

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS
CAMPUS DE RIO CLARO

FLÁVIO HENRIQUE REMÉDIO

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES DE ATERRO DE
RESÍDUOS URBANOS UTILIZANDO PARÂMETROS GEOTÉCNICOS
DE PROPOSTAS BIBLIOGRÁFICAS E CORRELAÇÕES COM N_{SPT}**

Dissertação elaborada junto ao Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, para obtenção do título de Mestre em Geociências.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Eugênio da Silva Cerri

RIO CLARO – SP

2014

RESUMO

O aumento nas taxas de geração de resíduos, decorrentes do aumento das atividades industriais e do poder de compra da população, frente à escassez de áreas adequadas à disposição de resíduos, próximas aos centros geradores, tem levado as administradoras a investirem no aumento da capacidade de carga de aterros sanitários em operação ou na reutilização de antigas áreas de disposição encerradas, para suprir esta demanda. Esta situação induz a construção de aterros cada vez mais altos, atenuando o problema da demanda de resíduos e, em contrapartida, gerando grandes preocupações quanto à estabilidade destes corpos. Dentro deste contexto, os métodos convencionais de cálculo de estabilidade de taludes são comumente utilizados em estudos de estabilidade em aterros sanitários, por pesquisadores e profissionais especializados. No entanto, estas metodologias de trabalho foram desenvolvidas para estudos em maciços com constituição e comportamento mecânico distintos dos materiais dispostos em aterros sanitários. Desta forma, foram executados estudos sistemáticos com objetivo de determinar parâmetros geotécnicos adequados aos resíduos presentes no Aterro de Caetetuba, localizado no município de Atibaia – SP. Os parâmetros geotécnicos dos resíduos foram determinados com base em propostas levantadas durante a pesquisa bibliográfica e com base em resultados de testes de penetração de sondagens identificadas na pesquisa documental. Diversos métodos de análise de estabilidade de taludes, levantados durante a pesquisa bibliográfica, foram avaliados visando identificar o método mais adequado para aplicação no Aterro Sanitário de Caetetuba. Para realização das análises de estabilidade foram elaboradas seções litoconstrutivas do aterro, com base em plantas topográficas e perfis de sondagens identificados na pesquisa documental, as quais foram implementadas no software SLOPE/W da Geo-Slope International. As conclusões foram expressas em função dos valores de segurança obtidos, sendo comparados os fatores de segurança calculados pelos diversos métodos oferecidos pelo *software* SLOPE/W, em função das variações nos parâmetros geotécnicos e dos métodos analíticos utilizados.

ABSTRACT

The increase in waste generation rates, due to the increase of industrial activity and the population's purchasing power, compared to the scarcity of appropriate disposition of the waste areas, close to generating centers, has led managers to invest in increasing the capacity of load landfills in operation or reuse of old disposal areas closed to meet this demand. This leads to the construction of higher and higher landfill, reducing the problem of waste demand and, in turn, generating serious concerns over the stability of these bodies developed for studies in natural massive, with constitution and mechanical behavior of different materials disposed of in landfills. In this way, systematic studies have been performed in order to determine suitable geotechnical parameters waste present in Caetetuba Landfill, located at Atibaia/SP city. The geotechnical parameters of waste were determined based on proposals raised during the literature and based on survey results of penetration tests identified in documentary research. Several methods of slope stability analysis, raised during the literature search were evaluated to identify the most suitable method for applying the landfill Caetetuba of Health. To perform the stability analysis were prepared sections of the site, based on topographic maps and profiles polls identified in documentary research, which were implemented in SLOPE / W Geo-Slope International software. The findings were expressed in terms of security values, and compared the safety factors calculated by the various methods offered by the SLOPE / W software, depending on the variations in geotechnical parameters and analytical methods used. Within this context, the conventional slope stability calculation methods developed in soil mechanics are commonly used in the stability studies in landfills, by researchers and professionals. However, these work methodologies were

SUMÁRIO

RESUMO	2
ABSTRACT	3
SUMÁRIO	4
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE QUADROS	8
1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Área Investigada	11
2. OBJETIVOS	13
3. MÉTODOS E ETAPAS DA PESQUISA	14
3.1. Pesquisa Bibliográfica	15
3.1.1. Bases Consultadas.....	17
3.2. Pesquisa Documental	18
3.3. Caracterização do Aterro de Caetetuba.....	20
3.4. Definição do Método Analítico	22
3.5. Definição dos Parâmetros Geotécnicos dos Materiais	23
3.6. Definição do Software para Aplicação do Método Analítico	25
3.7. Apresentação dos Resultados e Conclusões	25
4. CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	26
4.1. Composição e Classificação de Resíduos Sólidos	26
4.2. Características Físicas e Mecânicas de Resíduos Sólidos.....	30
4.2.1. Distribuição dos Tamanhos das Partículas	32
4.2.2. Peso Específico.....	32
4.2.3. Poropressão	33
4.2.4. Teor de Umidade.....	37
4.2.5. Permeabilidade.....	37
4.2.6. Compressibilidade	38
4.2.7. Resistência ao Cisalhamento	39
4.3. Tratamento e Destinação Final de Resíduos Sólidos.....	50
4.3.1. Incineração	50
4.3.2. Reciclagem.....	51

4.3.3.	Compostagem	51
4.3.4.	Lixões	52
4.3.5.	Aterros Controlados.....	52
4.3.6.	Aterros Sanitários.....	53
4.3.7.	Estabilidade de Aterros Sanitários.....	56
5.	MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES	61
5.1.	Método do Talude Infinito	63
5.2.	Método de Culmann	64
5.3.	Método de Fellenius	65
5.4.	Método Simplificado de Bishop	66
5.5.	Método Simplificado de Jambu	68
5.6.	Método de Spencer.....	69
5.7.	Método de Morgenstern e Price	70
5.8.	Comparações entre os Métodos Convencionais de Análise de Estabilidade de Taludes.....	71
5.9.	Métodos de Análise de Estabilidade de Taludes Aplicados em Aterros Sanitários.....	75
6.	ESTUDO DO MEIO FÍSICO	81
7.	CARACTERIZAÇÃO DO ATERRO DE CAETETUBA.....	86
7.1.	Histórico	86
7.2.	Dados Geotécnicos e Seções Litoconstrutivas.....	92
8.	ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES	103
8.1.	Definição do Método Analítico	103
8.2.	Definição do Software.....	104
8.3.	Definição dos Parâmetros Geotécnicos dos Materiais	105
8.3.1.	Definição dos Parâmetros Geotécnicos dos Resíduos com Base em Testes de Penetração	107
8.3.2.	Definição dos Parâmetros Geotécnicos dos Resíduos com Base em Propostas Literárias	109
8.4.	Execução das Análises de Estabilidade de Taludes	111
9.	CONCLUSÕES.....	117
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do Aterro de Caetetuba.	12
Figura 2 – Fluxograma das etapas da pesquisa.....	14
Figura 3 - Relação da perda de volume dos resíduos sólidos em função da biodegradação (retirado de MACHADO, CARVALHO e VILAR, 2009, p. 125). .	31
Figura 4 – Curva tensão-deformação de resíduos sólidos com interação das componentes de atrito e tração (retirado de KÖLSCH, 1993, <i>apud</i> CARDIM, 2008, p. 23).	40
Figura 5 – Correlação entre N_{SPT} e parâmetros de resistência do solo segundo diversos autores (modificado de: (a) DÉCOURT 1989, <i>apud</i> FONSECA, 1996, p. 53; (b) U. S. NAVY, 1986, <i>apud</i> VELLOSO e LOPES, 2004, p. 48).....	46
Figura 6 – Resultados de ensaios de penetração do cone obtidos por diversos autores (adaptado de CARVALHO, 199, p. 184)	48
Figura 7 - Principais formas de rompimento em aterros sanitários (adaptado de QIAN <i>et. al.</i> , 2002, <i>apud</i> BORGATTO, 2006, p. 59 – 63)	60
Figura 8 – Método do Talude Infinito.....	63
Figura 9 – Método de Culmann.....	64
Figura 10 – Método de Fellenius.....	65
Figura 11 – Método Simplificado de Bishop.....	67
Figura 12 – Método Simplificado de Jambu.....	68
Figura 13 – Método de Spencer.....	69
Figura 14 – Método de Morgenstern e Price.....	70
Figura 15 – Comparação gráfica dos resultados obtidos pelos métodos de Fellenius, Bishop Simplificado e Jambu Simplificado (adaptado de HORST, 2007, p. 62 - 65).....	73
Quadro 9 – Resultados obtidos nas retroanálises realizadas por BORGATTO (2006).	78
Figura 16 – Mapa geológico da região do Aterro de Caetetuba (modificado de NEVES,2005, Apêndice A).....	82
Figura 17 – Localização do Aterro de Caetetuba em relação a várzea do Rio Atibaia (modificado de IGGSP, 1979, escala 1:10.000).	85

Figura 18 - Fotos aéreas dos anos de 1962 (a), 1972 (b) e 1978 (c).....	87
Figura 19 – Imagens aéreas dos anos de 2003 (a), 2008 (b) e 2010 (c)	90
Figura 20 – Situação do aterro em 2010 e a localização das sondagens próximas ao Aterro de Caetetuba.....	94
Figura 21 – Perfis de sondagem com ensaio de penetração (SPT).....	95
Figura 22 – Perfis de sondagens a trado	96
Figura 23 – Seções geológico-construtivas.....	102
Figura 24 – Ábacos de correlação empírica e valores de NSPT corrigidos para os pacotes que constituem o substrato local (modificado de a) DÉCOURT (1989 apud FONSECA, 1996, p. 53) e b) U. S. NAVY, 1986 apud VELLOSO e LOPES, 2004, p. 48).....	107
Figura 25 – Ábacos de correlação empírica e valores de NSPT corrigidos para os resíduos (modificado de a) DÉCOURT (1989 apud FONSECA, 1996, p. 53) e b) U. S. NAVY, 1986 apud VELLOSO e LOPES, 2004, p. 48).....	110
Figura 26 – Resumo dos parâmetros geotécnicos adotados para os resíduos nas análises de estabilidade realizadas.....	112
Figura 27 – Seções implementadas no <i>software</i> SLOPE/W e análises de estabilidade realizadas.....	113
Figura 28 – Comparação entre os fatores de segurança calculados através de diferentes métodos.....	116

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Valores de peso específico de resíduos obtidos por diversos autores...	34
Quadro 2 – Resumo dos parâmetros de resistência obtidos por MARTINS (2006, p. 73 - 87).....	44
Quadro 3 – Resumo dos parâmetros de resistência obtidos por CARDIM (2008, p. 83).....	44
Quadro 4 – Peso específico em função da compacidade das areias e da consistência das argilas	46
Quadro 5 – Valores típicos de teor de umidade e peso específico para solos.....	46
Quadro 6 – Coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) de resíduos urbanos obtidos por diversos autores.....	49
Quadro 7 – Faixa de valores utilizados por HORST (2007).	72
Quadro 8 – Valores utilizados e resultados obtidos por MENEZES (2012).....	75
Quadro 10 – Parâmetros obtidos por IPT (1991) e por BORGATTO (2006, p. 117). ..	78
Quadro 11 – Resultados obtidos nas análises de estabilidade realizadas por BORGATTO (2006).....	80
Quadro 12 – Principais características das sondagens executadas no Aterro de Caetetuba (Projeção UTM, Fuso 23S, Datum SIRGAS 2000)	93
Quadro 13 - Resenha meteorológico do município de Atibaia (CEPAGRI, site oficial)	93
Quadro 14 – Valores máximos e mínimos do índice N_{SPT} obtidos	98
Quadro 15 – Valores de N_{SPT} adotados e parâmetros geotécnicos definidos para os pacotes que constituem o substrato local	107
Quadro 16 – Valores de parâmetros geotécnicos definidos para os resíduos a partir dos resultados dos testes de penetração.....	110
Quadro 17 – Valores de parâmetros geotécnicos adotados para os resíduos de acordo com as propostas literárias	111
Quadro 18 – Fatores de segurança calculados para os 06 cenários definidos	114

1. INTRODUÇÃO

O presente estudo de caso aborda um aterro de resíduos urbanos localizado no município de Atibaia, estado de São Paulo, denominado Aterro de Caetetuba, onde, em algumas das faces da pilha de resíduos, verificam-se feições de instabilidade como cicatrizes de escorregamento e árvores inclinadas.

O Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2013, (ABRELPE, 2013, p. 44), indica que do total de resíduos sólidos coletados atualmente, 58,3% são destinados a aterros sanitários, 24,3% para aterros controlados e 17,4% lixões.

A geração de resíduos é resultado de basicamente todas as atividades da sociedade contemporânea incluindo desde atividades domésticas corriqueiras até processos industriais complexos. Assim, a gestão dos resíduos gerados diariamente é um problema inerente a todos os municípios.

O aumento nas taxas de geração de resíduos, decorrentes do crescimento econômico nacional, do aumento das atividades industriais e do poder de compra da população, frente à escassez de áreas adequadas à disposição de resíduos, próximas aos centros geradores, tem levado as administradoras a investirem no aumento da capacidade de carga de aterros sanitários em operação ou na reutilização de antigas áreas de disposição encerradas, para suprir esta demanda.

Esta situação induz a construção de aterros cada vez mais altos, atenuando o problema da demanda de resíduos e, em contrapartida, gerando grandes preocupações quanto à estabilidade destes corpos.

A disposição inadequada, a falta de um bom sistema de drenagem, a ausência de monitoramento geotécnico, entre outros, constituem fatores que contribuem para a ocorrência de possíveis acidentes de escorregamento em aterros sanitários. Outros fatores que contribuem na insegurança quanto à estabilidade destes corpos são as inúmeras dificuldades técnicas envolvidas na execução de ensaios de campo e laboratório, além da grande heterogeneidade verificada entre os materiais depositados em aterros diferentes, ou mesmo entre porções diferentes de um mesmo aterro. Observa-se ainda que mesmo os processos tecnológicos destinados à recuperação de resíduos, como triagem, reciclagem e compostagem, ou mesmo os que visam à eliminação de resíduos utilizando processos térmicos (incineração), não

deixam de gerar certa quantidade de resíduo, tornando os aterros sanitários sempre necessários (MARQUES, 2001, p. 2).

Dentro deste contexto, os estudos geotécnicos referentes à estabilidade de aterros sanitários se mostram cada vez mais importantes.

Os métodos convencionais de cálculo de estabilidade de taludes desenvolvidos na engenharia geotécnica são comumente utilizados em estudos de estabilidade em aterros de resíduos urbanos, por pesquisadores e profissionais especializados. No entanto, estas metodologias de trabalho foram desenvolvidas para estudos em maciços com constituição e comportamento mecânico distintos dos aterros de resíduos urbanos, com possuem comportamento mecânico pouco conhecido, são heterogêneos, anisotrópicos e podem sofrer influência de gases gerados a partir da decomposição dos resíduos.

Sendo assim, considerou-se necessária a avaliação da aplicabilidade, em aterro de resíduos urbanos, de tais métodos análise de estabilidade e da qualidade dos resultados obtidos. Para tal, foram selecionados métodos de análise de estabilidade de taludes, os quais foram aplicados ao caso do Aterro de Caetetuba. Foram definidos parâmetros geotécnicos para os resíduos no aterro considerando 06 cenários, sendo 03 cenários com parâmetros definidos a partir de resultados de ensaios de penetração e 03 cenários com parâmetros definidos a partir de propostas identificadas em pesquisa bibliográfica.

A presente dissertação é composta por dez capítulos. A Introdução e os objetivos da pesquisa são apresentados nos Capítulos 1 e 2, respectivamente, enquanto no Capítulo 3 são descritos os métodos adotados.

