

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL**

LETÍCIA RIE SHIMAZAKI

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE ATERROS DE RESÍDUOS
SÓLIDOS ANTIGOS**

São Carlos, SP

2017

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
ENGENHARIA AMBIENTAL

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE ATERROS DE RESÍDUOS
SÓLIDOS ANTIGOS

Aluna: Letícia Rie Shimazaki

Orientador: Prof. Dr. Jefferson Lins da Silva

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Ambiental

São Carlos, SP

2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

S555a Shimazaki, Leticia Rie
Análise de estabilidade de aterros de resíduos
sólidos antigos / Leticia Rie Shimazaki; orientador
Jefferson Lins da Silva. São Carlos, 2017.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2017.

1. resíduos sólidos urbanos. 2. aterros sanitários.
3. métodos de estabilidade. 4. software SLOPE/W. 5.
parâmetros de resistência ao cisalhamento. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Leticia Rie Shimazaki**

Data da Defesa: 27/11/2017

Comissão Julgadora:

Resultado:

Jefferson Lins da Silva (Orientador(a))

Aprovada

Rogério Pinto Ribeiro

Aprovada

Oswaldo Augusto Filho

Aprovado



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091 - Trabalho de Graduação

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por me sustentar nessa caminhada e manter minha mente e meu espírito saudáveis.

Aos meus colegas de classe pelo companheirismo, em especial à Giovana Monteiro Gomes e Giulia Meneguel Coltro pela amizade, apoio e incentivo na realização deste trabalho e de todos os outros durante a minha graduação.

Ao meu namorado e amigo Denis Santos Mariolo por tornar esse trabalho mais leve e por me ajudar nos momentos de crise.

Agradeço também, a todos os professores que tive durante minha vida que me ajudaram a crescer intelectualmente e me ajudaram na minha formação. Em especial, agradeço ao meu orientador Prof. Jeferson Lins as Silva pelo amparo, aconselhamento, amizade e paciência na hora da escolha e também no desenvolvimento do trabalho.

Ao Laboratório de Geossintéticos do Departamento de Geotecnia da EESC-USP por todo incentivo, colaboração e ambiente de trabalho amigável.

RESUMO

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

O crescimento da geração de resíduos sólidos urbanos junto com a escassez de áreas adequadas para a construção de novos aterros sanitários para disposição desses resíduos, têm levado as administrações públicas a investirem no aumento da capacidade de carga dos aterros já existentes ou na reutilização de áreas de deposição antigas com atividades já encerradas, para atenuar o problema. Essa situação resulta na construção de aterros cada vez mais altos, aliviando o problema da demanda de locais para disposição adequada de resíduos e, por outro lado, gerando o problema de instabilidade dos aterros sanitários com riscos de escorregamentos e rupturas dos taludes. A realização de pesquisas e estudos relacionados à caracterização dos resíduos sólidos urbanos e ao entendimento do comportamento de aterros sanitários é de grande relevância, dada a importância e a segurança que estas obras exigem. Neste contexto, o presente trabalho objetivou investigar a influência de diferentes parâmetros de resistência e das distintas etapas de construção do aterro na estabilidade dos cortes dos taludes de aterros sanitários hipotéticos com inclinações 1V:1,5H e 1,5V:2H, dimensionados de acordo com a geração de RSU do município de São Carlos - SP, a fim de atender um período de projeto de 20 anos. Para a realização das análises de estabilidade foram calculados o fator de segurança pelos métodos de Bishop Simplificado, Spencer, Janbu e Morgenstern-Price por meio do software SLOPE/W da Geo-Slope International. De maneira geral, o estudo demonstrou a importância da estimativa dos parâmetros de resistência dos RSU na determinação da estabilidade dos taludes e a redução da estabilidade dos taludes com o aumento da altura das pilhas de resíduos dos aterros sanitários.

Palavras chave: resíduos sólidos urbanos, aterros sanitários, métodos de estabilidade, software SLOPE/W, parâmetros de resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT

SHIMAZAKI, L. R. Stability analysis of old solid waste landfills. 2017. 112 p. Trabalho de conclusão de curso– Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

The increase of municipal solid waste generation, along with the lack of suitable areas for the construction of new landfills for disposal of such wastes, has encouraged public authorities to invest in increasing the load capacity of existing landfill sites or to reuse sites with activities already closed to solve the problem. This situation results in building higher and higher landfills, alleviating the problem of demand sites for proper disposal of waste, although, on the other hand, causing an issue of instability of landfills with risks of landslides and slope break. The research and studies related to the characterization of municipal solid waste and the understanding of the behavior of landfills are of great relevance, given the importance and safety that these works require. In this context, the present study aimed to investigate the influence of different parameters of resistance and the landfill different stages of construction the stability of the slopes of hypothetical cuts landfills with gradients 1V: 1.5H and 1.5 V: 2H dimensioned according to the municipal solid waste generation of the city of São Carlos - SP, in order to meet a 20-year project period. For stability analyzes, the safety factor was calculated by the Simplified Bishop, Spencer, Janbu and Morgenstern-Price methods using the SLOPE/W software from Geo-Slope International. In general, the study demonstrated the importance of estimating resistance parameters of municipal solid waste in the determination of slope stability and the reduction of slope stability as the height of piles of waste from landfills increases.

Key words: urban solid waste, sanitary landfills, stability methods, SLOPE/W software, shear strength parameters.

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – SITUAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL PARA O ANO DE 2016.....	16
FIGURA 3.1 – RELAÇÃO ENTRE A TAXA DE CRESCIMENTO ANUAL DA GERAÇÃO PER CAPITA DE RSU E A POPULAÇÃO DO BRASIL.....	22
FIGURA 3.2 – RELAÇÃO DA GERAÇÃO TOTAL DE RSU EM TONELADAS POR DIA E O TOTAL COLETADO E A FORMA DE DISPOSIÇÃO DE TODO O RESÍDUO COLETADO.....	24
FIGURA 3.3 – EXEMPLO DE UM CORTE DE ATERRO SANITÁRIO.....	26
FIGURA 3.4 – FOTOS DE ATERROS SANITÁRIOS EXEMPLIFICANDO OS ATERROS CONVENCIONAIS (DIREITA) E EM VALA (ESQUERDA).....	27
FIGURA 3.5 – ROMPIMENTO ROTACIONAL.....	30
FIGURA 3.6 – ROMPIMENTO TRANSLACIONAL.....	31
FIGURA 3.7 – VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO EM FUNÇÃO DO PROCESSO DE BIODEGRADAÇÃO.....	32
FIGURA 3.8 – CLASSIFICAÇÃO DOS RSU PROPOSTA POR GRISOLIA, NAPOLEONI E TANCREDI, 1995.....	35
FIGURA 3.9 – DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS DO RSU COM DIFERENTES IDADES (MANASSERO, VAN IMPE E BOUAZZA, 1996) E FAIXA DE VARIAÇÃO TÍPICA PARA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO RSU (JESSBERGER, 1994).....	38
FIGURA 3.10 – PERFIL DE VARIAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE EM FUNÇÃO DA PROFUNDIDADE.....	39
FIGURA 3.11 – VARIAÇÃO DO TEOR EM ÁGUA EM FUNÇÃO DO TEOR EM MATÉRIA ORGÂNICA DE AMOSTRAS DE RSU ANTIGOS.....	40
FIGURA 3.12 – VARIAÇÃO DA COESÃO APARENTE COM O TEOR DE UMIDADE.....	41
FIGURA 3.13 – PESO ESPECÍFICO PARA O RESÍDUO SÓLIDO URBANO.....	44
FIGURA 3.14 – VARIAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO SECO COM A PROFUNDIDADE.....	45
FIGURA 3.15 – MODELO ESQUEMÁTICO DA COMPOSIÇÃO DOS RSU.....	46
FIGURA 3.16 – VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO (ESQUERDA) E DA COESÃO (DIREITA) COM A DEFORMAÇÃO	47
FIGURA 3.17 – CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO COM INTERAÇÃO ENTRE AS COMPONENTES DE ATRITO E TRAÇÃO DO RSU.....	48
FIGURA 3.18 – DIAGRAMA DE COESÃO PELO ÂNGULO DE ATRITO COM PROPOSTA DA FAIXA RECOMENDADA PARA PROJETOS.....	53
FIGURA 3.19 – DIAGRAMA DE COESÃO PELO ÂNGULO DE ATRITO COM PROPOSTA DA FAIXA RECOMENDADA PARA PROJETOS.....	53
FIGURA 3.20 – SUPERPOSIÇÃO DAS FAIXAS DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA PROPOSTA PELOS DOIS AUTORES	54
FIGURA 3.21 – (A) VARIAÇÃO DA RESISTÊNCIA COM O TEMPO (KÖNIG E JESSBERGER, 1997); (B) PROPOSTA APRESENTADA POR WALTER (1992).....	55
FIGURA 3.22 – VARIAÇÃO DA COESÃO COM O TEOR DE UMIDADE.....	55

FIGURA 3.23 – ESQUEMA DA INTER-RELAÇÃO DOS FATORES QUE AFETAM A COMPRESSIBILIDADE DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	57
FIGURA 3.24 – CURVA TEÓRICA DE COMPRESSIBILIDADE DO RSU	58
FIGURA 3.25 – RECALQUES TOTAL E ANUAL EM RSU	59
FIGURA 3.26 – EXEMPLO DE TRECHO DE ESCORREGAMENTO PLANAR DE UM TALUDE INFINITO	63
FIGURA 3.27 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO MÉTODO DE CULMANN	64
FIGURA 3.28 – FORÇAS ATUANTES NO MÉTODO SIMPLIFICADO DE BISHOP	65
FIGURA 3.29 – LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS E REGIÕES ADMINISTRATIVAS DO ESTADO DE SÃO PAULO.....	72
FIGURA 3.30 – PLUVIOMETRIA DO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS	73
FIGURA 4.1 – FLUXOGRAMA COM AS ETAPAS DA METODOLOGIA DO TRABALHO.....	76
FIGURA 4.2 – VISTA EM PLANTA DO DESENHO DOS ATERROS E INFORMAÇÕES DE CADA ATERRO	79
FIGURA 4.3 – PERFIL DO CORTE AA DO ATERRO 1	79
FIGURA 4.4 – PERFIL DO CORTE BB DO ATERRO 1.....	80
FIGURA 4.5 – PERFIL DO CORTE AA DO ATERRO 2	80
FIGURA 4.6 – PERFIL DO CORTE BB DO ATERRO 2.....	80
FIGURA 4.7 – PESO ESPECÍFICO IN SITU OBTIDOS ATRAVÉS DE ENSAIOS DE TRINCHEIRA, FUIROS DE SONDAÇÃO E RETROANÁLISE	82
FIGURA 5.1 - FATOR DE SEGURANÇA EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA ADOTADOS PARA O CORTE AA (ATERROS 1 E 2)	93
FIGURA 5.2 - FATOR DE SEGURANÇA EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA ADOTADOS PARA O CORTE BB (ATERROS 1 E 2)	93
FIGURA 5.3 – FATOR DE SEGURANÇA PELAS ETAPAS DE CONSTRUÇÃO DO ATERRO PARA OS TRÊS CONJUNTOS DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DOS RSU ESTUDADOS NO CORTE AA DO ATERRO 2.....	98
FIGURA 5.4 – FATOR DE SEGURANÇA PELAS ETAPAS DE CONSTRUÇÃO DO ATERRO PARA OS TRÊS CONJUNTOS DE PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DOS RSU ESTUDADOS NO CORTE BB DO ATERRO 2.....	98

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 3.1 – TABELA DE CÁLCULO DO VOLUME TOTAL A SER DISPOSTO NO ATERRO SANITÁRIO.....	28
TABELA 3.2 – PRINCIPAIS PROPOSTAS DE CLASSIFICAÇÃO DOS RSU.....	33
TABELA 3.3 – COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM DIFERENTES CIDADES.....	36
TABELA 3.4 – PORCENTAGENS TÍPICAS E PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS COMPONENTES DOS RSU.....	37
TABELA 3.5 – UMIDADE DOS COMPONENTES DO RSU DO ATERRO BANDEIRANTES.....	41
TABELA 3.6 – PESO ESPECÍFICO PARA OS RSU COMPACTADOS E NÃO COMPACTADOS ENCONTRADOS NA LITERATURA.....	43
TABELA 3.7 – VALORES DE COESÃO E ÂNGULO DE ATRITO PUBLICADOS.....	49
TABELA 3.8 – REVISÃO DE MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO EM CAMPO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO DOS RSU.....	51
TABELA 3.9 - REVISÃO DE MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO EM LABORATÓRIO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISLHAMENTO DOS RSU.....	52
TABELA 3.10 – FAIXA DE VALORES ADOTADOS PARA COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS.....	70
TABELA 3.11 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS MÉTODOS DE EQUILÍBRIO LIMITE PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES.....	71
TABELA 3.12 – CARACTERÍSTICAS DO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS.....	73
TABELA 3.13 – CARACTERIZAÇÃO MÁSSICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES DO MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS/SP.....	75
TABELA 4.1 – DADOS DE GERAÇÃO DE RSU E POPULAÇÃO PARA O MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS.....	77
TABELA 4.2 – ESTIMATIVA POPULACIONAL PARA O PERÍODO DE PROJETO PELOS MÉTODOS ARITMÉTICO E GEOMÉTRICO.....	78
TABELA 4.3 – PARÂMETROS GEOTÉCNICOS DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	81
TABELA 4.4 – PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE RSU ANTIGOS DE VARIADOS AUTORES.....	82
TABELA 4.5 – ETAPAS DA CONSTRUÇÃO DO ATERRO AVALIADAS NA SEGUNDA ANÁLISE.....	83
TABELA 5.1 – CÁLCULO DO VOLUME TOTAL ANO A ANO QUE DEVERÁ SER DISPOSTO NO ATERRO SANITÁRIO FICTÍCIO PARA O MUNICÍPIO DE SÃO CARLOS.....	86
TABELA 5.2 – VALORES DE FATOR DE SEGURANÇA DO CORTE AA DO ATERRO 1 OBTIDOS PELOS MÉTODOS DE BISHOP SIMPLIFICADO, SPENCER, JANBU E MORGENSTERN-PRICE.....	87
TABELA 5.3 – VALORES DE FATOR DE SEGURANÇA DO CORTE BB DO ATERRO 1 OBTIDOS PELOS MÉTODOS DE BISHOP SIMPLIFICADO, SPENCER, JANBU E MORGENSTERN-PRICE.....	87
TABELA 5.4 – VALORES DE FATOR DE SEGURANÇA DO CORTE AA DO ATERRO 2 OBTIDOS PELOS MÉTODOS DE BISHOP SIMPLIFICADO, SPENCER, JANBU E MORGENSTERN-PRICE.....	88
TABELA 5.5 – VALORES DE FATOR DE SEGURANÇA DO CORTE BB DO ATERRO 2 OBTIDOS PELOS MÉTODOS DE BISHOP SIMPLIFICADO, SPENCER, JANBU E MORGENSTERN-PRICE.....	88
TABELA 5.6 – SUPERFÍCIE DE RUPTURA MAIS CRÍTICA OBTIDA PELO MÉTODO DE BISHOP SIMPLIFICADO PARA O ATERRO 1.....	89

TABELA 5.7 – SUPERFÍCIE DE RUPTURA MAIS CRÍTICA OBTIDA PELO MÉTODO DE BISHOP SIMPLIFICADO PARA O ATERRO 1 (CONTINUAÇÃO).....	90
TABELA 5.8 – SUPERFÍCIE DE RUPTURA MAIS CRÍTICA OBTIDA PELO MÉTODO DE BISHOP SIMPLIFICADO PARA O ATERRO 2.....	91
TABELA 5.9 – SUPERFÍCIE DE RUPTURA MAIS CRÍTICA OBTIDA PELO MÉTODO DE BISHOP SIMPLIFICADO PARA O ATERRO 2 (CONTINUAÇÃO).....	92
TABELA 5.10 – FATORES DE SEGURANÇA OBTIDOS EM DIFERENTES ESTÁGIOS ATÉ O FIM DA OPERAÇÃO DO ATERRO 2/CORTE AA PELO MÉTODO DE ANÁLISE DE MORGENSTERN-PRICE.....	95
TABELA 5.11 – FATORES DE SEGURANÇA OBTIDOS EM DIFERENTES ESTÁGIOS ATÉ O FIM DA OPERAÇÃO DO ATERRO 2/CORTE BB PELO MÉTODO DE ANÁLISE DE MORGENSTERN-PRICE.....	95
TABELA 5.12 – SUPERFÍCIE DE RUPTURA MAIS CRÍTICA OBTIDA PELO MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE PARA O ATERRO 2/CORTE AA.....	96
TABELA 5.13 – SUPERFÍCIE DE RUPTURA MAIS CRÍTICA OBTIDA PELO MÉTODO DE MORGENSTERN-PRICE PARA O ATERRO 2/CORTE BB.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica

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

ASTM – American Society for Testing and Materials

CEPAGRI – Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CPT – Cone Penetration Test

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica

FEM – Métodos de Elementos Finitos (Finite Element Method)

FS – Fator de Segurança

GLR – Geotechnic of Landfill Recommendations

IBAM – Instituto Brasileiro de Administração Municipal

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

LEM – Métodos de Equilíbrio Limite (Limit Equilibrium Method)

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

RECESA – Rede de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental

RSD – Resíduos Sólidos Domiciliares

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SEDU/PR – Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano da Presidência da República

SPT – Standart Penetration Test

UU – Uncosolidated Undrained

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
2.1	OBJETIVO GERAL	18
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	CONCEITOS SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS	19
3.1.1	Definição e classificação.....	19
3.1.2	Métodos de disposição final dos RSU	20
3.1.3	Situação dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.....	22
3.2	ATERROS SANITÁRIOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	24
3.2.1	Definições	24
3.2.2	Geometria de aterros sanitários	25
3.2.3	Capacidade de armazenamento e vida útil	27
3.2.4	Estabilidade de aterros sanitários	28
3.3	PROPRIEDADES BIOLÓGICAS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	31
3.4	PROPRIEDADES FÍSICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	32
3.4.1	Classificação.....	33
3.4.2	Composição Gravimétrica.....	35
3.4.3	Distribuição do tamanho das partículas	37
3.4.4	Teor de umidade	38
3.4.5	Peso específico	42
3.5	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	45
3.5.1	Resistência ao cisalhamento.....	46
3.5.2	Compressibilidade	56
3.6	MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES.....	60
3.6.1	Método do talude infinito.....	63

3.6.2	Método de Culmann.....	64
3.6.3	Método de Fellenius.....	65
3.6.4	Método Simplificado de Bishop	65
3.6.5	Método Simplificado de Janbu	66
3.6.6	Método de Spencer	67
3.6.7	Método de Morgenstern e Price	68
3.6.8	Comparação entre os métodos de análise de estabilidade de taludes	69
3.7	LOCAL DE ESTUDO	72
3.7.1	Dados gerais	72
3.7.2	Clima.....	73
3.7.3	Caracterização dos resíduos sólidos domiciliares em São Carlos	74
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	76
4.1	PLANEJAMENTO DO ATERRO SANITÁRIO HIPOTÉTICO.....	76
4.1.1	Cálculo da quantidade de RSU a ser disposta	76
4.1.2	Geometria do aterro sanitário	79
4.2	ESCOLHA DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	81
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	85
5.1	VOLUME ÚTIL ESTIMADO PARA O ATERRO SANITÁRIO	85
5.2	ANÁLISE DE ESTABILIDADE A PARTIR DA ALTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	87
5.3	ANÁLISE DE ESTABILIDADE AO LONGO DO ALTEAMENTO	94
6	CONCLUSÃO	100
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

1 INTRODUÇÃO

A partir do século XVIII, vivenciou-se um período de grandes mudanças econômicas e culturais com o advento da Revolução Industrial. A produção em larga escala de diversos produtos, elevou os padrões de consumo, e conseqüentemente, a exploração dos recursos naturais e a geração dos resíduos (JUNIOR e FREIRE, 2013).

Além disso, a industrialização permitiu a produção de diversos produtos, de modo que os resíduos se tornaram mais diversificados, não se restringindo apenas aos resíduos orgânicos, como antigamente, mas, contendo também materiais inorgânicos de difícil degradação, como vidro, plástico, metais, entre outros (ANDREOLI et al., 2014). Deste modo, houve um enorme aumento na geração de resíduos sólidos pela crescente população, criando problemas de saúde pública, principalmente nas cidades (FRÉSCA, 2007).

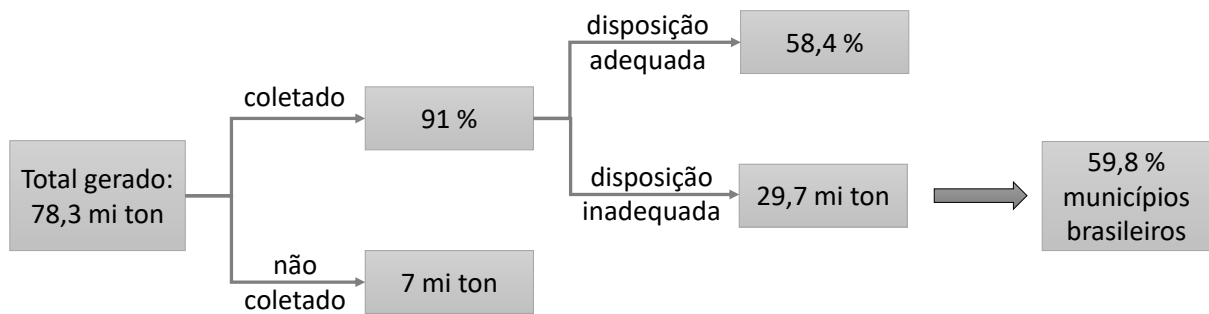
As cidades são grandes centros populacionais, onde se concentram indústrias e serviços, sendo assim, é nas cidades que boa parte dos recursos naturais são utilizados e os resíduos gerados (JUNIOR e ROMANEL, 2013). Segundo a Instituição Global Urban Development (2010), as atividades realizadas nas cidades correspondem à 85% do Produto Interno Bruto mundial, mas também, são responsáveis pelo consumo de 75% dos recursos naturais utilizados no planeta e pela geração de 75% dos resíduos.

No cenário brasileiro, no ano de 2016, foram gerados 78,3 milhões de toneladas apenas de Resíduos Sólidos Urbanos, sendo que desse total, 91,0 % foi coletado, deixando de ser recolhido cerca de 7 milhões de toneladas de RSU. Em se tratando da disposição final dos RSU, o índice 58,4 % correspondente à destinação final adequada no ano de 2016 apresentou queda de 0,3 % em relação ao ano anterior, totalizando 29,7 milhões de toneladas que seguiram para lixões ou aterros controlados (ABRELPE, 2016).

Ainda de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2016), 3.331 municípios brasileiros realizaram a disposição inadequada dos RSU, valor este que representa 59,8 % do total dos municípios do país. Esta prática gera graves conseqüências como a contaminação do solo, do ar, das águas superficiais e subterrâneas, além da transmissão de doenças, com impactos agravantes na saúde pública. Percebe-se também que, o gerenciamento inadequado desses resíduos em locais que na maioria das vezes não possui licenciamento, utiliza como critério de disposição final a disponibilidade de áreas e a distância em relação aos centros urbanos, ocorrendo a céu aberto (SCHALCH et al., 2002).

A Figura 1.1 sintetiza a situação atual dos resíduos sólidos urbanos no Brasil no ano de 2016 (ABRELPE, 2016). É possível observar que cerca de 47,0 % do total de resíduos gerados não são dispostos de forma adequada.

Figura 1.1 – Situação dos resíduos sólidos urbanos no Brasil para o ano de 2016



Fonte: ABRELPE, 2016

Aliado ao problema do baixo índice de disposição adequada dos resíduos sólidos urbanos tem-se a escassez de áreas para abertura de novos aterros sanitários, principalmente em razão da expansão dos centros urbanos, fazendo com que as administrações públicas busquem por outras soluções (OLIVEIRA, 2002).

Uma das alternativas encontradas é o transporte dos RSU para cidades próximas, contudo, esta opção provoca aumento no orçamento, devido aos deslocamentos diários dos resíduos. Exemplificando essa situação temos a cidade de Nova York que utiliza barcas para transportar e depositar seus resíduos em locais adequados na Flórida (OLIVEIRA, 2002).

O outro caminho, que tem sido cada vez mais empregado, é o aumento da capacidade de deposição dos locais já em operação ou a reutilização de locais que já foram encerrados, contudo, o desenvolvimento desses projetos de alteamento não tem sido praticado com cautela, como é o caso do Aterro Bandeirantes na região metropolitana de São Paulo, que já supera os 100 metros de altura (CARVALHO, 1999).

Esse quadro tem levado diversos especialistas da área geotécnica a conduzir estudos de estabilidade de taludes dos aterros sanitários e a resistência dos RSU. No entanto, o elevado grau de complexidade das interações físicas, químicas e biológicas que ocorrem dentro do maciço do aterro sanitário, bem como, a heterogeneidade dos componentes e estruturas dos RSU; prejudica a adaptação dos métodos convencionais de ensaios, tanto de laboratório como de campo, utilizados para os solos (CATAPRETA, 2008).

Existem dois diferentes métodos de avaliação de estabilidade de taludes, os determinísticos e os probabilísticos. As análises determinísticas por sua vez, são divididas em dois grupos, os que se baseiam em análise de deslocamentos e os que se baseiam em estado de equilíbrio limite. O primeiro grupo é fundamentado no método de elementos finitos (FEM), no qual são consideradas as relações tensão/deformação de diversos materiais (GERSCOVICH, 2012).

As análises determinísticas de estabilidade de taludes fundamentadas no método de equilíbrio limite - LEM (Bishop, 1955; Spencer, 1967; Morgenstern-Price, 1965; Janbu, 1956) são mais utilizadas e expressa um coeficiente ou fator de segurança (FS) que relaciona as tensões cisalhantes mobilizadas e a resistência ao cisalhamento (GERSCOVICH, 2012).

Esse tipo de análise desconsidera a variabilidade natural dos parâmetros de resistência e são limitados também, em razão da ausência de relação do FS com o funcionamento do talude, de análises que identifiquem a probabilidade de ruptura do talude e os parâmetros com maior influência na estabilidade (FILHO e ANDRADE, 2015).

A abordagem probabilística é baseada em alguns princípios dos métodos determinísticos apresentando alterações que possibilitam quantificar as incertezas inerentes. Os parâmetros geotécnicos utilizados não possuem valores fixos, fazendo com que estes sejam incorporados às análises por meio de funções de probabilidade, sendo possível obter a probabilidade de ruptura e o índice de confiabilidade da encosta associado ao fator de segurança (FILHO e ANDRADE, 2015).

Os métodos de análise de estabilidade são classificados ainda, em métodos rigorosos e não rigorosos, de acordo com o número de equações de equilíbrio da estática consideradas no cálculo (equilíbrio de forças e equilíbrio de momentos), sendo os métodos rigorosos, os que atendem a todas as equações de equilíbrio (SILVA, 2013).

A partir das informações apresentadas destacou-se a importância dos estudos de análise de estabilidade de taludes e a influência dos parâmetros de resistência na estabilidade. Nesse contexto, procurou-se, no presente trabalho, avaliar através métodos determinísticos rigorosos e não rigorosos fundamentados na teoria do equilíbrio limite, o comportamento de um aterro sanitário hipotético dimensionado para o município de São Carlos adotando diferentes parâmetros de resistência, adquiridos na literatura, bem como, a influência do alteamento na estabilidade desse aterro.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar a variação do fator de segurança de aterros sanitários com diferentes condições geométricas considerando resíduos sólidos urbanos antigos de dados literários para métodos de estabilidade determinísticos rigorosos e não rigorosos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos parciais podem ser resumidos em:

- Dimensionar um aterro sanitário hipotético para o município de São Carlos com período de atendimento de vinte anos;
- Analisar a estabilidade do aterro sanitário nas duas configurações geométricas propostas com base na inclinação do talude e nas alterações dos parâmetros de resistência;
- Comparar os resultados obtidos entre os diferentes métodos utilizados para análise de estabilidade;
- Verificar a estabilidade do aterro ao longo de seu alteamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONCEITOS SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS

3.1.1 Definição e classificação

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos descrita na Lei nº 12.305 de 2010, e regulamentada pelo Decreto nº 7.404 de 2010, dispõe sobre os princípios, objetivos e instrumentos da gestão e gerenciamento de resíduos sólidos em todo o país e os define como:

“...todo material, substância, objeto ou bem descartado de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível” (PNRS, 2010).

Segundo a NBR nº 10.004/2004, os resíduos sólidos abrangem resíduos no estado sólido e semi-sólido, resultantes de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de varrição.

Ainda de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT – NBR 10.004/04) os resíduos são classificados de acordo com o seu risco potencial ao meio ambiente e à saúde pública, sendo agrupados em perigosos (Classe I) e não perigosos (Classe II). Os resíduos Classe II são subdivididos em não inertes (Classe IIA) e inertes (Classe IIB).

Resíduos perigosos são aqueles que possuem características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e/ou patogenicidade, segundo definições descritas na Norma (ABNT – NBR 10.004/04), podendo assim, oferecer riscos à saúde pública.

Os resíduos Classe IIA, como por exemplo, os resíduos sólidos urbanos, podem apresentar biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água, e não se enquadram nas demais classes.

Por último, tem-se os resíduos não perigosos e inertes, os quais quando submetidos a ensaios com água destilada não tem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, com exceção dos parâmetros cor, turbidez, dureza e sabor. Como exemplo deste tipo de resíduo, tem-se os resíduos de construção e demolição.

De acordo com a literatura (SCHALCH, 2002; BIDONE e POVINELLI, 1999; CASTRO NETO e GUIMARÃES, 2000; SANTOS e MARTINS, 1995) os resíduos sólidos podem ser

separados em três categorias, segundo a sua fonte de geração, sendo eles: resíduos sólidos urbanos, resíduos sólidos industriais e resíduos sólidos especiais.

Os resíduos industriais são resultantes dos processos produtivos e instalações industriais, podendo estar na forma sólida, líquida ou gasosa. Suas características físicas, químicas e microbiológica não se assemelham aos resíduos domésticos, dentre eles, cinzas, óleos, materiais alcalinos ou ácidos, escórias, poeiras, borras, substâncias lixiviadas, efluentes líquidos e emissões gasosas (PNRS, 2010).

São considerados resíduos especiais, os resíduos sólidos que precisam de tratamento diferenciado, visto que podem causar males à saúde humana e ao meio ambiente. Dentre eles estão os lixos hospitalares, pilas, baterias, remédios vencidos, lixo radioativo, metais pesados e alguns resíduos industriais (PNRS, 2010).

Os resíduos sólidos urbanos englobam todos os resíduos provenientes das atividades domésticas exercidas nas residências urbanas, como também, os originários do comércio, escritórios, varrição, limpeza de logradouros, mercados, feiras e festejos; dessa forma, ficam resumidos em resíduos domiciliares e resíduos de limpeza urbana (ABRELPE, 2016).

Os RSU gerados devem ser coletados e dispostos de maneira adequada em aterros sanitários para que seja evitada a contaminação do meio ambiente, bem como a atração e reprodução de animais peçonhentos e agentes vetores de doenças. Para isso, é necessário realizar a caracterização deste resíduo de acordo com o local de estudo, uma vez que a composição dos resíduos sólidos urbanos é muito heterogênea e varia de um centro gerador para outro, de acordo com o grau de desenvolvimento econômico, os hábitos culturais, sociais e sanitários da região (FERREIRA, 2010; MACHADO et al., 2005).

3.1.2 Métodos de disposição final dos RSU

A disposição final dos RSU compreende a última fase a ser cumprida com relação a todos os processos que envolvem estes materiais. Anteriormente a esta etapa, tem-se a implantação de políticas de incentivo voltadas à redução da produção dos resíduos, estimulando o seu reuso, e posteriormente, a sua reciclagem, a fim de reduzir a quantidade de resíduos sólidos urbanos e com isso, todos os problemas que envolvem a disposição final destes, como por exemplo, a obtenção de áreas para a implantação de aterros.

Os métodos mais comuns de destinação final dos resíduos sólidos são: compostagem, incineração, lixão ou vazadouro, aterro controlado e aterro sanitário.