Os Capítulos 4 até 6 são destinados aos resultados obtidos durante a pesquisa bibliográfica realizada. O Capítulo 4 aborda aspectos inerentes a resíduos sólidos, como composição, classificação e comportamento mecânico, além de formas de tratamento e destinação dos mesmos. O Capítulo 5 apresenta os principais métodos de análise de estabilidade de taludes identificados na literatura, sendo incluídos estudos comparativos entre os métodos e casos de aplicações destes métodos em aterros sanitários. O Capítulo 6 é referente à caracterização do meio físico onde se insere o Aterro de Caetetuba, incluindo aspectos relativos a geologia e hidrogeologia local.

No Capítulo 7 são apresentados os resultados obtidos na pesquisa documental, realizada a partir de relatórios técnicos de estudos conduzidos no local, os quais foram cedidos pela administração do aterro para realização da presente dissertação, incluindo dados de trabalho como plantas topográficas e perfis de sondagens diversas.

O Capítulo 8 apresenta os procedimentos para definição dos parâmetros geotécnicos e métodos analíticos adotados, bem como os resultados das análises de estabilidade de taludes realizadas na presente dissertação.

O Capítulo 9 apresenta as conclusões obtidas nesta dissertação, as quais foram formuladas em função dos objetivos propostos, sendo consideradas as variações nos resultados das análises em função do uso de dados de entrada oriundos da literatura ou dos ensaios de campo.

Finalmente, no Capítulo 10, são apresentadas as bases bibliográficas e documentais utilizadas na presente dissertação.

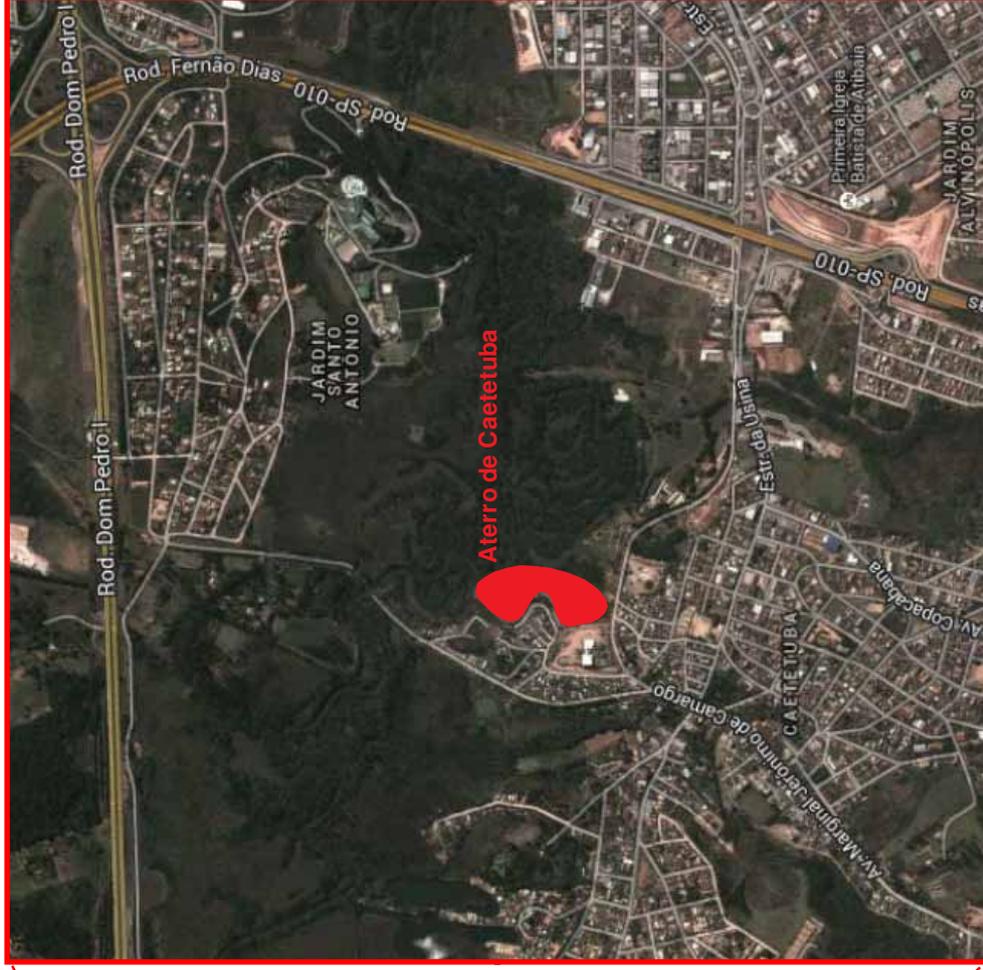
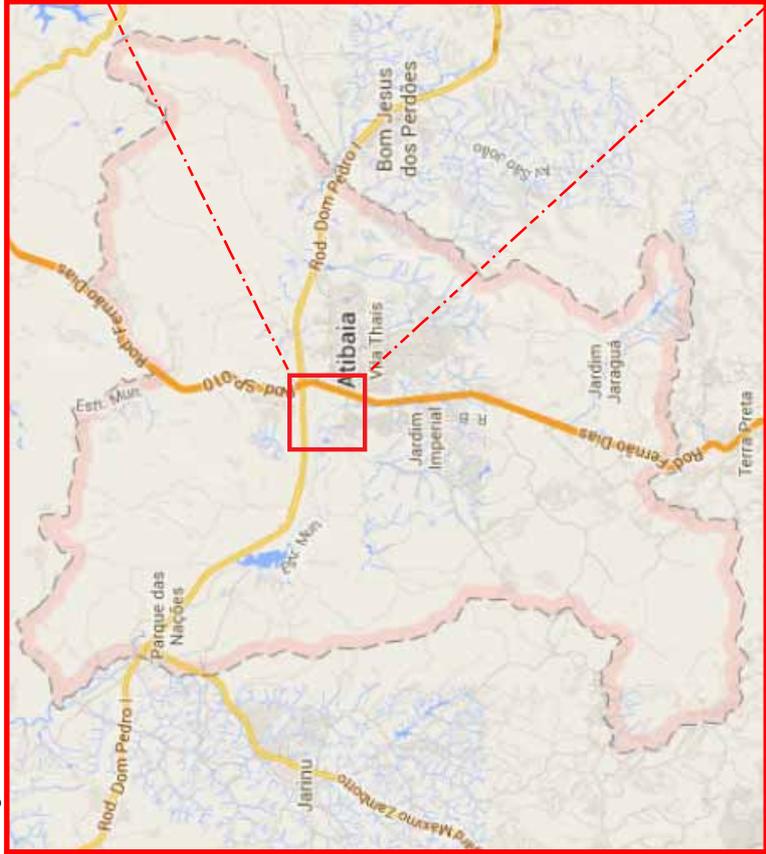
1.1. Área Investigada

A utilização da área do Aterro de Caetetuba para destinação de resíduos foi iniciada, há mais de três décadas. Posteriormente o local passou a ser administrado pelo município de Atibaia, sendo realizadas obras de recuperação que deram ao aterro sua configuração atual. Desta forma, existem diversos estudos realizados no local, os quais foram cedidos pela administração do aterro para que dados de trabalho, como sondagens e plantas diversas, fossem utilizados.

A área investigada fica localizada na Avenida Gerônimo de Camargo, no Bairro Caetetuba, município de Atibaia – SP. A Avenida Gerônimo de Camargo pode ser acessada pela Saída 39 da Rodovia Fernão Dias, dentro do perímetro urbano do município de Atibaia, próximo ao cruzamento da Rodovia Fernão Dias e a Rodovia Dom Pedro I.

O Aterro de Caetetuba está localizado a pouco mais de 50 m a sudoeste do Rio Atibaia, estando parte de sua base assentada sobre sedimentos aluviais recentes do mesmo. A **Figura 1** ilustra a localização do Aterro de Caetetuba.

Imagem sem escala



Escala - 1:15.000.000

Projeção UTM, Fuso 23S, Datum SIRGAS 2000

Figura 1 – Localização do Aterro de Caetetuba

2. OBJETIVOS

O presente estudo de caso teve como principal objetivo executar estudos sistemáticos visando a determinação de parâmetros geotécnicos adequados aos resíduos presentes no Aterro de Caetetuba, bem como aos pacotes que compõe o substrato local, para aplicação de métodos determinísticos de análise de estabilidade de taludes.

Esperou-se ainda, avaliar o desempenho de diferentes métodos para o cálculo de estabilidade de taludes, visando identificar o método mais adequado para aplicação no Aterro Sanitário de Caetetuba,

Pretendeu-se executar as análises de estabilidade utilizando dados de fácil obtenção como plantas topográficas, sondagens com ensaios de penetração e propostas literárias, adequados ao orçamento da maioria dos administradores de aterros sanitários e lixões, como no caso da Prefeitura de Atibaia.

3. MÉTODOS E ETAPAS DA PESQUISA

O desenvolvimento da presente dissertação foi organizado de acordo com os objetivos propostos e dividido em oito fases. O fluxograma da **Figura 2** apresenta as etapas de trabalho desenvolvidas.

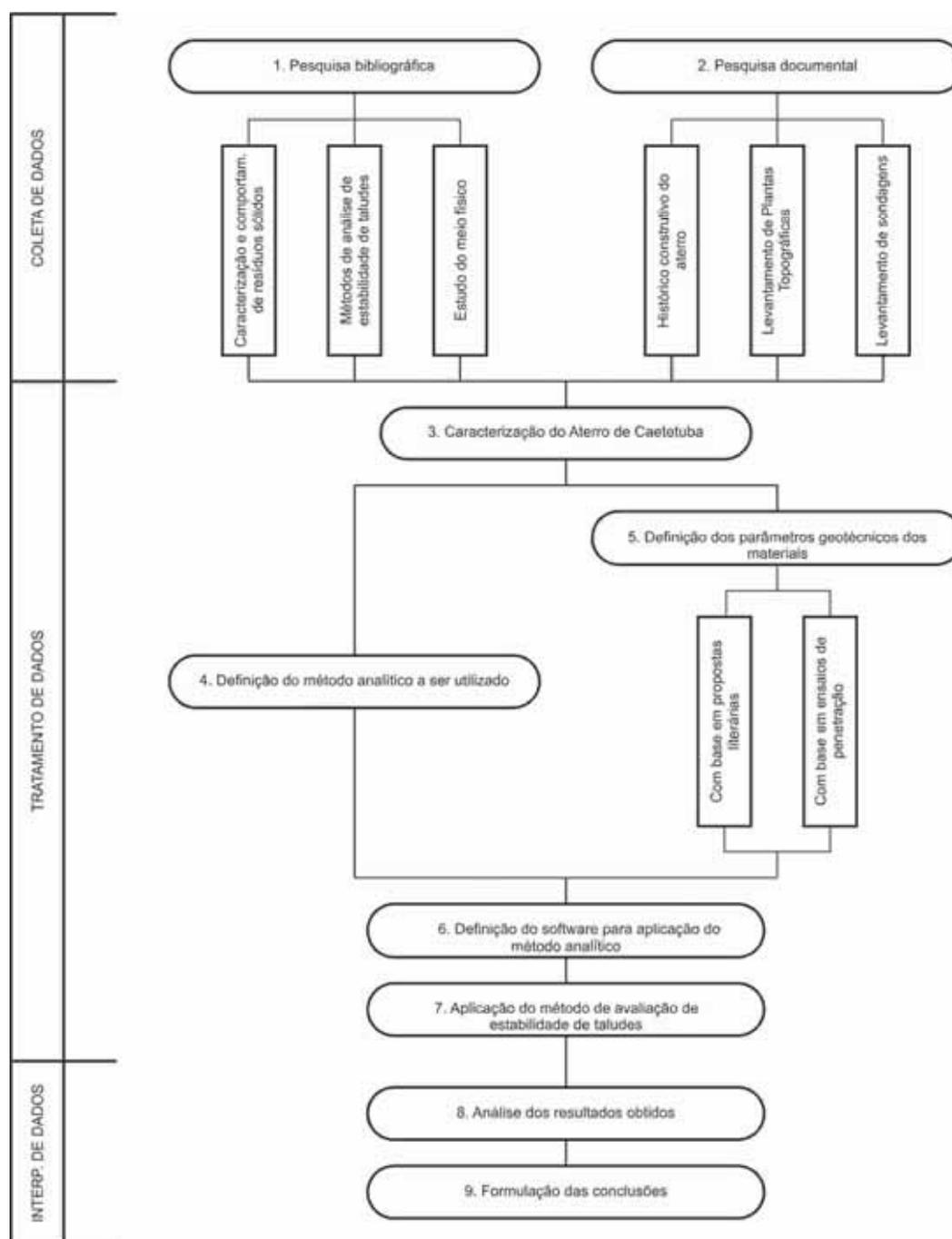


Figura 2 – Fluxograma das etapas da pesquisa.

3.1. Pesquisa Bibliográfica

Conforme ilustrado na **Figura 2**, a pesquisa bibliográfica realizada foi dividida em três etapas: a primeira etapa é referente à caracterização e comportamento de resíduos sólidos; a segunda etapa é referente aos métodos convencionais de análise de estabilidade de taludes; e a terceira etapa é referente ao estudo do meio físico onde se insere a área do Aterro de Caetetuba.

Na pesquisa referente à caracterização e comportamento de resíduos sólidos buscaram-se inicialmente as definições usuais para resíduos sólidos, sendo abordadas características como a constituição dos resíduos e de suas fases sólida, líquida e gasosa, além das diversas formas de classificar os resíduos. Também foram abordadas as características físicas e mecânicas de resíduos sólidos, incluindo fatores como distribuição dos tamanhos das partículas, peso específico, poropressão, teor de umidade, permeabilidade, compressibilidade e resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos. Foram consideradas as definições e formas de determinação de cada parâmetro e apresentados valores obtidos em trabalhos de diversos pesquisadores. Esta etapa da pesquisa abordou ainda aspectos referentes ao tratamento e destinação final de resíduos sólidos, incluindo as principais formas de tratamento de resíduos (incineração, reciclagem e compostagem) e formas de destinação de resíduos (lixões, aterros controlados e aterros sanitários) e suas principais características construtivas e operacionais.

Desta forma, a etapa da pesquisa bibliográfica referente à caracterização e comportamento de resíduos sólidos serviu de embasamento para o enquadramento do Aterro de Caetetuba, quanto aos tipos de resíduos identificados na área, aos métodos operacionais adotados durante a fase ativa do aterro, e a influência destes aspectos nas características físicas e mecânicas dos resíduos e na estabilidade do maciço de forma geral.

A segunda etapa da pesquisa bibliográfica, referente aos métodos de análise de estabilidade de taludes, foi iniciada com uma breve abordagem dos diversos métodos de avaliação de estabilidade e os tipos de análise adotados. Na sequência, buscou-se o aprofundamento nos métodos de análises determinísticos baseados na

teoria do equilíbrio limite, que utilizam um fator de segurança na definição da estabilidade de um maciço qualquer.

Os métodos de análises determinísticos baseados na teoria do equilíbrio limite são amplamente utilizados em projetos de engenharia, inclusive em aterros sanitários. Foram abordados os principais métodos analíticos, baseados na teoria do equilíbrio limite, identificados na literatura e os parâmetros envolvidos em cada método, incluindo os métodos do Talude Infinito, de Culmann, Simplificado de Bishop, Simplificado de Jambu, de Spencer e de Morgenstern e Price.

Esta etapa da pesquisa abordou ainda algumas comparações entre os métodos de análise de estabilidade de taludes citados. Na literatura, são poucas as comparações entre os métodos de análise, quando aplicados em maciços de resíduos sólidos, sendo identificadas comparações aplicadas em casos diferentes, como seções de um talude natural na Serra do Mar (TONUS, 2009) e taludes em uma mina de ferro (MENEZES, 2012), além de comparações em casos hipotéticos como FERNANDES e SILVA FILHO (2010) e HORST (2007).

Desta forma, a etapa da pesquisa bibliográfica referente aos métodos de análise de estabilidade de taludes foi útil na fundamentação dos métodos a serem utilizados e, em especial, na escolha do método a ser utilizado. Da mesma forma, as comparações entre os métodos de análise de estabilidade identificadas na literatura, subsidiaram a escolha dos métodos analíticos aplicados no Aterro de Caetetuba.

A terceira etapa da pesquisa bibliográfica, referente ao estudo do meio físico onde se insere a área do Aterro de Caetetuba, incluiu a caracterização geológica e hidrogeológica da área. Inicialmente foi abordado o contexto geológico regional da área, localizada sobre o embasamento pré-cambriano do Cinturão Ribeira (HASUI, 2012, p. 345). Na sequência foram apresentadas as principais unidades litoestratigráficas definidas nos mapeamentos geológicos identificados na literatura para a região. Posteriormente foram abordados aspectos relativos à hidrogeologia local sendo discutido o assentamento do Aterro de Caetetuba sobre os sedimentos da várzea do Rio Atibaia.

Estas informações foram de fundamental importância visto que, juntamente com informações obtidas na pesquisa documental, subsidiaram a elaboração de um modelo geológico-construtivo do aterro, etapa indispensável das análises de estabilidade realizadas.

3.1.1. Bases Consultadas

Durante a pesquisa bibliográfica foram consultadas diversas bases técnicas, incluindo instituições como a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

O acervo de normas técnicas da ABNT está disponível nos computadores da universidade por identificação via IP e visualizador no *site* da biblioteca do campus de Rio Claro. Os acervos CONAMA e CETESB estão disponíveis a todo o público interessado nos *sites* referentes a cada instituição.

Além das instituições mencionadas, foram consultados diversos acervos, com destaque para:

- Periódicos da CAPES, disponíveis a todos os computadores da universidade no Portal da CAPES em:
<<http://www-periodicos-capes-gov-br.ez87.periodicos.capes.gov.br/>>;
- Acervo UNESP, disponível na base de dados “ATHENA” em:
<<http://portal.biblioteca.unesp.br/portal/athena/>>;
- Acervo USP, disponível na base de dados “DEDALUS” em:
<<http://dedalus.usp.br/>>; e
- Catálogos da UFRJ, disponível na base de dados “MINERVA” em:
<<http://www.minerva.ufrj.br/>>.

Diversas outras bases de dados foram consultadas, incluindo sites comuns de busca.

Nos acervos técnicos da ABNT, CONAMA e CETESB, ao se pesquisar “resíduos sólidos”, foram identificados diversos documentos, com destaque para ABNT NBR 10004 (2004) e CONAMA 005/93 (1993). A busca foi repetida nas bases de dados das universidades, sendo as principais referências encontradas na base DEDALUS, com destaque para NASCIMENTO (2007), SCHALCH *et. al.* (2002) e CARVALHO (1999).

Pesquisando-se por “aterros sanitários” nos acervos da ABNT, CONAMA e CETESB, foram identificadas normas como CETESB P4.2471 e ABNT NBR 8419. Nas bases de dados das universidades, a busca por estas palavras-chave apresentou trabalhos como LOUREIRO (2005) e FARIA (2002), disponíveis no site do Grupo de Estudo em Tratamento de Resíduos Sólidos (GETRES). Na plataforma ATHENA, a mesma busca apresentou diversas referências, entre as quais, JARDIM (1995).

No banco de teses do Portal CAPES a pesquisa por “estabilidade de taludes x aterro sanitário” apresentou referências importantes como OLIVEIRA (2002), enquanto a busca por “mecânica x aterro sanitário” apontou referências como MARQUES (2001).

Buscando-se por “estabilidade de taludes” nos acervos das universidades são identificados vários documentos, dentre os quais, FIORI e CARMIGNANI (2009), na plataforma DEDALUS. Utilizando-se a palavra-chave “geotecnia”, na plataforma DEDALUS, foi identificado MASSAD (2003).

Com referência as bases utilizadas no estudo do meio físico, buscou-se inicialmente “geologia de Atibaia” na plataforma ATHENA, sendo verificados os mapeamentos geológicos realizados durante o convênio entre UNESP e o extinto Pró-Minério, onde foram mapeadas diversas bases cartográficas do IBGE, em escala 1:50.000, incluindo as folhas Atibaia. A partir destes foi obtida a compilação realizada por NEVES (2005).

É importante ressaltar que, apesar de apresentada no início da dissertação e de tratada como uma etapa inicial de trabalho, a pesquisa bibliográfica ocorreu ao longo de todo o projeto.

3.2. Pesquisa Documental

A área do Aterro de Caetetuba se mostrou favorável ao desenvolvimento desta pesquisa, tendo em vista as características construtivas e geométricas do maciço além da grande quantidade de informações disponíveis. O uso da área para destinação de resíduos foi iniciado a mais de três décadas. Desta forma, existem

diversos estudos realizados no local, referentes a análises ambientais, os quais foram cedidos pela administração do aterro para realização da presente dissertação.

Nos estudos cedidos pela administração do Aterro de Caetetuba estão registrados diversos trabalhos de campo, incluindo vistorias técnicas, levantamentos topográficos, execuções de sondagens e campanhas de instalação de poços de monitoramento com amostragem de água subterrânea. Destaca-se que não foram realizados trabalhos de campo no local durante a presente dissertação de mestrado, sendo todos os trabalhos de campo mencionados realizados por terceiros.

Foram utilizados documentos referentes ao processo de investigação ambiental da área em andamento na CETESB como memoriais e termos de ajustamento além de relatórios técnicos, dentre os quais:

- Memorial de Caracterização Técnica para licença de implantação de novo estabelecimento, referente a instalação da unidade de reciclagem e compostagem do Aterro de Caetetuba, elaborado pela Prefeitura Municipal de Atibaia, no ano de 2006;
- Investigação de Passivo Ambiental em área denominada Vila São José, Atibaia - SP, realizado pela empresa Gisante Serviços de Engenharia S/S LTDA, no ano de 2010;
- Avaliação Ambiental Preliminar do Aterro de Caetetuba, Atibaia - SP, realizado pela empresa Geocia - Consultoria, Serviços em Geologia e Engenharia Ambiental LTDA-EPP, no ano de 2012;
- Investigação Ambiental Confirmatória do Aterro de Caetetuba, Atibaia - SP, realizado pela empresa Geocia - Consultoria, Serviços em Geologia e Engenharia Ambiental LTDA-EPP, no ano de 2012.

Na Investigação de Passivo Ambiental foi obtida a planta topográfica da área, que representa a situação do maciço no ano de 2010. Conforme verificado no relatório elaborado pela empresa Gisante, foram realizadas 04 sondagens com amostragem de solo e instalação de poços de monitoramento com amostragem de água subterrânea, incluindo 01 poço entre o maciço e a várzea do Rio Atibaia e 03 poços entre o maciço e a Vila São Jose.

Na Avaliação Ambiental Preliminar, foram obtidas fotos aéreas datadas dos anos de 1962 (a), 1972 (b) e 1978 (c). Não foram verificadas fotos aéreas relativas às décadas de 1980 e 1990, época da disposição da maior parte dos resíduos domésticos no local. A partir do ano de 2005, estão disponíveis imagens de satélite da área, com periodicidade anual, no *software Google Earth*.

Na Investigação Ambiental Confirmatória, foram obtidos diversos perfis de sondagem, referentes as sondagens com teste de penetração (SPT) e a trado para instalação de poços de monitoramento. Conforme verificado no relatório elaborado pela empresa Geocia, foram realizadas 12 sondagens a trado, para instalação de 08 poços de monitoramento de água subterrânea e 04 poços para amostragem de gás, além da execução de uma malha de sondagens subsuperficiais para medição de gases voláteis no solo e execução de 05 sondagens com ensaio de penetração (SPT). Foram identificadas sondagens no topo do maciço, na lateral imediata à base e no entorno próximo ao Aterro de Caetetuba, sendo obtidas descrições dos resíduos e dos corpos litológicos que compõe o embasamento local.

Desta forma, o material consultado na Pesquisa Documental forneceu dados fundamentais a serem utilizados nas análises de estabilidade do aterro, incluindo geometria e perfil construtivo do maciço, condições de assentamento, parâmetros geotécnicos dos solos e dos resíduos e presença de água.

3.3. Caracterização do Aterro de Caetetuba

Após a coleta de dados disponíveis na literatura e nos estudos cedidos pela administração do Aterro de Caetetuba, foi iniciado o processo de tratamento de dados com a elaboração do modelo construtivo do Aterro de Caetetuba.

Foram identificadas sondagens no topo do maciço, na lateral imediata à base e no entorno próximo ao Aterro de Caetetuba. As sondagens realizadas diretamente no maciço forneceram dados relativos à caracterização dos resíduos e dos corpos que compõe o substrato local bem como as profundidades de mudança de material, da base do aterro e do nível d'água dentro do corpo de resíduos.

As sondagens realizadas na lateral imediata à base do aterro bem como as sondagens realizadas no entorno próximo foram importantes visto que forneceram informações referentes à continuidade lateral dos pacotes litológicos que compõe o substrato local bem como os parâmetros geotécnicos dos mesmos. Destaca-se que o Aterro de Caetetuba encontra-se parcialmente assentado sobre sedimentos aluviais do Rio Atibaia.

A localização das sondagens, bem como as plantas topográficas e imagens aéreas obtidas nos documentos consultados, foram georreferenciadas e sobrepostas, utilizando o *software* ArcGIS 10. Com base nas imagens aéreas e nas entrevistas contidas nos relatórios fornecidos, foi elaborado o histórico construtivo do maciço. A partir do histórico do aterro, juntamente com os perfis de sondagens e os levantamentos topográficos disponíveis foi possível elaborar um modelo construtivo do maciço bastante fiel à realidade.

Além de servirem como embasamento para o modelo construtivo do Aterro de Caetetuba, as sondagens com ensaios SPT forneceram dados referentes a presença de água no aterro e no substrato, bem como dados utilizados na determinação de parâmetros geotécnicos inerentes aos resíduos e aos pacotes litológicos sobre os quais está assentado o Aterro de Caetetuba.

Inicialmente foram elaboradas duas seções transversais do maciço, de forma que cada seção abrange uma sondagem realizada diretamente sobre os resíduos e uma sondagem realizada na base imediata do aterro. As seções transversais foram elaboradas utilizando-se o *software* AutoCAD 2013 sendo posteriormente exportadas para o *software* SLOPE/W 2012. No *software* SLOPE/W 2012, foram implementados os parâmetros geotécnicos inerentes a todos os materiais presentes no modelo, incluindo os resíduos e os pacotes litológicos que compõe o substrato. Após a definição dos parâmetros geotécnicos e dos métodos analíticos apropriados, foram realizadas as análises de estabilidade de taludes.

3.4. Definição do Método Analítico

Após a modelagem do Aterro de Caetetuba, foi definido o método analítico a ser utilizado nas análises de estabilidade. Foi realizado um levantamento bibliográfico referente ao comportamento de resíduos sólidos e aos métodos de análises de estabilidade determinísticos baseados na teoria do equilíbrio limite, os quais são amplamente utilizados em projetos de engenharia, inclusive em aterros sanitários.

Na pesquisa referente ao comportamento de resíduos sólidos foram identificadas algumas análises de estabilidade de taludes em aterros sanitários realizadas por diferentes metodologias, apresentando resultados diversos.

Na pesquisa referente aos métodos de análises de estabilidade de taludes, foram identificadas as vantagens e desvantagens de cada método e sugestões para suas aplicações, conforme a descrição das obras consultadas e as opiniões dos autores de tais obras. Também foram identificadas algumas comparações entre tais metodologias, quando aplicadas a casos gerais de engenharia, sendo os resultados obtidos nestas comparações expressos em virtude do fator de segurança obtido.

Após o levantamento dos diversos métodos de avaliação de estabilidade de taludes, foi realizada uma consulta a profissionais especializados na área, sendo estes profissionais solicitados a apontar, entre os métodos analíticos identificados na pesquisa bibliográfica, qual o método, ou os métodos mais adequados para análises de estabilidade em aterros sanitários.

Desta forma, a escolha do método analítico adotado na presente dissertação considerou os métodos levantados durante a etapa da pesquisa bibliográfica, os métodos apontados pelos profissionais especializados consultados e os métodos utilizados nas análises de estabilidade de taludes em aterros sanitários identificadas na literatura, sendo realizadas análises de estabilidade de taludes por diversos métodos, com ênfase para o método de Bishop Simplificado.

Após a execução das análises de estabilidade de taludes do Aterro de Caetetuba, pelo método de Bishop Simplificado, as mesmas foram novamente realizadas, utilizando outros métodos analíticos, identificados na pesquisa bibliográfica, disponíveis no *software* SLOPE/W.

3.5. Definição dos Parâmetros Geotécnicos dos Materiais

Posteriormente a definição do método analítico empregado, foram definidos os parâmetros geotécnicos dos materiais. Foram definidos parâmetros geotécnicos inerentes a todos os materiais presentes nas seções transversais elaboradas, incluindo os resíduos presentes no Aterro de Caetetuba e os litotipos que constituem o substrato onde se assenta o maciço. Entre as propriedades designadas aos pacotes definidos inclui-se peso específico, ângulo de atrito e coesão.

Os parâmetros geotécnicos inerentes aos litotipos que constituem o substrato local foram definidos pelas propostas de correlação empírica entre o índice N_{SPT} e os parâmetros de resistência do solo, sendo adotada a correlação entre N_{SPT} e ângulo de atrito para solos arenosos de DÉCOURT (1989, *apud* FONSECA, 1996, p. 53), a correlação entre N_{SPT} e a resistência não drenada para argilas proposta por U. S. NAVY (1986, *apud* VELLOSO e LOPES, 2004, p. 48) e a correlação entre N_{SPT} e o peso específico dos solos de GODOY (1972, *apud* CHRISTAN, 2013 p. 51).

Desta forma, na definição dos parâmetros geotécnicos dos pacotes que constituem o substrato local a partir dos ensaios de penetração, foi considerada a média dos valores de N_{SPT} obtidos ao longo de cada pacote. Destaca-se que, a versão gratuita do software SLOPE/W, disponível para estudantes, permite apenas análises de estabilidade em perfis que apresentem no máximo 03 litotipos diferentes. Desta forma, o pacote silto-arenoso, relativo aos solos de alteração do embasamento local, foi integrado ao pacote de areia média a grossa.

Na definição dos parâmetros geotécnicos dos resíduos dispostos no aterro, foram consideradas diversas possibilidades. Inicialmente foram considerados os resultados das sondagens com ensaio de penetração, realizadas nos resíduos, utilizando as mesmas correlações adotadas para definição dos parâmetros geotécnicos inerentes aos litotipos que constituem o substrato local.

De acordo com CARVALHO (1999, p. 68), na determinação dos parâmetros de resistência de resíduos a partir de ensaios de penetração, é usual considerar os resíduos como puramente coesivos ($\Phi=0$) ou puramente não coesivos ($c=0$). Alguns autores discordam destas proposições, como MITCHELL e MITCHELL (1992, *apud* CARDIM, 2008, p. 26) que alegam que embora não haja uma coesão verdadeira, é

razoável a inclusão da componente coesiva nas avaliações de resistência ao cisalhamento. Os mesmos se baseiam no fato de que cortes praticamente verticais em aterros permanecem estáveis por longos períodos. Para SANCHEZ-ALCITURRI et. al. (1993, *apud* CARVALHO, 1999, p. 68), a consideração de materiais puramente coesivos ou puramente não coesivos aplica-se somente aos solos. No caso dos resíduos, onde não existem bases firmes para tais afirmações, são mais adequadas as análises considerando valores de coesão e ângulo de atrito.

Desta forma, na definição dos parâmetros geotécnicos dos resíduos a partir dos ensaios de penetração foram consideradas três possibilidades, sendo elas: valores de coesão, ângulo de atrito e peso específico obtidos com base nas correlações adotadas; resíduos puramente coesivos ($\Phi=0$) com valor de coesão e peso específico obtidos pelas correlações adotadas; e resíduos puramente não coesivos ($c=0$) com valor de ângulo de atrito e peso específico obtidos pelas correlações adotadas. Nos três casos foi considerada a média dos valores de N_{SPT} obtidos ao longo do pacote, excluindo-se os picos de resistência ($N_{SPT} > 20$). Na definição do peso específico foi considerado o valor para meios úmidos.