3.1.2.1 Compostagem

Consiste na reciclagem da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos por meio de um processo biológico aeróbio e controlado de transformação da matéria orgânica em um material estabilizado com propriedades distintas daqueles que lhe deu origem, sendo este mais nobre (BIDONE e POVINELLI, 1999; NASCIMENTO, 2007).

3.1.2.2 Incineração

Define-se incineração como sendo um processo de redução da massa e do volume dos resíduos através da combustão controlada.

Segundo IPT (2000), esta prática é mais comum e tem se tornado cada vez mais crescente em países com pequena disponibilidade de área, como o Japão, Suíça e Suécia.

Ainda que este método possua a vantagem de ocupar menor área de implantação que os aterros sanitários, é pouco empregado frente aos outros métodos, devido as desvantagens apresentadas a seguir (NASCIMENTO, 2007):

- Elevado custo de implantação e operação;
- Necessidade de mão de obra qualificada; e
- Presença de alguns materiais nos resíduos que podem gerar compostos tóxicos e corrosivos.

3.1.2.3 Lixão ou vazadouro

Área de disposição final de resíduos sólidos sem nenhuma preparação anterior do solo, sem sistema de tratamento de efluentes líquidos e sem cobertura dos resíduos. Não existem controles sobre o tipo, volume ou grau de periculosidade dos resíduos depositados, sendo estes lançados sobre o solo natural, sem qualquer medida de proteção ao meio ambiente ou a saúde pública (SCHULER, 2010; NASCIMENTO, 2007)

Esta forma de disposição facilita a proliferação de inúmeros vetores, como moscas, ratos e baratas; também promove a geração de maus odores e a contaminação do solo e da água subterrâneas e superficiais (NASCIMENTO, 2007).

3.1.2.4 Aterro controlado

Sistema de disposição intermediário entre lixão e aterro sanitário, há cobertura dos resíduos, mas não conta com impermeabilização do solo e sistema de tratamento de efluentes líquidos (SCHULER, 2010). Este método é bastante utilizado nas regiões semiáridas do Brasil, devido ao seu baixo desenvolvimento econômico e baixa pluviosidade.

3.1.2.5 Aterro sanitário

Consiste no método de disposição final de resíduos sólidos urbanos mais utilizado no mundo, no qual os resíduos são dispostos respeitando-se as suas características peculiares e tomando todas as medidas cabíveis para que não haja impactos negativos no solo, na água, no ar e na saúde das pessoas que vivem nas proximidades. (NASCIMENTO, 2007)

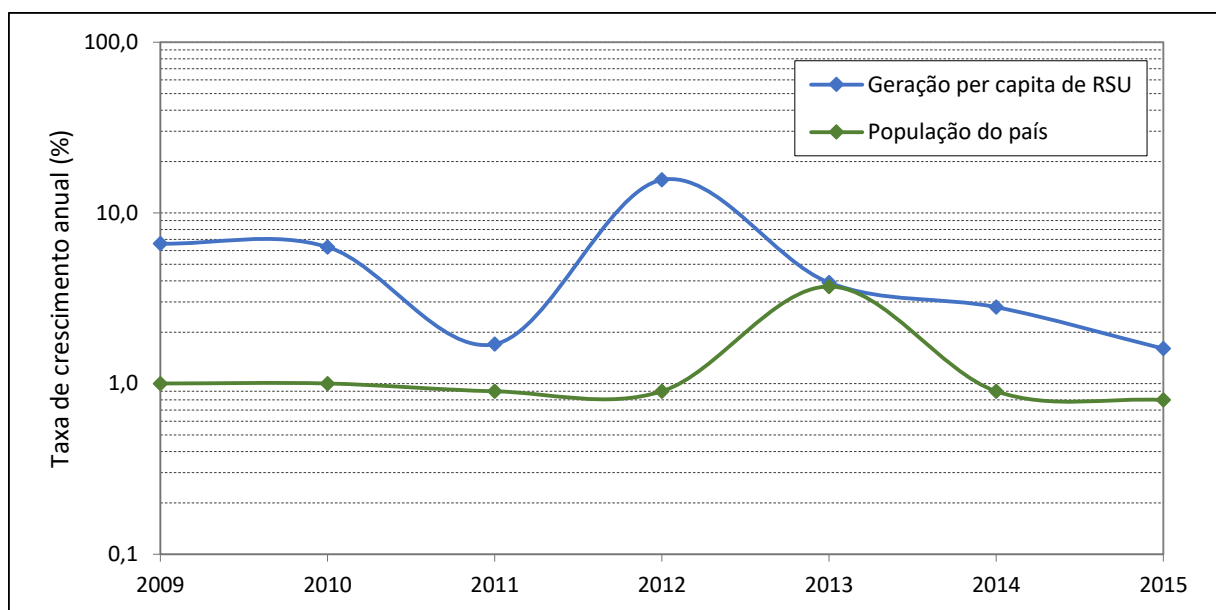
Essas obras obedecem a critérios de engenharia e normas operacionais específicas, realizando o confinamento seguro dos resíduos a fim de evitar a poluição ambiental e danos à saúde pública (SCHULER, 2010).

Segundo a norma NBR 8419 (ABNT, 1992), o aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos consiste em uma técnica de disposição de RSU no solo que deve empregar princípios de engenharia para confiná-los na menor área possível, reduzindo-os ao menor volume permissível, sem que haja danos à saúde pública e minimizando ao máximo os impactos ambientais.

3.1.3 Situação dos resíduos sólidos urbanos no Brasil

O crescimento populacional é acompanhado pelo crescimento da produção de resíduos sólidos urbanos, no entanto, este aumento não ocorre proporcionalmente no Brasil, de forma, que a taxa de geração de resíduos sólidos urbanos tem superado ano a ano a taxa de crescimento populacional, como pode ser observado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Relação entre a taxa de crescimento anual da geração per capita de RSU e a população do Brasil



Fonte: ABRELPE

O aumento da produção de resíduos, aumenta a demanda por serviços de logística e infraestrutura para atender toda a população. De acordo com o IBAM (2001), a geração de resíduos sólidos domiciliares no Brasil é de cerca de 0,6 kg/hab/dia e mais 0,3 kg/hab/dia de resíduos de varrição, limpeza de logradouros e entulhos, sendo que algumas regiões como a sul e a sudeste possuem maior geração per capita, podendo chegar a 1,3 kg/hab/dia de RSU.

A disposição final dos RSU é problemática uma vez que demandam grandes espaços e possuem duração significativamente pequena, dessa forma, na maioria das vezes o que se observa é que o poder público escolhe locais afastados dos centros urbanos, a fim de amenizar os efeitos colaterais gerados pela disposição dos RSU, como o mau cheiro e atração de animais. Em contrapartida a isso tanto a população quanto a geração per capita de RSU tem aumentado, fazendo com que a vida útil dos locais de disposição dos resíduos reduza significativamente e os centros urbanos se aproximem cada vez mais dos locais de descarte, principalmente a população de baixa renda (IBAM, 2001).

Diante dessa situação, torna-se necessário otimizar as áreas disponíveis, aumentando o desempenho e reduzindo os custos operacionais. Uma das práticas que vem sendo utilizadas a fim de aumentar a capacidade de armazenamento dos aterros sanitários e assim prolongar sua vida útil é o alteamento das pilhas compactadas de resíduos em aterros já existentes, contudo, esta ação resulta em alterações na estabilidade dos taludes do aterro (CADIM, 2008).

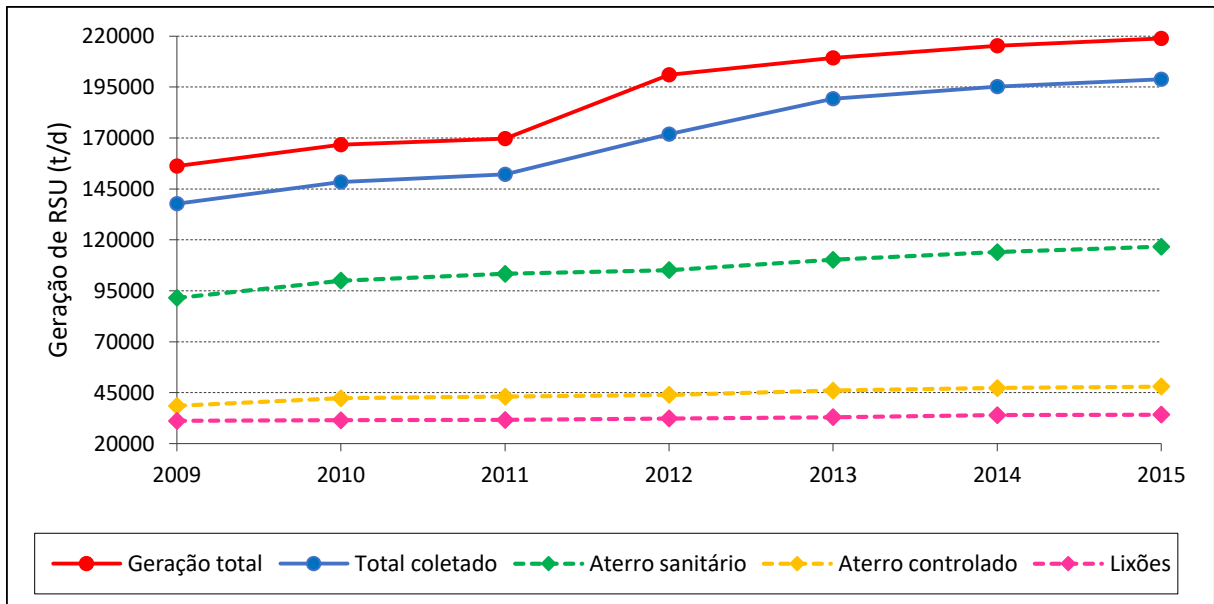
A união desses fatores desperta a necessidade de um melhor entendimento do comportamento a médio e longo prazo destes locais de descarte de resíduos, assim como a resposta deles à diferentes métodos construtivos e operacionais e a previsão do seu comportamento futuro, de forma a otimizar o aproveitamento dos espaços físicos destinados a eles, bem como aumentar sua vida útil. Para isso é preciso conhecer as condições geomecânicas do maciço, levando em consideração as diferenças de composição, umidade, permeabilidade e outras características, de acordo com o local de estudo, que influenciam no comportamento mecânico deste material.

Em se tratando das alternativas de disposição final dos resíduos no Brasil, assim como na grande maioria dos países, a alternativa adotada para disposição e tratamento dos RSU gerados diariamente pela população é o aterro sanitário, o qual ainda representa a solução técnica e economicamente mais viável (BENVENUTO e CUNHA, 1991; LEITE, 1995).

As cidades brasileiras ainda não coletam todos os RSU nela gerados, deixando de coletar em média 10% da geração total, o que em números, representa cerca de 20 mil t/d de RSU.

Desses 90% apenas uma parcela recebe disposição final adequada (cerca de 75%), sendo encaminhado aos lixões e/ou aterros controlados entre 22 e 35 mil t/d, como apresentado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Relação da geração total de RSU em toneladas por dia e o total coletado e a forma de disposição de todo o resíduo coletado



Fonte: ABRELPE

Como observado nas figuras apresentadas e mencionado por Simões et. al. (2003) a situação atual dos RSU no Brasil apresenta grande lacuna em se tratando de sua disposição final, demandando estudos que estabeleçam critérios para a redução dos riscos ambientais, nesse contexto, tem-se o estudo da estabilidade dos taludes de aterros sanitários, que deve ser realizado através de ensaios laboratoriais, monitoramento ambiental em campo e simulações computacionais.

3.2 ATERROS SANITÁRIOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

3.2.1 Definições

Os aterros sanitários tem sido o método de disposição final de resíduos sólidos mais aceito ao longo dos anos, em termos econômicos e ambientais (TCHOBANOGLIOUS, THIESEN e VIGIL, 1993). Estes são projetados para reduzir ao máximo os impactos que os resíduos podem causar ao meio ambiente, incluindo dessa forma, algumas medidas de proteção, tais como: captação e tratamento do lixiviado, impermeabilização do solo, construção de sistemas de

canais de drenagem superficiais, coleta e tratamento dos gases produzidos pela decomposição do chorume, sistema de monitoramento e recobrimento diário dos resíduos (TAVEIRA, 2012).

Ainda assim, este método apresenta algumas desvantagens, apresentadas pela Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (1999):

- Pode haver necessidade de transporte de resíduos a longa distância;
- Desvalorização imobiliária das áreas destinadas ao aterro, caso elas não necessitem de recuperação topográfica;
- Produção de águas residuárias;
- Possibilidade de poluição do lençol freático quando planejado ou operado de forma inadequada;
- Período longo para estabilização do solo do aterro; e
- Produção de ruídos e poeiras durante a fase de execução e operação.

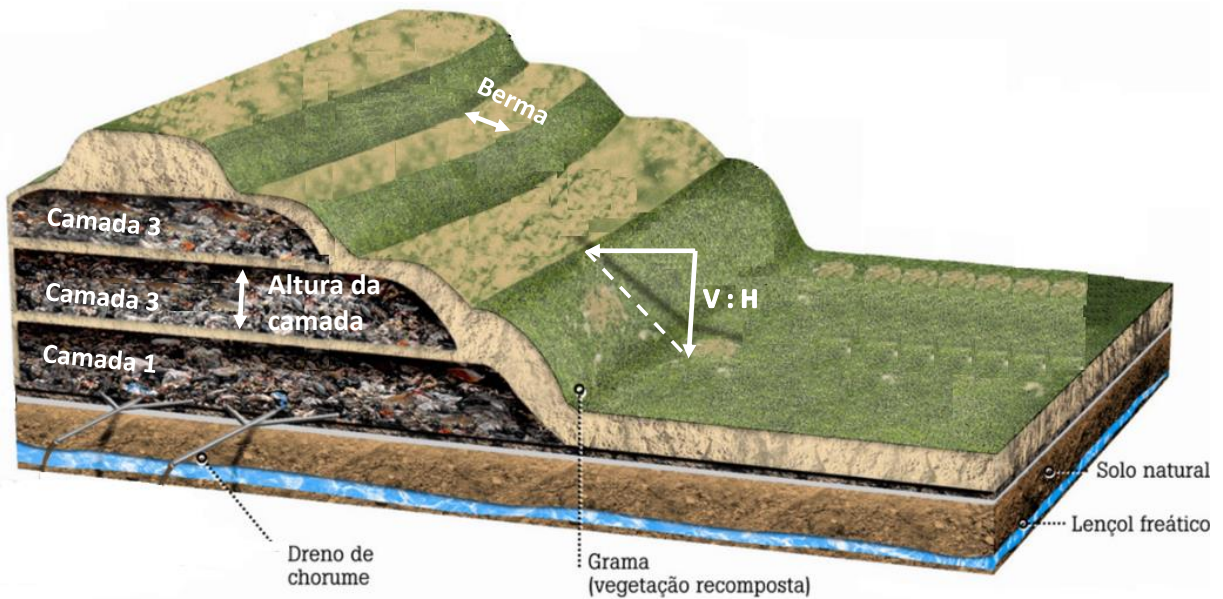
Nos itens a seguir, estão descritas algumas características dos aterros sanitários.

3.2.2 Geometria de aterros sanitários

O projeto geométrico de um aterro sanitário representa a definição da geometria do aterro e está intimamente ligado a capacidade de armazenamento e estabilidade do aterro. A forma geométrica deve ser determinada para maximizar o volume de resíduos a ser disposto na área disponível sem que ultrapasse as especificações exigidas para a estabilidade de sua fundação e taludes, garantindo dessa forma a segurança do projeto (RECESA, 2008).

A representação do projeto geométrico é feita em plantas e perfis, apresentando medidas de alturas dos alteamentos, largura das bermas de equilíbrio e inclinações dos taludes, assim como exemplificado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Exemplo de um corte de aterro sanitário



Fonte: Ricardo Terêncio Ferreira (2009)

A inclinação da rampa de compactação consiste um aspecto operacional importante e deve ser monitorado, pois influi diretamente na qualidade da compactação dos RSU. Contudo, este aspecto é discutido por poucos autores na literatura.

A literatura tem indicado como adequada a inclinação da rampa na ordem de 1V:3H (V: vertical; H: horizontal), embora outras inclinações também sejam aceitas: 1V:1H, 1V:2H, 1V:2,5H e 1V:4H (LUZ, 1976; CETESB, 1992; TCHOBANOGLOUS, THIESEN e VIGIL, 1993; CATERPILLAR, 2001). No presente trabalho foram adotadas as inclinações 1V:1,5H e 1,5V:2H.

Os aterros sanitários podem ser divididos basicamente em dois tipos, aterros convencionais e em valas. No primeiro, há formação de camadas de resíduos compactados, que são sobrepostas acima do nível do terreno, resultando em configurações típicas de escada ou de tronco de pirâmide. Os aterros sanitários em valas, utilizam valas e trincheiras, a fim de facilitar o aterramento dos resíduos e a formação das células e camadas. Esse tipo de aterro, deve devolver ao terreno sua topografia inicial ao fim do preenchimento total da trincheira (CETESB)

A Figura 3.4 apresenta fotos de aterros sanitários com exemplo dos dois tipos.

Figura 3.4 – Fotos de aterros sanitários exemplificando os aterros convencionais (direita) e em vala (esquerda)



3.2.3 Capacidade de armazenamento e vida útil

Comumente, um aterro sanitário é construído para receber todo o resíduo gerado por um ou mais municípios dentro de um prazo mínimo de 20 anos, para tal, é necessário realizar um estudo da capacidade de armazenamento e vida útil do aterro antes do início de sua operação.

A capacidade de armazenamento pode ser definida como o volume total em m³ reservado para acondicionar os resíduos sólidos e a vida útil refere-se ao tempo estimado em que o aterro estará em funcionamento até que a sua capacidade de armazenamento total seja alcançada.

Para se ter uma estimativa do tamanho da área necessária para a disposição dos resíduos durante o período de projeto estabelecido, é preciso determinar a geração de resíduos e o volume do aterro. No presente trabalho, estimou-se o volume total, ano a ano, do que será disposto no aterro sanitário hipotético para a cidade de São Carlos durante vida útil de 20 anos – coluna (A), segundo a Tabela 3.1, proposta por Recesa (2008) e Santos et al. (2016).

Nas colunas (C) e (D), calculam-se os volumes da quantidade de resíduos gerada e coletada no município, considerando a taxa de cobertura de coleta e geração per capita de resíduos. A coluna (E) representa o volume compactado dos resíduos coletados, obtido a partir da adoção de um valor para a densidade dos resíduos, geralmente utiliza-se 0,8 t/m³.

Além do resíduo coletado, é importante calcular o volume de solo utilizado para recobrimento diário do aterro, este volume fica na faixa de 20 a 30% do total do volume compactado de resíduos (RECESA, 2008). O cálculo desta variável encontra-se na coluna (F) da Tabela 3.1.

A somatória das colunas (E) e (F) resultam na coluna (G), que representa ano a ano, o volume dos resíduos compactados e aportados ao aterro, bem como o volume ocupado pelo solo de cobertura intermediária e final. Por fim, tem-se o volume acumulado total de operação

do aterro sanitário – coluna (H), sendo considerado a área necessária para a implantação do aterro sanitário o resultado obtido do encontro da coluna (H) com o último ano da coluna (A).

Tabela 3.1 – Tabela de cálculo do volume total a ser disposto no aterro sanitário

Ano	População anual (hab)	RSU			Solo	Total	
		Quantidade gerada e coletada (t/d)	Quantidade gerada e coletada (t/ano)	Volume compactado disposto no aterro (m ³ /ano)	Volume de solo de recobrimento (m ³ /ano)	Volume total de operação do aterro (m ³ /ano)	Volume de operação acumulado no aterro (m ³ /ano)
(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)
1							
⋮							
20							

Fonte: Adaptado de Recesa (2008) e Santos et al. (2016)

3.2.4 Estabilidade de aterros sanitários

Os escorregamentos e rupturas em aterros sanitários, embora ocorram com baixa frequência, quando acontecem, tendem a tomar grandes proporções (DIJON e JONES, 2005). A seguir, alguns casos de escorregamentos registrados na literatura:

- 2002: Aterro Controlado de Salvador - BA (OLIVEIRA, 2002);
- 1991: Aterro Sanitário Bandeirantes - SP (BENVENUTO e CUNHA, 1991);
- 2007: Aterro Sanitário Sítio São João – SP (BENVENUTO, 2012);
- 1994: La Coruña, Espanha (um morto) – 100.000 t (BENVENUTO, 2012);
- 1996: Rumpke, EUA – 1.200.000 m³ (BENVENUTO, 2012);
- 1997: Dona Juana, Bogotá, Colômbia – 800.000 t (BENVENUTO, 2012);
- 2000: Payatas, Filipinas (278 mortos) – 16.000 m³ (BENVENUTO, 2012);
- 2001: Navarro, Colômbia – 250.000 m³ (BENVENUTO, 2012);
- 2005: Leuwigaiah, Bandung, Indonésia (147 mortos) – 2.700.000 m³ (BENVENUTO, 2012).

Para Schuler (2010), os escorregamentos em aterros de resíduos sólidos se devem à redução da resistência interna dos materiais e/ou aumento das forças externas, causadas na maioria das vezes por alterações nas condições geométricas do aterro ou excesso de carga devido as pilhas de resíduos depositadas diariamente.

Os solos, assim como os RSU são considerados materiais multifásicos, sendo constituídos de partes sólidas, líquidas e gasosas. Nos RSU a fase sólida é composta de diversos materiais, que formam um arranjo poroso entre si e estes ficam preenchidos por líquidos percolados e/ou biogás. É importante lembrar que a relação percentual das fases se alteram de acordo com o grau de biodegradação da matéria orgânica (CARVALHO, 1999).

Em relação aos solos, as fases gasosa e líquida são constituídas pelo ar e pela água armazenados nos poros presentes em sua estrutura. Dentro desses poros formam-se interações solo-água nas partículas, que determinam a quantidade de água que infiltra ou escorre sobre sua superfície, propriedade denominada como permeabilidade do solo. Esta propriedade exerce grande influência na estabilidade dos aterros sanitários, uma vez que, a resistência e coesão do material diminui com o aumento do acúmulo de líquidos e gases na massa de resíduos causada pelo aumento da poropressão no interior da estrutura (MARTINS, 2006).

Em outras palavras, o aumento das poropressões reduzem a tensão normal, diminuindo também a resistência ao cisalhamento, possibilitando a formação de um plano potencial de escorregamento. Borgatto (2006) explica que com o aumento das poropressões, maior a fração do peso total suportado pela água e que a instabilidade do maciço ocorrerá quando a poropressão e a tensão normal se igualarem.

Segundo Borgatto (2006) e Cale (2007), dentre os principais fatores que influem na estabilidade de aterros sanitários, destacam-se:

- Parâmetros geotécnicos dos resíduos e dos solos de fundação;
- Geometria do aterro;
- Altura e inclinação dos taludes;
- Poropressões na base do aterro;
- Sistema hidrogeológico do local do aterro;
- Interface das forças de cisalhamento entre os materiais geossintéticos;
- Interface das forças de cisalhamento entre geossintéticos e solo;
- Controle, operação e monitoramento do aterro;
- Composição e resistência à erosão da capa superficial do aterro; e
- Grau de decomposição da matéria orgânica.

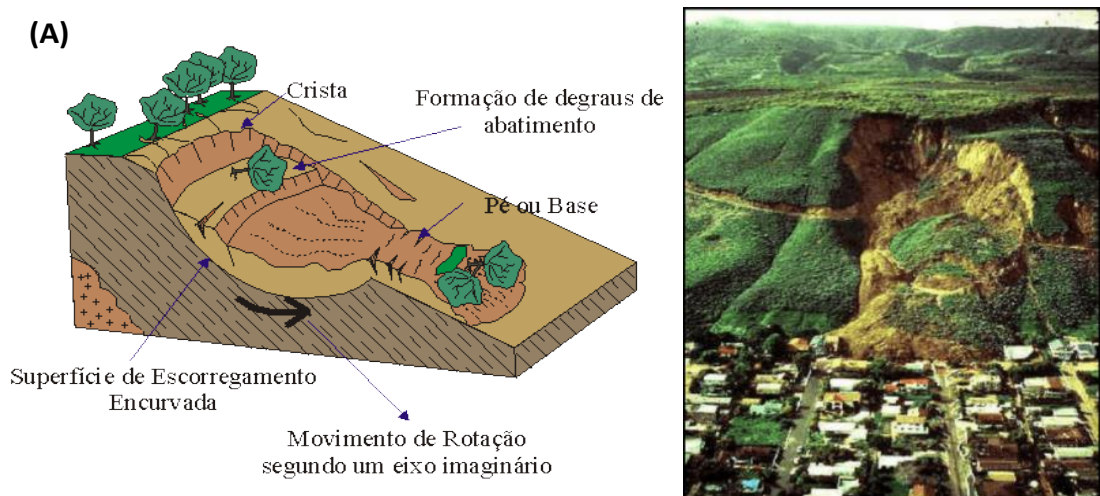
Dentre os fatores apresentados acima, a grande maioria são fatores físicos que podem ser alterados, exceto o grau de decomposição da matéria orgânica, importante parâmetro para manutenção e estabilidade dos aterros sanitários.

Segundo Carvalho (1999), o estado de alteração e composição dos resíduos influem na resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos, bem como, no comportamento mecânico individual de cada componente. Além da alteração da composição inicial presente nos resíduos sólidos, devido à degradabilidade de alguns componentes (matéria orgânica) e processos de reciclagem (plásticos, metais, papel, etc.), caso haja alguma falha na operação e nos sistemas de impermeabilização, drenagem de chorume e de gases no aterro, outros fatores podem instabilizar a estrutura do aterro, como:

- Aumento do nível do lençol freático;
- Aumento do nível de chorume dentro da massa; e
- Aumento da pressão interna de gases.

A partir desses fatores, Koerner e Soong (1999) apresentam dois principais tipos de rupturas existentes nos aterros sanitários, relacionadas à direção da falha ou plano de ruptura, as rotacionais e translacionais (Figuras 3.5 e 3.6). As rupturas rotacionais normalmente são circulares, dependendo do tipo de RSU e de sua disposição, já as translacionais são lineares ao longo de um único plano ou formada por diversos segmentos lineares.

Figura 3.5 – Rompimento rotacional



Fonte: adaptado de Junior e Filho (1998)

Figura 3.6 – Rompimento translacional



Fonte: adaptado de Junior e Filho (1998)

3.3 PROPRIEDADES BIOLÓGICAS DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Os aterros de resíduos sólidos urbanos possuem composição variada, podendo conter metais, plásticos, papéis, vidros, madeiras, têxteis, resíduos orgânicos, pedras e solos; materiais estes que quando depositados formam um maciço heterogêneo e poroso com comportamento peculiar. Outro fator que também exerce influência sobre o comportamento dos materiais em um aterro é a degradação dos materiais com o passar do tempo (CARVALHO, 1999).

Os resíduos transformam-se ao longo do tempo por fenômenos físicos, químicos e biológicos. Segundo Marques (2001), pode-se entender o funcionamento de um aterro sanitário como de um reator biológico heterogêneo, o qual é alimentado por resíduos sólidos e água e fornece na saída, os líquidos percolados e o biogás. O processo de decomposição de um aterro sanitário ocorre tanto na presença como ausência de oxigênio, processos denominados aeróbio e anaeróbio, respectivamente.

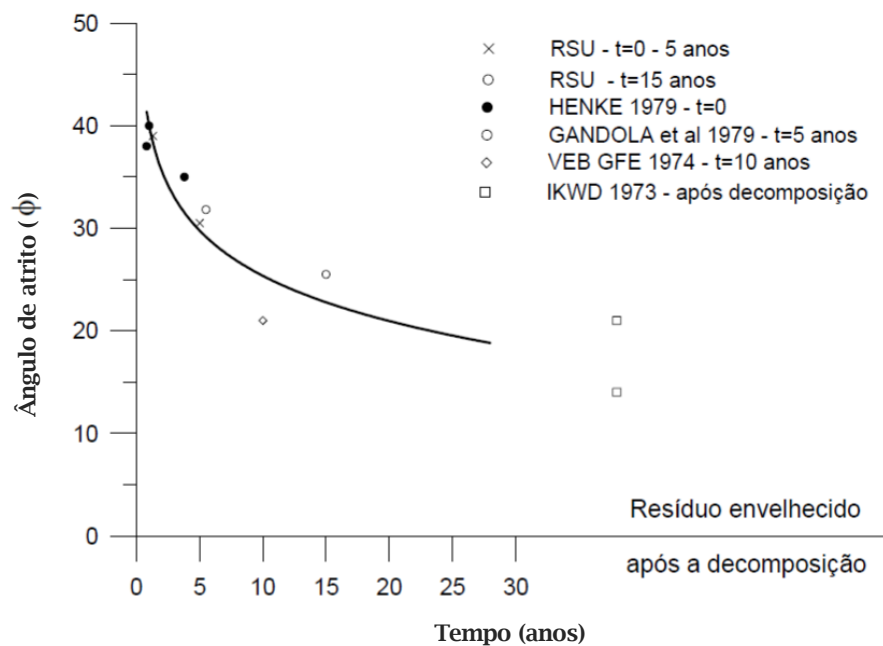
A biodegradação é a propriedade biológica mais importante da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares, principalmente em países em desenvolvimento, onde a maior parte dos resíduos depositados no aterro correspondem a fração orgânica (item 3.4.2 – Tabela 3.3). A degradação dos resíduos consiste na transformação dos componentes orgânicos complexos em biogás, líquidos, matéria orgânica mineralizada e compostos orgânicos mais simples (TCHOBANOGLOUS, THIESEN e VIGIL, 1993).

Os principais fatores em relação aos resíduos disposto no aterro que influenciam nos processos de biodegradação são granulometria, composição, idade, umidade, densidade e grau

de compactação. Já os fatores relacionados ao aterro como um todo são: temperatura, aspectos quantitativos e qualitativos de nutrientes e pH dos líquidos presentes (OLIVEIRA, 2002).

Em termos geotécnicos, a biodegradação promove mudanças no comportamento dos aterros sanitários. Como exemplo temos a redução da permeabilidade e da compressibilidade do RSU ao longo do tempo devido ao aumento da densidade, em função da constante perda de massa da fase sólida do RSU (EDIGERS, NOBLE e WILLIAMS, 1992; WALL e ZEISS, 1995 e SIMÕES et al. 1996). A biodegradação pode também, reduzir a resistência ao cisalhamento devido ao enfraquecimento do efeito “reforço” dado pela presença de materiais plásticos, têxteis e fibras (OLIVEIRA, 2002). De acordo com Massacci et al. (1993), a alteração da resistência ao cisalhamento e, em particular, do ângulo de atrito com o tempo, se deve aos processos de degradação físico-químicos e biológicos que ocorrem no RSU, assim como apresentado na Figura 3.7, a seguir.

Figura 3.7 – Variação da resistência ao cisalhamento do resíduo sólido urbano em função do processo de biodegradação



Fonte: Massacci et al. (1993)

3.4 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Para a determinação das propriedades dos resíduos sólidos urbanos, comumente são utilizados conceitos desenvolvidos para estudar o comportamento mecânico dos solos, contudo,

essa aplicação expressa uma grande variação dos parâmetros, podendo apresentar inconsistências, visto que existem muitas diferenças entre os dois tipos de materiais.

Neste capítulo serão abordadas algumas das propriedades físicas dos resíduos sólidos, tais como: classificação, composição gravimétrica, distribuição do tamanho das partículas, teor de umidade e peso específico.

3.4.1 Classificação

Os resíduos sólidos urbanos são compostos por vários tipos de materiais, resultando em uma massa multifásica, formada por sólidos, líquidos e gases. A fase sólida pode ser subdividida em materiais inertes, deformáveis e putrescíveis ou biodegradáveis, em função do seu comportamento. Na fase líquida estão presentes a água e os líquidos resultantes do processo de biodegradação, e resultante da decomposição ainda, tem-se os gases.