Em um segundo plano, os parâmetros geotécnicos dos resíduos foram definidos a partir das propostas levantadas na etapa da Pesquisa Bibliográfica, obtidos por diversos autores a partir de retroanálises, por meio de ensaios de laboratório ou por meio de ensaios *in situ*.

Entre as diversas propostas identificadas, foram selecionados os valores de coesão, ângulo de atrito e peso específico sugeridos por duas propostas, sendo elas a proposta de BENVENUTO e CUNHA (1991) e de KAVAZANJIAN et. al. (1995).

Os valores sugeridos por BENVENUTO e CUNHA (1991) se mostraram adequados visto que foram definidos com base em retroanálises de escorregamentos ocorridos no Aterro Bandeirantes, em São Paulo – SP, que assim como o Aterro de Caetetuba, é composto principalmente por resíduos urbanos.

Por sua vez, os valores sugeridos por KAVAZANJIAN et. al. (1995) foram adotados em virtude da ampla citação de sua proposta nos artigos identificados durante a pesquisa bibliográfica incluindo CARVALHO (1999, p. 68), CARDIM (2008, p.48), FUCALE (2005, p. 72), MARQUES (2001, p. 42), NASCIMENTO (2007, p. 78), NETO (2004, p. 35) e OLIVEIRA (2002, p. 104).

3.6. Definição do Software para Aplicação do Método Analítico

Nas análises de estabilidade de taludes identificadas na literatura durante a etapa de pesquisa bibliográfica, verificou-se o uso frequente de *softwares* especializados na modelagem dos corpos analisados. Entre os principais *softwares* relacionados à modelagem ambiental identificados, o conjunto de programas desenvolvidos pela Geo-Slope Internacional se destacou por sua praticidade e por possuir versões gratuitas para estudantes.

Entre as ferramentas no pacote da Geo-Slope International, o SLOPE/W é o produto utilizado para calcular o fator de segurança através de diversas metodologias que utilizam análises de equilíbrio limite, podendo modelar tipos heterogêneos de materiais com complexa geometria, considerando diferentes superfícies de deslizamento e poropressão (GEO-SLOPE INTERNATIONAL).

O pacote de Ferramentas Geo-Studio 2012 pode ser descarregado no site <<http://www.geo-slope.com/downloads/2012.aspx>>. Instalando-se o arquivo completo, seleciona-se a versão estudantil nas opções do programa, que é livre com algumas limitações.

3.7. Apresentação dos Resultados e Conclusões

Os resultados obtidos são apresentados a partir do Capítulo 4 da presente dissertação de mestrado, incluindo os resultados obtidos na pesquisa bibliográfica, na pesquisa documental e nas análises de estabilidade de taludes.

Os resultados das análises de estabilidade foram expressos em função dos valores de segurança obtidos, sendo comparados os fatores de segurança calculados pelos diversos métodos oferecidos pelo *software* SLOPE/W, em função das variações nos parâmetros geotécnicos e dos métodos analíticos utilizados.

4. CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A geração de resíduos é resultado de basicamente todas as atividades da sociedade contemporânea incluindo desde atividades domésticas corriqueiras até grandes processos industriais.

A norma ABNT NBR 10004 (2004, p. 1) define resíduos sólidos como:

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

Os resíduos sólidos, assim como os solos naturais, são meios multifásicos constituídos pelas fases sólidas, líquida e gasosa. A fase sólida dos resíduos apresenta diversos constituintes, formando um arranjo poroso que pode ou não estar preenchido por líquidos percolados. No caso de aterros de resíduos urbanos, inicialmente tem-se o predomínio da fase sólida, com a ação do tempo, os processos de biodegradação acarretam na geração de líquidos e gases (CARVALHO, 1999, p. 38).

4.1. Composição e Classificação de Resíduos Sólidos

A composição dos resíduos sólidos, chamada composição física ou gravimétrica, define a porcentagem dos diversos componentes presentes na massa de lixo (NASCIMENTO, 2007, p. 45). A caracterização da composição dos resíduos é feita utilizando-se amostras representativas, com seleção e mensuração dos componentes da massa, de forma a determinar a relação entre o peso de cada componente presente na amostra e o peso da amostra total (SILVEIRA, 2004,

p. 15). A definição da composição física dos resíduos é de grande importância, visto que condiciona o comportamento global da massa de lixo (OLIVEIRA, 2002, p. 31).

A fase gasosa do aterro é composta por diversos gases, alguns presentes em grandes quantidades como o metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂), e outros em quantidades menores incluindo amônia (NH₃), hidrogênio (H₂), gás sulfídrico (H₂S), nitrogênio (N₂) e oxigênio (O₂). A decomposição dos resíduos se inicia por processos aeróbicos, na deposição do resíduo. Após a cobertura do lixo, ocorre a redução de oxigênio e a decomposição passa a ser anaeróbica (BORBA, 2006, p.08 - 11).

A fase líquida do aterro, ou chorume, é composta basicamente pelo líquido que entra na massa aterrada de lixo, proveniente de fontes externas, tais como sistemas de drenagem superficial, chuva, lençol freático, nascentes e aqueles resultantes da decomposição do lixo (HAMADA, 1997, p. 1802). A norma ABNT NBR 8419 (1996, p. 2), define chorume como:

“Líquido, produzido pela decomposição de substâncias contidas nos resíduos sólidos, que tem como características a cor escura, o mau cheiro e a elevada DBO (demanda bioquímica de oxigênio).”

A fase sólida dos resíduos apresenta uma mistura de materiais de diferentes tipos, formas e dimensões, incluindo papéis, plásticos, tecidos, vidros, metais, madeiras, entulhos e resíduos alimentares (NASCIMENTO, 2007, p. 46).

Diversas propostas são apresentadas na literatura para classificação de resíduos sólidos. A norma ABNT NBR 10004 (2004, p. 3) classifica tais resíduos de acordo com os processos envolvidos na origem dos mesmos, na caracterização de seus constituintes e na identificação dos possíveis impactos a saúde e ao meio ambiente. As classes definidas são:

- Resíduos Classe I – Perigosos: os resíduos nesta classe apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e/ou patogenicidade;
- Resíduos Classe II - Não Perigosos: os resíduos nesta classe são divididos em duas subclasses:
 - Classe II A - Não Inertes: podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade e/ou solubilidade em água; e

- Classe II B – Inertes: quando submetidos a um contato estático ou dinâmico com água, não apresentam nenhum de seus componentes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água definidos pelo Anexo H da Norma.

Por sua vez, a Resolução CONAMA 005/93 (1993, p. 595) classifica os resíduos sólidos em quatro classes, de acordo com o risco oferecido a saúde pública. As classes definidas são:

- Grupo A: apresentam risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente, tendo em vista a presença de agentes biológicos, incluindo excreções, secreções, líquidos orgânicos; meios de cultura; tecidos, filtros de gases aspirados de área contaminada; resíduos advindos de área de isolamento; restos alimentares de unidade de isolamento; resíduos de laboratórios de análises clínicas; resíduos de unidades de atendimento ambulatorial; resíduos de sanitários de unidade de internação e de enfermaria, objetos perfurantes ou cortantes, capazes de causar punctura ou corte, tais como lâminas de barbear, bisturi, agulhas, escalpes, vidros quebrados, provenientes de estabelecimentos prestadores de serviços de saúde;
- Grupo B: apresentam risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente devido às suas características químicas, incluindo drogas quimioterápicas e produtos por elas contaminados, resíduos farmacêuticos e demais produtos considerados perigosos, conforme classificação da ABNT NBR 10004 (2004);
- Grupo C: materiais radioativos ou contaminados com radionuclídeos, provenientes de laboratórios de análises clínicas, serviços de medicina nuclear e radioterapia; e
- Grupo D: resíduos comuns que não se enquadram nos grupos descritos anteriormente.

BIDONE e POVINELLI (1999, *apud* NASCIMENTO, 2007, p. 37) classificou os resíduos sólidos com base em sua degradabilidade, sendo:

- Facilmente degradáveis: apresentam degradação biológica através de bactérias e fungos como a matéria orgânica presente nos resíduos de origem urbana;
- Moderadamente degradáveis: apresentam degradação biológica em um período de duas a quatro semanas como papéis, papelão e outros materiais celulósicos;
- Dificilmente degradáveis: apresentam degradação biológica desprezível como panos, retalhos, aparas, resíduos de couro, borracha e madeira; e
- Não degradáveis: não apresentam degradação biológica como vidros, pedras, metais, diversos tipos de plásticos, terra e outros.

SCHALCH *et. al.* (2002, p. 4 – 6), apresentaram uma classificação para resíduos sólidos com base na sua origem. Segundo esta obra, os resíduos sólidos se dividem em:

- Resíduos Urbanos: gerados nas residências, escritórios, lojas, hotéis, supermercados, restaurantes e em outros estabelecimentos, além de resíduos oriundos da limpeza pública urbana;
- Resíduos Industriais: gerados nos diversos tipos de processamentos industriais;
- Resíduos de Serviços de Saúde: gerados em hospitais, clínicas médicas e veterinárias, laboratórios de análises clínicas, farmácias, centros de saúde, consultórios odontológicos e outros estabelecimentos afins;
- Resíduos de Portos, Aeroportos, Terminais Rodoviários e Ferroviários: resíduos sépticos, que podem conter organismos patogênicos, tais como: materiais de higiene e de asseio pessoal, podendo veicular doenças de outras cidades, estados e países;
- Resíduos Agrícolas: oriundo das atividades da agricultura e pecuária, como embalagens de adubos, defensivos agrícolas, ração, restos de colheita, esterco animal;
- Entulho: resíduos da construção civil, demolições, solos de escavações etc.; e
- Resíduos Radioativos: resíduos provenientes dos combustíveis nucleares.

Conforme se verá adiante, no Aterro de Caetetuba são identificados dois pacotes distintos de resíduos, sendo o pacote basal constituído de Resíduos Urbanos e o Pacote superior constituído de Entulhos.

Existem ainda propostas de classificação de resíduos baseadas na mecânica dos solos como o emprego da carta de Schmertmann, onde são plotados os resultados médios obtidos em ensaios de penetração do cone, excluindo-se os picos de resistência causados por objetos rígidos no aterro. Desta forma, é possível classificar os resíduos dentro de uma variação de areia fofa a argila siltosa e arenosa (CARVALHO, 1999, p. 36).

4.2. Características Físicas e Mecânicas de Resíduos Sólidos

Na investigação das propriedades mecânicas dos resíduos sólidos é necessário o conhecimento de diversas propriedades físicas dos mesmos, incluindo a distribuição do tamanho das partículas, peso específico, entre outros (MARQUES, 2001, p. 21). As principais propriedades mecânicas dos resíduos sólidos são a compressibilidade e a resistência ao cisalhamento. Em geral, estas propriedades são avaliadas utilizando os métodos convencionais desenvolvidos na mecânica dos solos (NASCIMENTO, 2007, p. 56).

Os resíduos sólidos, assim como os solos naturais, são meios multifásicos construídos pelas fases sólidas, líquida e gasosa. A fase sólida dos resíduos apresenta diversos constituintes, formando um arranjo poroso que pode ou não estar preenchido por líquidos percolados. Inicialmente tem-se o predomínio da fase sólida, com a ação do tempo, os processos de biodegradação acarretam na geração de líquidos e gases (CARVALHO, 1999, p. 38).

Desta forma, entende-se que o tempo é um elemento importante no comportamento dos resíduos sólidos. MACHADO, CARVALHO e VILAR (2009, p. 125) propõe um modelo de quatro fases para resíduos em aterros sanitários, incluindo as fases gasosa, líquida e sólida, sendo a fase sólida dividida em duas partes: as fibras, compostas principalmente por plásticos e tecido; e a pasta sólida de resíduo, composta por todos os outros materiais sólidos não fibrosos. A **Figura 3** apresenta relação da perda de volume dos resíduos sólidos em função da biodegradação, de acordo com MACHADO, CARVALHO e VILAR (2009, p. 125):

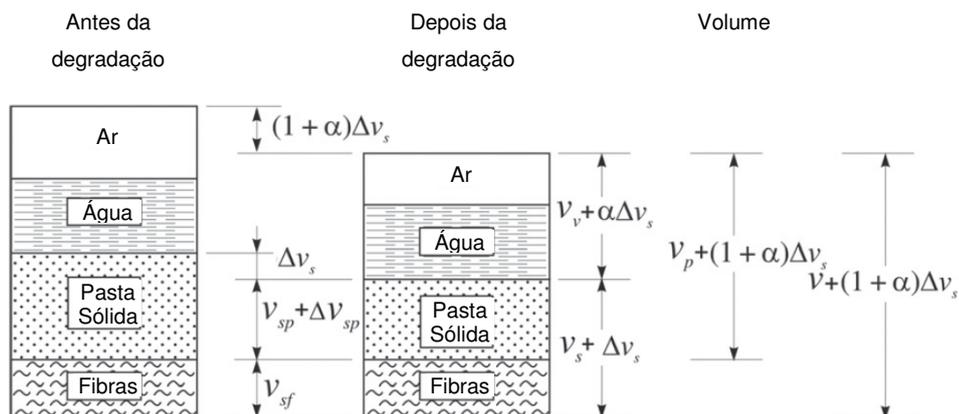


Figura 3 - Relação da perda de volume dos resíduos sólidos em função da biodegradação (retirado de MACHADO, CARVALHO e VILAR, 2009, p. 125).

Onde:

- V_s = Volume do sólido
- V_p = Volume de pasta de resíduo mais volume de vazios
- V_v = Volume de vazios
- V_{sp} = Volume de pasta de resíduo
- V_{sf} = Volume de fibras
- α = Taxa de compressão de resíduos ao longo do tempo

Segundo o modelo, os componentes de fibra não perdem massa ao longo do tempo, assim, a variação do volume sólido corresponde à variação do volume de pasta sólida de resíduo (MACHADO, CARVALHO e VILAR, 2009, p. 125).

Desta forma, com o decorrer do tempo ocorre uma concentração de materiais que adquirem texturas fibrosas como plásticos e tecidos podendo isto influenciar fortemente nos valores de resistência (NASCIMENTO, 2007, p. 66).

Além disso, aterros sanitários apresentam geração de biogás ao longo do tempo, resultando no aumento das pressões internas, na medida em que haja aprisionamento ou dificuldade do mesmo ser drenado, o que também influencia no comportamento dos resíduos (BENVENUTO e CIPRIANO, 2010, p. 43). Altos valores de teor de umidade também resultam no desenvolvimento de poropressões, podendo diminuir a tensão efetiva, resultando em menores valores de resistência ao cisalhamento (MARTINS, 2006, p. 16).

A seguir são detalhadas as principais características físicas e mecânicas dos resíduos sólidos.

4.2.1. Distribuição dos Tamanhos das Partículas

A distribuição do tamanho das partículas de resíduos sólidos, em decorrência da heterogeneidade dos materiais depositados em um aterro, apresenta uma ampla faixa de variação, tornando limitadas as metodologias para sua determinação (CARVALHO, 1999, p. 40).

Diversos pesquisadores utilizam o processo clássico de peneiramento para determinação da curva de distribuição do tamanho das partículas (NASCIMENTO, 2007, p. 47). Nota-se que existe uma tendência ao aumento das frações de partículas mais finas com o aumento da idade dos resíduos, em decorrência da evolução dos processos de degradação (MACHADO, 2005, p. 4).

OLIVEIRA (2002, p. 94) apresentou resultados onde 60% do tamanho das partículas são maiores que 20 mm e 20% dos grãos estão compreendidos na faixa entre 20 mm e 2 mm. CARVALHO (1999, p. 189) obteve resultados para amostras de profundidades menores que 18m, onde 30% a 35% dos componentes são maiores que 20 mm e 50% dos grãos possuem entre 20 mm e 2 mm. Para amostras de profundidades maiores que 18 m, 20% a 50% dos componentes possuem mais de 20 mm e 45% a 60% dos componentes possuem entre 20 mm e 2 mm.

4.2.2. Peso Específico

O peso específico (γ) dos resíduos sólidos é expresso por kN/m^3 e representa a relação entre o peso de uma amostra e seu volume (SILVEIRA, 2004, p. 17). Diversos fatores influenciam o peso específico dos resíduos sólidos como a composição e umidade dos resíduos, forma disposição, compactação e consolidação dos resíduos em função da sobreposição de novas camadas e a decomposição com o tempo (NASCIMENTO, 2007, p. 52).

A determinação do peso específico de resíduos sólidos é complicada, não só devido à natureza dos materiais, mais à necessidade de amostras com volume bem maior do que as normalmente utilizadas em geotecnia (SILVEIRA, 2004, p. 17 - 19).

O peso específico de uma amostra de resíduos pode ser obtido pelas diversas metodologias, entre as quais, a execução de poços ou trincheiras, onde o peso específico é obtido pela relação entre o peso dos resíduos escavados e o volume da cava. Não existem resultados precisos (OLIVEIRA, 2002, p. 37).

MARQUES (2001) realizou um estudo em um aterro experimental, construído em São Paulo – SP, onde foram executados ensaios in situ em equipamentos de grandes dimensões para avaliar o peso específico dos resíduos. Os resultados obtidos por MARQUES (2001, p. 326) se mostraram bastante variados com valores situados entre $3,4 \text{ kN/m}^3$ e 14 kN/m^3 , e valor médio em torno de $8,2 \text{ kN/m}^3$.

SILVEIRA (2004) realizou um estudo do peso específico de resíduos sólidos dispostos em aterros não controlados, controlados e sanitários, utilizando ensaios in situ com o uso do percâmetro nos aterros de Paracambi – RJ, Santo André - SP, Gramacho – RJ e Nova Iguaçu – RJ. Os resultados obtidos por SILVEIRA (2004, p. 90), mostraram valores de peso específico entre $9,47 \text{ kN/m}^3$ e $16,50 \text{ kN/m}^3$ para aterros a céu aberto, $16,75 \text{ kN/m}^3$ e $19,74 \text{ kN/m}^3$ para aterros controlados e $9,15 \text{ kN/m}^3$ e $19,54 \text{ kN/m}^3$ para aterros sanitários.

O **Quadro 1** apresenta os valores de peso específico de resíduos obtidos por diversos autores, pelas diferentes metodologias.

4.2.3. Poropressão

Numa massa saturada de resíduos, considerando os resíduos como meios multifásicos construídos pelas fases sólidas, líquida e gasosa, os líquidos que ocupam os vazios estão sob uma determinada pressão chamada de poropressão (u) (BORGATTO, 2006, p. 52).

Quadro 1 – Valores de peso específico de resíduos obtidos por diversos autores.

Autor	Peso Específico	Observações
(a) Sowers (1968)	8 - 12	Compactados
(a) Sowers (1973)	1,2 - 3	Antes da compactação
	6	Após a compactação
(a) Rao (1974)	1,5 - 2	Sem compactação
	3,5 - 6	Fraca Compactação
(a) Bratley et al. (1976)	1,16	Sem compactação
	7 - 13,1	Compactados
(a) Cartier e Baldit (1983)	11 - 14,5	Compactados
	10	Após a compactação
(a) Oviden (1987)	7,5 - 8,5	Pré-carregados
	5,5 - 7,1	Antes da decomposição
(a) Oweiss e Khera (1990)	6,3	Origem industrial e domestica
	4,6 - 17,3	Mistura
(a) Oweiss e Khera (1990)	2,8 - 3,1	Resíduos Municipais sem compactação
	4,7 - 6,3	Resíduos Municipais moderadamente compactados
(a) Arroyo et al. (1990)	10	Compactados
(a) Landva e Clark (1990)	7 - 14	
(a) Van Impe (1993/1994)	10	Resíduos sólidos municipais densificados
	9,3	Máxima densidade seca (w=31%)
(a) (b) Gabr e Valero (1995)	8	Saturação completa (w=70%)
	12	Volume de ar nulo (w=31%)
(b) Kaimoto e Cepolina (1987)	5 - 7	Resíduos novos não decompostos e pouco compactados
	9 - 13	Resíduos após compactação mecânica e após a ocorrência de recalques
(b) Gabr e Valero (1995)	8	Resíduo Saturado
(b) Benvenuto e Cunha (1991)	10	Condição drenada
	13	Condição saturada
(b) Santos e Presa (1995)	7	Resíduos recém lançados
	10	Resíduos após a ocorrência de recalques
(b) Mahler e Iturri (1998)	10,5	Seção do aterro com 84 m de desnível e 10 meses de alteamento
(b) Sarsby (2000)	1,2 - 1,3	Resíduo lançado no aterro
(b) Kavazanjian (2001)	10 - 20	
(b) Bauer (2006)	8,6 - 15,6	Aterro com Resíduos Degradados
(b) Cata Preta et al. (2005)	7 - 11	
(b) Carvalho (2006)	9,47 - 16,36	Paracambi-RJ
	9,99 - 11,75	Ensaio Percâmetro, Santo André - SP
(b) Ochs e Shane (2006)	7,35	Resíduo Fresco, População Baixa renda
	4,9	Resíduo Fresco, População Classe Média
	1,96	Resíduo Fresco, População Classe Alta

Fonte: *in*: (a) SILVEIRA (2004, p. 20) (b) BORGATTO (2010, p. 32).

A estrutura porosa permite que os vazios interligados funcionem como tubos capilares. À medida que os líquidos evaporam, formam-se meniscos entre as partículas, fazendo com que atuem as forças capilares, aproximando as partículas. Quando o meio seca totalmente desaparecem os meniscos e, conseqüentemente, desaparece a força capilar. De forma similar, não há força capilar quando todo meio está submerso em água (FIORI e CARMIGNANI, 2009, p. 106).

Considerando todo o processo de movimentação de água no solo, um perfil pode apresentar diferentes condições de umidade sendo identificadas três zonas principais: zona não saturada; zona saturada por capilaridade; e zona saturada abaixo do nível d'água. Na zona saturada as pressões de água são positivas, enquanto acima do nível d'água as pressões são negativas e podem ser denominadas sucção. Pressões positivas tendem a afastar as partículas sólidas enquanto as negativas atuam como agentes de atração de partículas (GERSCOVICH, 2012, p. 63 – 64).

As poropressões podem diminuir à tensão normal em um plano potencial de escorregamento, de forma que a resistência ao cisalhamento sofre uma redução devido à diminuição da tensão normal. Quanto maior a ação das poropressões, maior será a parte do peso total do material que será suportado pela água. Quando a poropressão igualar-se à tensão normal, a resistência ao cisalhamento fica totalmente comprometida causando instabilidade no maciço (BORGATTO, 2006, p. 52 - 53).

Segundo BENVENUTO e CIPRIANO (2010, p. 43), ao longo do tempo os aterros sanitários apresentam geração de biogás, resultando no aumento das pressões internas, na medida em que haja aprisionamento ou dificuldade do mesmo ser drenado. A medida que o biogás percola pelos vazios dos sólidos, esta pressão é dissipada pelo sistema de drenagem ou pela camada de cobertura do aterro. Concomitantemente, os líquidos percolam para cotas inferiores, lixiviando os resíduos, abastecendo as bactérias e gerando chorume. Essas pressões de líquidos e gases atuam no arcabouço sólido como pressões internas, ou seja, poropressões, forçando e direcionando a movimentação de gases e líquidos pela massa de resíduos.

Para BENVENUTO e CIPRIANO (2010, p. 43 - 44), nesse cruzamento de rotas, os bloqueios e impedimentos de movimentação assumem posições transitórias na massa, criando os bolsões de líquidos e gases, de dimensões e tempo de existência variável. Esse efeito, denominado oclusão por bolhas de gases, estabelece o princípio do comportamento das poropressões nos resíduos e no arcabouço sólido, influenciando na estabilidade mecânica.

A poropressão de um maciço de resíduos sólidos pode ser obtida pelas diversas técnicas, entre elas, a instalação de piezômetros do tipo sifão, que permitem medir as pressões de gás e de líquidos percolados separadamente. Estes piezômetros são constituídos de dois tubos concêntricos, sendo o interno para o registro da pressão no chorume e o externo para a avaliação da pressão no gás (SCHULER, 2010, p. 54 - 55).

A poropressão também pode ser obtida por de ensaios de penetração do piezocone, que consiste na determinação do atrito lateral na luva e na medida de poropressão, considerando a resistência de ponta oferecida pelo resíduos à cravação de um cone de 10 cm² e arestas inclinadas 60° em relação à horizontal (OLIVEIRA, 2002, p. 65).

Segundo OLIVEIRA (2002, p. 110), a poropressão influencia na estabilidade de taludes por meio do coeficiente de poropressão (r_u), definido pela relação entre poropressão e tensão vertical. SCHULER (2010, p. 94) determinou valores de poropressão em um aterro localizado no estado do Rio de Janeiro. Segundo SCHULER (2010, p. 94), o coeficiente de poropressão (r_u), pode ser definido pela seguinte equação:

$$r_u = u/y.h$$

Onde:

- u = Poropressão medida (kPa)
- y = Peso específico dos RSU (kN/m³)
- h = Altura de lixo acima de onde está se medindo a poropressão (m)

Nas análises de estabilidade em aterros sanitários, o ideal seria dispor e considerar valores de poropressões em diversas profundidades (BENVENUTO e CIPRIANO, 2010, p. 45).

4.2.4. Teor de Umidade

O teor de umidade dos aterros sanitários é influenciado por fatores como a composição inicial do material depositado, as condições climáticas locais, o sistema de operação de aterro, a eficiência dos sistemas de drenagem superficial e coleta de chorume (CARVALHO, 1999, p. 41).

A determinação do teor de umidade de um aterro sanitário é de grande relevância na análise de estabilidade de aterros. Altos valores de teor de umidade acarretam no desenvolvimento de poropressões na pilha de resíduos, que podem diminuir a tensão efetiva, resultando em menores valores de resistência ao cisalhamento (MARTINS, 2006, p. 16).

Existem diversas metodologias para a determinação do teor de umidade dos resíduos, pelo peso da amostra seca, pela relação entre os volumes de líquidos e sólidos, ou pela relação entre os pesos secos e úmidos da amostra (OLIVEIRA, 2002, p. 91 – 36).

RIBEIRO (2007, p. 57 – 58) obteve valores entre 41,75% e 91,11%, enquanto OLIVEIRA (2002, p. 91 – 92) obteve valores entre 52,5% e 34,4%, com a ressalva de que as amostras foram coletadas em um período seco.

4.2.5. Permeabilidade

A permeabilidade dos resíduos sólidos é influenciada por fatores como os procedimentos de aterramento e o grau de compactação, a pressão de sobrecarga exercida, além da composição e idade dos resíduos (KNOCHENMUS *et. al.*, 1998, *apud* CARVALHO, 1999, p. 53). O tempo influencia na permeabilidade dos resíduos visto o aumento das frações de partículas mais finas decorrente da evolução dos processos de degradação (MACHADO, 2005, p. 4).

A disposição dos resíduos em camadas e o recobrimento diário dos mesmos, geralmente com solo de baixa permeabilidade, resultam em um comportamento anisotrópico da permeabilidade, que apresenta valores mais altos nas direções horizontais (MARTINS, 2006, p. 20).

A permeabilidade interfere diretamente na estabilidade dos aterros sanitários, pois, quanto maior for o acúmulo de líquidos e gases na massa de resíduos, maiores serão os valores das poropressões geradas e menor será a resistência do material (MARTINS, 2006, p. 19).

Existem diversas maneiras de determinar a permeabilidade de resíduos sólidos, por ensaios de laboratório e ensaios de campo, realizados em furos de sondagens, trincheiras e poços de grande diâmetro (NASCIMENTO, 2007, p. 53).

Em sua pesquisa, CARVALHO (1999, p. 127) obteve valores de permeabilidade entre 8×10^{-4} cm/s e 5×10^{-6} cm/s, enquanto NASCIMENTO (2007, p. 117) obteve valores entre $2,7 \times 10^{-3}$ cm/s e $6,9 \times 10^{-4}$ cm/s.

BOSCOV e ABREU (2000 *apud* MARTINS, 2006, p. 21) afirmaram que provavelmente os resíduos sólidos brasileiros possuem os coeficientes de permeabilidade mais baixos identificados na literatura internacional devido ao alto teor de material putrescível presente.

4.2.6. Compressibilidade

Tendo em vista a redução do volume e conseqüente aumento da vida útil de aterros, a compactação de resíduos sólidos vem sendo alvo de diversas pesquisas e estudos de campo (MARQUES, 2001, p. 33 – 34).

O recalque de aterros sanitários é influenciado por diversos fatores. Além da compressibilidade instantânea resultante das cargas aplicadas na deposição de materiais no aterro, deve ser considerada a influência de fatores como as técnicas de preenchimento e sistema de drenagem do aterro além da decomposição dos resíduos (VILAR e CARVALHO, 2004, p. 1 – 2).

DIJON e JONES (2005, p. 218) identificam duas fases na compressão de um aterro sanitário. A compressão primária inclui compressão física de partículas (distorção e orientação das partículas) e consolidação. Na maioria dos resíduos, a compressão física ocorre imediatamente após aplicação de camadas sobrepostas de resíduos, ocorrendo num período de alguns dias a algumas semanas. A compressão secundária inclui os efeitos de compressão mecânica resultantes da tensão constante aplicada e os efeitos referentes à degradação química e biológica.

Os processos de degradação e decomposição podem ocorrer por meio de processos físicos e biológicos, influenciado por características como a composição inicial e umidade dos resíduos, disponibilidade de nutrientes para crescimento microbológico e condições climáticas. Os valores de recalque de um aterro sanitário, somente em resposta a ação do próprio peso podem variar entre 10% e 40% (MARTINS, 2006, p. 20 - 23). A previsão de recalque de aterros sanitários pode ser realizada por diversas metodologias.

NASCIMENTO (2007, p. 59) divide os modelos de previsão de recalques de aterros sanitários em:

- Modelos baseados na consolidação, que utiliza a teoria do adensamento unidirecional;
- Modelos baseados na descrição do processo reológico;
- Modelos baseados na biodegradação, onde a degradação da matéria orgânica provoca uma redução de volume da massa de resíduos; e
- Modelos baseados em regressões (por exemplo, logarítmicas, hiperbólicas, bilineares e multilíneares), obtidas a partir de dados de recalques dos aterros sanitários.

4.2.7. Resistência ao Cisalhamento

A resistência ao cisalhamento representa um aspecto fundamental na análise de estabilidade de aterros sanitários. Comumente, as análises de resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos são realizadas a partir de modelos e métodos estabelecidos para solos (CALLE, 2007, p. 28). Desta forma, a determinação da resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos é geralmente realizada por meio do critério de rompimento de Mohr-Coulomb que envolve os parâmetros ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c) (DAS, 2007, p. 331). Apesar de usuais, a interpretação dos resultados de tais análises fica sujeita a muitas incertezas, em virtude da dificuldade de definir o modelo de ruptura mais apropriado para o comportamento especial deste material. Além disso, existem diferenças significativas entre resíduos e solo, visto o alto índice de vazios, que implica numa compressibilidade volumétrica alta (CALLE, 2007, p. 28).

A resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos é altamente influenciada pelo estado de alteração e composição dos resíduos, além do comportamento mecânico individual de cada componente (CARVALHO, 1999, p. 50). Materiais que adquirem texturas fibrosas como plásticos e tecidos podem influenciar fortemente nos valores de resistência (NASCIMENTO, 2007, p. 66).