Existem muitas formas de classificar os RSU, estas diferem entre si no número de parâmetros que são considerados e visam agrupar os materiais em classes e/ou subclasses com características comportamentais semelhantes, como pode ser observado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Principais propostas de classificação dos RSU

Fonte	Classe	Subclasse	Tipo de resíduo
Landva e Clark (1990)	Resíduos orgânicos (O)	Putrescíveis ou de rápida biodegradação (OP)	Resíduos alimentares, de jardinagem, de animais
		Não putrescíveis ou de lenta biodegradação (ON)	Papel, madeira, têxteis, couro, plástico, borracha, lamas orgânicas, gorduras, etc.
	Resíduos inorgânicos (I)	Degradáveis (ID)	Metais
		Não degradáveis (IN)	Vidro, cerâmica, solos e rochas, resíduos de construção e demolição, cinzas, etc.
GLR (1993)	Tipo solo		Lamas industriais, solos, resíduos de obras viárias ou resíduos de incineração
	Não tipo solo		Resíduos sólidos urbanos, resíduos verdes, lamas de estações de tratamentos de águas residuais, etc.
Grisolia, Napoleoni e Tancredi (1995)	Resíduos inertes		Solos, vidro, cerâmica, metais, resíduos de construção, cinzas, etc.
	Resíduos muito deformáveis		Papel, cartão, têxteis, couro, plásticos, borracha, etc.
	Resíduos facilmente biodegradáveis		Resíduos alimentares, verdes, de animais, etc.

Dentre as classificações existentes, ressaltam-se algumas mais utilizadas, como a classificação universal proposta por Landva e Clark (1990), na qual os resíduos são divididos em 2 grandes grupos: orgânicos (O) e inorgânicos (I), e posteriormente subdivididos de acordo com a velocidade de degradação dos resíduos orgânicos e inorgânicos

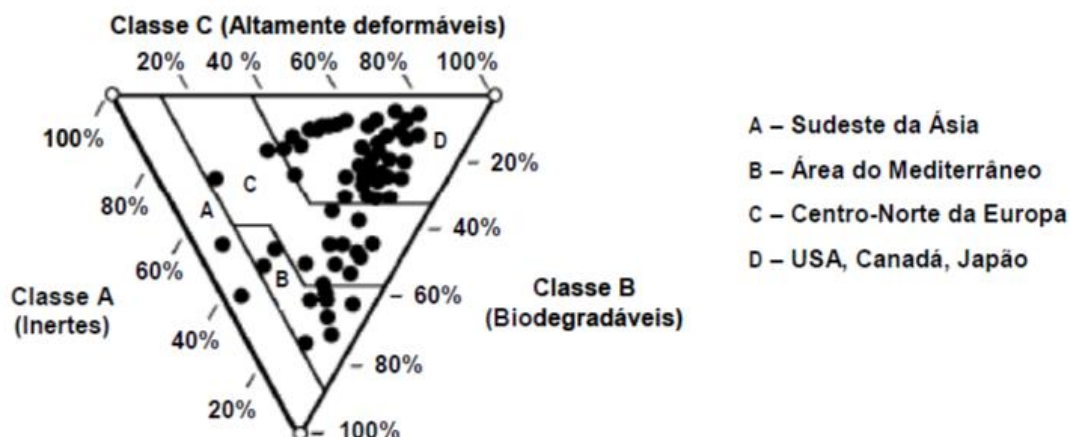
Considerando a semelhança comportamental dos resíduos em relação aos solos, a GLR - Geotechnic of Landfill Recommendations, 1993 (in KONIG e JESSBERGER, 1997) também divide os resíduos em 2 grandes grupos, os resíduos similares aos solos e os diferentes dos solos. No primeiro grupo estão presentes as lamas industriais, resíduos de obras viárias e resíduos de incineração, no segundo, encontram-se os resíduos sólidos urbanos, resíduos verdes, lamas de estações de tratamento de água residuárias, entre outros.

Grisolia, Napoleoni e Tancredi (1995) propuseram um diagrama triangular composto por três classes de materiais para a classificação dos resíduos que avalia as propriedades mecânicas esperadas para o material a partir da determinação da posição da amostra no diagrama por meio da composição de cada classe do RSU. A seguir estão descritas as três classes propostas pelo modelo:

- Classe A ou materiais inertes: comportamento geotécnico semelhante ao dos solos granulares grosseiros muito heterogêneos;
- Classe B ou materiais facilmente biodegradáveis: resíduos orgânicos que possuem rápidas e significativas alterações físico-químicas afetando o comportamento global dos resíduos;
- Classe C ou materiais muito deformáveis: materiais achatados (forma de folha ou tira) que apresentam elevada deformabilidade ainda que sob cargas reduzidas.

A fim de ilustrar o funcionamento do diagrama triangular, a Figura 3.8 apresenta um exemplo com dados de resíduos obtidos em diversos países, no qual é possível identificar regiões delimitadas que refletem a origem geográfica do RSU.

Figura 3.8 – Classificação dos RSU proposta por Grisolia, Napoleoni e Tancredi, 1995



As classificações apresentadas representam apenas parte de todas as existentes, reforçando a inexistência de uniformização e consenso da literatura para este critério, contudo, em todas as propostas é possível identificar o agrupamento de classes de resíduos a partir de suas características e comportamentos comuns, diferindo, como dito anteriormente, na quantidade de classes e subclasses apresentadas.

3.4.2 Composição Gravimétrica

Conforme citado anteriormente, a composição dos RSU é multifásica, constituída pelas fases sólida, líquida e gasosa. Na fase sólida estão presentes diversos materiais com propriedades distintas que alteram as características dos maciços sanitários, desta forma, torna-se essencial determinar a quantidade percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra analisada, variável denominada composição gravimétrica (OLIVEIRA, 2002).

A composição gravimétrica varia de um centro gerador para outro, influenciada pelos aspectos sociais, econômicos, culturais, geográficos e climáticos das cidades (MACHADO et al., 2005; IBAM, 2001). Na Tabela 3.3, a seguir, estão apresentadas as composições dos resíduos sólidos urbanos para diferentes cidades de diferentes países. É possível observar que em locais menos desenvolvidos socioeconomicamente, a porcentagem de matéria orgânica é superior à dos países mais desenvolvidos.

Tabela 3.3 – Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos em diferentes cidades

Componentes	Cidade/ País							
	Bangkok/ Tailândia (*)	Pequim/ China (*)	Nairobi/ Quênia (*)	Hong Kong (*)	New York/ USA (*)	São Paulo/ Brasil (*)	Recife/ Brasil (*)	São Carlos- SP/ Brasil (**)
Metal	1	1	3	3	5	5	2	5
Papel	25	5	12	3	22	14	15	21
Plástico	-	1	5	-	-	14	8	9
Borracha, couro e madeira	7	1	-	7	3	7	-	2
Têxteis	3	-	-	10	-	3	-	3
Materiais org.	44	45	74	15	20	51	60	57
Vidro	1	1	4	10	6	1	2	1
Outros	19	46	2	22	46	5	13	1

Fonte: (*) Manassero, 1997; (**) Fresca, 2007

A quantidade de material orgânico putrescível influi no teor de umidade, na permeabilidade, na resistência ao cisalhamento, no peso específico e na geração de chorume e gás da massa de lixo (de LAMARE NETO, 2004; BOSCOV, 2008). O percentual de plásticos, panos e trapos, couro, borracha e outros materiais que contenham componentes fibrosos interferem diretamente na resistência ao cisalhamento, proporcionando a característica de “falsa coesão” ao maciço sanitário. Por fim, os materiais inertes e dimensionalmente estáveis, tais como entulhos e solos, promovem aumento da resistência ao atrito entre as partículas do RSU (CARDIM, 2008).

A Tabela 3.4 mostra um arranjo típico de percentuais de constituição dos resíduos sólidos urbanos e suas principais características, de acordo com Sowers (1973).

Tabela 3.4 – Porcentagens típicas e principais características dos componentes dos RSU

Material	Porcentagem (em peso)	Característica
Resíduos orgânicos	10-20	Úmido, fermenta e degrada rapidamente, compressível, baixa resistência
Papel e pano/trapos	10-40	Seco a úmido, degrada, queima, compressível
Resíduos de poda	10-20	Úmido, fermenta, degrada, queima
Plásticos	1-2	Seco, compressível, resistente à degradação, mas suscetível à queima
Instrumentos de metal	5-15	Seco, corrosível, triturável
Metal maciço	1	Seco, levemente corrosível, rígido
Borracha	5-10	Seco, elástico, pode ser queimado, compressível, resistente à degradação
Vidro	5-15	Seco, triturável, compressível, resistente à degradação
Madeira de demolição	0-5	Seco, triturável, compressível, degradável, queima
Entulho	0-10	Úmido, triturável, erodível, resistente à degradação
Cinzas e escória	0-5	Úmido, compressível, quimicamente ativo, parcialmente solúvel

Fonte: Sowers (1973)

3.4.3 Distribuição do tamanho das partículas

A composição dos resíduos sólidos urbanos é bastante heterogênea e depende dos processos físico-químicos atuantes, tal fato dificulta a especificação da dimensão e distribuição das partículas deste resíduo, fazendo com que não haja um método padronizado para análise (SANTOS e PRESA, 1995).

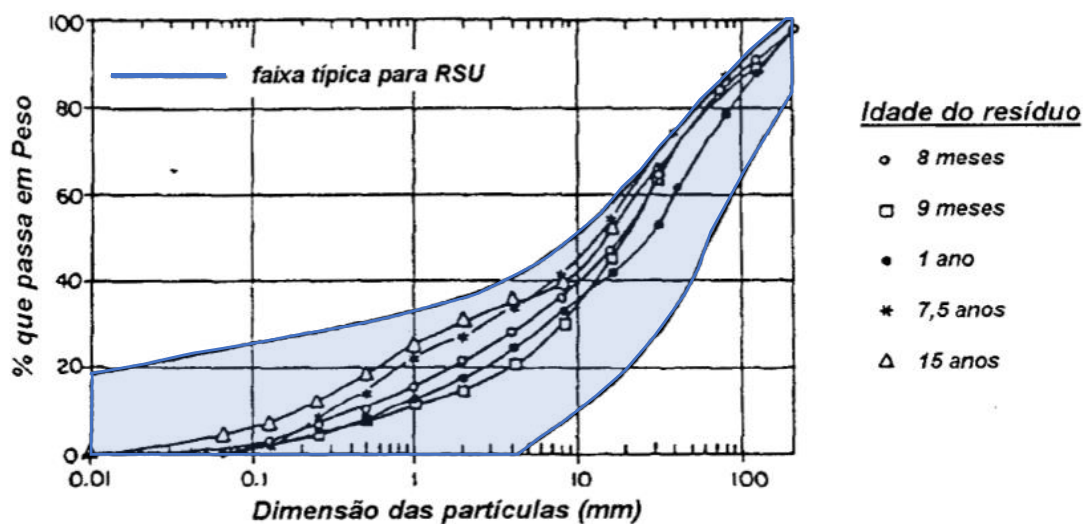
É importante definir a distribuição granulométrica do resíduo, pois esta contribui para a classificação deste e têm papel importante nos processos de assentamento e biodegradação. Semelhantemente aos solos, a granulometria irá determinar o arranjo estrutural dentro do complexo sanitário, bem como, a migração das partículas menores entre os espaços interpartículas. Além disso, o tamanho e forma das partículas interfere na degradação do RSU determinando a área de ataque dos microrganismos, as condições de arejamento e a circulação de água (GOMES, 2008).

O método para análise do tamanho das partículas mais utilizado é a clássica análise granulométrica por peneiramento da mecânica dos solos, visto que a proporção de material fino tende a crescer com o envelhecimento dos resíduos em função dos diferentes estágios de decomposição a que estão submetidos. A dimensão das partículas dos RSU entende-se por faixas amplas, e sua distribuição típica é próxima a dos cascalhos, possuindo menos de 20% de

finos (partículas com dimensão inferior a 0,075 mm) (KNOCHENMUS, WOJNAROWICZ e VAN IMPE, 1998).

Kölsch (1995) efetuou a distribuição granulométrica dos RSU da Alemanha utilizando um conjunto de peneiras com aberturas de 8, 20, 40, 60 e 120 mm. Os materiais maiores foram separados a olho nu entre as frações de 500 e 1000 mm. A Figura 3.9 apresenta as curvas granulométricas de RSU com idade variando entre 8 meses a 15 anos, na qual observa-se que o percentual de materiais com granulação mais fina tende a aumentar com os anos devido ao maior grau de biodegradação do material orgânico.

Figura 3.9 – Distribuição do tamanho das partículas do RSU com diferentes idades (MANASSERO, VAN IMPE e BOUAZZA, 1996) e faixa de variação típica para distribuição granulométrica do RSU (JESSBERGER, 1994).



É importante ressaltar que a eficiência do sistema interno de drenagem interfere nas características granulométricas dos RSU, sendo ineficiente ou inexistente, o acúmulo de afluentes líquidos e gasosos faz com que surjam regiões com massas orgânicas muito moles (BORGATTO, 2010).

3.4.4 Teor de umidade

O teor de umidade dentro do RSU talvez seja a propriedade que possui maior número de variáveis capazes de influenciar seu valor, dentre elas, composição inicial do aterro, condições climáticas locais, processos de operação do aterro, taxa de biodegradação, funcionamento dos sistemas de coleta de líquidos percolados e do sistema de cobertura (CARVALHO, 1999).

A determinação deste parâmetro é de grande importância na análise de estabilidade de aterros, visto que elevados teores de umidade promovem a existência de poropressões na pilha

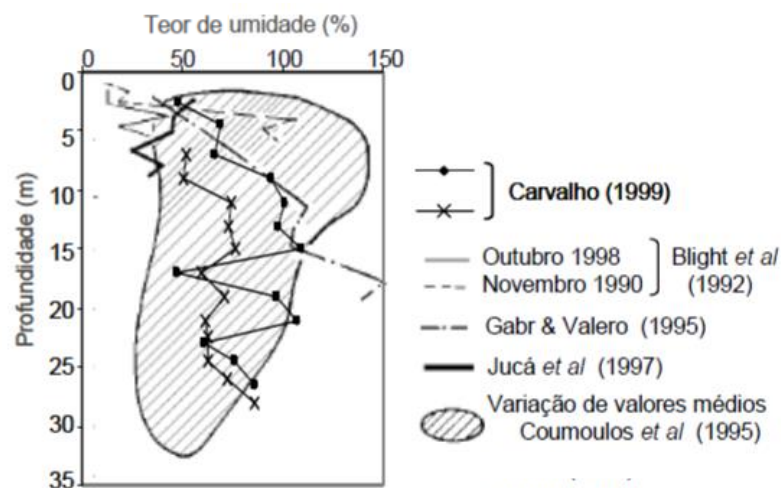
de resíduos, que podem diminuir a tensão efetiva, e conseqüentemente, reduzir a resistência ao cisalhamento (MARTINS, 2006).

O teor de umidade pode variar muito dentro de um aterro, devido a sua heterogeneidade de composição, em alguns pontos pode haver a existência de bolsões de umidade devido à presença de materiais como plásticos, borrachas, papéis, papelões, couro, madeira, dentre outros, que conseguem reter a água ou absorvê-la em sua estrutura (CARDIM, 2008). Dessa forma, torna-se relevante a obtenção do perfil de umidade com a profundidade, o qual pode ser obtido através de sonda de nêutrons ou secagem de amostras em estufas.

Na Figura 3.10 são apresentados os resultados dos estudos da variação do teor de umidade para o resíduo sólido urbano com a profundidade dentro do aterro sanitário realizada por vários autores. Conclui-se que não há um comportamento comum entre os resultados, para Gabr e Valero (1995) no aterro de Pioneer Crossing, Pensilvânia (USA) as medições resultaram em aumento do teor de umidade com a profundidade, variando de 30% próximo a superfície e 130% em maiores profundidades. Os autores Bright et al. (1992), in König e Jessberger (1997); que estudaram o aterro de Linbro na África do Sul em duas épocas diferentes (outubro de 1988 e novembro de 1990, esta última após uma chuva sazonal) e Carvalho (1999) no aterro dos Bandeirantes em São Paulo (Brasil), chegaram à mesma conclusão.

De maneira oposta, Coumoulos et al. (1995), no estudo realizado no aterro de Ano Liossia em Atenas, Grécia, obteve teor de umidade em torno de 80% em profundidades de até 5 metros e de 40% em 30 metros de fundura, demonstrando redução da umidade com a profundidade. Tais resultados também foram alcançados por Jucá et al. (1997), que estudou o aterro de Muribeca em Recife (PE-Brasil).

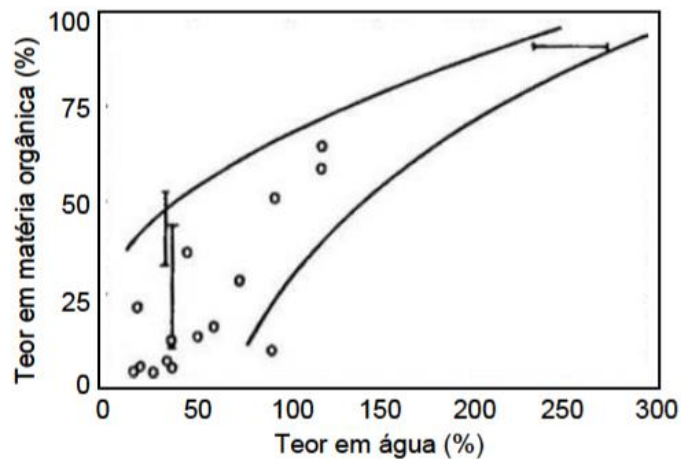
Figura 3.10 – Perfil de variação do teor de umidade em função da profundidade



Fonte: adaptado de Carvalho (1999)

A partir dos estudos apresentados na Figura 3.10, compreende-se que os teores de umidade dos resíduos sólidos de um aterro não são influenciados pela profundidade de forma direta, mas sim pelo teor de matéria putrescível presente nesses aterros. Da mesma forma, concluíram Landva e Clark (1990), conforme estudos realizados em vários aterros antigos do Canadá relacionando o teor de umidade com o teor de matéria orgânica, apresentados na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Variação do teor em água em função do teor em matéria orgânica de amostras de RSU antigos



Fonte: Landva e Clark (1990)

Na literatura é possível encontrar diferentes maneiras de obter o teor de umidade das amostras de RSU. König e Jessberger (1997) recomendam que o teor em água seja calculado seguindo o que é aplicado na geotecnia para os solos, relação entre massa de água e massa seca, secando as amostras em estufa a no máximo 70° C. Para Tchonobanoglous, Thiesen e Vigil (1993) a umidade pode ser determinada tanto em base seca como em base úmida, tal qual é usado na agronomia. Contudo, o procedimento mais aceito no meio ambiental é o da umidade volumétrica (θ_w), que relaciona os volumes de água e volume de sólidos ao invés das massas.

Abaixo estão apresentadas as equações matemáticas que representam o cálculo da umidade de resíduos por meio do peso seco (Equação 3.1) e do peso úmido (Equação 3.2).

$$W_d = \frac{(w_o - w_i)}{w_o} \quad \text{Equação 3.1}$$

$$W_w = \frac{(w_o - w_i)}{w_i} \quad \text{Equação 3.2}$$

Em que w_o corresponde ao peso inicial da amostra e w_i ao peso da amostra após secagem. Ainda que ambas as metodologias sejam válidas, é importante indicar a utilizada visto que alcançam resultados distintos, assim, como apresentado por Carvalho (1999) em estudo realizado no aterro Bandeirantes (SP), e observado na Tabela 3.5.

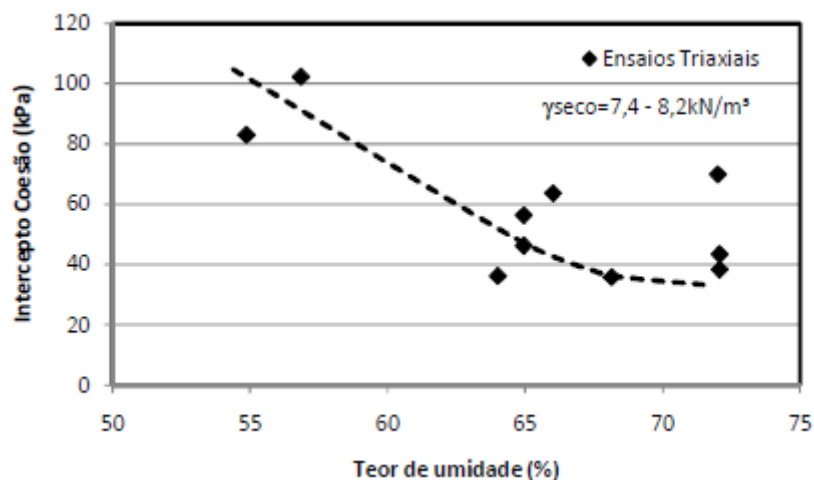
Tabela 3.5 – Umidade dos componentes do RSU do aterro Bandeirantes

Componentes	Teor de umidade (%)	
	Base seca	Base úmida
Metais	19,6	16,4
Papel	74,8	42,8
Vidro	5,9	5,7
Plástico	41,5	29,3
Borracha	24,5	19,6
Têxteis	55,0	35,5
Pedra	12,6	11,2
Madeira	69,8	41,1
Matéria orgânica	47,0	32,0

Fonte: Carvalho (1999)

Em estudo realizado por Gabr e Valero (1995), revela que uma das influências do teor de umidade no comportamento mecânico do maciço sanitário é a redução da coesão aparente do RSU, conforme pode ser observado na Figura 3.12, na qual nota-se que para teores de umidade variando entre 55 e 70%, os valores de coesão aparente diminuem consideravelmente passando de cerca de 100 kPa para 40 kPa.

Figura 3.12 – Variação da coesão aparente com o teor de umidade



Fonte: adaptado de Gabr e Valero (1995)

Outro aspecto influenciado pelo teor de umidade é o peso específico, Caterpillar (2001) averiguou por meio de testes em campo que o teor de umidade dos RSU geralmente varia entre 10 e 80 %, sendo que a compactação é otimizada com umidade igual 10%. Em contrapartida, nos estudos realizados por Catapreta et al. (2005) em Belo Horizonte, a umidade que apresentou melhor índice de compactação ficou em torno de 56%.

3.4.5 Peso específico

A variável peso específico (γ) descreve a relação entre o peso de uma amostra e seu volume, expressa em kN/m^3 (SILVEIRA, 2004). São muitos os fatores que podem alterar o peso específico dos resíduos sólidos, os principais são a composição física e umidade (teor de matéria orgânica, recicláveis, etc.), o volume de cobertura diária e o grau de compactação durante a deposição (operação do aterro) e o estágio de degradabilidade (COWLAND, TANG e GABAY 1993; MITCHELL, BRAY e MITCHALL, 1995; LING et al. 1998; NASCIMENTO, 2007).

Além da natureza dos materiais e sua heterogeneidade que acabam por dificultar a determinação do peso específico do RSU, a necessidade de um volume amostral maior do que usualmente é utilizado na geotecnia também contribui para essa complexidade (SILVEIRA, 2004).

Várias técnicas são utilizadas para determinação do peso específico in situ, as mais comuns são os ensaios em poços ou trincheiras, na qual obtêm-se o peso específico pela relação entre o peso dos resíduos escavados e o volume da cava, que geralmente possui de 2 a 4 metros de profundidade. Outro método aplicado é o empregando radiação gama (GOTTELAND, LEMARÉCHAL e RICHARD, 1995). É consenso na literatura que os resultados obtidos não são precisos, atingindo um grau de incerteza de 10 a 20% (GOTTELAND, LEMARÉCHAL e RICHARD, 1995; OLIVEIRA, 2002).

Segundo Gomes, Conceição e Fleck (1997) o peso específico médio dos resíduos sólidos soltos varia entre 1,0 e 3,0 kN/m^3 , após a compactação pode atingir valores de 7,0 a 9,0 kN/m^3 . Ainda em concordância com o autor, os processos físicos e biológicos que ocorrem com o tempo podem fazer com que o peso específico atinja valores de 10,0 a 13,0 kN/m^3 .

Na literatura encontram-se valores de peso específico de resíduos tão baixos quanto 1,2 kN/m^3 , em aterros mal compactados e com muito plástico, até valores de 17,0 kN/m^3 em aterros muito compactados (CARVALHO, 1999; SANTOS, 1997). Para Knochenmus, Wojnarowicz e Van Impe (1998) os resíduos não compactados variam seu peso específico de 3 kN/m^3 e os com alto grau de compactação de 14 kN/m^3 . A Tabela 3.6 apresenta uma síntese

dos pesos específicos adquiridos por vários autores em relação ao grau de compactação dos resíduos sólidos urbanos.

Tabela 3.6 – Peso específico para os RSU compactados e não compactados encontrados na literatura

Autor	Peso específico médio dos RSU não compactados e/ou pobremente compactados (kN/m ³)	Peso específico médio dos RSU compactados (kN/m ³)
Gomes, Conceição e Fleck (1997)	1,00 a 3,00	7,00 a 9,00
		10,0 a 13,0 (influência temporal)
Marques (2001)	-	3,4 a 14,0 (médio de 8,2 kN/m ³)
Catterpillar (2001)	2,75 a 7,00	3,60 a 4,50
Fakher (2006)	2,50 a 4,00	4,50 a 8,50
Kaimoto e Cepollina (1996)	5,00 a 7,00	9,00 a 13,0
Landva & Clark (1990)	7,00 a 14,0	-
König & Jessberger (1997)	3,00	17,0
Oweis & Khera (1990)*	2,80 a 3,10	4,70 a 6,30
Bratley et al (1983)*	1,16	7,00 a 13,1
Sowers (1973)*	1,10 a 3,00	6,00
Sowers (1968)**	-	8,00 a 12,0
Rao (1974)*	1,50 a 2,00	3,50 a 6,00
Owers (1993) **	4,70 a 6,30	8,60 a 9,40

Fonte: (*) Adaptado de Carvalho, 2002; (**) Engecorps, 1996

A partir dos dados apresentados na Tabela 3.6 é possível concluir que o grau de compactação do aterro exerce influência relevante sobre o peso específico dos RSU, isso se deve ao elevado índice de vazios presentes nos RSU e de sua alta compressibilidade. Outro fator que deve ser levado em consideração é a influência temporal exercida na variável, visto que os processos de degradação do material putrescível alcançam níveis avançados.

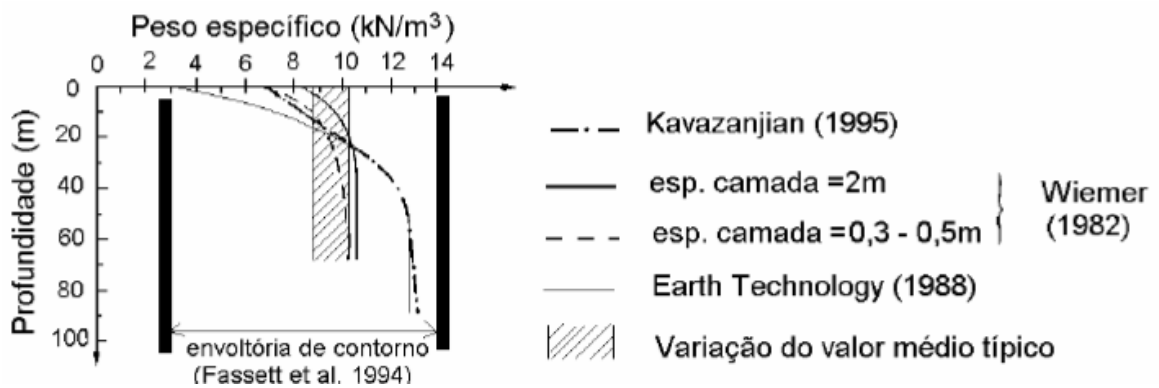
Gabr e Valero (1995) trabalharam com resíduos sólidos urbanos antigos (15 a 30 anos) aplicando o procedimento recomendado para solos pela ASTM – American Society for Testing and Materials e aferiram um peso específico médio de 19,6 kN/m³. Da mesma forma, Carvalho (1999) trabalhando no aterro Bandeirantes de São Paulo e com resíduos de cerca de 15 anos de idade, obteve pesos específicos das partículas sólidas variando entre 22,4 e 25,1 kN/m³.

De acordo com Martins (2006), quanto maior o percentual de material orgânico nos RSU maior o seu peso específico e quanto maior a quantidade de papéis, papelão e plásticos, menor o valor do peso específico. Essa influência da composição gravimétrica no peso específico dos resíduos sólidos urbanos também foi confirmada por de Lamare Neto (2004) que estudou os RSU proveniente de várias regiões da cidade do Rio de Janeiro e constatou que os resíduos das

áreas mais pobres apresentavam maior peso específico do que o das porções mais nobres da cidade.

Através de dados publicados pelo Earth Technology (1988) e Fassett, Leonards e Repetto (1994), Kavazanjian et al. (1995) elaboraram um perfil de variação do peso específico com a profundidade, no qual é possível observar que o peso específico in situ médio permanece entre 8,6 e 10,2 kN/m³ e aumenta com a profundidade devido à bioconsolidação do RSU com o tempo e à compressão devido à sobrecarga, sendo este aumento insignificante para profundidades a partir de 40-45 metros. Os dados do Earth Technology foram realizados no aterro Puente Hills, próximo de Los Angeles. Na Figura 3.13 estão apresentados os perfis do peso específico de Kavazanjian et al. (1995), Wiemer (1982) e as envoltórias de valor máximo e mínimo de Fassett, Leonards e Repetto (1994).

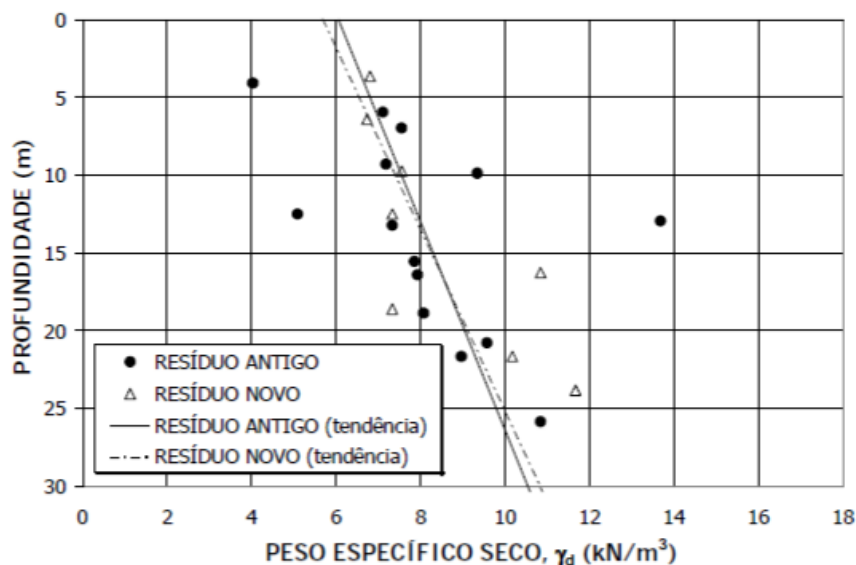
Figura 3.13 – Peso específico para o resíduo sólido urbano



Fonte: modificado de Kavazanjian et al. (1995)

Os autores Powrie e Beaven (1999) relacionaram ainda, a variação do peso específico das partículas sólidas com as tensões verticais aplicadas, como apresentado na Figura 3.14.

Figura 3.14 – Variação do peso específico seco com a profundidade



Fonte: Oweis e Khera (1986)

3.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Knochenmus, Wojnarowicz e Van Impe (1998) apontam que as principais propriedades mecânicas para o estudo da estabilidade de taludes de resíduos são a compressibilidade e a resistência ao cisalhamento. Estas sofrem alterações com as variações que ocorrem dentro do maciço em função da decomposição, da idade do resíduo, condições de estocagem e drenagem, além do comportamento mecânico de cada componente.

De maneira geral, utilizam-se os métodos convencionais de ensaios desenvolvidos para solos na análise das propriedades mecânicas dos resíduos sólidos, tais como ângulo de atrito (ϕ) e intercepto coesivo (c'). Contudo, é alertado pelos autores da literatura (SÁNCHEZ-ALCITURRI et al., 1993; MANASSERO, VAN IMPE e BOUAZZA, 1996; KÖNIG e JESSBERGER, 1997) que a execução desta prática deve ser realizada de forma cuidadosa, visto que são significantes as diferenças entre os dois materiais. O maciço de RSU possui elevado índice de vazios, levando a uma significativa compressibilidade volumétrica; possui ainda, partículas de diferentes naturezas, sendo muitas delas frágeis e deformáveis que passam por processos de decomposição com o tempo, implicando em auto consolidação e variação das propriedades dos materiais com o tempo (MANASSERO, VAN IMPE e BOUAZZA, 1996).