Segundo KÖLSCH (1993, *apud* BORGATTO, 2006, p. 39), o comportamento dos aterros sanitários se assemelha ao comportamento de aterros de solos com reforços geossintéticos. Desta forma, a resistência ao cisalhamento dos resíduos é função das forças de atrito atuantes no plano de cisalhamento e das forças de tração das fibras. A **Figura 4** apresenta a interação entre estas parcelas de força, segundo o modelo proposto por KÖLSCH (1993, *apud* CARDIM, 2008, p. 23).

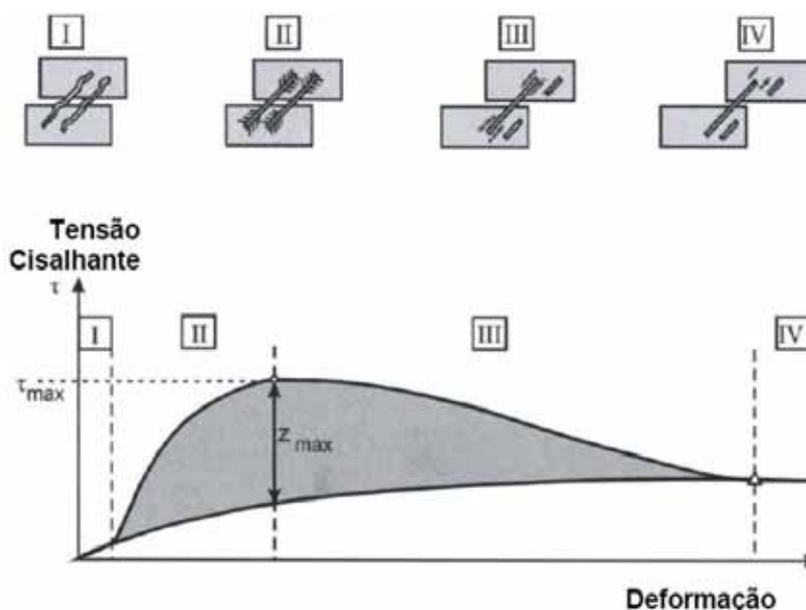


Figura 4 – Curva tensão-deformação de resíduos sólidos com interação das componentes de atrito e tração (retirado de KÖLSCH, 1993, *apud* CARDIM, 2008, p. 23).

Segundo o modelo de KÖLSCH (1993, *apud* CARDIM, 2008, p. 23 - 24), para pequenas deformações (FASE I) ocorre a mobilização das forças de atrito. Com o aumento das deformações, as fibras são tracionadas (FASE II) fazendo aumentar a parcela das forças de tração até um valor máximo (z_{max}) que corresponde à resistência de tração das fibras e/ou a interação com o restante do lixo. Em seguida, há a redução gradativa da contribuição das forças de tração (FASE III), até que se atinja o ponto a partir do qual a resistência ao cisalhamento do resíduo é resultado apenas das componentes de atrito (FASE IV). Assim, a contribuição de cada uma dessas parcelas

na resistência ao cisalhamento dos resíduos varia de acordo com a tensão normal atuante e com a deformação.

NETO (2004) realizou um estudo da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos e materiais granulares com fibras, onde foram efetuados ensaios de cisalhamento direto com amostras de resíduos e com amostras de uma mistura de areia e pequenas tiras de plástico. O estudo buscou verificar a influência destas fibras no comportamento mecânico e nos parâmetros de resistência ao cisalhamento destes materiais, de forma a se estabelecerem correlações entre os mesmos.

Os resultados obtidos por NETO (2004, p. 187 - 188) mostraram que tanto para os aterros sanitários como para os aterros de solo reforçado com geotêxteis a coesão está diretamente relacionada a concentração das fibras, sendo que, para os solos reforçados existe uma relação aproximadamente linear entre a “coesão das fibras” e a concentração de geotêxtil, enquanto que para os aterros sanitários esta relação não é conhecida.

FUCALE (2005) realizou um estudo semelhante considerando a influência das fibras na resistência de resíduos sólidos. O autor executou ensaios de cisalhamento direto em amostras de solo, sem e com inclusão de fibras, no intuito de investigar o comportamento mecânico de solos reforçados com fibras plásticas distribuídas aleatoriamente e verificar uma possível analogia entre o comportamento destes materiais e dos resíduos sólidos.

O estudo permitiu confirmar que os elementos fibrosos que compõem os resíduos sólidos nos aterros possuem uma grande influência no comportamento mecânico do material, sendo estes responsáveis pelos altos valores de resistência medidos em ensaios com resíduos sólidos urbanos, como também pela estabilidade observada em diversos taludes de resíduos sólidos (FUCALE, 2005, p. 2001).

A determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento (ângulo de atrito e coesão) pode ser realizada por retroanálise, por meio de ensaios de laboratório ou por meio de ensaios de campo (MARQUES, 2001, p. 38 – 39). CARVALHO (1999, p. 50), citando diversos autores, admite o uso dos métodos de investigação convencionais desenvolvidos pela mecânica dos solos em aterros sanitários, desde que sejam reconhecidas as diferenças das propriedades dos materiais envolvidos.

Os modelos de avaliação por retroanálise são baseados principalmente em ensaios de carregamento de placa e registros operacionais (OLIVEIRA, 2002, p. 46). Estes modelos utilizam as equações de equilíbrio-limite, nas quais se estabelece um

fator de segurança (F_s) em função da relação entre as forças resistentes e as forças atuantes. Tendo conhecimento da carga aplicada nos ensaios de carregamento de placa, admite-se que a massa de resíduos está na iminência de romper e determina-se a resistência (MARTINS, 2006, p. 45). Para MARQUES (2001, p. 45), estes modelos devem ser utilizados com ressalva, visto que existem inúmeras combinações que satisfazem a equação de equilíbrio limite.

OLIVEIRA (2002) realizou retroanálises a partir de um escorregamento ocorrido em um aterro controlado em Salvador – BA (Aterro Canabrava) e a partir de uma seção experimental no Aterro Sanitário de Salvador. A retroanálise realizada a partir do escorregamento no Aterro de Canabrava considerou a inclinação média do talude em 27° e, em virtude da saturação do solo no momento da ruptura, coesão nula, sendo obtido um ângulo de atrito de 20° (OLIVEIRA, 2002, p. 108). Na seção experimental no aterro municipal, o autor executou ensaios de sobrecarga em um talude experimental com inclinação de 90° e arbitrou valores de ângulo de atrito para obtenção de valores de coesão. Para os ângulos de atrito de 15° , 20° , 25° , 30° e 35° OLIVEIRA (2002, p. 114) obteve valores de coesão de 27 kPa, 22 kPa, 17 kPa, 14 kPa e 10 kPa, respectivamente.

BORGATTO (2006, p. 116) realizou a determinação de parâmetros de resistência de resíduos sólidos por retroanálise do escorregamento ocorrido no Aterro Sanitário Bandeirantes considerando o efeito das fibras. Os resultados obtidos foram comparados com os valores apontados pelo relatório técnico elaborado pelo IPT (1991), obtidos pelos métodos convencionais da engenharia geotécnica. As análises realizadas com e sem o efeito das fibras mostraram grande discrepância de valores de coesão. Segundo BORGATTO (2006, p. 119), a discrepância entre os valores de coesão obtidos indicam que o material, na hora do escorregamento, apresentava característica puramente granular, sendo a resistência “coesiva” provinda do reforço das fibras.

Os ensaios de laboratório mais comuns são os ensaios de cisalhamento direto e de compressão triaxial (MARTINS, 2006, p. 33). Estes ensaios apresentam algumas desvantagens como o alto custo e a dificuldade de se obter amostras indeformadas representativas (DIJON e JONES, 2005, p. 209). Mesmo assim, ensaios de cisalhamento direto em laboratório são comumente utilizados por pesquisadores em todo o mundo, em geral, realizados sobre amostras deformadas, coletadas em aterros sanitários, e em muitas vezes, em escala não representativa (CARDIM, 2008, p. 28).

Para KÖNIG e JESSBERGER (1997, *apud* MARQUES, 2001, p. 39), observa-se nestes ensaios que, mesmo sob elevadas tensões de compressão, a ruptura não é claramente atingida e os resíduos apresentam ganho de resistência com o aumento das deformações. Observa-se ainda que o ângulo de atrito máximo é mobilizado em deformações menores ou iguais a 20%, enquanto a coesão necessita de valores bem maiores.

MARTINS (2006, p. 7) realizou um estudo da resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos utilizando um equipamento de ensaio de cisalhamento direto de grandes dimensões e amostras com diferentes condições de composição, peso específico, umidade e idade, provenientes da central de tratamento de resíduos sólidos da BR 040, localizada no município de Belo Horizonte, MG. Os resultados obtidos por MARTINS (2006, p. 103 - 104) mostraram, para o ângulo de atrito, aumento dos valores a partir de 20 % de deslocamento não sendo atingida a estabilização para o deslocamento máximo de 50%, conforme indicado na literatura. Para a coesão, foi constatado o aumento dos valores até o deslocamento máximo de 50%, seguindo, desta forma, o comportamento típico apresentado na literatura. O **Quadro 2** foi adaptado de MARTINS (2006, p. 73 - 87) e apresenta o resumo dos parâmetros de resistência obtidos nos ensaios.

RIBEIRO (2007, p. 15) determinou os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) de resíduos sólidos na cidade de Viçosa – MG, utilizando ensaios laboratoriais, incluindo ensaios de prova de carga em uma sapata apoiada em resíduos dispostos em manilhas de concreto e em um talude construído em uma caixa de madeira. Tendo o conhecimento das cargas aplicadas nas massas de resíduos, foram arbitrados valores de coesão para determinação do ângulo de atrito considerando o fator de segurança (F_s) = 1 (RIBEIRO, 2007, p. 52). Os resultados obtidos na pesquisa permitiram ao autor sugerir, em projetos de análise de estabilidade de taludes em maciços de resíduos sólidos urbanos, o uso de coesão na ordem de 12 kPa e ângulo de atrito na ordem de 30° (RIBEIRO, 2007, p. 94).

CARDIM (2008, p. 3) realizou um estudo semelhante, sendo realizados ensaios de cisalhamento em resíduos, em equipamento de grandes dimensões, utilizando amostras de resíduos provenientes de duas unidades de tratamento de lixo de Brasília. Os valores encontrados por CARDIM (2008, p. 86 - 87) para a deformação máxima ensaiada variaram, para o ângulo de atrito, entre 43,63° e 50,72°, apresentando indícios de estabilização após os 50% de deslocamento relativo das

amostras. Para a coesão, os valores para deslocamento relativo máximo de 50% situaram-se entre 13,94 kPa e 20,29 kPa. O **Quadro 3** foi adaptado de CARDIM (2008, p. 83) e apresenta o resumo dos parâmetros de resistência obtidos nos ensaios.

Quadro 2 – Resumo dos parâmetros de resistência obtidos por MARTINS (2006, p. 73 - 87).

Ensaio	Parâmetros de Resistência	Deslocamentos Horizontais Relativos			
		10%	20%	35%	50%
1	c (kPa)	14,6	15,7	23,7	37,2
	ϕ (°)	21,2	35,6	48,4	52
2	c (kPa)	16,8	20	27,2	31,6
	ϕ (°)	13,5	20,2	30,9	53
3	c (kPa)	6,6	6,9	10,2	14,1
	ϕ (°)	4,6	7,8	10,5	17,2
4	c (kPa)	2,7	3,4	3,7	8,2
	ϕ (°)	21,7	25,7	37,7	48,1
5	c (kPa)	10,5	11,1	17,7	21,6
	ϕ (°)	37,1	48,2	58,3	83,7
6	c (kPa)	21,8	21,7	23,4	25,1
	ϕ (°)	9,1	20,7	40,8	72,8

Fonte: Modificado de MARTINS (2006, p. 73 - 87)

Quadro 3 – Resumo dos parâmetros de resistência obtidos por CARDIM (2008, p. 83).

Ensaio	Parâmetros de Resistência	Deslocamentos Horizontais Relativos				
		10%	20%	30%	40%	50%
1	c (kPa)	0,3	2,79	4,94	6,61	13,94
	ϕ (°)	33,23	38,63	41,67	46,68	47,78
2	c (kPa)	0	0,93	5,64	6,65	12,09
	ϕ (°)	33,82	38,5	41,66	47,87	50,72
3	c (kPa)	3,61	4,35	5,64	12,65	20,29
	ϕ (°)	28	34,49	41,66	44,28	43,63

Fonte: Modificado de CARDIM (2008, p. 83)

Os ensaios *in situ* convencionais, como os ensaios de penetração dinâmica (SPT) e ensaios de penetração do cone (CPT), têm sido usados para avaliação de resistência de resíduos sólidos por diversos autores (CARVALHO, 1999, p. 52).

Apesar das críticas literárias quanto ao uso de ensaios de penetração dinâmica (SPT) para determinação dos parâmetros de resistência de resíduos sólidos, estes ensaios estão entre as propostas mais comuns para caracterizar os materiais de um aterro de resíduos, visto que se trata de um procedimento fácil e econômico (FUCALE, 2002).

Os ensaios de penetração do cone (CPT) exigem mais recursos para execução quando comparado aos ensaios de penetração dinâmica (SPT), sendo a popularidade deste método atribuída à qualidade de seus resultados (VELLOSO e LOPES, 2004, p. 41).

Devido à presença de materiais resistentes como madeira, metal, pedra, dentre outros, durante os ensaios ocorrem grandes picos na resistência, além de desvio das hastes dos equipamentos e avarias nos amostradores, paletas e ponteiros (FUCALE e JUCÁ, 2002, p. 1). A presença de tais materiais dificulta a execução dos ensaios a ponto de inviabilizá-los em determinados locais (MARQUES, 2001, p. 22).

O uso de ensaios de penetração dinâmica (SPT) tem inúmeras aplicações na engenharia geotécnica, que vão desde o simples reconhecimento e amostragem do substrato até a sua correlação com propriedades geotécnicas dos materiais (SCHNAID, 2000, p. 39).

A determinação dos parâmetros de resistência a partir de ensaios de penetração é realizada pelo uso de correlações empíricas e semi-empíricas desenvolvidas para solos, que consideram as relações entre a resistência à penetração *in situ* e o comportamento de resistência e deformabilidade dos solos. Desta forma, a utilização de tais ensaios em aterros de resíduos sólidos exige um cuidado adicional no uso dos resultados (FUCALE, 2002).

Os resultados dos ensaios de penetração dinâmica (SPT) são expressos em função do índice N_{SPT} que corresponde ao número de golpes necessários à cravação de 30 cm do amostrador padrão, após a cravação inicial de 15 cm, utilizando-se corda de sisal para levantamento do martelo padronizado ABNT NBR 6484 (1991, p. 2).

A **Figura 5** apresenta propostas de correlação entre o índice N_{SPT} e os parâmetros de resistência do solo, sendo: a) correlação entre N_{SPT} e ângulo de atrito de solos arenosos (DÉCOURT 1989, apud FONSECA, 1996, p. 53); b) correlação entre N_{SPT} e a resistência não drenada de argilas (U. S. NAVY, 1986, apud VELLOSO e LOPES, 2004, p. 48). Alguns autores sugerem ainda a correlação entre o índice N_{SPT} e o peso específico dos solos. O **Quadro 4** foi adaptado de GODOY (1972 apud CHRISTAN, 2013 p. 51) e apresenta valores de peso específico em função da compactação das areias e da consistência das argilas. DAS (2007, p. 51) apresenta valores típicos de teor de umidade e peso específico para alguns solos em estado natural conforme apresentado no **Quadro 5**.