3.5.1 Resistência ao cisalhamento

A propriedade de resistência ao cisalhamento nos solos representa a deformação por corte da massa de solo e é medida através do ângulo de atrito e da coesão segundo o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, apresentado na Equação 3.3 (SILVA, 2014).

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

τ : resistência ao cisalhamento (kPa);

c : coesão (kPa);

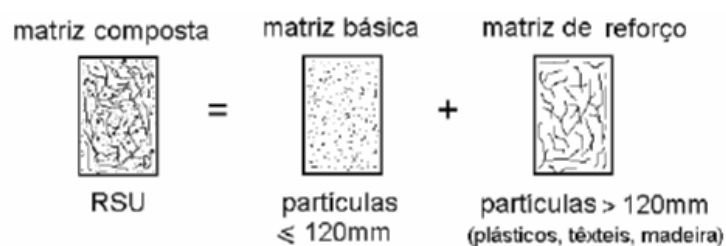
σ : tensão vertical (kPa);

φ : ângulo de atrito ($^{\circ}$).

As forças atrativas interpartículas ou simplesmente, a tendência do solo aderir a si mesmo, é definida pela coesão (HOLTZ e KOVACS, 1981). Já o ângulo de atrito interno, representa a tensão vertical efetiva existente em uma partícula de solo e é condicionada pela composição mineralógica, forma, índice de vazios e porcentagem de material orgânico presente no solo (LAMBE e WHITMAN, 1969).

Em geral, solos granulares possuem valores de coesão diminuto e elevado ângulo de atrito, enquanto a resistência ao cisalhamento nos solos finos é dominada pela coesão (SILVA, 2014). Para Kockel (1995), em König e Jessberger (1997), os resíduos sólidos urbanos apresentam comportamento de resistência semelhante aos solos reforçados, devido à presença dos componentes fibrosos, como plásticos, couros, papéis, papelões, tecidos, etc. Dessa forma, o RSU é uma matriz mista, constituído por uma matriz básica, compreendida de materiais finos e granulares; e uma matriz de reforço, na qual estão presentes os componentes fibrosos resistentes à tração, conforme representado na Figura 3.15.

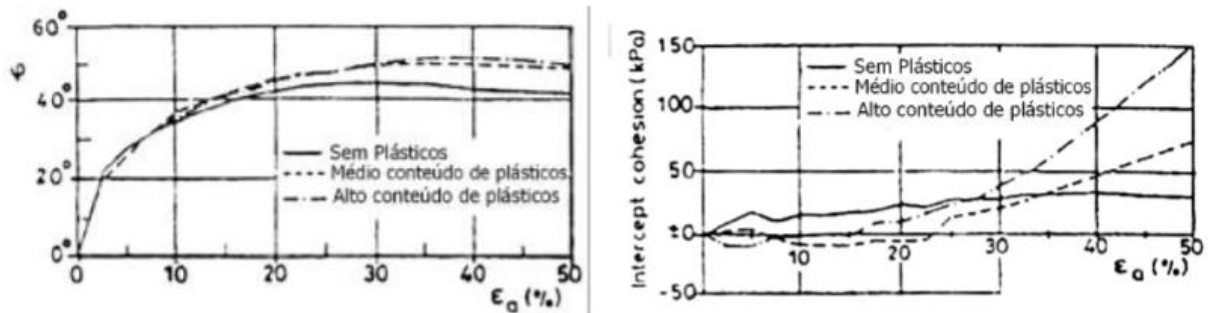
Figura 3.15 – Modelo esquemático da composição dos RSU



Fonte: König & Jessberger (1997)

Kockel e Jessberger (1995) realizaram estudos demonstrando que as quantidades de componentes plásticos presentes nos resíduos não influenciam significativamente o ângulo de atrito, mas afetam bastante o intercepto coesivo, concluindo que na matriz básica atua principalmente a resistência friccional que atinge valores máximos de ângulos de atrito entre 42° e 45° mobilizados com elevadas deformações, conforme apresentado na Figura 3.16.

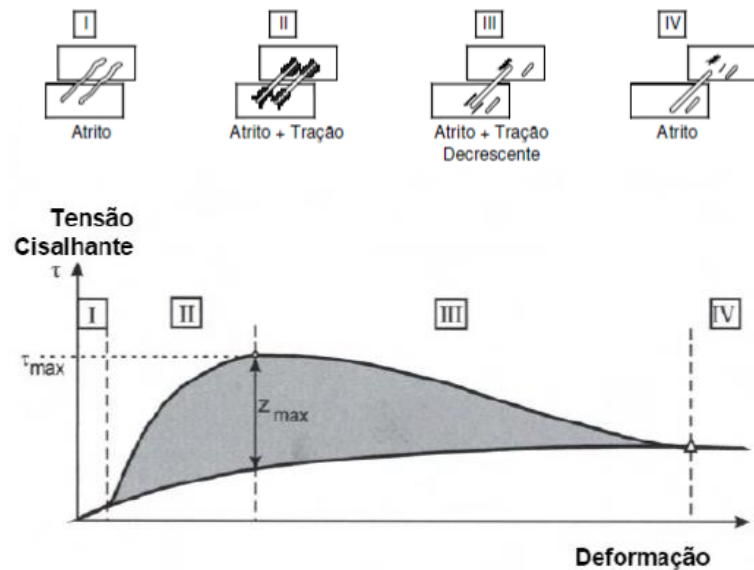
Figura 3.16 – Variação do ângulo de atrito (esquerda) e da coesão (direita) com a deformação



Fonte: König e Jessberger (1997)

De acordo com Grisolia e Napoleoni (1996), a ocorrência apresentada no gráfico da esquerda (Figura 3.16) na qual há aumento da resistência friccional com as deformações até um ponto máximo de estabilização, solidifica a hipótese de que em grandes deformações o comportamento dos RSU se assemelha ao dos solos e é controlado pelos componentes inertes presentes. A coesão é fomentada no momento em que o ângulo de atrito está quase totalmente mobilizado em deformações superiores a 20% e é dependente da matriz de reforço. Kölsch (1993) apresenta um modelo composto por quatro fases que representa a interação entre as forças de atrito e de tração dentro de uma massa de resíduo sujeita ao cisalhamento, conforme Figura 3.17.

Figura 3.17 – Curva tensão-deformação com interação entre as componentes de atrito e tração do RSU



Fonte: Kölsch (1993)

A curva apresentada na Figura 3.17, mostra que baixas deformações mobilizam apenas as forças de atrito (Estágio I), ao passo que as deformações aumentam as fibras começam a ser tracionadas (Estágio II) e as forças de tração crescem até atingir um valor máximo (Z_{max}) equivalente à resistência à tração das fibras e/ou da interação das fibras com a massa de resíduos. A partir do pico as forças de tração diminuem gradualmente (Estágio III) até atingirem o Estágio IV, no qual a resistência ao cisalhamento do resíduo passa a se limitar pela componente de atrito. Segundo Kölsch (1993), a parcela de resistência devida ao atrito aumenta linearmente com o acréscimo da tensão normal e a parcela referente as forças de tração, que é exercida pelas fibras, só contribui efetivamente na resistência ao corte a partir de um determinado nível de tensão normal (I). Desta maneira, a participação de cada uma dessas parcelas na resistência ao corte do RSU é alterada com a intensidade da tensão normal atuante e da deformação.

Similarmente às outras características relacionadas aos resíduos sólidos urbanos, os parâmetros de resistência ao cisalhamento não fogem à regra, sendo influenciados por diferentes fatores, dentre eles o mais determinante e que dificulta sua medição é a heterogeneidade de composição, conforme mencionado anteriormente. Por esta razão, o parâmetro possui ampla variação e é específico para cada local, operação do aterro e composição, idade, dimensão e peso volúmico dos RSU (SILVA, 2014).

Na Tabela 3.7 estão agrupados parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos por diversos autores, na qual é possível observar que existe uma grande inconstância nos valores

de resistência, baseada nas diferentes condições de ensaio. Os valores de coesão apresentados variam de 0 a 64 kPa com média de 14 kPa, já o ângulo de atrito apresenta média de 30° e variação de 15 a 59°.

Tabela 3.7 – Valores de coesão e ângulo de atrito publicados

Fonte	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)	Método/ensaio	Comentários	País
Landva e Clark (1986)	19	42	Cisalhamento direto	RSU antigos	Canadá
	16	38		RSU antigos	
	16	33		RSU antigos	
	23	24		RSU recentes triturados	
	10	33,6		resíduos de madeira	
Siegel et al. (1990)	0	39 a 53	Triaxial	5 composições diferentes de RSU (16 a 39% de deformação)	EUA
Howland e Landva (1992)	17	33	Cisalhamento direto	RSU com 10 a 15 anos de idade; 25% deformação	Canadá
Cowland, Tang e Gabay (1993)	10	25	Cisalhamento direto	-	Itália
Del Greco e Oggeri (1993)	15,7	21	Cisalhamento direto	fardos de baixa densidade	Itália
	23,5	22		fardo de alta densidade	
Golder e Associates (1993)	0	41	Cisalhamento direto	-	-
Jessberger (1994)	7	38	Não definido	-	Alemanha
	10	15	Retroanálise	-	
	10	17	Retroanálise	-	
	0	30	Estimado	observações de campo	
	0	40	Estimado		
	7	42	Cisalhamento direto	RSU com 9 meses	
	28	26,5	Valores sugeridos	RSU recentes	
Fassett, Leonardo e Repetto (1994)	10	23	Valores sugeridos	-	EUA
Kolsch (1995)	15	15	Valores sugeridos	-	Alemanha
	18	22	Retroanálise	-	
Gabr e Valero (1995)	16,8	34	Triaxial	amostras remoldadas de sondagens	EUA
	0 a 27,5	20,5	Cisalhamento direto		
Benson et al. (1996)	20	35	Valores sugeridos	-	EUA
	24	42	Cisalhamento direto	-	
Carvalho (1999)	42 - 60	21 - 27	Cisalhamento direto	RSU antigos	Brasil
Kavazanjian (2001)	16 a 30	33 a 59	Cisalhamento simples	RSU degradado	EUA
Reddy et al. (2008a e b)	31 a 64	26 a 30	Cisalhamento direto	RSU recentes	EUA
	38	16	Triaxial		

Fonte: adaptado de Wong, 2009

A resistência ao cisalhamento de solos é usualmente estimada por meio de ensaios in situ (cisalhamento direto, SPT, CPT e Vane test), ensaios laboratoriais (triaxial e cisalhamento direto) e retroanálise de dados de campo. Contudo, devido a inexistência de um modelo conceitual de referência específico para o comportamento deste material, as informações acerca desta propriedade dos RSU são muitas vezes contraditórias e a interpretação dos resultados contém numerosas incertezas (FUCALE, 2005). No Brasil a realização de ensaios para determinação da resistência ao cisalhamento dos RSU é escassa, mas quando realizados geralmente são estimados através de retroanálise de rupturas (SCHULER, 2010).

A aplicabilidade dos ensaios do tipo Vane Test é muito questionada, segundo Singh e Murphy (1990) as paletas utilizadas nestas análises são muito pequenas comparadas com as dimensões dos componentes dos RSU. Para Cardim (2008), os resultados obtidos por este teste não são representativos porque a estrutura de composição e as condições de drenagem do RSU comprometem a qualidade dos resultados obtidos pelo equipamento, que fornece melhores resultados para condição não drenada de materiais homogêneos.

Outra técnica bastante advertida também é a investigação tipo SPT, devido ao empirismo do tratamento dos seus dados. A especificação de parâmetros obtidos pela relação entre o número de golpes e a resistência ao cisalhamento dos RSU têm pouco crédito, dado que não existem estudos publicados que fundamentem tais relações (CARDIM, 2008).

No caso dos ensaios laboratoriais as maiores dificuldades encontradas referem-se à coleta e obtenção de amostras representativas em função da composição muito heterogênea dos RSU e também pela presença de materiais resistentes (madeiras, pedras, metais e outros) que originam na medição de grandes picos, desvios das hastes dos equipamentos e danos nos amostradores, paletas e ponteiras (CARVALHO, 1999).

König e Jessberger (1997) e Manassero, Van Impe e Bouazza (1996) indicam que os resultados de resistência obtidos por retroanálise devem ser utilizados de forma cuidadosa, pois existe um número infinito de combinações de resistência ao corte que correspondem a equação de equilíbrio, função de duas variáveis, e portanto, a solução não é exata. Alguns autores citam que os resultados obtidos por retroanálise conferem um método conservativo de valores de resistência, pois estes representam o contorno inferior da resistência de campo.

Nas Tabela 3.8 e 3.9 estão expostos os principais métodos de determinação de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos juntamente com alguns

comentários abrangendo as vantagens e desvantagens dos métodos e os autores referentes (DIXON, RUSSEL e JONES, 2005).

Tabela 3.8 – Revisão de métodos para a determinação em campo dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU

Local de estudo: campo		
Métodos de determinação	Comentários	Referências
Retroanálise de ruptura de taludes	Informações adequadas raramente disponíveis (poropressão, forma e posição da superfície de ruptura)	Benvenuto & Cunha (1991) Kavazanjian et al. (1995) Van Impe et al. (1996) Koener & Soong (2000) Oliveira (2002)
Retroanálise de ensaios de corte em taludes	Observadas grandes deformações, porém sem apresentar ruptura	Singh & Murphy (1990) Cowland et al. (1993)
Retro análise de taludes estáveis	Alterações na composição do resíduo fazem com que as experiências passadas não sirvam de guia para desempenhos futuros	Gotteland et al. (2002)
Cisalhamento Direto in situ	Dificuldades na execução e resultados relacionados a baixos níveis de tensão. Custos relativamente altos.	Richardson & Reynolds (1990) Jessberger & Kockel (1993) Del Greco & Oggeri (1993) Withian et al. (1995) Gotteland et al. (1995)
SPT, CPT e Vane Test	Não há clareza na relação entre a resistência à penetração e a resistência ao cisalhamento dos RSU, no caso do SPT e CPT. Estrutura de composição e condições de drenagem do RSU comprometem a qualidade dos resultados obtidos pelo equipamento. Palhetas muito pequenas em relação às dimensões dos componentes do RSU (Vane Test).	Sowers (1968) Cartier & Baldit (1983) Siegel et al (1990) Sanchez-Alciturri et al. (1993) Coumoulos et al. (1995) Bouazza et al. (1996) Jucá et al. (1997)

Fonte: Dixon, Russel e Jones, 2005

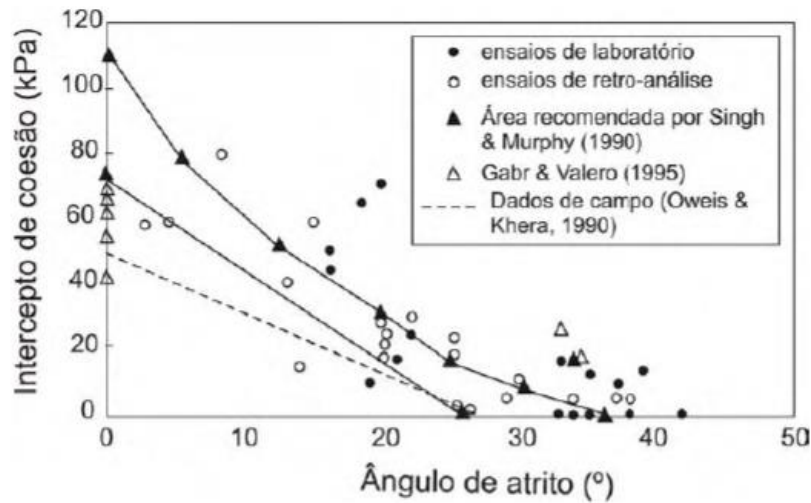
Tabela 3.9 - Revisão de métodos para a determinação em laboratório dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU

Local de estudo: laboratório		
Métodos de determinação	Comentários	Referências
Compressão Triaxial	Realização do ensaio com amostras deformadas. Não há a observação de resistência de pico devido à alta compressão e densificação da amostra.	Singh & Murphy (1990); Jessberger & Kockel (1993); Jessberger (1994); Grisolia et al. (1995); Kockel & Jessberger (1995); Gabr & Valero(1995); Grisolia & Napoleoni (1996); Manassero et al. (1996); König & Jessberger (1997); Knochenmus et al. (1998); Van Impe (1998); Wojnarowicz et al. (1998); Carvalho (1999); Caicedo et al. (2002); Zekkos (2005); Machado et al. (2005); Nascimento (2007); Zekkos et al. (2007)
Cisalhamento Direto	Ensaio realizado em amostras deformadas. Requer equipamentos de grande porte para o fornecimento de dados representativos. São necessários grandes deslocamentos para mobilizar resistência de pico.	Landva & Clark (1990); Siegel et al. (1990); Van Impe (1993); Brandl (1995); Gabr & Valero (1995); Kölsch (1995); Gotteland et al. (2001); Fucale (2005); Martins (2006)
Cisalhamento Simples	Ensaio realizado em amostras deformadas. Requer equipamentos de grande porte para o fornecimento de dados representativos. Informação útil do módulo de rigidez cisalhante.	Kavazanjian et al. (1999)

Fonte: Dixon, Russel e Jones, 2005

Singh e Murphy (1990) foram os primeiros a utilizarem o gráfico de coesão *versus* ângulo de atrito para representar os resultados de parâmetros de resistência adquiridos para os RSU. Os mesmos autores, propuseram uma faixa recomendada dos parâmetros de resistência para a elaboração de projetos por meio de compilação dos dados de ensaios de laboratório, de campo e retroanálise disponíveis até então, o gráfico está exposto na Figura 3.18.

Figura 3.18 – Diagrama de coesão pelo ângulo de atrito com proposta da faixa recomendada para projetos

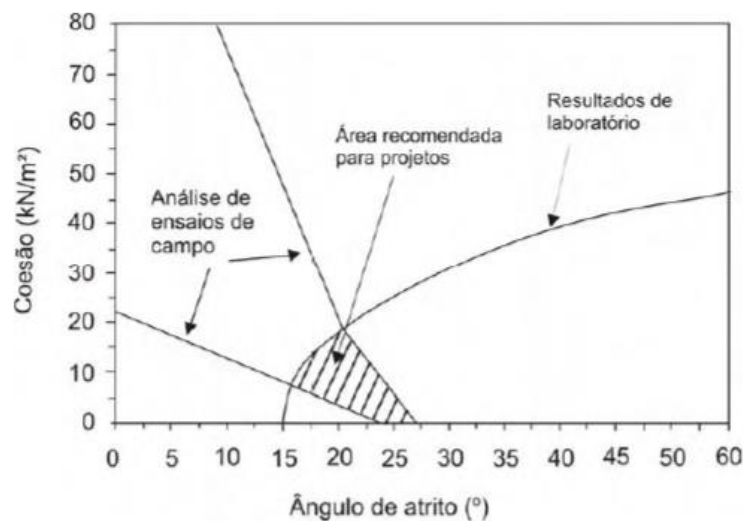


Fonte: Singh e Murphy (1990)

É possível observar no gráfico uma elevada dispersão dos dados apresentados, mostrando a dificuldade existente na estimativa da resistência dos RSU. Sanchez-Alciturri et al. (1993) constaram ainda que a maioria dos valores de ângulo de atrito se encontram entre 25° e 35° e que há apenas um valor abaixo de 17° apresentado por Gabr e Valero (1995) em ensaios de UU (UU – unconsolidated undrained).

Com suporte nas constatações feitas Sanchez-Alciturri et al. (1993) propuseram um novo diagrama, no qual o parâmetro de projeto deve ser adquirido escolhendo um ponto dentro da área hachurada do gráfico apresentado na Figura 3.19.

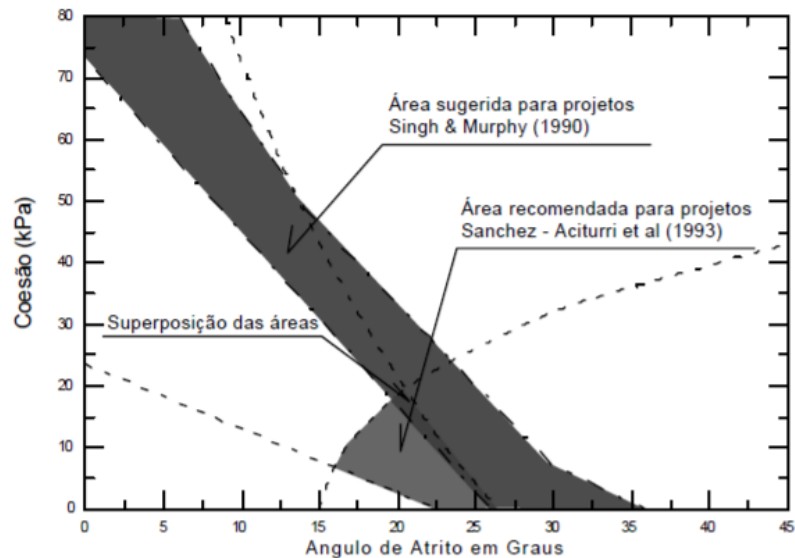
Figura 3.19 – Diagrama de coesão pelo ângulo de atrito com proposta da faixa recomendada para projetos



Fonte: Sanchez-Alciturri et al. (1993)

Sanchez-Alciturri et al. (1993) relatam que o diagrama apresentado coincide de modo grosseiro com o proposto por Singh e Murphy (1990), mas plotando-se as duas faixas propostas em um gráfico nota-se que apenas uma pequena área é sobreposta, sendo a faixa recomendada por Sanchez-Alciturri mais conservadora.

Figura 3.20 – Superposição das faixas de parâmetros de resistência proposta pelos dois autores

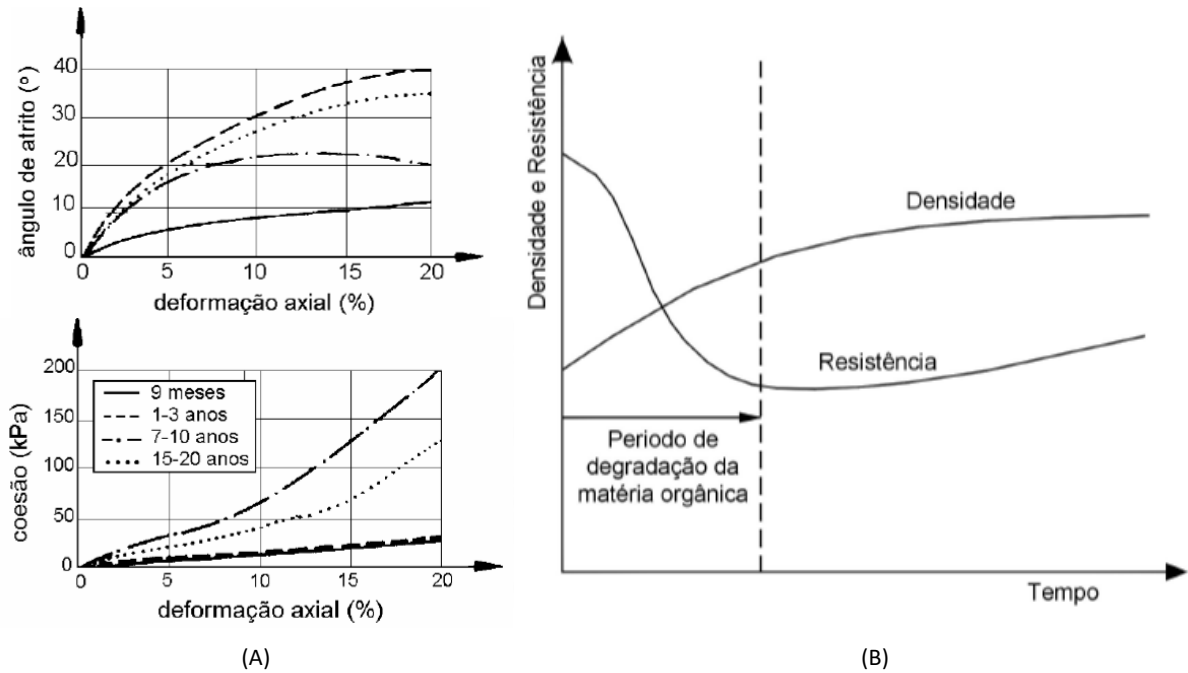


Fonte: Sanchez-Alciturri et al. (1993); Singh e Murphy (1990)

Diversos autores, no entanto, atentam para as limitações existentes na aplicação direta desses diagramas em projetos, dado que eles reúnem resultados de diferentes ensaios, executados sob condições climáticas e operacionais distintas, e que muitas vezes admitem condições que não refletem as reais características dos resíduos (SANCHEZ-ALCITURRI et al., 1993; MANASSERO, VAN IMPE e BPUAZZA, 1996; KÖNIG e JESSBERGER, 1997; KNOCHENMUS, WOJNAROWICZ e VAN IMPE, 1998).

Além da discordância dos autores a respeito dos métodos e condições para estimar os parâmetros de resistência dos RSU, há também um desacordo sobre a influência da decomposição resultante do tempo na resistência do maciço. Para König e Jessberger (1997) a redução da resistência ao longo do tempo ainda não foi comprovada, contudo, Walter (1992) citado em Palma (1995), afirma que há redução da resistência ao cisalhamento, principalmente da coesão, resultante do aumento da densidade dos RSU provocada pela biodegradação e enfraquecimento do efeito reforço. Ambas as vertentes estão apresentadas graficamente na Figura 3.21.

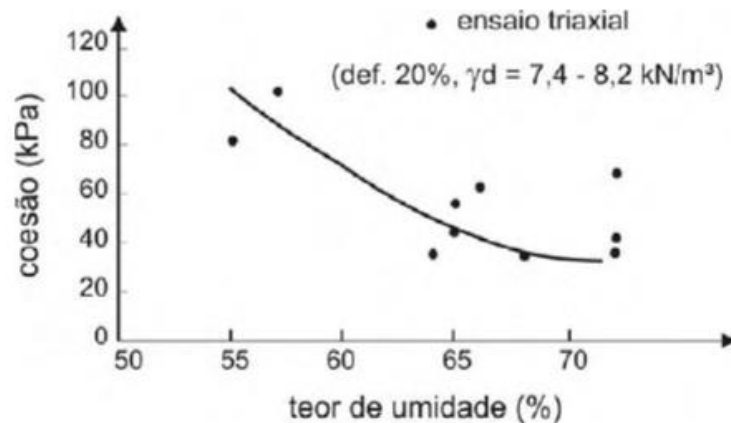
Figura 3.21 – (A) Variação da resistência com o tempo (König e Jessberger, 1997); (B) Proposta apresentada por Walter (1992)



Fonte: Palma (1995)

O teor de umidade dos resíduos sólidos urbanos é apontado como outro fator condicionante dos parâmetros de resistência (GABR e VALERO, 1995), atuante no caso de inexistência da matriz reforço, ou seja, ausência de plásticos, tecidos e outros materiais fibrosos. Os autores observaram redução significativa da parcela de coesão, de 100 kPa para 40 kPa, quando o teor de umidade foi acrescido de 55% para cerca de 65%, conforme pode ser observado na Figura 3.22.

Figura 3.22 – Variação da coesão com o teor de umidade



Fonte: Gabr e Valero (1995)

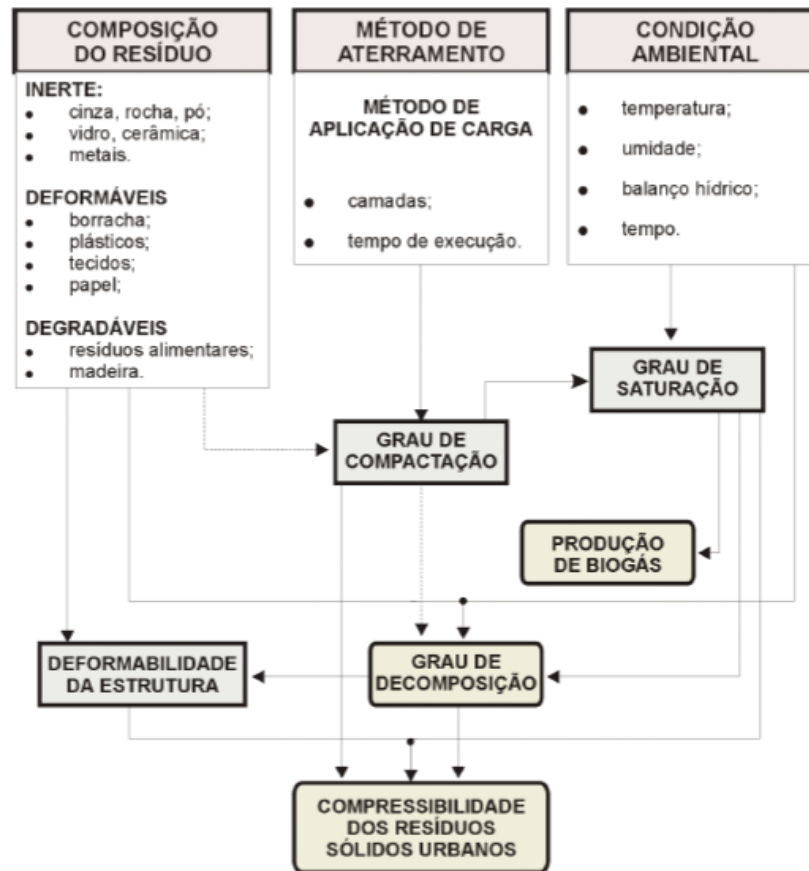
3.5.2 Compressibilidade

Os aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos consistem em um maciço heterogêneo e poroso com comportamento peculiar devido aos diferentes tipos de resíduos nele presentes (metais, plásticos, papéis, vidros, têxteis, resíduos orgânicos, pedras, solos, etc.) e da degradação dos mesmos com o passar do tempo através de fenômenos físico-químicos e biológicos. Tais fenômenos são controlados por um conjunto de fatores como, composição e umidade dos RSU, disponibilidade de nutrientes para crescimento microbológico, detalhes de projeto e operação do aterro (compactação, cobertura diária, sistema de coleta de gases e líquidos) e condições climáticas (VAN MEERTEN, SELLMEIJER e PEREBOOM, 1995).

As transformações biológicas resultam na alteração de muitos componentes sólidos presentes nos RSU em gases, líquidos e sólidos inorgânicos e orgânicos relativamente inertes (TCHOBANOGLIOUS, THIESEN e VAN IMPE, 1993). Dessa forma, além da compressibilidade instantânea promovida pelas cargas aplicadas na deposição de materiais no aterro, ocorre redução no volume do material depositado pelas transformações biológicas, que chegam a reduzir cerca de 25% da massa total por meio da geração de biogás (GANDOLLA et al., 1994).

A Figura 3.23 apresenta os fatores que influenciam a compressibilidade dos RSU, bem como a inter-relação existente entre eles na visão de Grisolia, Gasparini e Saetti (1993).

Figura 3.23 – Esquema da inter-relação dos fatores que afetam a compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos



Fonte: Grisolia, Gasparini e Saetti (1993)

A complexidade dos fatores que influenciam os recalques em aterros sanitários tem sido academicamente muito discutida: Sowers, 1973; Yen e Sconlon, 1975; Coduto e Huitric, 1990; Massacci et al., 1993; Gandolla et al., 1994; Dunn, 1995; Santos e Presa, 1995; Manassero, Van Impe e Bouazza, 1996; Bouazza, Van Impe e Haegeman, 1996; Van Impe, 1998; Carvalho, 1999; dentre outros.