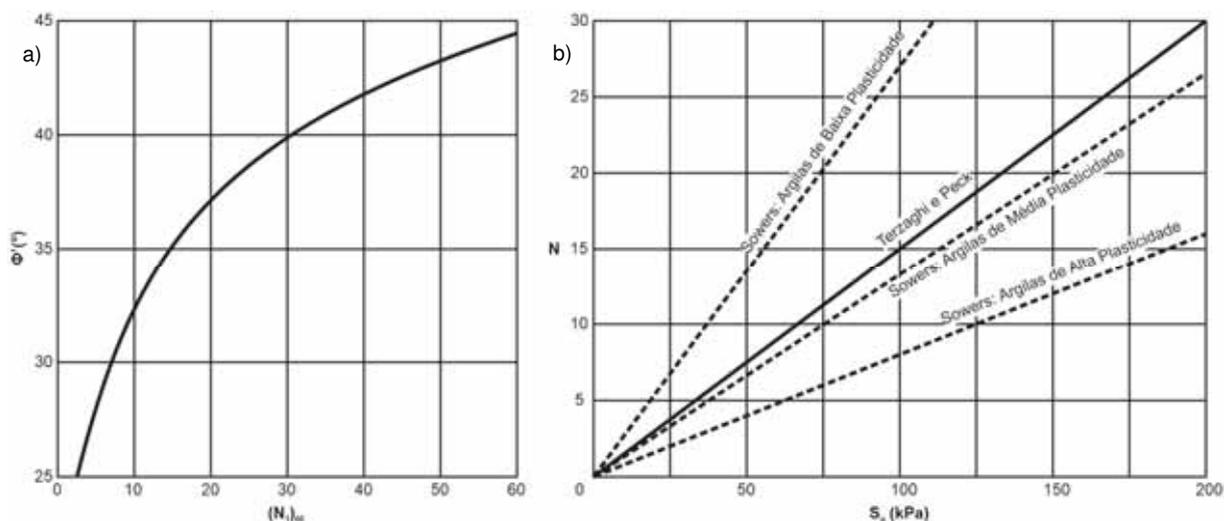


Figura 5 – Correlação entre N_{SPT} e parâmetros de resistência do solo segundo diversos autores (modificado de: (a) DÉCOURT 1989, apud FONSECA, 1996, p. 53; (b) U. S. NAVY, 1986, apud VELLOSO e LOPES, 2004, p. 48).

Quadro 4 – Peso específico em função da compactação das areias e da consistência das argilas

Consistência da argila	Índice N_{SPT}	Peso específico (kN/m^3)		
		Muito Mole	≤ 2	13
Mole	3 – 5	15		
Média	6 - 10	17		
Rija	11 - 19	19		
Dura	≥ 20	21		
Compacidade da areia	Índice N_{SPT}	Peso específico (kN/m^3)		
		Seca	Úmida	Saturada
Fofa	< 5			
Pouco compacta	5 – 8	16	18	19
Medianamente compacta	9 – 18	17	19	20
Compacta	19 – 40	18	20	21
Muito compacta	> 40			

Fonte: Modificado de GODOY (1972, apud CHRISTAN, 2013, p. 51)

Quadro 5 – Valores típicos de teor de umidade e peso específico para solos

Tipo de Solo	Índice de Vazios	Teor de umidade saturada (%)	Peso específico seco (kN/m^3)
Areia uniforme fofa ou solta	0,8	30	14,5
Areia uniforme compacta	0,45	16	18
Areia siltosa com granulação angular fofa	0,65	25	16
Areia siltosa com granulação angular compacta	0,4	15	19
Argila rija	0,6	21	17
Argila mole	0,9 - 1,4	30 - 50	11,5 - 14,5
Loess	0,9	25	13,5
Argila orgânica mole	2,5 - 3,2	90 - 120	6 - 8
Till glacial	0,3	10	21

Fonte: Modificado de DAS (2007, p. 51)

FUCALE (2002) realizou ensaios de penetração em dois aterros controlados em Recife, um aterro sanitário em Salvador e um lixão em João Pessoa. Os resultados obtidos indicaram variabilidade em função da heterogeneidade do material, sendo verificada, para resíduos antigos, uma tendência a valores de resistência mais baixos e constantes com a profundidade. Os resíduos sólidos recentes mostraram valores um pouco mais elevados e com tendência a aumentarem com a profundidade.

CARVALHO (1999) realizou um estudo do comportamento mecânico de resíduos sólidos executando diversos ensaios no Aterro Bandeirantes em São Paulo – SP, incluindo ensaios de penetração (SPT) e ensaios de penetração do cone (CPT).

As sondagens com ensaio de penetração realizadas por CARVALHO (1999) apresentaram N_{SPT} médio de 7 para as camadas superficiais, atingindo 12 nas camadas mais profundas (10 – 30 m). Utilizando estes valores e a correlação entre N_{SPT} e solos arenosos, CARVALHO (1999, p. 259), estimou o ângulo de atrito dos resíduos entre 26° e 32°. Utilizando a correlação entre N_{SPT} e solos argilosos, CARVALHO (1999, p. 259), estimou a coesão dos resíduos entre 90 e 150 kPa.

Baseado em estudos executados por diversos autores, CARVALHO (1999, p. 184 - 185) utilizou a Carta de SCHMERTMANN (1978), que correlaciona frações granulométricas de solos e dados obtidos em ensaios de penetração do cone, de forma a classificar os resíduos dentro de uma faixa granulométrica admitida para solos.

A **Figura 6** foi adaptada de CARVALHO (1999, p. 184) e apresenta os resultados obtidos nos ensaios de penetração do cone executados no Aterro Bandeirantes e os resultados obtidos por outros autores. Os resultados permitiram classificar os resíduos do Aterro bandeirantes dentro de uma variação de areia fofa a argila siltosa arenosa.

Na Carta de SCHMERTMANN (1978) são plotados os valores de razão de atrito em função dos valores da resistência de ponta, excluindo-se os picos de resistência decorrentes de objetos rígidos. Ambos os parâmetros são obtidos durante os ensaios de penetração do cone.

A razão de atrito é expressa em porcentagem e representa a razão entre resistência de atrito lateral e a resistência de ponta do cone à mesma profundidade. A resistência de ponta é expressa em mPa e representa a resistência à penetração desenvolvida sobre o cone.

A resistência de atrito lateral é expressa em kPa e representa a resistência à penetração desenvolvida sobre a luva de atrito (ABNT NBR 12069, 1991, p. 2). Utilizando a correlação entre a resistência de ponta e solos arenosos, CARVALHO (1999, p. 183), estimou o ângulo de atrito dos resíduos entre 29° e 33°. Estes valores permitiram estimar o valor de coesão não drenada variando entre 45 kPa e 120 kPa.

O **Quadro 6** foi adaptado de SUZUKI (2012, p. 35 - 37) e apresenta valores de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) obtidos por diversos autores a partir de retroanálises, por meio de ensaios de laboratório ou por meio de ensaios *in situ*.

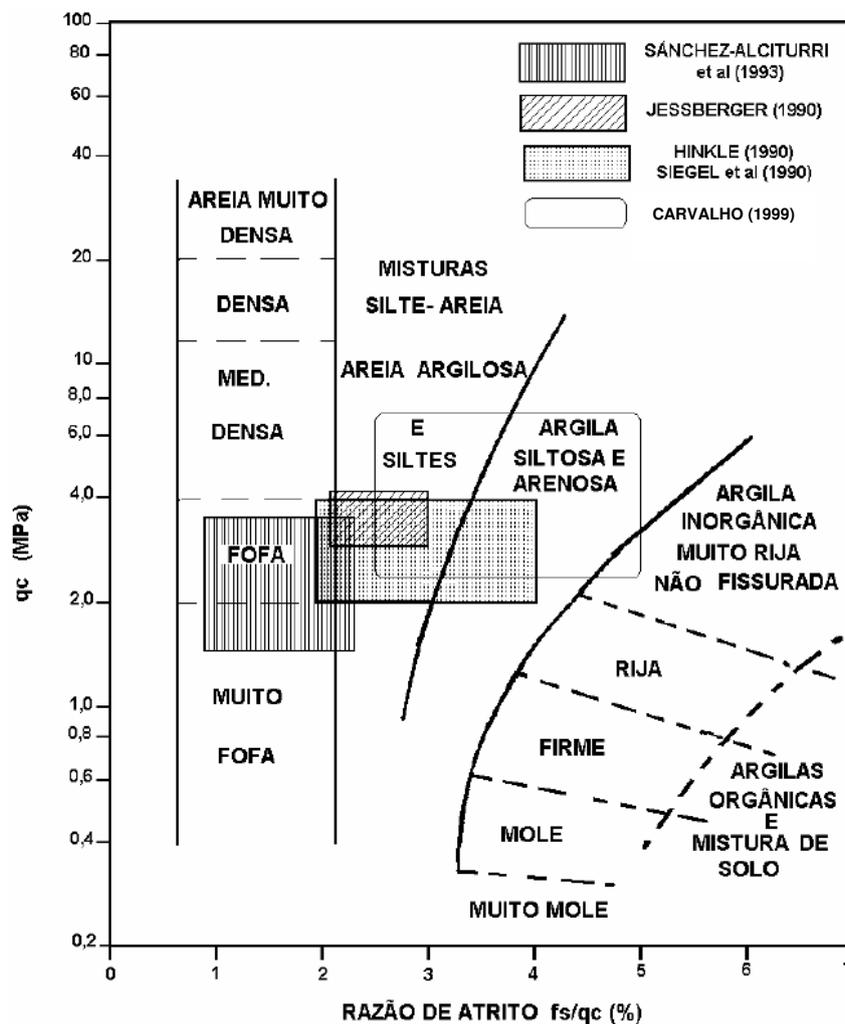


Figura 6 – Resultados de ensaios de penetração do cone obtidos por diversos autores (adaptado de CARVALHO, 1999, p. 184)

Lazzucato et. al. (1999)	22	17	Cisalhamento direto de grandes dimensões	Amostra reconstituída
	24	18	Cisalhamento direto de grandes dimensões	Amostra indeformada
Gerber (1991)	25	27	Cisalhamento direto de grandes dimensões	Aterro em Maine (EUA)
Paicedo et. al (2002a)	78	23	Cisalhamento direto de grandes dimensões	$\sigma_n = 6$ kPa a 117 kPa
Paicedo et. al (2002b)	36	35	Pressiômetro	Na superfície
	72	22	Pressiômetro	Em 8 m de profundidade
(b) Oweiss (1995)	0	26	Prova de carga	Limite inferior da resistência, sem ruptura, $\gamma = 7$
Reynolds e Murphy (1990)	75 - 110	25 - 36	Prova de carga	Valores recomendados
Magotto e Rimoldi (1987)	29	22	Prova de carga em placa	-
Rowland et. al (1993)	10	25	Talude de trincheira profunda	-
Kavazanjian et. al. (1995)	-	25 - 34	-	$45 \text{ kPa} < \sigma_n < 180 \text{ kPa}$
Koda (1998)	20	26	Escorregamento (Polônia)	Resíduos antigos
	150	20	Escorregamento (Ohio)	Resíduos recentes
Eid et al. (2000)	40	35	-	$\gamma = 10,2 \text{ kN/m}^3$
Manly e Impe et. al. (1996)	20	0	-	Sobrecarga ≤ 20 kPa
	0	38	-	Sobrecarga de 20 kPa a 60 kPa
	20	30	-	Sobrecarga ≥ 60 kPa
Benvenuto e Cunha (1991)	13,5	22	Escorregamento (São Paulo)	$\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$ a 13 kN/m^3
Rowland e Clark (1986, 1990)	16	38 - 42	Cisalhamento direto de grandes dimensões	Resíduos antigos
	16	33	Cisalhamento direto de grandes dimensões	Resíduos decompostos por 1 ano
	23	24	Cisalhamento direto de grandes dimensões	Resíduos novos triturados
	10	33	Cisalhamento direto de grandes dimensões	Resíduos madeireiros
	19 - 22	24 - 39	Cisalhamento direto de grandes dimensões	$\sigma_n = 15$ kPa a 480 kPa
Jessberger e Kockel (1991)	22	17	Ensaio triaxial de grandes dimensões	Resíduos antigos
Grisolia et. al. (1991)	10	17	Ensaio triaxial de grandes dimensões	Resíduos reconstituídos
	22	42	Ensaio triaxial de grandes dimensões	Resíduos reconstituídos
Rowland e Landva (1992)	17	33	Cisalhamento direto	Resíduos com 10 a 15 anos
(c) Bransl (1995)	0	27 - 38	Ensaio triaxial	-
	0	36 - 42	Ensaio triaxial	-
Kockel e Jessberger (1995)	41 - 51	42 - 49	Ensaio triaxial de grandes dimensões	Resíduos com 1 a 3 anos
Gabr e Valero (1995)	16,8	34	Ensaio triaxial	Resíduos antigos e $\gamma = 7,8 \text{ kN/m}^3$ a $8,2 \text{ kN/m}^3$
Grisolia e Napoleoni (1996)	0	22	Ensaio triaxial	Resíduos reconstituídos
Carvalho (1999)	27 - 60	17 - 29	Ensaio triaxial de grandes dimensões	Deformações de 20%
Kavazanjian et. al. (1995)	24	0	-	$\sigma_n < 30$ kPa
Kavazanjian et. al. (1999)	0	33	-	$\sigma_n > 30$ kPa
Paicedo et. al (2002a)	45	14	Ensaio triaxial	-
Paicedo et. al (2002b)	25	24	Cisalhamento direto de grandes dimensões	Deformações de 15%
Zeccos (2005)	34	30	Cisalhamento direto de grandes dimensões	$\sigma_n = 50$ kPa a 600 kPa e deformações de aproximadamente 5%
Ribeiro (2007)	0	39	Ensaio triaxial de grandes dimensões	Deformações de 5%
	10	35	Prova de carga em manilha de concreto	Deformações entre 15% e 20%, $\gamma = 7$
	10	28	Prova de carga em talude	Deformações de 17% e $\gamma = 5 \text{ kN/m}^3$
Reddy et. al. (2011)	1	35	Cisalhamento direto	Resíduos recentes
	40	28	Cisalhamento direto	Resíduos decompostos
	21	8	Ensaio triaxial	Resíduos recentes e deformação de 5%
	57	5	Ensaio triaxial	Resíduos decompostos e deformação de 5%

do de SUZUKI (2012, p. 35 - 37) (a) *in* Kavazanjian et. al. (1995); (b) *in* Gonzalez (1995); (c) *in* Manassero et. al. (1996); (d) *in* Boscov

4.3. Tratamento e Destinação Final de Resíduos Sólidos

A seguir são descritos os métodos mais comuns de tratamento e destinação final de resíduos sólidos incluindo incineração, compostagem, reciclagem, disposição em lixões, em aterros controlados e disposição em aterros sanitários.

Observa-se que mesmo os processos tecnológicos destinados à recuperação de resíduos, como reciclagem e compostagem, ou mesmo os que visam à eliminação de resíduos utilizando processos térmicos (incineração), não deixam de gerar certa quantidade de resíduos tornando os aterros sanitários sempre necessários (MARQUES, 2001, p. 2).

É importante ressaltar que os aterros sanitários são responsáveis pela destinação final dos resíduos sólidos de apenas 27,7% dos municípios no Brasil (IBGE, 2010) enquanto 50,8% dos municípios ainda destinam seus resíduos sólidos a vazadouros a céu aberto.

4.3.1. Incineração

A incineração consiste basicamente num processo de redução de peso e volume do lixo utilizando a combustão controlada SCHALCH *et. al.* (2002, p. 35).

Normalmente são adotados dois tipos básicos de incineração de resíduos, método convencional e método com recuperação de energia. No segundo caso, a energia térmica dos gases da combustão é aproveitada na geração de energia (LOUREIRO, 2005, p. 166). Este método apresenta uma série de desvantagens como o alto custo de instalação e operação e a geração de sub-resíduos com concentração de produtos tóxicos e corrosivos, além dos riscos de poluição atmosférica.