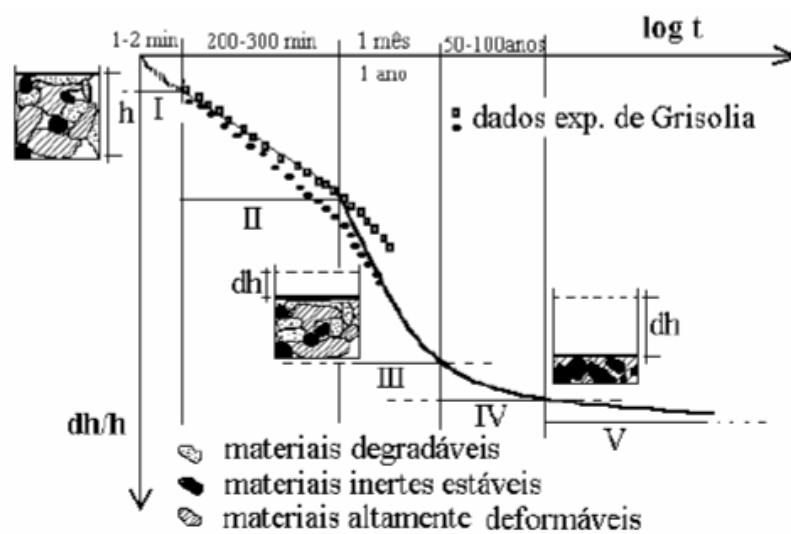
Manassero, Van Impe e Bouazza (1996) preconizaram que o mecanismo de recalque em aterros sanitários pode ser configurado pelas seguintes fases:

1. Compressão mecânica consequente do rearranjo e da fragmentação de elementos sólidos devido ao peso dos materiais de cobertura e do próprio peso dos RSU;
2. Mudança de volume resultante da migração de pequenas partículas para os vazios maiores;
3. Comportamento viscoso e fenômeno de consolidação envolvendo o esqueleto e as partículas individuais, ou seja, os componentes;

4. Redução do volume promovido pela biodegradação do material orgânico;
5. Colapso dos componentes devido aos fenômenos de corrosão, oxidação e outros processos de degradação dos componentes inorgânicos;
6. Dissipação da pressão neutra de líquidos e gases no interior do maciço.

De acordo com Grisolia e Napoleoni (1996), os resíduos sólidos, igualmente aos solos, são meios multifásicos composto de elementos sólidos, líquidos e gasosos, contudo, na parte sólida dos RSU é possível identificar três distintas classes de materiais, os materiais inertes estáveis (metais, vidros e entulhos), materiais altamente deformáveis (papelão, plástico e têxteis) e os facilmente degradáveis ou putrescíveis. Frente a estas considerações, os autores propuseram uma curva teórica subdividida em fases, a fim de explicar os mecanismos controladores do recalque em depósitos de RSU, apresentada na Figura 3.24.

Figura 3.24 – Curva teórica de compressibilidade do RSU



Fonte: Grisolia e Napoleoni (1996)

As fases retratadas são descritas como:

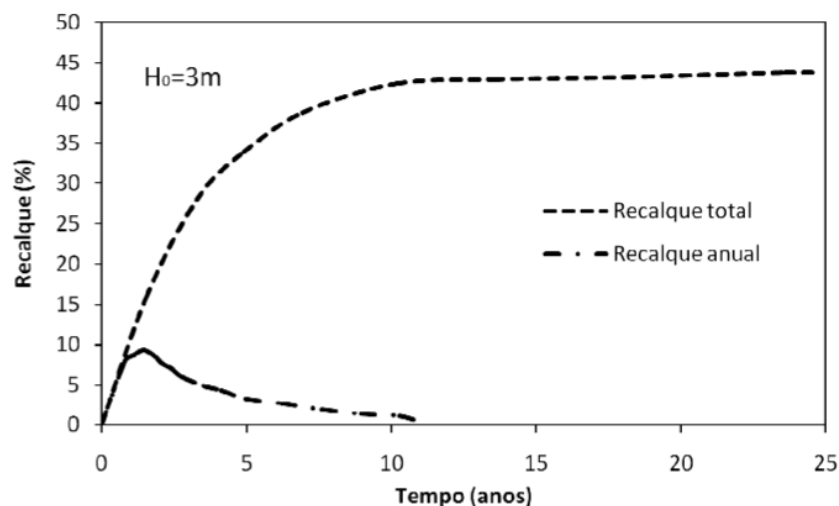
- Fase I – Deformação inicial, redução da macroporosidade;
- Fase II – Recalque residual dos materiais altamente deformáveis e deslocamento dos inertes estáveis;
- Fase III – Deformação lenta e decomposição da matéria orgânica;
- Fase IV – Deformação concluída; e
- Fase V – Deformação residual.

A deformação do maciço de RSU dos aterros sanitários ao longo do tempo é determinada por meio da teoria da consolidação unidirecional, também utilizada para solos, e a compressão total é resultante da somatória da compressão inicial, primária e secundária (SOWERS, 1973; SIMÕES et al., 1996). A compressão inicial ou imediata representa a condensação dos vazios e dos componentes pelas cargas impostas e pelo processo de operação do aterro e é mencionada através da teoria da elasticidade. Na compressão primária é quantificada por intermédio da teoria clássica de Terzaghi, a drenagem dos líquidos presentes no aterro. Por fim, tem-se a compressão secundária, que dimensiona os recalques resultantes da degradação físico-química e biológica que ocorrem no maciço, calculados a partir de uma relação linear com o logaritmo do tempo, assim como em solos.

A previsão de recalques em maciços de resíduos sólidos urbanos é complexa e envolve variáveis de difícil quantificação, de acordo com Grisolia e Napoleoni (1996), a compressão imediata está vinculada a composição gravimétrica dos resíduos e da forma em que estão dispostos no aterro, entretanto, é difícil acompanhar e interpretar os dados obtidos durante a construção dos aterros sanitários. Segundo os autores, a interpretação das medidas torna-se possível após a conclusão do aterro.

Grisolia e Napoleoni (1996) defendem ainda que os depósitos de RSU recalcam cerca de 10 a 30% somente sob a ação de seu peso próprio, e que cerca de 90% dos recalques totais esperados ocorrem nos dez primeiros anos após o fechamento do aterro. Tal afirmação foi respaldada por Gandolla et al. (1994), através dos resultados obtidos em ensaios com células experimentais, apresentado na Figura 3.25.

Figura 3.25 – Recalques total e anual em RSU



Fonte: Gandolla et al. (1994)

Em se tratando do recalque a longo prazo, este depende essencialmente da taxa de decomposição da matéria orgânica e do comportamento viscoso dos resíduos. A taxa de biodegradação por sua vez, está relacionada com inúmeros parâmetros, incluindo o grau de compactação do aterro, que pode reduzir significativamente o recalque (KNOCHENMUS, WOJNAROWICZ e VAN IMPE, 1998). Em contrapartida, a redução da quantidade de poros existentes também diminui as reações biológicas, resultando em uma baixa taxa de recalque no tempo.

Os dados publicados referentes às propriedades de compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos são bastante escassos, devido à dificuldade de aplicar o conceito da teoria clássica de adensamento utilizada nos solos (KNOCHENMUS, WOJNAROWICZ e VAN IMPE, 1998). Normalmente, são utilizados ensaios se laboratório, ensaios in situ e dados de monitoramento de aterros existentes para determinar a compressibilidade.

A deficiência dos ensaios laboratoriais e in situ está no curto tempo de duração dos ensaios e na incapacidade de reproduzir todos os aspectos relativos aos mecanismos de compressão que ocorrem dentro do maciço. Na maior parte das vezes, esses ensaios determinam apenas o recalque mecânico, referente à mudança de tensão efetiva e sobrecarga, desconsiderando ou considerando apenas parcialmente os recalques relativos à degradação dos RSU (KÖNIG E JESSBERGER, 1997).

Comparativamente, o monitoramento in situ do recalque é mais realista e representativo para estudar os processos de compressibilidade dos resíduos sólidos urbanos do que os ensaios laboratoriais, isso porque é difícil reproduzir os processos de compressão resultantes da degradação dos componentes com o tempo, devido aos abundantes fatores biológicos e físico-químicos envolvidos nesse processo (GRISOLIA e NAPOLEONI 1996).

3.6 MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Talude é qualquer superfície de terreno inclinado, podendo ter origem natural ou antrópica. A partir do momento em que o terreno não é mais horizontal existirá uma força gravitacional não nula atuando sobre ele que poderá provocar rotura do talude e movimentá-lo, caso esta componente horizontal seja suficientemente grande (SILVA, 2014). Resumidamente, para que haja deslocamento do solo as forças gravitacionais atuantes tem que superar a resistência ao cisalhamento do solo ao longo de uma dada superfície no interior do maciço.

Desta maneira, é essencial calcular e quantificar a segurança dos taludes, sejam eles naturais ou resultados de escavações e de aterros. A este processo que implica na determinação e comparação da tensão de corte que é mobilizada ao longo da mais provável superfície de ruptura com a resistência ao corte do solo, damos o nome de análise de estabilidade de taludes (HUANG, 2014).

Na literatura estão presentes os mais diversos métodos de avaliação de estabilidade de taludes, a escolha do melhor método dependerá da escala de trabalho, da disponibilidade de tempo, da quantidade de dados presentes no trabalho e dos recursos financeiros (AHRENDT, 2005). No presente trabalho serão analisados os métodos de estabilidade determinísticos.

As análises determinísticas para a estabilidade de taludes são expressas com base em um coeficiente ou fator de segurança (F_s) que relaciona as tensões cisalhantes mobilizadas e a resistência ao corte (GERSCOVICH, 2012). A definição mais utilizada para o fator de segurança está apresenta na Equação 3.4 (DUNCAN e WRIGHT, 2005).

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde:

F_s : fator de segurança;

τ_f : resistência ao cisalhamento do solo;

τ_d : tensões cisalhantes desenvolvidas ao longo da superfície de ruptura requeridas para o equilíbrio.

De acordo com SCHULER (2010), fatores de segurança maiores do que 1,0 retratam condições de estabilidade, valores iguais a 1,0 se apresentam no limite de estabilidade e valores menores do que 1,0 não possuem significado físico.

A norma técnica brasileira de Estabilidade de Encostas (ABNT NBR 11.682/2009) recomenda alguns valores de fatores de segurança mínimos que devem ser aplicados em projetos de taludes e encostas, levando em consideração o grau de segurança já presente no local de implementação da obra, separados em locais com necessidade de alto, médio e baixo fator de segurança.

Os territórios com necessidade de alto grau de segurança devem possuir fator de segurança de projeto mínimo de 1,50 e representam as zonas próximas à edificações habitacionais, instalações industriais, obras de arte, condutos, linhas de transmissão de energia, torres de sistemas de comunicação, obras hidráulicas de grande porte, estações de tratamento de água de abastecimento urbano ou esgoto sanitário, rodovias e ferrovias dentro do perímetro urbano de cidades de grande porte, vias urbanas e rios e canalizações pluviais em áreas urbanas densamente ocupadas e situações similares.

São consideradas áreas com necessidade média de segurança todos os locais acima citados, desde que haja entre o talude e a região a ser ocupada, um espaço de atividade não permanente que sirva como área de segurança. Estão inclusos nesta categoria também, as localidades com proximidade de leito de ferrovias e de rodovias fora do perímetro urbano, corpo de diques de reservatórios de águas pluviais com habitações próximas e rios em áreas imediatamente a jusante do perímetro urbano de cidades de grande porte sujeitas a inundações. Nestes casos, o fator de segurança mínimo para a execução de projetos é de 1,30.

Por fim, nos locais onde o grau de segurança já é alto, o FS mínimo deve ser de 1,15 e fazem menção as zonas onde são instituídos procedimentos capazes de prevenir acidentes em rodovias, túneis em fase de escavação, minas, bacias de acumulação de barragens e canteiros de obras em geral.

As análises determinísticas de estabilidade de taludes são conduzidas levando em consideração duas lógicas, os métodos de equilíbrio limite (LEM) e os métodos de elementos finitos (FEM), também chamado de método das fatias. Ambos os métodos se distinguem, pois, os FEM baseiam-se nas relações de tensão-deformação existente entre os materiais, ao passo que os LEM, são fundamentados no equilíbrio estático de forças e/ou momentos. Este último é o método mais tradicional e utilizado devido a facilidade de aplicação e o acúmulo de experiência dos profissionais (TONUS, 2009).

Os estudos de equilíbrio limite investigam a estabilidade de uma massa qualquer de solo, ou rocha, tomando a existência de uma ruptura inicial ao longo de uma potencial superfície de ruptura, podendo esta ser plana, circular, poligonal ou mista (SILVA, 2011). Em princípio, assume-se que a superfície de deslizamento origina uma massa potencialmente instável, na qual devem ser estimadas as forças atuantes e as resistentes sob essa superfície, a fim de atingir o equilíbrio de forças.

Massad (2003) aponta as principais considerações que os métodos de equilíbrio limite apresentam:

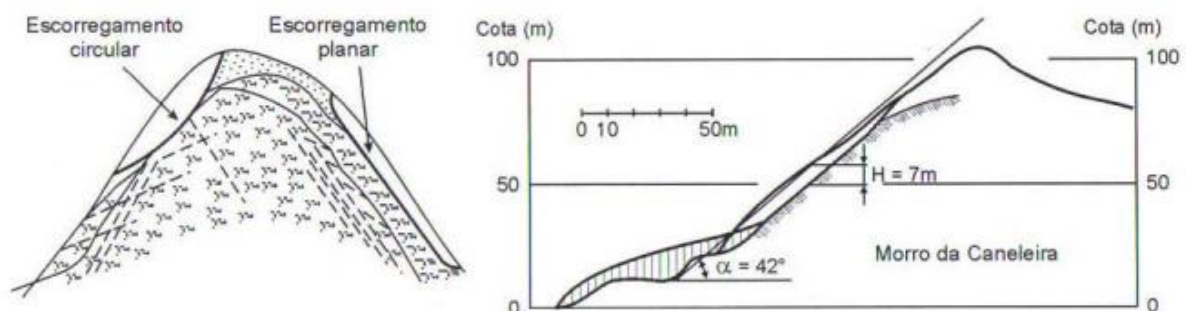
- O comportamento do solo como material rígido-plástico que rompe bruscamente sem se deformar;
- A validade das equações de equilíbrio estático até a iminência da ruptura, onde o processo passa a ser dinâmico; e
- A não alteração do coeficiente de segurança ao longo da superfície de ruptura.

O método de elementos finitos constitui em segmentar o talude em fatias e analisar a estabilidade da massa levando em consideração o equilíbrio estático de cada fatia, bem como o equilíbrio global da massa abaixo da superfície de ruptura assumida. Utilizando essa teoria foi possível simplificar problemas com geometrias de taludes complexas, com heterogeneidade de componentes e influência de cargas externas (FREDLUND e KRAHN, 1977)

3.6.1 Método do talude infinito

O método do talude infinito assume que a relação entre as grandezas geométricas do talude, extensão e espessura, são muito grandes, por essa razão este modelo tem sido bastante aplicado em análise de encostas naturais (AHRENDT, 2005). Nos taludes infinitos a linha potencial de ruptura se manifesta paralelamente à superfície do terreno, conforme exposto na Figura 3.26 (MASSAD, 2003).

Figura 3.26 – Exemplo de trecho de escorregamento planar de um talude infinito



Fonte: Massad (2003)

O fator de segurança é determinado segundo a Equação 3.5.

$$F_s = \frac{c + [\gamma \cdot h \cdot \cos^2(\alpha - u)] \operatorname{tg} \phi}{\gamma \cdot h \cdot \operatorname{sen} \alpha \cdot \cos \alpha} \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

c: coesão ao longo da superfície de ruptura;

α : ângulo da superfície de ruptura;

ϕ : ângulo de atrito interno do solo ao longo da superfície de ruptura;

γ : peso específico do solo;

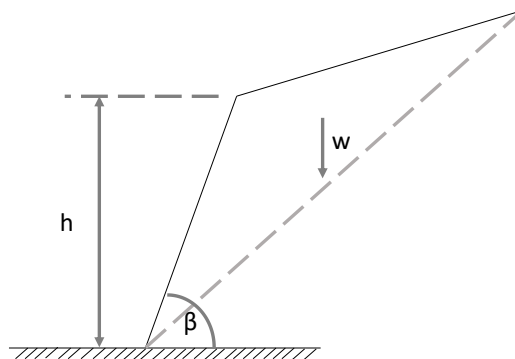
h: profundidade do solo; e

u: poropressão.

3.6.2 Método de Culmann

Este método apoia-se na hipótese de que a superfície de ruptura planar passa pela base do talude, além disso, assume que a massa de solo está seca, não havendo, portanto, a presença da poropressão (MASSAD, 2003). Na Figura 3.27 está apresentado a geometria de um talude pelo método de Culmann com talude de inclinação β .

Figura 3.27 – Desenho esquemático do método de Culmann



Uma vez conhecida a geometria do talude e escolhida a superfície de ruptura, podemos analisar as forças participantes do equilíbrio da cunha (peso (w), coesão e atrito) utilizando a Equação 3.6, apresentada por Massad (2003):

$$\frac{c}{\gamma \cdot h} = \frac{1 - \cos(\beta - \phi)}{4 \cdot \sin\beta \cdot \cos\phi} \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde:

c: coesão ao longo da superfície de ruptura;

β : ângulo da superfície do talude;

ϕ : ângulo de atrito interno do solo ao longo da superfície de ruptura;

γ : peso específico do solo; e

h : profundidade do solo.

3.6.3 Método de Fellenius

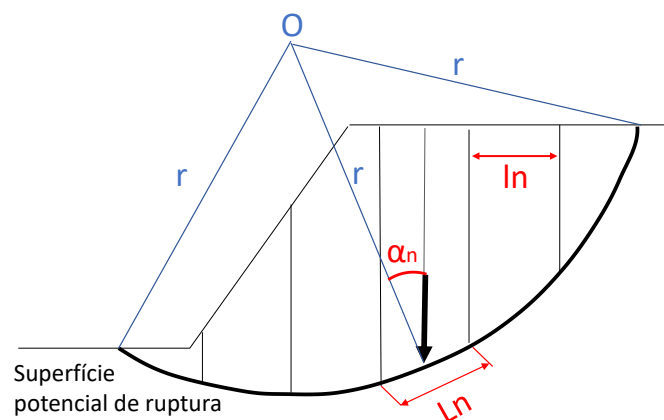
O método de Fellenius é o primeiro e mais simplório método das fatias criado, nele o fator de segurança é obtido através de uma equação linear, processo permitido pela segmentação do volume existente acima da superfície de escorregamento em fatias verticais (FIORI e CARMIGNANI, 2009; SILVA, 2014).

As forças normais e de corte resultantes da interação inter-fatias são consideradas como paralelas à base da lamela e com mesma magnitude, sendo desconsideradas no cálculo do fator de segurança (BORGATTO, 2006). Assim sendo, esse critério negligencia as forças nas laterais das fatias e não satisfaz o equilíbrio das forças horizontais e verticais (REMÉDIO, 2014), levando a resultados bem conservadores (TONUS, 2009).

3.6.4 Método Simplificado de Bishop

O método de Bishop simplificado proposto em 1955, por Bishop, tem por base o modelo de Fellenius, mas se diferencia por considerar as forças horizontais existentes entre as fatias, mas ainda é considerado um método não rigoroso (DAS 2007). Estão apresentadas na Figura 3.28, a seguir, as forças atuantes em uma fatia.

Figura 3.28 – Forças atuantes no Método Simplificado de Bishop



Fonte: adaptado de Remédio (2014)

A quantificação do fator de segurança é realizada por meio das Equações 3.7 e 3.8. É possível observar que o FS está presente em ambas as relações matemáticas, dessa forma, adota-se um FS para a segunda expressão e em seguida calcula-se o FS da primeira equação, se os dois valores obtidos estiverem próximos o resultado é aceito, do contrário, repete-se o procedimento (MASSAD, 2003).

$$F_S = \sum \frac{[(c' \cdot l_n + P_n \cdot \tan \phi) \frac{1}{m_{an}}]}{\sum P_n \cdot \text{sena}_n} \quad \text{Equação 3.7}$$

$$m_{an} = \text{cosa}_n + \frac{\tan \phi \cdot \text{sena}_n}{F_S} \quad \text{Equação 3.8}$$

Onde:

c' : coesão ao longo da superfície de ruptura;

ϕ : ângulo de atrito interno do solo ao longo da superfície de ruptura;

P_n : peso da fatia;

L_n : comprimento da base da fatia;

l_n : comprimento da fatia; e

α_n : ângulo entre o raio da superfície de ruptura e o eixo vertical da fatia.

Segundo Silva (2010), o erro intrínseco deste método raramente ultrapassa os 7%, por isso é considerado bastante preciso frente a outros métodos. Tonus (2009) realizou estudos de estabilidade em uma encosta coluvionar residual da Serra do Mar paranaense pelos métodos de Bishop e Spencer e alcançou resultados variando apenas na terceira casa decimal. Por essa razão, este método tem sido amplamente utilizado na determinação do fator de segurança de taludes (DAS, 2007).

3.6.5 Método Simplificado de Janbu

Janbu (1956) foi um dos métodos pioneiros para análise de rupturas não circulares. Neste método as forças inter-fatias são consideradas nulas, e adota-se um fator de correção (F_0) a fim de minimizar as imprecisões embutidas nas hipóteses adotadas (TONUS, 2009). De acordo com Fiori e Carmignani (2009), o fator F_0 está associado à geometria da superfície de ruptura estudada, aos parâmetros de coesão e ângulo de atrito e às forças verticais entre as lamelas.

Abaixo, estão retratadas as Equações 3.9 e 3.10 para o cálculo do FS.

$$FS = F_0 \frac{\sum[(c' \cdot ln + (Pn - u_n ln) \tan\phi) \cdot \frac{1}{n_{an}}]}{\sum Pn \cdot \tan\alpha_n} \quad \text{Equação 3.9}$$

$$n_{an} = \cos^2\alpha_n \left(1 + \tan\alpha_n \frac{\tan\phi}{FS}\right) \quad \text{Equação 3.10}$$

Onde:

c' : coesão ao longo da superfície de ruptura;

ϕ : ângulo de atrito interno do solo ao longo da superfície de ruptura;

Pn : peso da fatia;

ln : comprimento da fatia;

u_n : poropressão no centro da base da fatia; e

α_n : ângulo entre o raio da superfície de ruptura e o eixo vertical da fatia.

3.6.6 Método de Spencer

Este método foi apresentado em 1967 e é considerado rigoroso por atender todas as equações de equilíbrio estático (forças e momentos). Além disso, é aplicado para superfícies de deslizamentos circulares, da mesma forma que o Método de Bishop (CRUZ, 2004).

Em comparação à Bishop, o método de Spencer é considerado mais preciso (HO, 2014), visto que o primeiro avalia apenas as equações de equilíbrio com relação ao momento, enquanto que a segunda leva em consideração também, as forças de interação entre as fatias (DAS, 2007). As forças existentes entre as fatias são paralelas entre si e possuem ângulo constante, assim como o fator de segurança e são obtidos de forma iterativa até que o equilíbrio de forças seja satisfeito para todas as fatias, sendo, portanto, necessário a utilização de ferramentas computacionais para resolvê-lo (USACE, 2003). A expressão referente a este método está apresentada na Equação 3.11.

$$Q = \frac{\frac{c' \cdot ln}{FS} + \frac{(Pn \cdot \cos\alpha_n - u_n \cdot ln) \tan\phi}{FS} - Pn \cdot \sin\alpha_n}{\cos(\alpha_n - \theta_n) \cdot \left[1 + \frac{\tan\phi \cdot \tan(\alpha_n - \theta_n)}{FS}\right]} \quad \text{Equação 3.11}$$

Onde:

Q : resultante da força de interação entre as fatias;

c' : coesão ao longo da superfície de ruptura;

ϕ : ângulo de atrito interno do solo ao longo da superfície de ruptura;

P_n : peso da fatia;

l_n : comprimento da base da fatia;

u_n : poropressão no centro da base da fatia;

α_n : ângulo entre a base da fatia e a horizontal; e

θ_n : ângulo entre a resultante Q da fatia e a horizontal.

3.6.7 Método de Morgenstern e Price

O método de Morgenstern e Price considera que as fatias do volume da superfície de ruptura possuem largura infinitesimal, nas quais o ângulo de atrito respectivo à resultante das forças exercidas pelas fatias adjacentes não é constante, e é tido como rigoroso (GERSCOVICH, 2012). O fator de segurança é estimado pelo somatório das forças tangenciais e normais às bases das fatias e dos momentos existentes ao redor do centro da base de cada fatia (SILVA, 2014).

A resolução do método requer a adoção arbitrária de uma direção para a resultante de forças de cisalhamento e normais existente entre as fatias (SILVA, 2011), sendo essas suposições e as equações de equilíbrio estático as mesmas utilizadas na formulação do método geral de equilíbrio limite. Contudo, há diferenças na maneira em que a força na base de cada fatia é aplicada (FREUDLUND, KRAHN e PUF AHL, 1981).

O método geral de equilíbrio limite foi desenvolvido anos mais tarde que os outros métodos, por volta dos anos 70, por Fredlund e Krahn. Este mecanismo é considerado uma extensão dos métodos de Spencer e Morgenstern e Price, onde assume-se uma relação entre a inclinação das forças inter-fatias e calcula-se dois fatores de segurança, um considerando o equilíbrio dos momentos e outro o equilíbrio das forças. A principal vantagem deste método é que ele permite comparar resultados dos valores de fator de segurança obtidos por diferentes métodos em um mesmo gráfico (FREDLUND e KRAHN, 1977).

Ferreira (2012) apresenta a fórmula que representa este modelo, expressa na Equação 3.12.

$$\frac{c' \cdot (1 + \tan^2 \alpha_n)}{F_s} + \frac{\tan \phi}{F_s} \left[\frac{dP}{l} + \frac{dX}{l} - \frac{dE}{l} \tan \alpha_n - u_n (1 + \tan^2 \alpha_n) \right] = \frac{dE}{l} + \frac{dX}{l} \tan \alpha_n + \frac{dP}{l} \tan \alpha_n \quad \text{Equação 3.12}$$

Em que as variáveis X e E representam as forças presentes entre as fatias e estão ligadas pela seguinte relação:

$$X = \lambda f(x).E$$

Onde:

c' : coesão ao longo da superfície de ruptura;

ϕ : ângulo de atrito interno do solo ao longo da superfície de ruptura;

P : peso da fatia;

l : comprimento da fatia;

u_n : poropressão no centro da base da fatia; e

α_n : ângulo entre a base da fatia e a horizontal.

A solução é obtida realizando-se um processo iterativo a partir da integração das diferenciais (REMÉDIO, 2014).

3.6.8 Comparação entre os métodos de análise de estabilidade de taludes

A propagação na quantidade de métodos existentes para análise de estabilidade de taludes, bem como o aperfeiçoamento dos softwares utilizados para estima-los, possibilita comparar os resultados a fim de eleger o melhor método para cada caso especificamente (REMÉDIO, 2014). A literatura ainda se encontra carente quanto a comparações entre métodos aplicados à análise de estabilidade de taludes em aterros sanitários, mas alguns outros trabalhos comparativos executados permitem compreender as diferenças e semelhanças existentes entre as diferentes metodologias (TONUS, 2009; MENEZES, 2012; FERNANDES e SILVA, 2010; HORST, 2007).

Horst (2007) executou um ensaio a partir de um caso hipotético a fim de comparar os resultados através dos métodos de Fellenius, Bishop Simplificado e Janbu Simplificado. O autor adotou valores aleatórios para os principais fatores atuantes na estabilidade de um talude, estas variáveis, bem como os valores adotados estão apresentados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Faixa de valores adotados para comparação dos métodos

Variáveis estudadas	Faixa de valores definidos				
Altura (m)	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0
Inclinação (°)	15,0	30,0	45,0	60,0	75,0
Ângulo de atrito (°)	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0
Coesão (kPa)	0,0	10,0	20,0	30,0	40,0
Peso específico do solo (N/m ³)	14,0	16,0	18,0	20,0	22,0

Fonte: Modificado de Horst, 2007

O autor realizou o cruzamento das informações acima apresentadas e obteve resultados de fatores de segurança distintos para cada método. Em suma, os resultados obtidos pelo método de Bishop Simplificado foram os menos conservadores, por serem maiores que os apresentados pelos outros dois métodos. Entre os resultados das metodologias de Fellenius e Janbu, houve maior concordância, ainda assim, os FS adquiridos pelo método de Fellenius foram superiores (HORST, 2007).

Tonus (2009) retratou um caso real de um talude pelo qual passam dois oleodutos, um gasoduto e uma linha de transmissão de energia localizado na Serra do Mar paranaense, no município de Guaratuba, no qual foram instalados dispositivos de drenagem e realizadas obras de contenção na superfície após a detecção de sinais de instabilidade. As análises foram realizadas pelos métodos de Fellenius, Janbu simplificado, Bishop simplificado, Morgenstern-Price e Spencer, e foram consideradas a presença, ou não, das estruturas de contenção e as variações do nível d'água.

As observações adquiridas após os ensaios foram (TONUS, 2009):

- Os resultados não apresentaram grandes variações quando o número de grandezas envolvidas foi reduzido, ou seja, desconsideração do dispositivo de contenção e da alteração do nível d'água;
- O aumento gradual no número de variáveis consideradas permite a aproximação dos resultados obtidos pelos métodos mais simplificados (Fellenius e Janbu) frente aos métodos considerados rigorosos (Morgenstern-Price e Spencer);
- O método de Bishop simplificado possui melhor desempenho que os outros métodos mais simples, fornecendo resultados próximos aos métodos mais rigorosos em qualquer situação;
- A metodologia de Bishop apresenta bons resultados mas limita-se por ser restrita às superfícies de escorregamentos circulares.

Na Tabela 3.11 apresentam-se resumidas as características dos principais métodos de equilíbrio limite considerados neste trabalho (FERREIRA, 2012).

Tabela 3.11 – Principais características dos métodos de equilíbrio limite para análise de estabilidade de taludes

Métodos	Superfície de ruptura	Forças horizontais nulas	Forças verticias nulas	Momento nulo	Força E (normal inter-fatias)	Força X (tangencial inter-fatias)	Forças de interação entre fatias
Fellenius	Circular	Não	Sim	Sim	Não	Não	Inexistente
Bishop Simplificado	Circular	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Horizontal
Janbu Simplificado	Qualquer	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Horizontal
Spencer	Circular	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Constante
Morgenstern-Price	Qualquer	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Variável

Fonte: modificado de Ferreira (2012)

Os métodos são classificados como rigorosos ou não rigorosos de acordo com o número de equações da estática consideradas no cálculo do fator de segurança. Desta forma, podemos observar que os três primeiros métodos da Tabela 3.11 são métodos não rigorosos, sendo, os métodos de Spencer e Morgenstern-Price rigoroso.

Majoritariamente, pesquisando-se na literatura estudos sobre análise de estabilidade de taludes em aterros sanitários, são utilizados os métodos convencionais aplicados em solos para os diagnósticos (MAHLER e NETO, 2000; OLIVEIRA, 2002; BORGATTO, 2006; RIBEIRO, 2007; SCHULER, 2010).

De acordo com especialistas renomados na área geotécnica, conjuntamente com orientações de docentes e pesquisadores da EESC-USP de São Carlos/SP, os métodos de Janbu, Spencer e Bishop Simplificado tem sido utilizados com maior frequência para este tipo de estudo ultimamente.

Para alguns pesquisadores, como é o caso de Oliveira (2002) a escolha pelo método de Bishop Simplificado se dá por ser um método "consagrado". Para Remédio (2014) a popularidade do método se dá pela simplicidade e pela possibilidade de obter valores de coeficiente próximos de valores obtidos por métodos mais precisos.

A aplicação dos métodos convencionais que fornecem condições de estabilidade mais conservadoras pode ser utilizada, desde que estes apresentem variações confiáveis para as propriedades dos RSU e valores de fatores de segurança aceitáveis (FARIA, 2002; LOUREIRO, 2005), de maneira que não haja a previsão de informações errôneas que possam inviabilizar economicamente alguns projetos (TONUS, 2009).

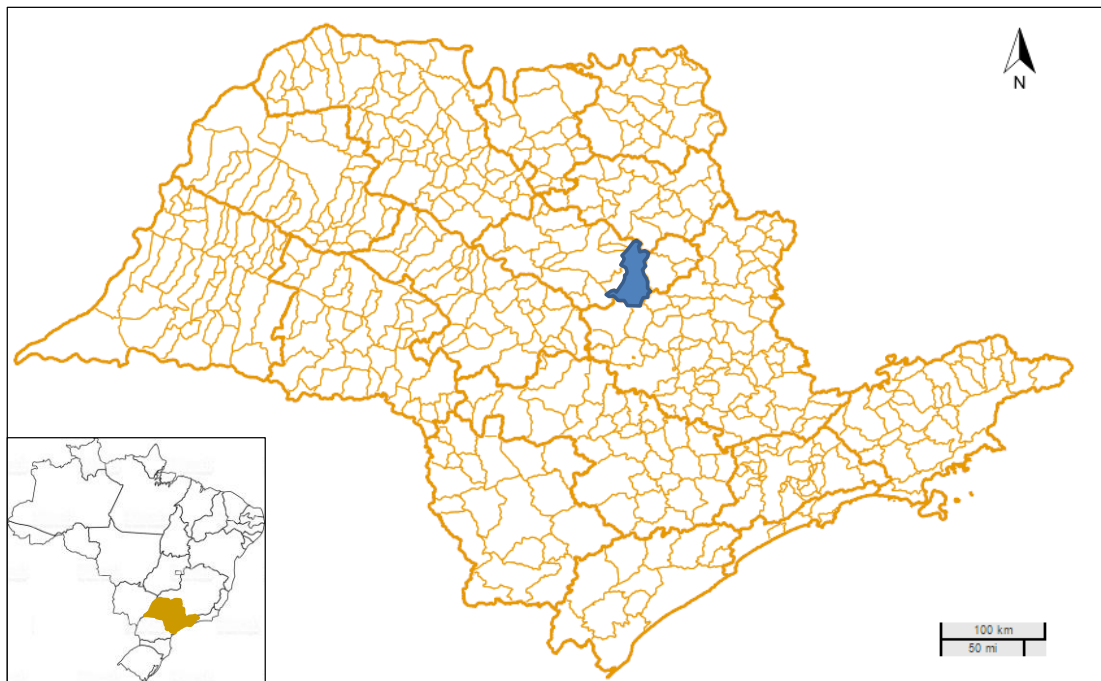
3.7 LOCAL DE ESTUDO

3.7.1 Dados gerais

O município de São Carlos foi fundado em 04 de novembro de 1857 e localiza-se a 230 km da capital, na porção centro-leste do Estado de São Paulo (IBGE CIDADES, 2017). Segundo estimativas do último censo do IBGE (2010), o município tem 221.950 habitantes e possui uma área de cerca de 1.137 km², constituindo a 13^a maior cidade do interior do estado em número de residentes, e crescimentos demográfico de cerca de 2,4 % ao ano. Devido à presença de grandes empresas, bem como duas universidades, sua população flutuante chega a atingir 20 mil habitantes (IBGE, 2010).

A localização do município no estado de São Paulo e suas principais características estão descritas a seguir, na Figura 3.29 e Tabela 3.12, respectivamente.

Figura 3.29 – Localização do município de São Carlos e Regiões Administrativas do Estado de São Paulo



Fonte: Adaptado de GeoStudio (2017)

Tabela 3.12 – Características do município de São Carlos

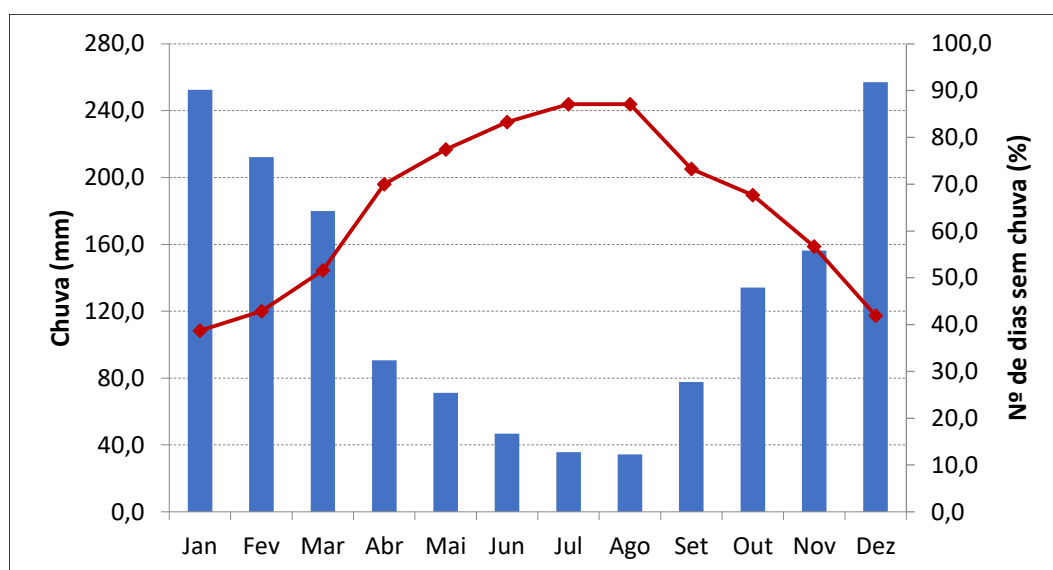
Altitude	máxima (1000 m); mínima (520 m) e média (856 m) (PMSC, 2017)
Coordenadas	Longitude: entre os meridianos 47°30' e 48°30' a Oeste de Greenwich Latitude: entre os paralelos 21°30' e 22°30' ao Sul do Equador (IBGE, 2010)
Limites geográficos	Rincão, Luís Antônio e Santa Lúcia (norte), Ribeirão Bonito e Itirapina (sul), Descalvado e Analândia (leste) e Ibaté, Araraquara e Américo Brasiliense (oeste)
Clima	Tropical de altitude com inverno seco (PMSC, 2017)
Distritos	Santa Eudóxia e Água Vermelha
Vegetação	Cerrado (PMSC, 2017)

3.7.2 Clima

O estado de São Paulo abrange sete tipos climáticos distintos, segundo o estabelecido pela classificação climática de Köppen, obtida a partir de dados mensais pluviométricos e termométricos. Dentre estas classificações, a mais presente e que abrange o município de São Carlos, bem como a região central do Estado, é a Cwa, definida pelo clima tropical de altitude com chuvas no verão e seca no inverno (MIRANDA, 2005).

A partir dos dados da série histórica de 1970 a 2014 obtidos pela Estação nº 2247109 operada pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE-SP), construiu-se o gráfico pluviométrico apresentado na Figura 3.30. Ressalta-se que os dados tratados eram diários e que no período de março de 1996 a setembro de 2013 houve ausência de medições.

Figura 3.30 – Pluviometria do município de São Carlos



Fonte: Hidroweb/ANA (2017)

É possível observar através da Figura 3.29 que os meses de abril a setembro correspondem ao período de seca, enquanto que os meses de outubro a março fazem referência ao período chuvoso e que as precipitações máximas mensais chegam a atingir 250 mm.

De acordo com o Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI/UNICAMP), a precipitação média mensal do município encontra-se próxima a 1.400 mm, sendo as mínimas e máximas mensais iguais a 16,0 mm e 270 mm, respectivamente. Ainda em concordância com o centro de pesquisas, as temperaturas médias mensais estão entre 18,0 e 23,0 °C e as anuais em torno de 21,1 °C.

3.7.3 Caracterização dos resíduos sólidos domiciliares em São Carlos

O município de São Carlos tem apresentado rápido crescimento demográfico e com isso, aumento da malha urbana até o limite de sua capacidade (FRÉSCA, 2007). Conjuntamente a esses fatores, a evolução da produção de resíduos sólidos urbanos resultou na superlotação e superexploração das áreas destinadas para o descarte dos RSU, havendo necessidade de construir células acima da superfície do terreno para comportar os resíduos do município, visto que não havia previsão de novas áreas para abertura de aterros sanitários, fato que ocorreu com o aterro operado pela VEGA Engenharia Ambiental em 2006 (FRÉSCA, 2007).

A geração média total de resíduos sólidos urbanos da cidade de São Carlos foi de 210,6 toneladas por dia no ano de 2016, conforme dados do Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos da CETESB. Essa produção apresentou crescimento percentual de 0,98 % em relação aos dados levantados no ano anterior (CETESB, 2017; CETESB, 2016).

Segundo o secretário de Desenvolvimento Sustentável, Ciência e Tecnologia, José Galízia Tundisi, em reportagem concedida ao noticiário online A Folha São Carlos e Região, a quantidade de resíduos sólidos descartados chega a 240 toneladas por dia, correspondendo a quase 1 kg de resíduos domésticos por munícipe (A FOLHA, 2017). O Secretário apontou ainda, a necessidade da criação de um plano municipal de resíduos sólidos ou projeto de gestão integrada dos resíduos sólidos para a cidade.

Dois autores realizaram o estudo da composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares do município de São Carlos, Gomes (1989) e Frésca (2007), os resultados obtidos pelos autores estão sintetizados na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 – Caracterização mássica dos resíduos sólidos domiciliares do município de São Carlos/SP

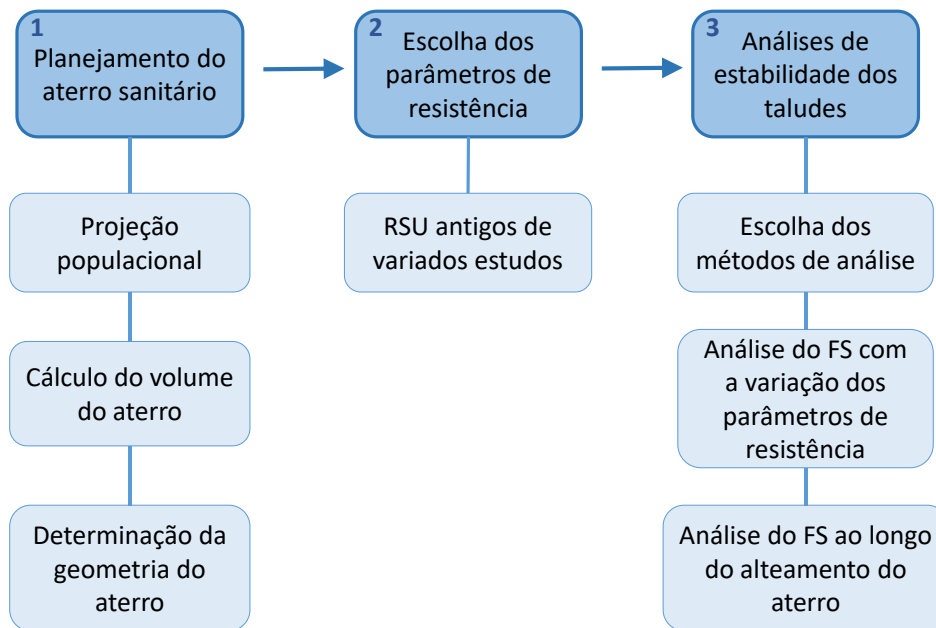
Tipo de material	Porcentagem média em massa (base úmida)	
	Gomes (1989)	Frésca (2007)
Matéria orgânica	56,7	59,8
Papel/papelão	21,3	6,44
Plástico	8,5	10,47
Alumínio e metal	5,4	1,31
Trapos	3,4	-
Madeira, couro, borracha	2,3	-
Vidro	1,4	1,67
Embalagem longa vida	-	0,94
Inertes	1,3	-
Rejeitos/outros	-	20,09

Observa-se nos dados apresentados acima que mesmo após quase 20 anos desde a primeira caracterização da composição gravimétrica dos RSD a predominância do descarte de materiais putrescíveis se manteve. Os materiais que apresentaram redução na disposição final foram o papel/papelão e alumínio/metálico, fato que pode ser atribuído ao crescimento da coleta desses materiais pelas cooperativas e catadores informais.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo divide-se em três etapas, conforme apresentado no fluxograma a seguir (Figura 4.1).

Figura 4.1 – Fluxograma com as etapas da metodologia do trabalho



Fonte: Autor

4.1 PLANEJAMENTO DO ATERRO SANITÁRIO HIPOTÉTICO

4.1.1 Cálculo da quantidade de RSU a ser disposta

Primeiramente, consultou-se os Inventários Estaduais de Resíduos Sólidos Urbanos elaborados pela CETESB, de 2004 até 2015, para coleta de dados. A Tabela 4.1 apresenta os dados obtidos:

Tabela 4.1 – Dados de geração de RSU e população para o município de São Carlos

Ano	RSU (t/d)	Taxa de crescimento da produção de RSU (%)	População (hab)	Taxa de crescimento populacional (%)	Geração per capita (g/hab/d)
2004	120,90	-	210.841	-	573,42
2005	123,00	1,74	214.786	1,871	572,66
2006	125,80	2,28	218.702	1,823	575,21
2007	128,60	2,23	212.956	-2,627	603,88
2008	124,40	-3,27	218.080	2,406	570,43
2009	125,70	1,05	220.463	1,093	570,16
2010	127,80	1,67	221.950	0,674	575,81
2011	129,10	1,02	224.172	1,001	575,9
2012	130,35	0,97	226.322	0,959	575,95
2013	204,29	56,72	236.457	4,478	863,96
2014	206,45	1,06	238.958	1,058	863,96
2015	208,55	1,02	241.389	1,017	863,96

Fonte: Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos (2004 a 2015)

A partir da série histórica analisada, foi realizada a projeção populacional ano a ano de 2016 até 2037 (fim de projeto) pelos métodos aritmético e geométrico de estimativa populacional. As populações finais foram calculadas pelo resultado da média entre as estimativas feitas a partir dos dois métodos de projeções populacionais, conforme as Equações 4.1 e 4.2.

Método Aritmético:

$$P_t = P_2 + ka(t - t_2) \quad ; \quad ka = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} \quad \text{Equação 4.1}$$

Método Geométrico:

$$P_t = P_2 \cdot e^{kg(t-t_2)} \quad ; \quad kg = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{t_2 - t_1} \quad \text{Equação 4.2}$$

Onde:

Pt: população de projeto;

P1 e P2: população inicial e final conhecidas (utilizou-se 221.950 e 241.389 habitantes, segundo o Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos da CETESB);

t1 e t2: ano inicial e final conhecidos (utilizou-se os anos de 2010 e 2015);

t: ano de final de projeto (t = 2037);

ka: taxa de crescimento aritmética; e

kg: taxa de crescimento geométrica.

Os resultados contabilizados estão expostos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Estimativa populacional para o período de projeto pelos métodos aritmético e geométrico

Ano	Proj. Aritmética	Proj. Geométrica	Média
2018	253.052	253.860	253.456
2019	251.109	251.738	251.424
2020	253.538	254.394	253.966
2021	255.968	257.078	256.523
2022	258.398	259.790	259.094
2023	260.828	262.531	261.680
2024	263.258	265.300	264.279
2025	265.688	268.099	266.894
2026	268.118	270.928	269.523
2027	270.548	273.786	272.167
2028	272.977	276.674	274.826
2029	275.407	279.593	277.500
2030	277.837	282.543	280.190
2031	280.267	285.524	282.896
2032	282.697	288.536	285.617
2033	285.127	291.580	288.354
2034	287.557	294.656	291.107
2035	289.987	297.765	293.876
2036	292.416	300.906	296.661
2037	294.846	304.081	299.464

Na segunda etapa, adotou-se os parâmetros para o dimensionamento do aterro, segundo proposto por Recesa (2008) e Santos et al. (2016). Os parâmetros adotados foram:

Horizonte de planejamento	20 anos
Taxa de cobertura de coleta de RSU	100 %
Produção média de RSU por pessoa	0,867 kg/h.d (ano de referência: 2017)
Taxa de crescimento da produção de RSU.....	0,01 %
Densidade dos resíduos compactados	0,8 t/m ³
Taxa de recobrimento de solo	30 % do volume total do aterro

4.1.2 Geometria do aterro sanitário

O método escolhido para a disposição dos resíduos no município de São Carlos foi misto, composto por uma trincheira e camadas em forma de escada acima do nível do terreno, devido à grande quantidade de resíduos gerada na cidade.

A partir do volume útil calculado no item anterior, realizou-se a configuração de dois aterros, com 9 camadas acima do solo e 1 camada abaixo do nível do terreno em formato de tronco de pirâmide. As alturas das camadas foram fixadas em 5,0 metros e variou-se a inclinação do talude, conforme desenhos apresentados nas Figuras 4.2 a 4.6. Referenciou-se como Aterro 1, o que apresenta relação de 1,0 V: 1,5 H e de Aterro 2, o de 1,5 V: 2,0 H.

Figura 4.2 – Vista em planta do desenho dos aterros e informações de cada aterro

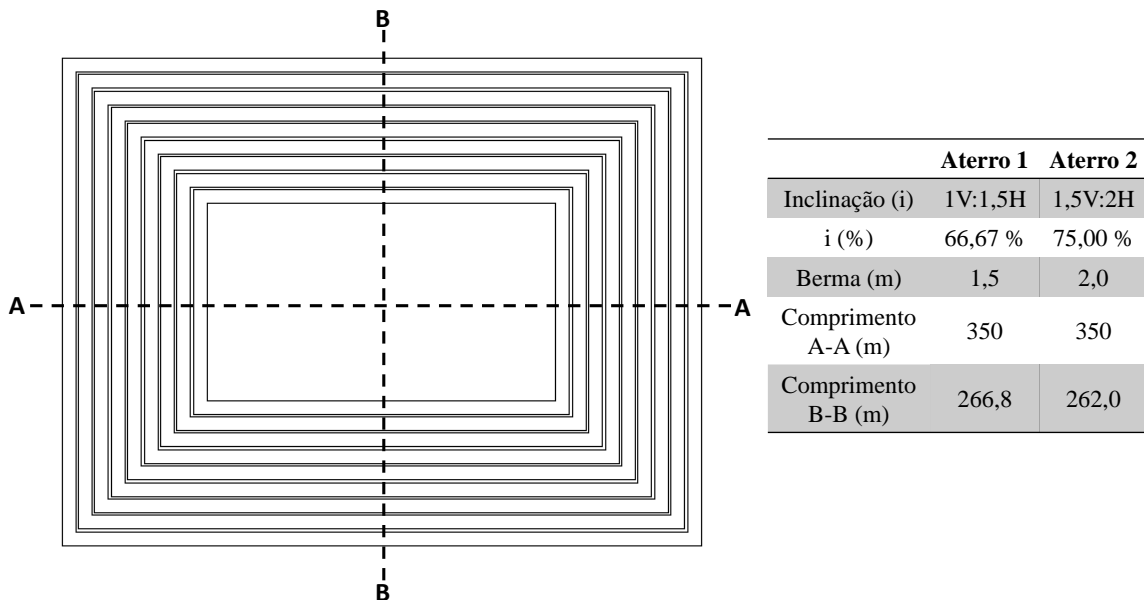


Figura 4.3 – Perfil do corte AA do aterro 1

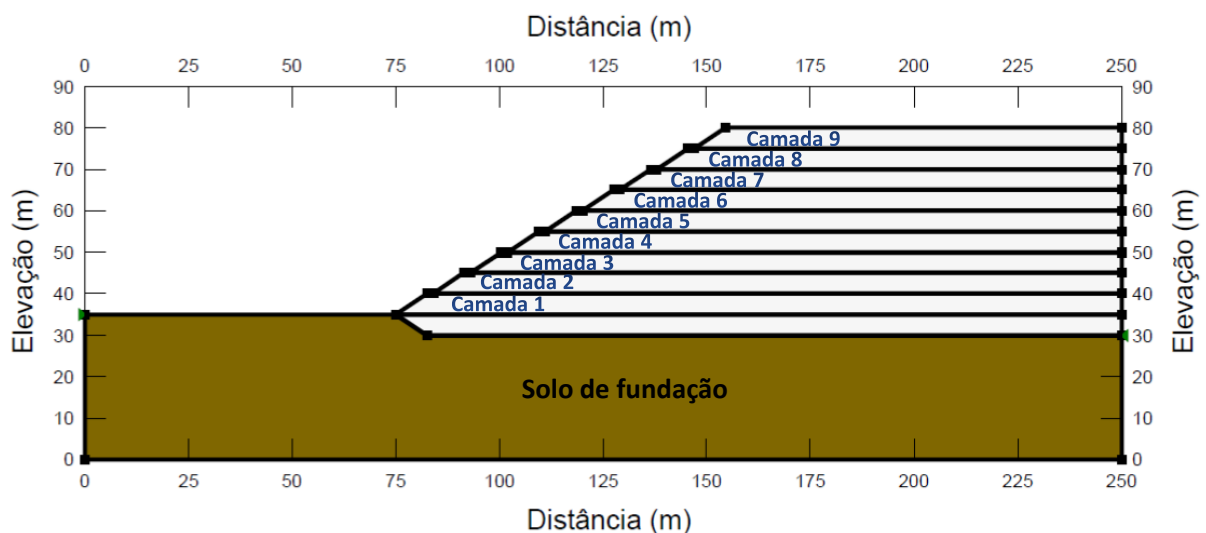


Figura 4.4 – Perfil do corte BB do aterro 1

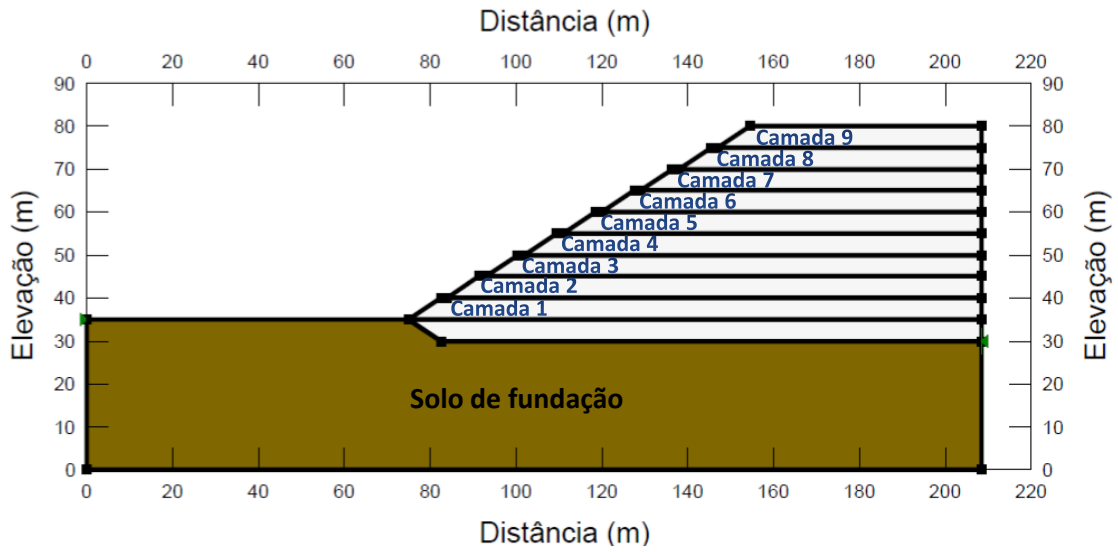


Figura 4.5 – Perfil do corte AA do aterro 2

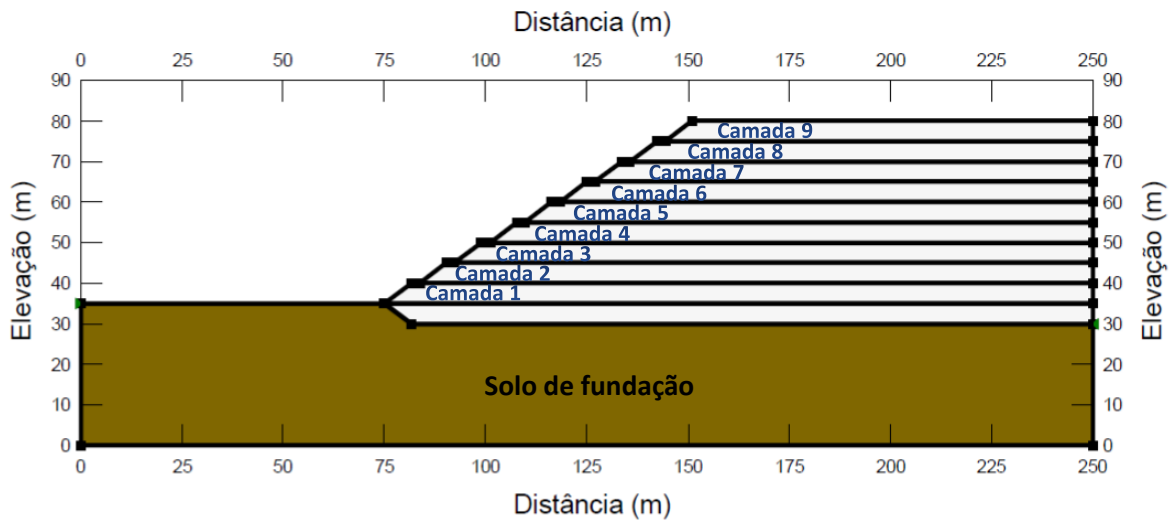
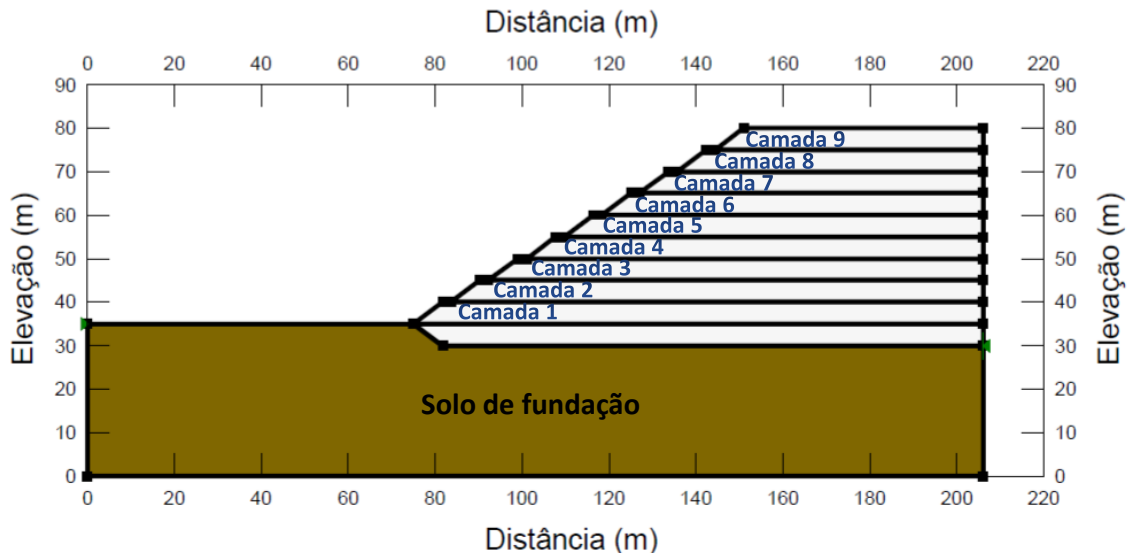


Figura 4.6 – Perfil do corte BB do aterro 2



4.2 ESCOLHA DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Deseja-se calcular o fator de segurança global relativo a estabilidade das seções dos Aterros 1 e 2, apresentadas nas Figuras 4.3 a 4.6; para tais simulações numéricas é imprescindível a obtenção dos parâmetros geotécnicos, como o peso específico dos materiais presentes no maciço (γ), a coesão (c') e o ângulo de atrito interno (ϕ).

A literatura apresenta muitos estudos que indicam valores para os parâmetros físicos, mecânicos e hidráulicos dos RSU, em função do teor de umidade e tempo de disposição. O teor de umidade dos RSU apresenta variações de grande escala ao longo de sua degradação; pois segundo Abreu (2000), na literatura internacional este parâmetro varia de 15 a 130%, já de acordo com o IPT (2001), no Brasil este parâmetro é da ordem de 50%. Conforme já citado na revisão bibliográfica, a umidade do material tem reflexo direto na conformação das pressões neutras do aterro, e influenciam também no peso específico do material. Kaimoto e Cepollina (1996) indicaram para o aterro Bandeirantes, em São Paulo, valores de peso específico do RSU entre 5 e 7 kN/m³. Já Benvenuto e Cunha (1991), após evento de escorregamentos no mesmo aterro, concluiu por meio de retroanálise que em condições normais o peso específico era de aproximadamente 10 kN/m³ e em condições saturadas de 13 kN/m³.

Na seção de análise foram considerados dois materiais distintos: o RSU e o solo de fundação. A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros geotécnicos utilizados para a fundação, considerados constantes ao longo do tempo, baseados nos estudos de Schuler (2010). Destaca-se que o solo de recobrimento foi desconsiderado no estudo por representar uma fração ínfima em relação à quantidade de resíduos existente, cerca de 30 cm, não interferindo na resistência e no resultado das análises de estabilidade de maneira significativa.

Tabela 4.3 – Parâmetros geotécnicos dos materiais utilizados

Material	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
Fundação	18,0	20,0	35,0
RSU	variável	variável	variável

Fonte: Schuler (2010)

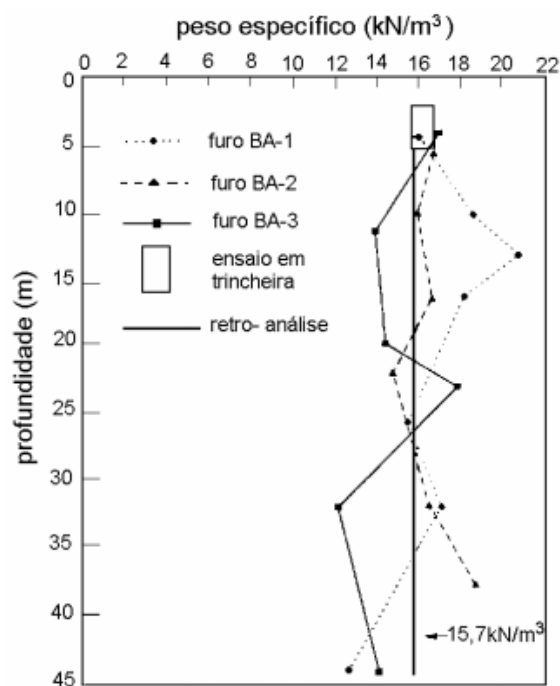
Na definição dos parâmetros de resistência, buscou-se reproduzir valores apresentados por vários autores para resíduos sólidos antigos, conforme apresentado na revisão bibliográfica, itens 3.4.5 (Tabela 3.6) e 3.5.1 (Tabela 3.7). Os dados considerados estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Parâmetros de resistência de RSU antigos de variados autores

Nº conjunto	Parâmetros RSU			Referência	País
	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)		
1	7,0	16,0	33,0	Landva e Clark (1986)	Canadá
2	10,5	16,0	38,0	Landva e Clark (1986)	Canadá
3	10,5	10,0	23,0	Fassett, Leonardo e Repetto (1994)	EUA
4	11,0	20,0	35,0	Benson et al. (1996)	EUA
5	13,0	18,0	22,0	Del Greco e Oggeri (1993)	Itália
6	14,0	19,0	42,0	Landva e Clark (1986)	Canadá
7	15,0	23,0	46,0	Kavazanjian (2001)	EUA
8	16,0	10,0	25,0	Cowland, Tang e Gabay (1993)	Itália
9	17,0	51,0	24,0	Carvalho (1999)	Brasil
10	18,0	23,5	22,0	Kolsch (1995)	Alemanha

É importante destacar que alguns valores de peso específico utilizados pelos autores em suas pesquisas não foram encontrados, estes estão destacados em vermelho na Tabela 4.4 e foram estabelecidos segundo os dados obtidos por Matasovic e Kavazanjian (1998), para um aterro na Califórnia. Os autores empregaram diferentes métodos de ensaio (em trincheiras, furo de sondagem e retroanálise) para estimar o peso específico dos resíduos do aterro e conforme apresentado na Figura 4.7, pode-se observar que os resultados variaram de forma não sistemática entre 12 kN/m³ e 21 kN/m³, sendo o intervalo de 14 kN/m³ a 18 kN/m³ mais presente.

Figura 4.7 – Peso específico in situ obtidos através de ensaios de trincheira, furos de sondagem e retroanálise



Fonte: Matasovic e Kavazanjian (1998)

Por fim, executou-se os modelos computacionais do software SLOPE/W da Geo-Slope International que são fundamentados em diversas metodologias que utilizam análises pelo método do equilíbrio limite, podendo modelar tipos heterogêneos de materiais nas mais diversas geometrias onde por meio de iterações internas, são consideradas várias superfícies de deslizamentos e poropressão (GEO-SLOPE INTERNATIONAL). Através do software determinou-se o fator de segurança mais crítico dos taludes dos aterros em duas análises distintas.

O primeiro estudo verificou a influência da geometria do aterro e dos parâmetros de resistência na sua estabilidade, e foi avaliado pelos métodos de análise de estabilidade não rigorosos de Bishop Simplificado e Janbu, e pelos métodos rigorosos de Spencer e Morgenstern-Price.

Estes métodos foram escolhidos por meio de recomendação de docentes e pesquisadores da EESC/USP de São Carlos-SP, bem como, de alguns estudos da literatura, e buscou abranger métodos rigorosos e não rigorosos, tornando possível comparar os resultados obtidos entre eles.

Na segunda simulação estudou-se a estabilidade do aterro sanitário conforme o seu alteamento, analisando diferentes etapas da construção do aterro ao longo do seu período de funcionamento, conforme apresentado na Tabela 4.5. Ressalta-se que o número de camadas contabilizados encontram-se acima do nível do terreno e que cada camada de RSU possui 5,0 metros de espessura.

Tabela 4.5 – Etapas da construção do aterro avaliadas na segunda análise

Etapas de construção do aterro	Nº de camadas de RSU acima do nível do terreno	Altura do aterro sanitário (m)
1ª	1	5,0
2ª	3	15,0
3ª	5	25,0
4ª	7	35,0
5ª (final)	9 (total)	45,0

Para esta análise foram considerados os conjuntos de parâmetros de resistência do aterro com geometria mais crítica que apresentaram os melhores resultados, os piores e os medianos, conforme as respostas do primeiro estudo; sendo este avaliado pelo método de análise de estabilidade mais rigoroso, o de Morgenstern-Price.

As ponderações feitas em ambos os estudos para as análises de estabilidade foram:

- Desconsideração do nível d'água;
- Desconsideração da poropressão;
- Desconsideração do solo de recobrimento compactado;
- Avaliação de 4.851 superfícies de ruptura;
- Profundidade mínima da superfície de ruptura igual a 10,0 metros na primeira análise e 5,0 metros na segunda análise;
- Número de incrementos em relação ao alcance: 20;
- Número de incrementos do raio: 10;
- Carga sísmica: 10^{-9} ; e
- Cores distintas para cada conjunto de parâmetros de resistência do RSU.

Os resultados de cada uma das análises realizadas estão apresentados no capítulo 5, a seguir.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 VOLUME ÚTIL ESTIMADO PARA O ATERRO SANITÁRIO

O cálculo do volume necessário para a construção do aterro sanitário, foi realizado conforme considerações apresentadas no item 4.1.1 e Tabela 3.1 do item 3.2.3. Os resultados adquiridos estão expostos na Tabela 5.1, que apresenta as etapas que levaram à estimativa do volume útil total necessário para um aterro sanitário na cidade de São Carlos receber resíduos durante a vida útil de 20 anos; o volume útil adquirido foi de 2.821.629,6 m³.

Tabela 5.1 – Cálculo do volume total ano a ano que deverá ser disposto no aterro sanitário fictício para o município de São Carlos

Ano		População anual (hab)	RSU			Solo	Total	
			Quantidade gerada e coletada (t/d)	Quantidade gerada e coletada (t/ano)	Volume compactado disposto no aterro (m³/ano)	Volume de solo de recobrimento - 30% (m³/ano)	Volume total de operação do aterro (m³/ano)	Volume de operação acumulado no aterro (m³/ano)
1	2018	253.456	220,0	80.317,3	100.396,6	30.119,0	130.515,5	130.515,5
2	2019	251.424	218,3	79.673,2	99.591,5	29.877,4	129.468,9	259.984,5
3	2020	253.966	220,5	80.478,9	100.598,6	30.179,6	130.778,2	390.762,6
4	2021	256.523	222,7	81.289,2	101.611,4	30.483,4	132.094,9	522.857,5
5	2022	259.094	224,9	82.103,9	102.629,8	30.789,0	133.418,8	656.276,3
6	2023	261.680	227,2	82.923,2	103.654,0	31.096,2	134.750,2	791.026,5
7	2024	264.279	229,4	83.746,9	104.683,7	31.405,1	136.088,8	927.115,3
8	2025	266.894	231,7	84.575,4	105.719,3	31.715,8	137.435,1	1.064.550,4
9	2026	269.523	234,0	85.408,7	106.760,9	32.028,3	138.789,1	1.203.339,5
10	2027	272.167	236,3	86.246,6	107.808,2	32.342,5	140.150,7	1.343.490,2
11	2028	274.826	238,6	87.089,0	108.861,3	32.658,4	141.519,6	1.485.009,8
12	2029	277.500	240,9	87.936,5	109.920,7	32.976,2	142.896,9	1.627.906,7
13	2030	280.190	243,3	88.789,0	110.986,2	33.295,9	144.282,0	1.772.188,7
14	2031	282.896	245,6	89.646,3	112.057,9	33.617,4	145.675,2	1.917.863,9
15	2032	285.617	248,0	90.508,5	113.135,7	33.940,7	147.076,4	2.064.940,3
16	2033	288.354	250,3	91.375,9	114.219,8	34.266,0	148.485,8	2.213.426,1
17	2034	291.107	252,7	92.248,3	115.310,3	34.593,1	149.903,4	2.363.329,6
18	2035	293.876	255,1	93.125,9	116.407,4	34.922,2	151.329,6	2.514.659,1
19	2036	296.661	257,6	94.008,4	117.510,5	35.253,2	152.763,7	2.667.422,8
20	2037	299.464	260,0	94.896,5	118.620,6	35.586,2	154.206,8	2.821.629,6

5.2 ANÁLISE DE ESTABILIDADE A PARTIR DA ALTERAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Os resultados de todas as análises de estabilidade nas mais variadas condições dos parâmetros de resistência dos RSU podem ser visualizados nas Tabelas 5.2 a 5.5.

Tabela 5.2 – Valores de fator de segurança do corte AA do aterro 1 obtidos pelos métodos de Bishop Simplificado, Spencer, Janbu e Morgenstern-Price

Conjunto de parâmetros do RSU				Bishop Simplificado	Spencer	Janbu	M.P.
Nº	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)				
1	7,0	16,0	33,0	1,927	1,923	1,810	1,923
2	10,5	16,0	38,0	2,009	2,007	1,926	2,007
3	10,5	10,0	23,0	1,124	1,123	1,074	1,123
4	11,0	20,0	35,0	1,920	1,917	1,821	1,917
5	13,0	18,0	22,0	1,190	1,188	1,118	1,189
6	14,0	19,0	42,0	2,211	2,209	2,129	2,171
7	15,0	23,0	46,0	2,535	2,533	2,376	2,489
8	16,0	10,0	25,0	1,124	1,123	1,084	1,123
9	17,0	51,0	24,0	1,610	1,607	1,485	1,606
10	18,0	23,5	22,0	1,172	1,170	1,100	1,170

Tabela 5.3 – Valores de fator de segurança do corte BB do aterro 1 obtidos pelos métodos de Bishop Simplificado, Spencer, Janbu e Morgenstern-Price

Conjunto de parâmetros do RSU				Bishop Simplificado	Spencer	Janbu	M.P.
Nº	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)				
1	7,0	16,0	33,0	1,920	1,916	1,796	1,916
2	10,5	16,0	38,0	2,001	1,998	1,905	1,988
3	10,5	10,0	23,0	1,122	1,120	1,064	1,120
4	11,0	20,0	35,0	1,914	1,911	1,801	1,910
5	13,0	18,0	22,0	1,185	1,184	1,109	1,183
6	14,0	19,0	42,0	2,193	2,191	2,100	2,173
7	15,0	23,0	46,0	2,514	2,511	2,358	2,490
8	16,0	10,0	25,0	1,114	1,113	1,071	1,113
9	17,0	51,0	24,0	1,609	1,607	1,485	1,606
10	18,0	23,5	22,0	1,166	1,164	1,091	1,163

Tabela 5.4 – Valores de fator de segurança do corte AA do aterro 2 obtidos pelos métodos de Bishop Simplificado, Spencer, Janbu e Morgenstern-Price

Conjunto de parâmetros do RSU				Bishop Simplificado	Spencer	Janbu	M.P.
Nº	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)				
1	7,0	16,0	33,0	1,866	1,863	1,755	1,863
2	10,5	16,0	38,0	1,952	1,950	1,867	1,949
3	10,5	10,0	23,0	1,092	1,090	1,042	1,090
4	11,0	20,0	35,0	1,863	1,816	1,769	1,861
5	13,0	18,0	22,0	1,153	1,151	1,084	1,150
6	14,0	19,0	42,0	2,148	2,146	2,066	2,122
7	15,0	23,0	46,0	2,464	2,461	2,334	2,431
8	16,0	10,0	25,0	1,093	1,092	1,054	1,089
9	17,0	51,0	24,0	1,573	1,569	1,451	1,569
10	18,0	23,5	22,0	1,135	1,133	1,069	1,133

Tabela 5.5 – Valores de fator de segurança do corte BB do aterro 2 obtidos pelos métodos de Bishop Simplificado, Spencer, Janbu e Morgenstern-Price

Conjunto de parâmetros do RSU				Bishop Simplificado	Spencer	Janbu	M.P.
Nº	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)				
1	7,0	16,0	33,0	1,863	1,859	1,758	1,859
2	10,5	16,0	38,0	1,945	1,941	1,843	1,941
3	10,5	10,0	23,0	1,087	1,085	1,031	1,085
4	11,0	20,0	35,0	1,852	1,849	1,755	1,849
5	13,0	18,0	22,0	1,150	1,148	1,085	1,147
6	14,0	19,0	42,0	2,129	2,126	2,030	2,122
7	15,0	23,0	46,0	2,440	2,438	2,310	2,431
8	16,0	10,0	25,0	1,080	1,079	1,033	1,079
9	17,0	51,0	24,0	1,571	1,569	1,453	1,567
10	18,0	23,5	22,0	1,131	1,129	1,065	1,128

Nas Tabelas 5.6 a 5.9, a seguir, estão expostas as imagens obtidas através do método de Bishop Simplificado para os dois cortes dos dois aterros estudados, a fim de ilustrar as superfícies de ruptura resultantes na condição mais crítica de estabilidade. É importante citar que a profundidade mínima da superfície de ruptura foi estabelecida em 10 metros, forçando a passagem dos planos de ruptura pela massa de resíduos sólidos urbanos.

Tabela 5.6 – Superfície de ruptura mais crítica obtida pelo método de Bishop Simplificado para o aterro 1

Parâmetros RSU	Corte AA	Corte BB
1	<p>FS: 1,927</p>	<p>FS: 1,920</p>
2	<p>FS: 2,009</p>	<p>FS: 2,001</p>
3	<p>FS: 1,124</p>	<p>FS: 1,122</p>
4	<p>FS: 1,920</p>	<p>FS: 1,914</p>
5	<p>FS: 1,190</p>	<p>FS: 1,185</p>

Tabela 5.7 – Superfície de ruptura mais crítica obtida pelo método de Bishop Simplificado para o aterro 1 (continuação)

Parâmetros RSU	Corte AA	Corte BB
6	<p>FS: 2,211</p>	<p>FS: 2,193</p>
7	<p>FS: 2,535</p>	<p>FS: 2,514</p>
8	<p>FS: 1,124</p>	<p>FS: 1,114</p>
9	<p>FS: 1,610</p>	<p>FS: 1,609</p>
10	<p>FS: 1,172</p>	<p>FS: 1,166</p>

Tabela 5.8 – Superfície de ruptura mais crítica obtida pelo método de Bishop Simplificado para o aterro 2

Parâmetros RSU	Corte AA	Corte BB
1	<p>FS: 1,866</p>	<p>FS: 1,863</p>
2	<p>FS: 1,952</p>	<p>FS: 1,945</p>
3	<p>FS: 1,092</p>	<p>FS: 1,087</p>
4	<p>FS: 1,863</p>	<p>FS: 1,852</p>
5	<p>FS: 1,153</p>	<p>FS: 1,150</p>

Tabela 5.9 – Superfície de ruptura mais crítica obtida pelo método de Bishop Simplificado para o aterro 2 (continuação)

Parâmetros RSU	Corte AA	Corte BB
6	<p>FS: 2,148</p>	<p>FS: 2,129</p>
7	<p>FS: 2,464</p>	<p>FS: 2,440</p>
8	<p>FS: 1,093</p>	<p>FS: 1,080</p>
9	<p>FS: 1,573</p>	<p>FS: 1,571</p>
10	<p>FS: 1,135</p>	<p>FS: 1,131</p>

A fim de facilitar a comparação entre os dados obtidos, construiu-se um gráfico para cada corte considerando o fator de segurança pelo conjunto de parâmetros adotados para os RSU, apresentados nas Figuras 5.1 e 5.2.

Figura 5.1 - Fator de segurança em função dos parâmetros de resistência adotados para o corte AA (aterros 1 e 2)

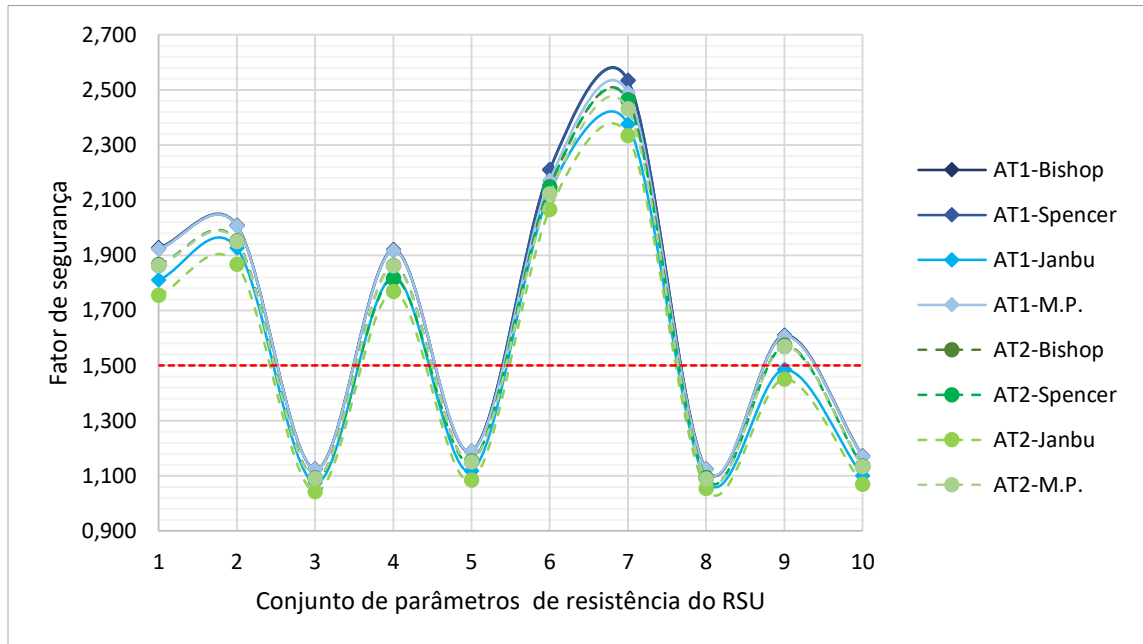
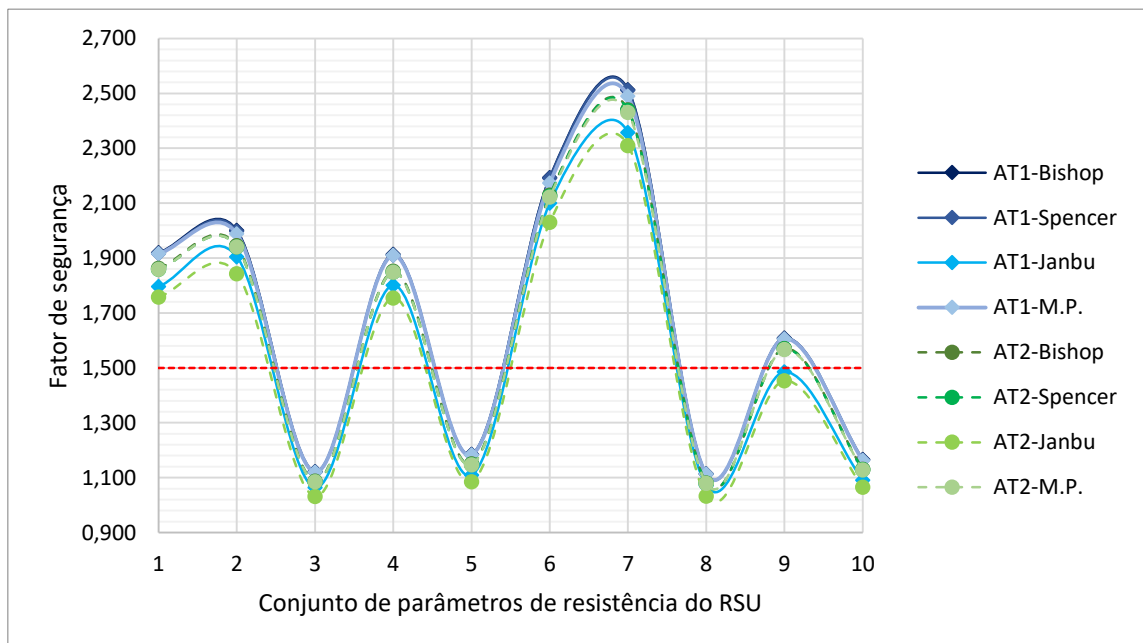


Figura 5.2 - Fator de segurança em função dos parâmetros de resistência adotados para o corte BB (aterros 1 e 2)



A partir das Tabelas 5.2 a 5.9 e das Figuras 5.1 e 5.2 apresentadas, é possível fazer as seguintes observações:

- Os valores dos fatores de segurança não tiveram grande variação do aterro 1 (1,0 V: 1,5 H) para o aterro 2 (1,5 V: 2,0 H) e nem do corte AA para corte BB, no entanto, seguiram a seguinte ordem decrescente: corte AA/AT1 > corte BB/AT1 > corte AA/AT2 > corte BB/AT2, apresentando redução de valores pela ação da inclinação e do comprimento:
 - Redução média de 2,90 % nos valores de FS obtidos do corte AA/AT1 (inclinação = 66,67%) para o corte AA/AT2 (inclinação = 75,00%);
 - Redução média de 0,6 % e 0,5 % nos valores de FS do corte AA/AT1 (comprimento = 350,0 m) para o corte BB/AT1 (comprimento = 266,8 m) e do corte AA/AT2 (comprimento = 350,0 m) para o corte BB/AT2 (comprimento = 262,0 m), respectivamente;
- Os conjuntos de parâmetros 3, 5, 8 e 10 adotados para os RSU não satisfizeram as condições geotécnicas mínimas de segurança recomendadas para projetos de taludes e encostas estabelecidas pela ABNT NBR 11.682/2009 ($FS_{\min} = 1,5$);
- O conjunto de parâmetros nº 9 não atingiu o fator de segurança mínimo exigido pela Norma Técnica Brasileira de Estabilidade de Encostas, apenas para o método de análise de estabilidade de Janbu, sendo este, portanto, o método que apresentou valores mais conservadores dentre os outros, manifestando diferença máxima de até 6,30 %;
- Dentre os métodos de análise de estabilidade, o método de Bishop Simplificado (não rigoroso) apresentou os valores mais altos de FS, porém, os resultados foram bem próximos dos obtidos pelos métodos rigorosos de Spencer e Morgenstern-Price. Os valores de FS dos métodos de Spencer e Morgenstern-Price coincidiram em 45,0 % do total de análises.

5.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE AO LONGO DO ALTEAMENTO

Na segunda análise foram avaliadas três situações, segundo os dados apresentados nas Tabelas 5.2 a 5.5 (item 5.2), uma condição de estabilidade média, a pior e a melhor, correspondente aos conjuntos de parâmetros dos RSU nºs 1, 3 e 7, respectivamente. O método de estabilidade utilizado foi o de Morgenstern-Price por ser um método rigoroso

Os valores obtidos estão expostos nas Tabelas 5.10 e 5.11, para os dois cortes do Aterro 2, que manifestou piores condições de estabilidade. Para este ensaio a profundidade mínima da superfície de ruptura considerada foi de 5,0 metros.

Tabela 5.10 – Fatores de segurança obtidos em diferentes estágios até o fim da operação do aterro 2/corte AA pelo método de análise de Morgenstern-Price

Conjunto de parâmetros do RSU				1ª Etapa	2ª Etapa	3ª Etapa	4ª Etapa	5ª Etapa (final)
Nº	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)					
1 (média)	7,0	16,0	33,0	6,562	3,222	2,326	2,042	1,863
3 (pior)	10,5	10,0	23,0	3,619	1,853	1,338	1,184	1,090
7 (melhor)	15,0	23,0	46,0	6,004	3,289	2,821	2,590	2,431

Tabela 5.11 – Fatores de segurança obtidos em diferentes estágios até o fim da operação do aterro 2/corte BB pelo método de análise de Morgenstern-Price

Conjunto de parâmetros do RSU				1ª Etapa	2ª Etapa	3ª Etapa	4ª Etapa	5ª Etapa
Nº	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)					
1 (média)	7,0	16,0	33,0	7,292	2,786	2,301	2,008	1,859
3 (pior)	10,5	10,0	23,0	4,041	1,553	1,320	1,158	1,085
7 (melhor)	15,0	23,0	46,0	6,890	3,195	2,796	2,583	2,431

Os resultados das condições de pior e melhor estabilidade, correspondente aos conjuntos de parâmetros de resistência n^{os} 3 e 7 dos RSU, estão retratados passo a passo nas Tabelas 5.12 e 5.13.

Tabela 5.12 – Superfície de ruptura mais crítica obtida pelo método de Morgenstern-Price para o aterro 2/corte AA

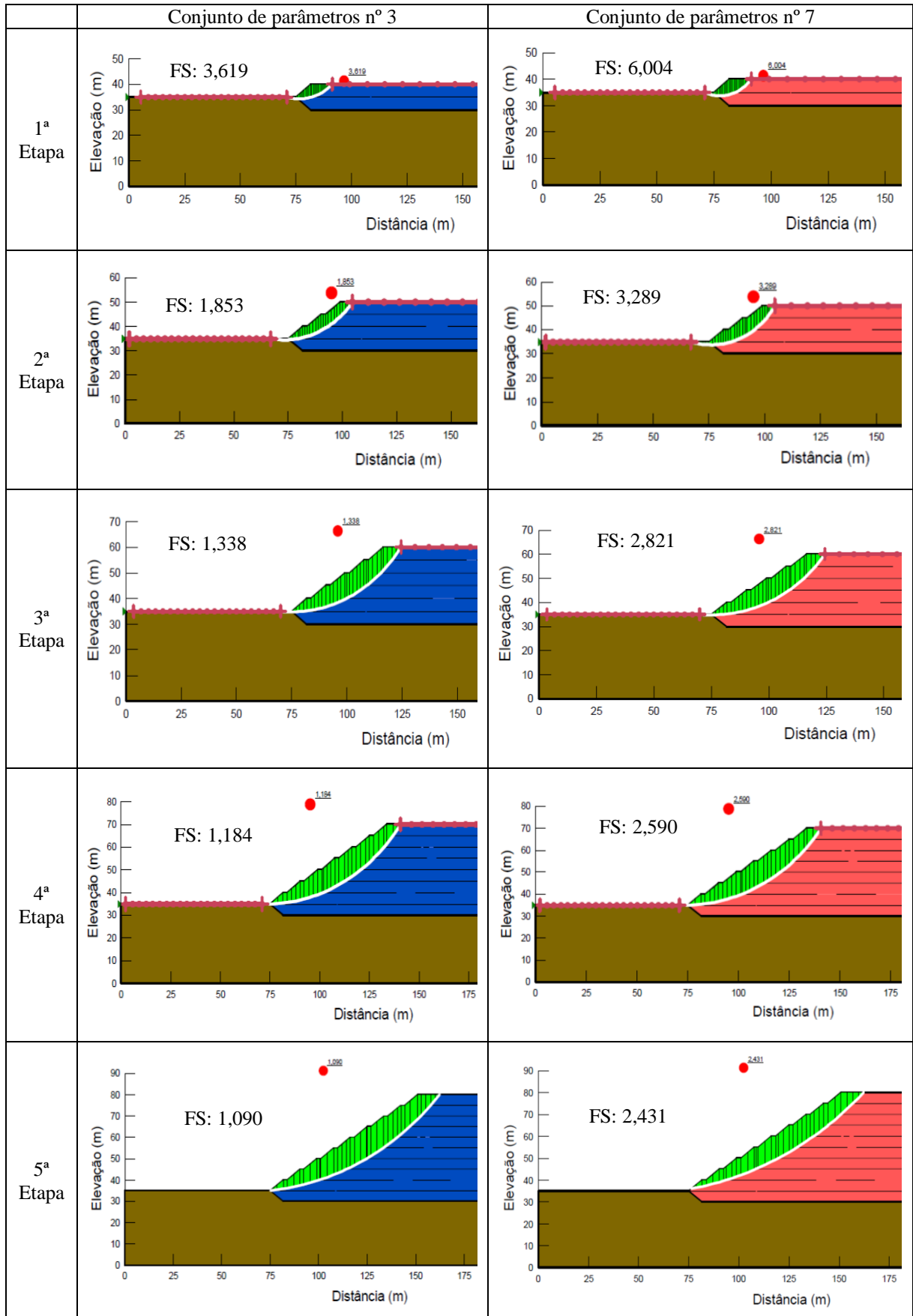
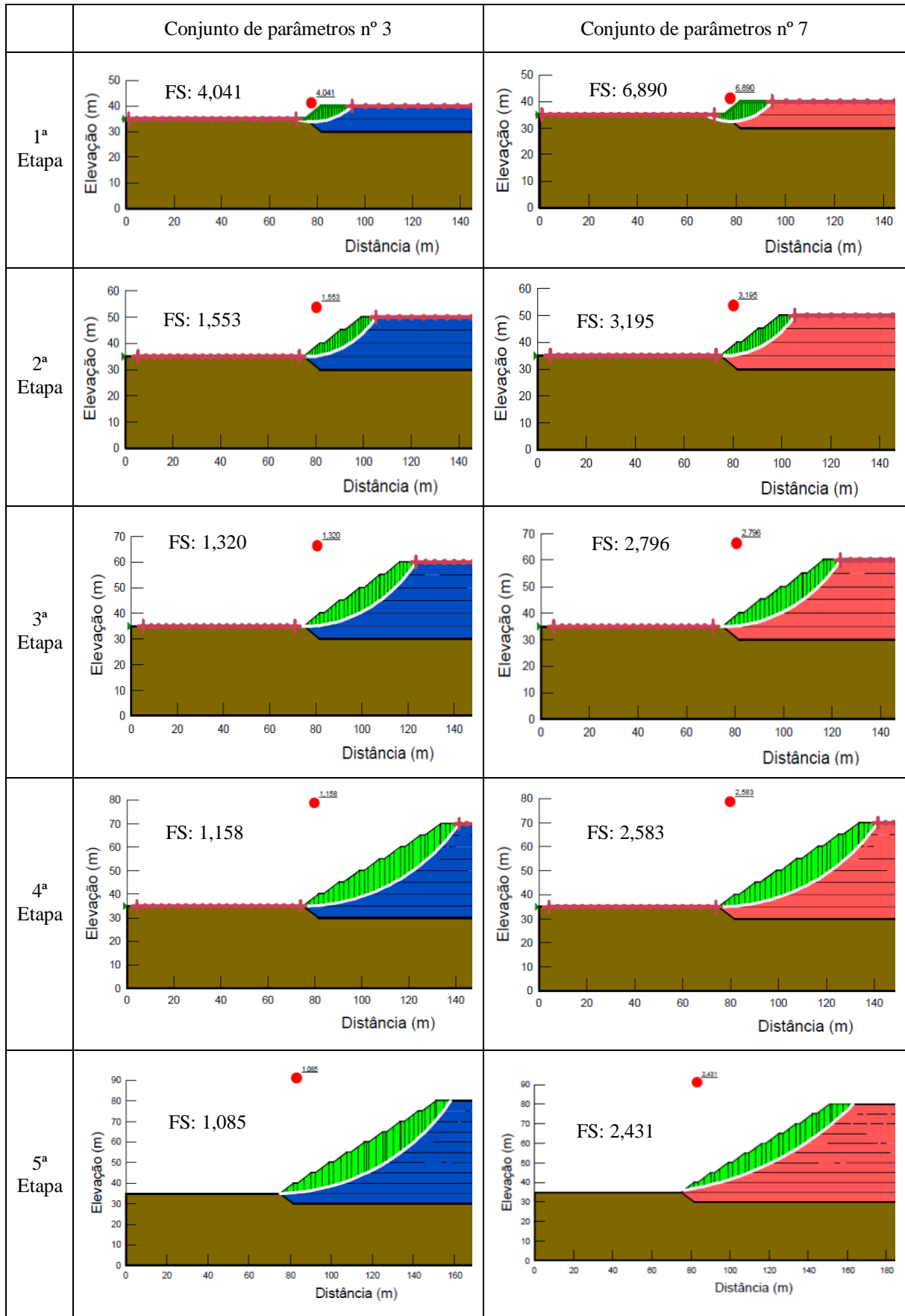


Tabela 5.13 – Superfície de ruptura mais crítica obtida pelo método de Morgenstern-Price para o aterro 2/corte BB



Os resultados obtidos foram agrupados nos gráficos das Figuras 5.3 e 5.4 que relacionam os valores do fator de segurança e as etapas de construção do aterro.

Figura 5.3 – Fator de segurança pelas etapas de construção do aterro para os três conjuntos de parâmetros de resistência dos RSU estudados no corte AA do aterro 2

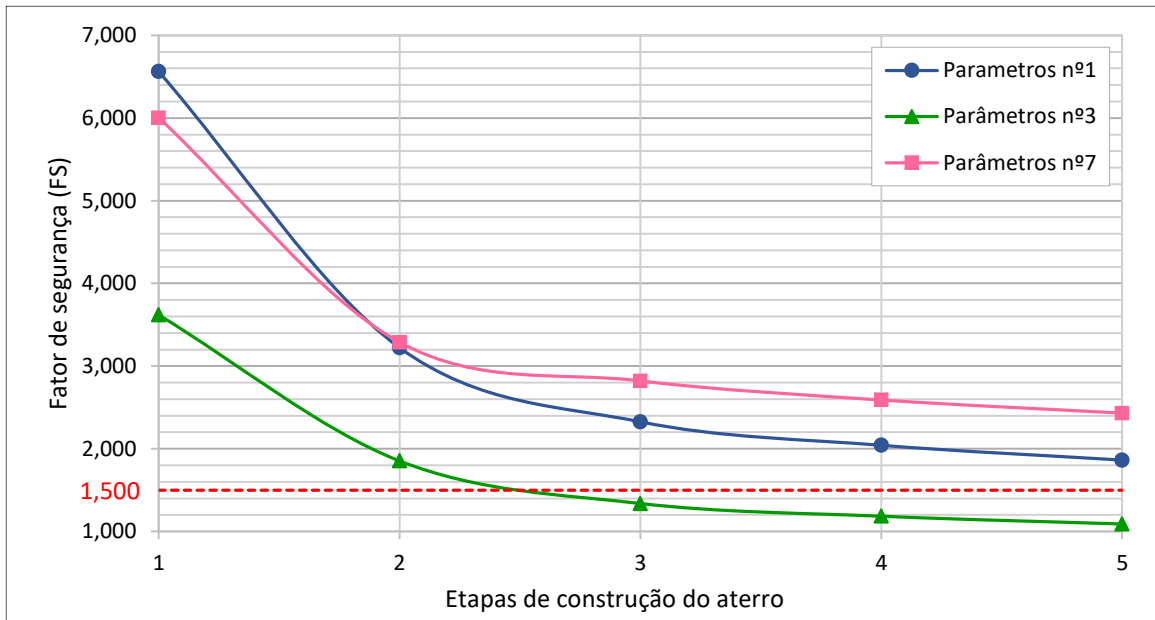
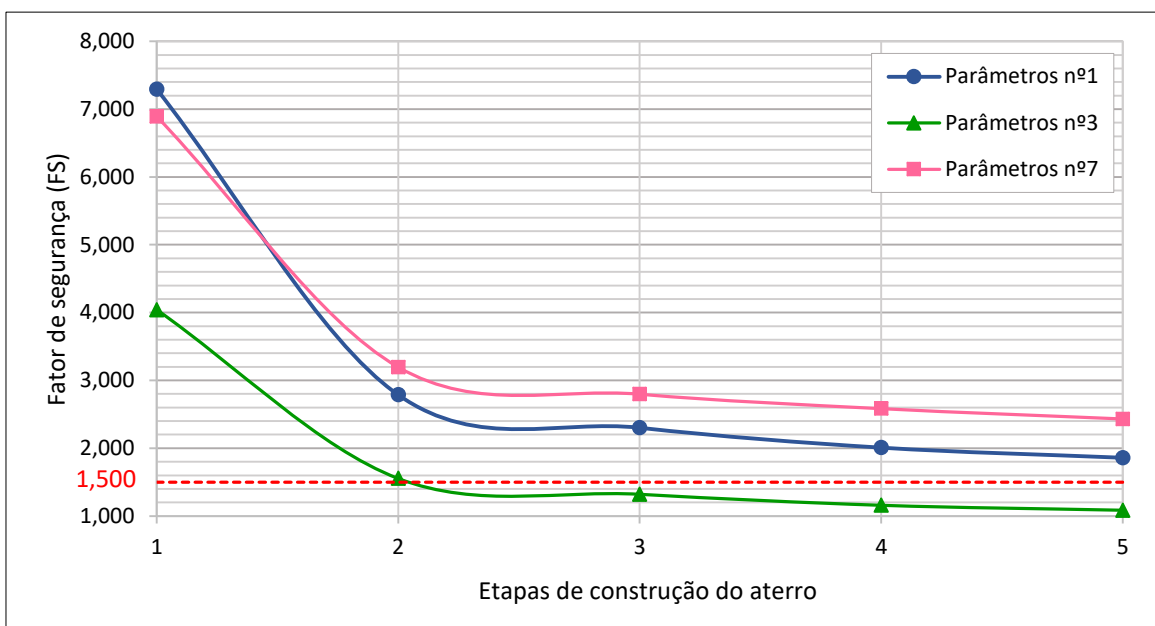


Figura 5.4 – Fator de segurança pelas etapas de construção do aterro para os três conjuntos de parâmetros de resistência dos RSU estudados no corte BB do aterro 2



As informações expostas nas Tabelas 5.10 a 5.13 e Figuras 5.3 e 5.4, possibilitam as seguintes observações:

- A estabilidade do talude diminui significativamente com o aumento da altura da pilha de RSU, alcançando maiores diferenças da 1ª etapa (1 camada de RSU) para a 2ª etapa (3 camadas de RSU), na qual atingiu redução máxima de 61,8% e mínima de 5,9 %. As reduções médias da 1ª para a 2ª etapa, da 2ª para a 3ª etapa, da 3ª para a 4ª etapa e da 4ª para a 5ª etapa, foram decrescentes em, 53,7 %, 19,1%, 10,8 % e 7,1 %, respectivamente;
- Os valores de fator de segurança obtidos pelos conjuntos de parâmetros de resistência dos RSU nº 1 e 7 foram aproximados, apresentando discrepância máxima de 30,8 % e mínima de 2,1 %. Em ambos os cortes, o conjunto estimado como sendo de segurança mediana na primeira análise, passou para a condição mais segura, apresentando valores de FS superiores à curva nº 7;
- A curva representativa do conjunto de parâmetros nº 3 não cumpre recomendado pela norma ABNT NBR 11.682/2009 ($FS > 1,5$), a partir da 3ª etapa da construção do aterro, correspondente à 5 camadas de 5,0 metros de RSU acima do nível do terreno.

6 CONCLUSÃO

O presente estudo determinou a estabilidade dos taludes de aterros sanitários com inclinações distintas, 1V:1,5H (aterro 1) e 1,5V:2H (aterro 2), através dos métodos de Bishop Simplificado, Spencer, Janbu e Morgenstern-Price, oferecidos pelo software SLOPE/W da Geo-Slope International.

Os resultados obtidos nas análises de estabilidade de taludes realizadas no primeiro cenário, no qual variou-se os parâmetros de resistência dos RSU segundo dados apresentados nos estudos de diversos autores; permitiu verificar que a baixa variação da inclinação não interferiu significativamente nos FS obtidos, sendo a maior diferença identificada de 5,3 %. O mesmo ocorreu entre cortes do mesmo aterro, apresentando oscilação máxima de apenas 2,0 %.

Nesta análise inicial, é possível observar ainda, que nos quatro conjuntos de peso específico, coesão e ângulo de atrito, que não satisfizeram o valor mínimo de 1,50 para o fator segurança, recomendado pela norma ABNT NBR 11.682/2009 para projetos de taludes e encostas, o ângulo de atrito (ϕ) esteve entre 22 e 25. As condições que satisfizeram a Norma Técnica Brasileira de Estabilidade de Encostas apresentaram valores de ϕ iguais a 24°, 33°, 35°, 38°, 42° e 46°, ou seja, quase todos os valores acima de 30°, com exceção de um.

Na segunda análise, na qual calculou-se o fator de segurança ao longo da construção do aterro para as condições que apresentaram média, baixa e alta estabilidade no primeiro cenário, foi observado que o fator de segurança decresce com o alteamento do aterro sanitário.

Destaca-se dessa forma, que as “soluções” praticadas pelas administrações públicas em razão da falta de locais para construção de novos aterros sanitários, devem ser executadas de forma mais cautelosa, havendo a necessidade de um novo estudo para verificação da possibilidade de alteamento dos aterros já existentes. Torna-se fundamental também, o monitoramento constante dessas obras, principalmente quando deseja-se reativar aterros que já tiveram suas atividades encerradas, visto que o comportamento dos resíduos novos que serão depositados e dos resíduos já decompostos presentes no aterro apresentam características totalmente diferentes, podendo a interface de contato entre eles, apresentar uma possível superfície de ruptura.

Em se tratando da comparação dos resultados fornecidos pelos diferentes métodos de análise de estabilidade de talude, nota-se uma tendência de valores mais altos para os métodos de Bishop Simplificado, Spencer, Morgenstern-Price e Janbu, nesta ordem. Dentre os métodos

apresentados, o método de Bishop Simplificado, considerado não rigoroso, assemelhou-se bastante dos resultados de FS apontados pelos métodos de Spencer e Morgenstern-Price, tido como rigorosos, e que se igualaram em 45,0 % das 40 análises realizadas no primeiro cenário. O método de Janbu forneceu valores mais conservadores de fator de segurança, mas ainda assim próximos dos apresentados pelos outros métodos, com maior diferença igual a 6,3 %.

Como sugestões para trabalhos futuros, preconiza-se que sejam realizados diferentes ensaios para determinação dos parâmetros de resistência no próprio aterro do município de São Carlos, para que assim, os parâmetros de resistência retratem de maneira fidedigna as condições existentes no aterro.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A Folha São Carlos e Região. São Carlos descarta 240 toneladas de lixo doméstico por dia. Publicado em 07.04.2017. Disponível em: <http://www.afolhasaocarlos.com.br/noticias/ver_noticia/43141/controler:noticias>. Acesso em: 17 de abril de 2017;

ABES. Aterros Sanitários: Projeto, Construção, Operação e Gerenciamento. Bauru – SP, 1999;

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004;

ABRELPE: Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. 2016. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf>>. Acesso em: 13 de outubro de 2017;

ABREU, R. C. Compressibilidade de maciços sanitários. São Paulo Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000;

AHRENDT, A. Movimentos de massa gravitacionais – proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP. 334 p. + Anexos. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005;

ANDREOLI, C. V.; ANDREOLI, F. N.; TRINDADE, T. V.; HOPPEN, C. Resíduos sólidos: origem, classificação e soluções para destinação final adequada. Coleção Agrinho, 2014;

BENVENUTO, C. Estabilidade geotécnica de aterros sanitários. I Seminário sobre Geomecânica dos Resíduos Sólidos Urbanos, 2012;

BENVENUTO, C., CUNHA, M. A. Escorregamento em massa de lixo no aterro sanitário Bandeirantes em São Paulo, SP. In: Anais do 2º Simpósio sobre barragens de rejeitos e disposição de resíduos, REGEO'91. Rio de Janeiro, 1991;

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. Conceitos básicos de resíduos sólidos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, EESC/USP. 120p., 1999;

BORGATTO, A. V. A. Estudo das propriedades geomecânicas de resíduos sólidos urbanos pré-tratados. Dissertação de Doutorado, UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2010;

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

BOSCOV, M. E. G. Geotecnia ambiental, oficina de textos, São Paulo, 248 p., 2008;

BOUAZZA, A.; VAN IMPE, W. F.; HAEGEMAN, W. Quality control of dynamic compaction in municipal solid waste fills. In: Proc. Of The Second International Congress on Environmental Geotechnics, ISBN 90 5410 848 7, Osaka, Japan, A.A. Balkema, v.2, p.635-640, 1996;

CARDIM, R. D. Estudo da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-168/08, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 91p., 2008;

CARVALHO, A. R. Percâmetro: Um novo equipamento para medidas de parâmetros geotécnicos de resíduos sólidos. Desenvolvimento e Aplicação no Aterro Sanitário de Santo André. Viçosa: UFV, 114 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002;

CARVALHO, M. F. Comportamento mecânico dos resíduos sólidos urbanos. São Carlos: EESC-USP, 306 p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999;

CASTRO NETO, P. P.; GUIMARÃES, P. C. V. A gestão dos resíduos em São Paulo e o desafio do desenvolvimento sustentável. Revista de Administração Pública: Rio de Janeiro, v. 34, n. 87-104, jun/ago 2000;

CATAPRETA, C. A. A. Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2008;

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G.F.; BATISTA, H. P.; OLIVEIRA, A. F. G.; OLIVEIRA, L. C. M. Influência da umidade e fatores operacionais na compactação de resíduos sólidos urbanos no aterro sanitário de Belo Horizonte, MG. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande, MS. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 2005;

CATERPILLAR. Manual de gerenciamento de resíduos (ref. APDS0227). Washington: Caterpillar, 2001;

CEPAGRI/UNICAMP: Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_549.html>. Acesso em: 05 de outubro de 2017;

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Resíduos sólidos industriais. São Paulo: CETESB/ASCETESB, 2a edição, 1992, 233 p.;

CETESB: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Aterro sanitário – definições. Disponível em: < <http://biogas.cetesb.sp.gov.br/aterro-sanitario/>>. Acesso em: 17 de abril de 2017;

CETESB: Inventário estadual de resíduos sólidos urbanos 2015. Coordenação e redação Maria Heloisa P. L. Assumpção; equipe técnica Marilda de Souza Soares et al. São Paulo: CETESB, 2016. Disponível em:< <http://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/wp-content/uploads/sites/26/2013/11/inventario-RSD-2015.pdf>>. Acesso em: 06 de outubro de 2017;

CETESB: Inventário estadual de resíduos sólidos urbanos 2016. Coordenação e redação Maria Heloisa P. L. Assumpção; equipe técnica Marilda de Souza Soares et al. São Paulo: CETESB, 2017. Disponível em:< <http://solo.cetesb.sp.gov.br/wp->

content/uploads/sites/18/2013/12/inventario-residuos-solidos-2016.pdf>. Acesso em: 06 de outubro de 2017;

CODUTO, D. P.; HUITRIC, R. Monitoring landfill using precise instruments. *Geotechnics of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM STP 1070, Arvid Landva and G. David Knowles, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, p.358-370;

COUMOULOS; D. G.; KORYALOS, T. P. Prediction of long-term settlement behaviour of landfill covers after closure, *Proc. of Sardinia 99 - 7th International Landfill Symposium*, Cagliari, Vol.3, 1999, p. 505 – 512.;

COUMOULOS; D. G.; KORYALOS, T. P.; METAXAS, I. L.; GIOKA, D. A. Geotechnical investigation at the mais landfill of Athens. *Proc. of Sardinia 95 - 5th International Landfill Symposium*, S. Margherita di Pula, Cagliari Italy, October 1995, p. 885-895;

COWLAND, J. W.; TANG, K. Y.; GABAY, J. Density and strength properties of Hong Kong refuse. *Proceedings Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium*, S. Margherita di Pula, Cagliari Italy, October 1993, p. 1433-1446;

CRUZ, P. T. 100 Barragens Brasileiras. Oficina de textos. São Paulo, 2004;

DAS, B. M. Fundamentos de engenharia geotécnica. São Paulo: Ed. Thompson Pioneira, 6. ed., 2007;

de LAMARE NETO, A. Resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos e de materiais granulares com fibras. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 2004, 190 p.;

DEL GRECCO, O., OGGERI, C. Geotechnical parameters of sanitary wastes. *IV International Landfill Symposium – Sardinia'93*. S. Margherita di Pula, Italy, 1993, pp.1421-1431;

DIJON, N.; JONES, D. R. V. Engineering properties of municipal solid waste. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 23, nº 3, p. 205 – 233. 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266114405000051>>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2017;

DIXON, N., RUSSEL, D., JONES, V. Engineering properties of municipal solid waste. 2005;

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G. Soil strength and slope stability. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005;

DUNN, R. J. Design and construction of foundations compatible with solid waste. *Landfill Closures – Environmental Protection and Land Recovery*, Geotechnical special publication nº53, ASCE, 1995, p.139-159;

EARTH TECHNOLOGY. In-place stability of landfill slopes, Puente hills landfill, Los Angeles, California. Repot nº 88-614-1, prepared for the sanitation districts of Los Angeles country, the Earth Technology Corp., Long Beach, CA, 1988;

EDGERS, L.; NOBLE, J. J.; WILLIAMS, E. Abiologic model for long term settlement in landfills. In: Proc. of the Mediterranean Conference on Environmental Geotechnology, Usmen & Acar (eds), Balkema, ISBN 90 5410 0559, 1992, p. 177-184.;

ENGECORPS - Corpo de Engenheiros Consultores. Rel: 064-SSO-NOD-B173. Estado da Arte dos Aterros Sanitários - Parte II, abril, 1996, 233p.;

FAKHER, A. Experimental study on the compaction of waste. In: International Congress on Environmental Geotechnics, 5, 2006, Cardiff, England. Proceedings...Cardiff, 2006;

FARIA, F. S. Índice de qualidade de aterros de resíduos urbanos. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002, 311 p.;

FASSETT, J. B.; LEONARDS, G. A.; REPETTO, P. C. Geotechnical properties of municipal solid wastes and their use in landfill design. Proc. Waste Technical Conference, Charleston, SC, USA, 1994;

FERNANDES, M. O., SILVA FILHO, F. C. Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Fellenius, Bishop e Jambu. In: Revista Tecnologia, v. 19, n. 1, 2010;

FERREIRA, A. G. Estudo dos lixiviados das frações do aterro sanitários de São Carlos – SP por meio da caracterização físico-química. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010;

FERREIRA, J. L. F. Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Jambu e Spencer. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012, 122 p.;

FILHO, R. J. A. T.; ANDRADE, V. C. Comparação entre análises determinísticas e probabilísticas de estabilidade de taludes de barragens: estudo de caso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba, Paraná, 2015.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. Universidade Federal do Paraná. 2ª ed. Editora UFPR. Curitiba, 2009, 604p.;

FREDLUND, D.; KRAHN, J. Comparison of slope stability methods of analysis. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 14, 1977, pp. 429-439;

FRÉSCA, F. R. C. Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares no município de São Carlos, SP, a partir da caracterização física. Dissertação de Mestrado em Ciência da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007, 134f.;

FREUDLUND, D.; KRAHN, J.; PUFAHL, D. The relationship between Limit Equilibrium Slope Stability Methods. Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, Vol.3, 1981, pp. 403-416;

FUCALE, S.P. Influência dos componentes de reforço na resistência de resíduos sólidos urbanos. Tese de Doutorado, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 2005, 215p.;

GABR M. A.; VALERO S. N. Geotechnical properties of municipal solid waste, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 18, Nº 2, 1995, pp. 241 – 251;

GANDOLLA, M., DUGNANI, L., BRESSI, G., ACAIA, C. The determination of subsidence effects at municipal solid waste disposal sites. In: *Proc. Simpósio Internacional de Destinação do Lixo*, Salvador, Bahia, 1994, pp. 17;

GEO-SLOPE INTERNATIONAL. *Geo-Slope Stability modeling with SLOPE/W 2007 Version*;

GERSCOVICH, D. M. S. Estabilidade de taludes. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 166 p.;

GLOBAL URBAN DEVELOPMENT. *Urban Development*. 2010. Disponível em: < <http://www.globalurban.org/publications.htm> >. Acesso em: 17 de abril de 2017;

GOMES, C. M. B. da C. Estudo do comportamento de aterros de resíduos: caracterização física, bioquímica e mecânica dos resíduos sólidos urbanos. Dissertação de Doutorado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto/ FEUP, Porto, Portugal, 2008;

GOMES, L. P. Estudo da caracterização física e da biodegradabilidade dos resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário. São Carlos/SP. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1989;

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

GOTTELAND, P.; LEMARÉCHAL, D.; RICHARD, P. Analysis and monitoring of the stability of a domestic waste landfill. *Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1995, pp.777-787;

GRISOLIA, M.; GASPARINI, A.; SAETTI, G. F. Survey on waste compressibility. *Proc., 4th International Landfill Symposium – Sardinia 93*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 1993, pp.1447-1456;

GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q.; TANCREDI, G. Contribution to a technical classification of MSW. *Proc. of Sardinia 95 – 5th International Landfill Symposium*, Cagliari, Vol.2, 1995, pp. 703-710;

GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q. Geotechnical characterization of municipal solid waste: choice of design parameters. *Proc of the Second International Congress on Environmental Geotechnics*, Osaka, Japan, A.A.Balkema, 5-8 november 1996, v.2, pp.642-646;

HO, I.H. Parametric studies of slope stability analyses using three-dimensional finite element technique: geometric effect. *Journal of GeoEngineering*, Vol. 9, No. 1, 2014, pp. 33-43;

HOLTZ, R. D., KOVACS, W. D. An introduction to geotechnical engineering. New Jersey: Prentice Hall, 1981;

HORST, R. Avaliação dos métodos para cálculo de estabilidade de taludes em maciço terroso. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Tecnologia da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2007, 129 p.;

HOWLAND, J.; LANDVA, A. stability analysis of a municipal solid waste landfill. Stability and Performance of Slope and Embankments II, Geotechnical Special Publication No. 31, ASCE, 1992, pp.1216-1231;

HUANG, Y. H. Slope Stability by the Limit Equilibrium Method: Fundamentals and Methods. American Society of Civil Engineers, 2014;

IBAM, SEDU/PR. Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos. 2001;

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. Lixo Municipal: Gerenciamento integrado. São Paulo, 2001;

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo. Manual de Gerenciamento integrado do lixo. 2ª edição. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, CEMPRE, 2000, 370 p.;

JESSBERGER, H. L. Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction - Parts 1 to 3. Proc. Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, v.107, April, 1994, pp. 99-113;

JUCÁ J.F.T.; CABRAL J.J.P.S.; MONTEIRO V.E.D.; SANTOS S.M.; PERRIER G.S. Geotechnics of a municipal solid waste landfill in Recife, Brazil. Recent Developments in soil and pavement mechanics, Almeida (ed), Balkema, Rotterdam, 1997, pp. 429 – 436;

JUNIOR, E. F. O.; FREIRE, R. S. Os impactos ambientais decorrentes da produção de resíduos sólidos urbanos e seus riscos à saúde humana. Faculdade José Augusto Vieira, 2013;

JUNIOR, J. V. B.; ROMANEL, C. Sustentabilidade na indústria da construção: uma logística para reciclagem dos resíduos de pequenas obras. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 5, n. 2, p. 27-37, 2013.

JUNIOR, N. I.; FILHO, N. F. Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. cap. 9, pp.131-152;

KAIMOTO, L. S. A.; CEPOLLINA, M. Considerações sobre alguns condicionantes e critérios geotécnicos de projeto e executivos de aterros sanitários. In: Simpósio Internacional da Qualidade Ambiental, Porto Alegre, Anais... Porto Alegre, 1996;

KAVAZANJIAN, E.; MATASOVIC, N.; BONAPARTE, R.; SCHMERTMAM, G. R. Evaluation of MSW properties for seismic analysis. Geoenvironmental 2000. Geotechnical Special Publication ° 46, ASCE, vol.2, 1995, pp.1126-1142. Ed. Yalcin B. Acar and David E. Daniel, New Orleans;

KNOCHENMUS, G.; WOJNAROWICZ, M.; VAN IMPE, W. F. Stability of municipal solid wastes. In: Proc. of the Third International Congress on Environmental Geotechnics, Lisboa Portugal, Sêco e Pinto (ed.), Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 006x, Vol. 3, 1998, pp. 977-1000;

KOCKEL, R.; JESSBERGER, H. Stability evaluation of municipal solid waste slopes. In: Proc. 11th ECSMFE, Danish Geotechnical Society, Bulletin 11, v. 2, Copenhagen, Denmark, 1995;

KOERNER, R. M., SOONG, T. Y. Leachate in land hills: the stability issues, Geotextiles and Geomembranes, n. 18, 1999, pp. 293-309;

KÖLSCH, F. Material values for some mechanical properties of domestic waste. CISA (Hrsg.): Proceedings of the 5th International Landfill Symposium, Cagliari (Italy), Vol.2, 1995, pp. 711-729;

KÖLSCH, F. The bearing behaviour of domestic waste and related consequences for stability. In: Proceedings Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium, pp. 1393 – 1410, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, 11-15 October 1993;

KÖNIG, D.; JESSBERGER, H. L. Waste mechanics. In: ISSMFE Technical Committee TC5 5 (Environmental Geotechnics), Sub Committee 3 (Waste Mechanics). International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1997, pp. 35 – 76;

LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. Soil Mechanics. John Wiley & Sons, 1969;

LANDVA, A. O.; CLARK, J. I. Geotechnical testing of waste fill. Proc. 39th Canadian Geotechnical Conference, Ottawa, Ontario, 1986, pp.371-385;

LANDVA, A. O.; CLARK, J. I. Geotechnics of waste fill. In: Geotechnics of Waste Fill - Theory and Practice. Philadelphia, PA: ASTM, 1990, pp. 86–106;

LEITE, J. C. Metodologia para elaboração da carta de susceptibilidade à contaminação e poluição das águas subsuperficiais. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1995, v.1, 219 p.;

LING, H. I.; LESHCHINSKY, D.; MOHRI, Y.; KAWABATA, T. Estimation of municipal solid waste landfill settlement. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v.124, n°1, January, 1998, ASCE, pp. 21-28;

LOUREIRO, S. M. Índice de qualidade no sistema de gestão ambiental em aterro de resíduo sólido urbano - IQS. 425p.+ apêndices. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005;

LUZ, F. X. R. Aterro Sanitário. São Paulo: CETESB, 1976, 13 p.;

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

MAHLER, C. F.; NETO, A. L. Análise de estabilidade do vazadouro da Rua Duarte da Silveira (Petrópolis), considerando o efeito das fibras. In Américas y la acción por el medio ambiente en el milênio, 2000, pp 1-8;

MANASSERO, C. M. Controlled Landfill Design. ISSMFE Technical Committee TC5 on Environmental Geotechnics, TC5 Report, 1997, pp. 77-111;

MANASSERO, M.; VAN IMPE, W. F.; BOUAZZA, A. Waste Disposal. In: Proc. of the Second International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, Rotterdam, A. A. Balkema, Vol. 2, 1996, pp. 193-242;

MARQUES, A. C. M. Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos. São Carlos: EESC-USP, 2001. v. 1 e 2, 469 p. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001;

MARTINS, H. L. Avaliação da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto em equipamentos de grandes dimensões. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2006, 116 p.;

MASSACCI, G; MOTZO, G. M; PILIA, M.; COSSU, R. Analysis and monitoring of geotechnical parameters in sanitary landfill. Proceedings Sardinia 93, Fourth International Landfill Symposium, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, October 1993;

MASSAD, F. Obras de terra: curso básico de geotecnia. São Paulo. Oficina de Textos, 2003. 170 p.;

MATASOVIC, N; KAVAZANJIAN, E. Cyclic characterization of oil landfill solid waste. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v.124, nº 3, March 1998, ASCE, pp.197-210;

MENEZES, I. P. Estudos de estabilidade de taludes da mina a céu aberto São Luís em Catas Altas/MG combinando técnicas de geoprocessamento e métodos usuais de investigação e análise geológico-geotécnicas. 2012. 139 p. + anexos. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012;

MIRANDA, E. E. – Coord. Sistema de gestão territorial para a Associação Brasileira do Agronegócio da Região de Ribeirão Preto (ABAG/RP). Embrapa monitoramento por satélite, Campinas, 2005. Disponível em: < <http://www.abagr.p.cnpm.embrapa.br/>>. Acesso em: 05 de outubro de 2017;

MITCHELL, J. K.; BRAY, J. D.; MITCHELL, R. A. Material interactions in solid waste landfills. Geoenvironmental 2000. Geotechnical Special Publication °46, ASCE, vol.1, 1995, pp.568-590. Ed. Yalcin B. Acar and David E. Daniel, New Orleans;

NASCIMENTO, J. C. F. do. Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, EESC/USP, 2007;

OLIVEIRA, D. A. F. Estabilidade de taludes de maciços de resíduos sólidos urbanos. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2002, 155p.;

OWEIS, I. S.; KHERA, R. Criteria for geotechnical construction of sanitary landfills. Proc. International Symposium on Environmental Geotechnology, FANG, H.Y., ed., v.1, 1986, pp.205-222;

PALMA, J. H. Comportamineto geotecnico de vertederos controlados de residuos solidos urbanos. Tesis Doctoral, tomo II, Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales Y Puertos, Universidad de Cantabria, España, 1995, 300 p.;

PMSC: PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS. 2017. Disponível em: <<http://www.saocarlos.sp.gov.br/>>. Acesso em: 09 de junho de 2017;

POWRIE, W.; BEAVEN, R. P. Hydraulic properties of household waste and implications for landfills. Proc. Institution of Civil Engineering, Geotechnical Engineering, London, v.137, October 1999, pp.235-247;

RECESA: Rede de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental. Resíduos sólidos: projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários. Guia do profissional em treinamento: nível 2/ Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). Belo Horizonte. 2008, 112 p.;

REDDY, K.; GANGATHULASI, J.; HETTIARACHCHI, H.; BOGNER, J. Geotechnical Properties of a Municipal Solid Waste Subjected to Leachate Recirculation. Geocongress 2008, Eds. A.N. Alshawabkeh, K. R. Reddy, and M.V. Khire, ASCE, New Orleans, LA, 2008b, pp.144-151;

REDDY, K.; HETTIARACHCHI, H.; PARAKALLA, N.; GANGATHULASI, J. Geotechnical Properties of Fresh Municipal Solid waste at Orchard Hills Landfill, USA. Waste Management, 2008a, pp.952-959;

REMÉDIO, F. H. Análise de estabilidade de taludes de aterros de resíduos urbanos utilizando parâmetros geotécnicos de propostas bibliográficas e correlações com N_{spt} . Dissertação de Mestrados em Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 2014;

RIBEIRO, A. G. C. Determinação de parâmetros de resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de retro-análise de testes em laboratório. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, 2007;

SÁNCHEZ-ALCITURRI, J. M.; PALMA, J. H.; SAGASETA, C.; CANIZAL, J. Mechanical properties of wastes in a sanitary landfill. In: Proc. International Conference Green'93, Waste Disposal by Landfill – GREEN'93, Sarsby (ed), Balkema, Rotterdam, 1993, ISBN 90 5410 356 6, pp. 357-363;

SANTOS, J. M. R.; MARTINS, M. T. Coleta de Lixo – Uma alternativa ecológica no manejo integrado dos resíduos sólidos urbanos. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, BT/PHD/18, São Paulo, 1995;

SANTOS, L. A. O; PRESA, E. P. Compressibilidade de aterros sanitários controlados. III Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos – REGEO'95, v.2, Ouro Preto/MG, 1995, pp.577-591;

SANTOS, L. P. S.; MENDES, T. A.; ABREU, G. R. O.; NETO, A. S. S.; LEITÃO, V. S. Software para pré-dimensionamento de aterro sanitário pelo método das trincheiras destinado a municípios de pequeno porte. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria –REGET/UFMS. V.20, jan-abr 2016, pp. 398-404;

SANTOS, S. M. Propriedades geotécnicas de um aterro de resíduos sólidos. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1997, 98p.;

SCHALCH, V. Estratégias para a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002;

SCHALCH, V.; LEITE, W. C. A.; FERNANDES JÚNIOR, J. L.; CASTRO, M. C. A. A. Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos. Tese de Livre Docência da Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2002;

SCHULER, A. R. Análise do comportamento de um aterro municipal de resíduos sólidos urbanos instrumentado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ/COPPE), Rio de Janeiro, 2010, 152 p.;

SILVA, A. F. P. Desenvolvimento de um programa de cálculo automático de estabilidade de taludes pelo Método de Correia. Mestrado integrado em Engenharia Civil - 2009/2010, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2010;

SILVA, B. V da. Estabilidade de taludes de aterros não controlados de resíduos. Dissertação de Mestrado em Geotecnica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL), Portugal, 2014;

SILVA, J. P. Os métodos de equilíbrio limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011, 87p.;

SILVA, V. C. Métodos analíticos para avaliar a contribuição de estacas para o fator de segurança de taludes. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ/ Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2013;

SILVEIRA, A. M. M. Estudo do peso específico de resíduos sólidos urbanos. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004. 101 p.;

SIMÕES, G. F., CATAPRETA, C. A. A., BATISTA, H. P., GALVÃO, T. C. B. Monitoramento geotécnico de aterros sanitários: a experiência da central de tratamento de resíduos sólidos da BR 040 em Belo Horizonte - MG. In: 5º Congresso Brasileiro de Geotecnica Ambiental, 2003, Porto Alegre/RS;

SIMÕES, G. F.; CAMPOS, T. M. P.; GALVÃO, T. C. B.; VARGAS JR, E. A. Considerações sobre o fenômeno de adensamento em aterros sanitários. In: Simpósio Internacional da Qualidade Ambiental, Porto Alegre, 1996, pp. 131-135;

SINGH, S.; MURPHY, B. J. Evaluation of the stability of sanitary landfills. *Geotechnical of Waste Fills – Theory and Practise*, ASTM STP 1070, Arvid Landva and G. David Knowles, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp.240-258;

SOWERS, G. F. Settlement of waste disposal fills. *Proc. 8th International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering*, Moscou, Rússia, vol.2, 1973, pp. 207-210;

TAVEIRA, M. M. V. Impactos de aterros sanitários de três município de Minas Gerais na qualidade da água. *Dissertação de pós-graduação – Universidade de Lavras, MG*, 2012;

TCHOBANOGLIOUS, G.; THIESEN, H.; VIGIL, S. A. *Integrated solid waste management - engineering principles and management issues*. New York: McGraw-Hill International Editions, 1993, 978 p.;

TONUS, B. P. A. Estabilidade de taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da serra do mar paranaense. *Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná. Curitiba*, 2009;

USACE – U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Slope Stability*. EM 1110-2-1902, Washington, 2003;

VAN IMPE, W. F. *Environmental Geotechnics – ITC5 – Reports and future goals*. geotechnical hazards, Maric, Lisac & Szavits-Nossan (eds), Balkema, Rotterdam, 1998, ISBN 90 5410 9572, pp.127-156;

VAN MEERTEN, J. J.; SELLMEIJER, J. B.; PEREBOOM, D. Prediction of landfill settlements. *Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium*, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy, october 1995, pp.823-831;

WALL, D. K.; ZEISS, C. Municipal landfill biodegradation and settlement. *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, vol. 121, nº 3, March 1995, pp.214-224;

WONG, W. W. Investigation of the geotechnical properties of municipal solid waste as a function of placement properties. A thesis presented to the Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2009, 140p.;

YEN, B. C.; SCANLON, B. Sanitary landfill settlements rates. *Journal of Geotechnical Division*, ASCE, c.101, GT5, 1975, pp.475-487.