Mesmo apresentando desvantagens, a incineração é um processo adotado em países com pouca disponibilidade de áreas como Japão, Suíça e Suécia. O processo de incineração, quando bem executado, pode reduzir a massa de resíduo a 20% do total (SCHALCH *et. al.*, 2002, p. 35).

4.3.2. Reciclagem

JARDIM *et. al.* (1995, p. 129) definem reciclagem como as atividades onde resíduos são utilizados como matéria prima na manufatura de bens, após separação e processamento, dispensando a utilização de matéria-prima virgem.

A reciclagem deve ser entendida como parte das atividades integradas ao gerenciamento de resíduos sólidos, não sendo a principal solução para a disposição de resíduos, visto que nem todos os materiais são passíveis de reciclagem, seja por motivos técnicos ou econômicos (SCHALCH *et. al.*, 2002, p. 11).

Os processos de reciclagem poupam os recursos naturais e diminuem a quantidade de resíduos a serem aterrados, além de constituírem uma importante forma de recuperação energética, especialmente quando associado a um sistema de compostagem.

Também é importante ressaltar que, dependendo das características regionais, a reciclagem pode representar fonte de renda e emprego a diversas comunidades e um fator importante na redução de custos dentro do sistema de limpeza urbana (LOUREIRO, 2005, p. 168).

4.3.3. Compostagem

Segundo BIDONE e POVINELLI (1999, apud NASCIMENTO, 2007, p. 39), a compostagem consiste em um processo biológico aeróbio e controlado de transformação da matéria orgânica em um material estabilizado com propriedades distintas daquele que lhe deu origem.

O produto final da compostagem, denominado composto, é definido como sendo um adubo preparado com restos de animais e/ou vegetais. Esses resíduos, em estado natural, não têm nenhum valor agrícola; no entanto, após passarem pelo processo de compostagem, podem transformar-se em excelente adubo orgânico (SCHALCH *et. al.*, 2002, p. 22).

Apesar de ser considerado um método de tratamento, a compostagem também pode ser entendida como um processo de destinação final do material orgânico presente no lixo e, seu composto, seu produto de reciclagem (PEREIRA NETO e LELIS, 1999, *apud* FARIA, 2002, p. 67).

4.3.4. Lixões

Nesta forma de disposição de resíduos sólidos não existem controles sobre tipo, volume ou grau de periculosidade dos resíduos depositados. Qualquer medida de proteção ao meio ambiente e a saúde pública são inexistentes e também não há qualquer tipo de controle de entrada de pessoas ou animais.

Em lixões ou vazadouros, os resíduos são simplesmente lançados sobre o solo natural, sem receber qualquer tipo de cobertura ou tratamento mecânico para redução de volume (NASCIMENTO, 2007, p. 40).

A falta de controle no acesso a pessoas e animais facilita a proliferação de vetores, além disso, o não revolvimento periódico dos resíduos faz com que a decomposição da matéria orgânica presente consuma todo o oxigênio contido, dando lugar à decomposição anaeróbica, com desprendimento de gases, como o metano, o gás carbônico e alguns gases de odores desagradáveis. Outro fator preocupante é a formação de chorume durante a decomposição anaeróbica, que pode infiltrar-se contaminando o solo e as águas subterrâneas e superficiais SCHALCH *et. al.* (2002, p. 48).

4.3.5. Aterros Controlados

Nesta forma de disposição de resíduos sólidos, existe um controle moderado da entrada de resíduos, de pessoas e animais na área e algumas medidas tecnológicas de minimização de impactos são tomadas, como o recobrimento dos resíduos com argila (NASCIMENTO, 2007, p. 41).

Os aterros controlados, geralmente, não possuem sistemas de impermeabilização de base nem de tratamento de chorume ou gases gerados, podendo ocorrer contaminação do solo e das águas subterrâneas e superficiais (LOUREIRO, 2005, p. 170).

Apesar de apresentar diversos problemas ambientais, esta técnica é aceitável em municípios de baixo desenvolvimento econômico, que não possuam equipamentos de compactação ou arrecadação suficiente para contratação de empresas especializadas (NASCIMENTO, 2007, p. 41).

4.3.6. Aterros Sanitários

Compreende um sistema preparado, englobando determinados componentes e práticas operacionais que incluem compactação e cobertura dos resíduos, sistemas de drenagem e tratamento de líquidos e gases, impermeabilização da base do aterro, divisão em células, monitoramento geotécnico e ambiental, entre outros (BOSCOV, 2008). Para disposição de resíduos sólidos urbanos, a norma ABNT NBR 8419 (1996, p. 1), define aterros sanitários como:

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

Segundo a norma CETESB P4.2471 (1982, p. 6 - 8), um aterro sanitário deve dispor de sistema de:

- Sistema de drenagem superficial
- Sistema de coleta e remoção de percolato
- Sistema de tratamento de percolato
- Impermeabilização inferior e/ou superior
- Sistema de coleta de gás bioquímico

De acordo com CETESB (Site Oficial) os aterros sanitários devem provir de:

- Sistema de impermeabilização de base, podendo ser feita com argila ou geomembranas sintéticas;
- Sistema de drenagem de gás, podendo ser construídos de concreto ou de PEAD;
- Sistema de coleta de chorume, feita pela base do aterro, sendo o chorume coletado e enviado a tanques de armazenamento ou lagoas previamente preparadas com impermeabilização;
- Sistema de tratamento de chorume, podendo ser feito no local ou em estação de tratamento, após coleta e transporte do chorume;
- Sistema de drenagem de águas pluviais, para evitar a infiltração que gera o chorume;
- Portaria para controlar a entrada e saída de pessoas e caminhões de lixo;
- Isolamento da área para manutenção da ordem e do bom andamento das obras;
e
- Acessos internos que permitam a interligação entre diversos pontos do aterro.

O Aterro de Caetetuba atende apenas alguns destes quesitos como sistema de drenagem de águas pluviais e portaria, não sendo verificados sistema de impermeabilização de base ou de coleta e tratamento de chorume. O isolamento da área existe, no entanto é pouco eficaz, sendo comum a presença de pessoas e animais no local. Desta forma, o Aterro de Caetetuba pode ser enquadrado na classe dos aterros controlados.

Ainda de acordo com CETESB (Site Oficial) os aterros sanitários se dividem em duas classes: aterros convencionais, onde camadas de resíduos compactados são sobrepostas acima do nível original do terreno; aterro em valas, onde a operação do aterramento dos resíduos é facilitada com o uso de trincheiras ou valas.

Outras classificações são propostas para aterros sanitários como SCHALCH *et. al.* (1992, p. 124), classifica os aterros sanitários em aterros em depressões e aterros de superfície. Segundo sua concepção os aterros em depressões são executados em regiões de topografia acidentada, como fundos de vales e pedreiras abandonadas. Já os aterros em superfície são implantados em regiões planas, podendo ser operados pelo método da trincheira, da rampa e/ou pelo método da área.

O Método da Área é adotado quando o terreno não oferece boas condições para escavação de trincheiras, sendo normalmente utilizado em áreas baixas e alagadiças, onde o nível freático está muito próximo à superfície.

Os resíduos são dispostos sobre a superfície do terreno e compactados, formando uma elevação tronco-piramidada, sendo cobertos com solo ao final da operação (LOUREIRO, 2005, p. 190 - 191).

Este método apresenta algumas desvantagens como a utilização de áreas de empréstimo e transporte de material para recobrimento, o que encarece o processo, além da necessidade de bombeamento de toda a água do local antes do início da construção do aterro e do constante rebaixamento do lençol freático durante a operação (FARIA, 2002, p. 93).

O Método da Rampa se utiliza da topografia local para disposição de resíduos aproveitando rampas, áreas secas de encostas e depressões onde o solo natural possa ser escavado e utilizado como cobertura. O processo se inicia com o depósito de resíduos sólidos no solo, sendo compactado por um trator de esteiras, em camadas de 3,0 m ou 4,0 m de altura, e posteriormente recobertos pelo solo escavado (FARIA, 2002, p. 94).

Também conhecido como método da escavação progressiva, este método é bastante vantajoso por aproveitar o material recortado na cobertura dispensando áreas de empréstimo e economizando em transporte de material.

Alguns cuidados devem ser tomados, visto que as áreas utilizadas neste método possuem intenso escoamento superficial. Deve haver um controle dos processos erosivos e das drenagens superficiais, provisórias e definitivas do local, deve haver um distanciamento mínimo de 2 m entre o fundo da escavação e o lençol freático e o material escavado, utilizado na cobertura, deve permitir a formação de um talude consistente, que resista à compactação (LOUREIRO, 2005, p. 189 - 190).

O método das trincheiras é uma técnica apoiada na abertura e preenchimento de trincheiras ou valas no solo. Segundo LOUREIRO (2005, p. 187 - 189), os resíduos são dispostos no fundo, sendo compactados e posteriormente recobertos com o solo remanescente da escavação da vala. A superfície do fundo das trincheiras é coberta com membrana sintética ou por camada argilosa, de baixa permeabilidade.

Este método é indicado para terrenos onde o lençol freático não está próximo à superfície e quando existe uma profundidade adequada de material de cobertura, disponível na área a ser escavada.

Normalmente, o operador do equipamento de escavação (retroescavadeira ou similar) delimita a vala e executa a escavação, acumulando o solo removido sobre uma das laterais da vala. Os resíduos são descarregados pelo lado livre das trincheiras, sem o ingresso do caminhão em seu interior, iniciando-se por uma das extremidades da vala.

Após o completo aterramento da vala, se o município dispuser de equipamentos, poderá, ainda, promover uma melhor compactação dos resíduos. Quando não houver esta possibilidade, a abertura da vala seguinte deverá ser realizada de tal forma que o solo de escavação seja acumulado sobre as valas já enterradas, acelerando-se os recalques e impondo certa compactação aos resíduos (FARIA, 2002, p. 93).

4.3.7. Estabilidade de Aterros Sanitários

Acidentes de escorregamento em aterros sanitários, embora incomuns, ocorrem em uma base regular em países ao redor do mundo (DIJON e JONES, 2005, p. 206). No Brasil, alguns casos são registrados na literatura como o escorregamento do Aterro Controlado de Salvador - BA (OLIVEIRA, 2002) e o escorregamento do Aterro Sanitário Bandeirantes, localizado no município de São Paulo (BENVENUTO e CUNHA, 1991, *apud* CARVALHO, 1999, p. 51).

Na concepção de SCHULER (2010, p. 78) as principais causas dos escorregamentos em aterros de resíduos sólidos são a redução da resistência interna dos materiais e/ou um acréscimo das solicitações externas, geralmente causadas por mudança nas condições geométricas ou sobrecargas.

A permeabilidade interfere diretamente na estabilidade dos aterros sanitários, pois, quanto maior for o acúmulo de líquidos e gases na massa de resíduos, maiores serão os valores das poropressões geradas e menor será a resistência do material (MARTINS, 2006, p. 19).

As poropressões diminuem à tensão normal em um plano potencial de escorregamento, de forma que a resistência ao cisalhamento sofre uma redução devido à diminuição da tensão normal.

Quanto maior a ação das poropressões, maior será a parte do peso total do material que será suportado pela água. Quando a poropressão igualar-se à tensão normal, a resistência ao cisalhamento fica totalmente comprometida causando instabilidade no maciço (BORGATTO, 2006, p. 52 - 53).

Altos valores de teor de umidade acarretam no desenvolvimento de poropressões na pilha de resíduos (MARTINS, 2006, p. 16), diminuindo a resistência do material. Nas análises de estabilidade em aterros sanitários, o ideal seria dispor e considerar valores de poropressões em diversas profundidades (BENVENUTO e CIPRIANO, 2010, p. 45).

DIJON e JONES (2005, p. 206), ressaltam que, apesar dos vários pontos positivos, o uso de membranas geossintéticas pode contribuir na instabilidade de um maciço de resíduos sólidos visto que as mesmas constituem potenciais planos ruptura.

Para BORGATTO (2006, p. 62), entre os principais fatores que influenciam a estabilidade de aterros sanitários destacam-se:

- Parâmetros geotécnicos dos resíduos;
- 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; e
- Controle, operação e monitoramento do aterro.

No mesmo âmbito, CALE (2007, p. 38) destaca entre os fatores que influenciam a estabilidade de aterros sanitários:

- Nível de chorume e flutuação no interior do aterro;
- Parâmetros geotécnicos dos solos de fundação; e
- Composição e resistência à erosão da capa superficial do aterro.

O tempo também é um elemento importante na estabilidade dos taludes, visto que a resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos é altamente influenciada pelo estado de alteração e composição dos resíduos, além do comportamento mecânico individual de cada componente (CARVALHO, 1999, p. 50). Materiais que adquirem texturas fibrosas como plásticos e tecidos podem influenciar fortemente nos valores de resistência (NASCIMENTO, 2007, p. 66).

Além disso, aterros sanitários apresentam geração de biogás ao longo do tempo, resultando no aumento das pressões internas, na medida em que haja aprisionamento ou dificuldade do mesmo ser drenado (BENVENUTO e CIPRIANO, 2010, p. 43). Entre os efeitos causados pelo tempo em aterros sanitários, BORGATTO (2006, p. 63) destaca:

- Alteração da composição dos RSU devido à característica de degradabilidade de alguns componentes (matéria orgânica) e por processos de reciclagem (plásticos, metais, papel, etc.);
- Aumento do nível do lençol freático causado por falha do sistema de impermeabilização;
- Aumento do nível de chorume dentro da massa de resíduo causado por falha no sistema de drenagem; e
- Aumento da pressão interna de gases causada pela ruptura do sistema de drenagem de gases.

Para KOERNER e SOONG (2000, p. 199 - 200) há dois tipos fundamentais ruptura em aterros sanitários: falhas rotacionais e falhas translacionais.

As falhas rotacionais são geralmente circulares, mas, dependendo do tipo de resíduos e a sua colocação, podem ter forma em espiral. Segundo o autor estas falhas podem ocorrer: superficialmente, na face dos resíduos; podem atingir inteiramente os resíduos tangenciando uma ou mais "camadas" do maciço; ou podem ocorrer na base do aterro.

As falhas translacionais são lineares ao longo de um único plano ou podem consistir de vários segmentos lineares. Neste último caso o rompimento se dá pelo contato entre "camadas" do maciço, podendo estar associado à presença de mantas geossintéticas.

Para BORGATTO (2006, p. 59 – 63) as rupturas em aterros de resíduos sólidos podem ocorrer das seguintes formas:

- **a)** Escorregamento pelo Sistema de Drenagem de Base, que ocorre na porção inferior do sistema de drenagem de base, quando a inclinação do talude é muito íngreme ou o comprimento muito extenso.
- **b)** Escorregamento pelo sistema de cobertura final dos resíduos, que ocorre na base do sistema de cobertura, quando a inclinação do talude é muito íngreme ou o comprimento muito extenso.
- **c)** Escorregamento rotacional pela parede ou base do talude, que ocorre na massa de solo abaixo dos resíduos depositados, apresentando movimento rotacional que pode emergir ao longo da superfície do talude, pelo pé do talude ou pela sua fundação.
- **d)** Escorregamento rotacional pela fundação, que ocorre na fundação de aterros, geralmente com fundações em solos moles, atravessando o sistema de tratamento de base e a massa de resíduo. Apresenta movimento rotacional passando pela fundação do aterro após o pé do talude;
- **e)** Escorregamento rotacional pela massa de resíduo, que ocorre pela massa de resíduo, devido a taludes muito íngremes, altos níveis de chorume no corpo do aterro ou problemas no controle operacional;
- **f)** Escorregamento translacional ao longo do sistema de tratamento de base e laterais do aterro, que ocorre no contato da massa de resíduo com o sistema de impermeabilização, começando pelo pé do talude e propagando-se pela massa de resíduo até o sistema de impermeabilização das paredes laterais e fundação.

A **Figura 7** foi adaptada de QIAN *et. al.* (2002 *apud* BORGATTO, 2006, p. 59 – 63) e ilustra as principais formas de rompimento em aterros sanitários.

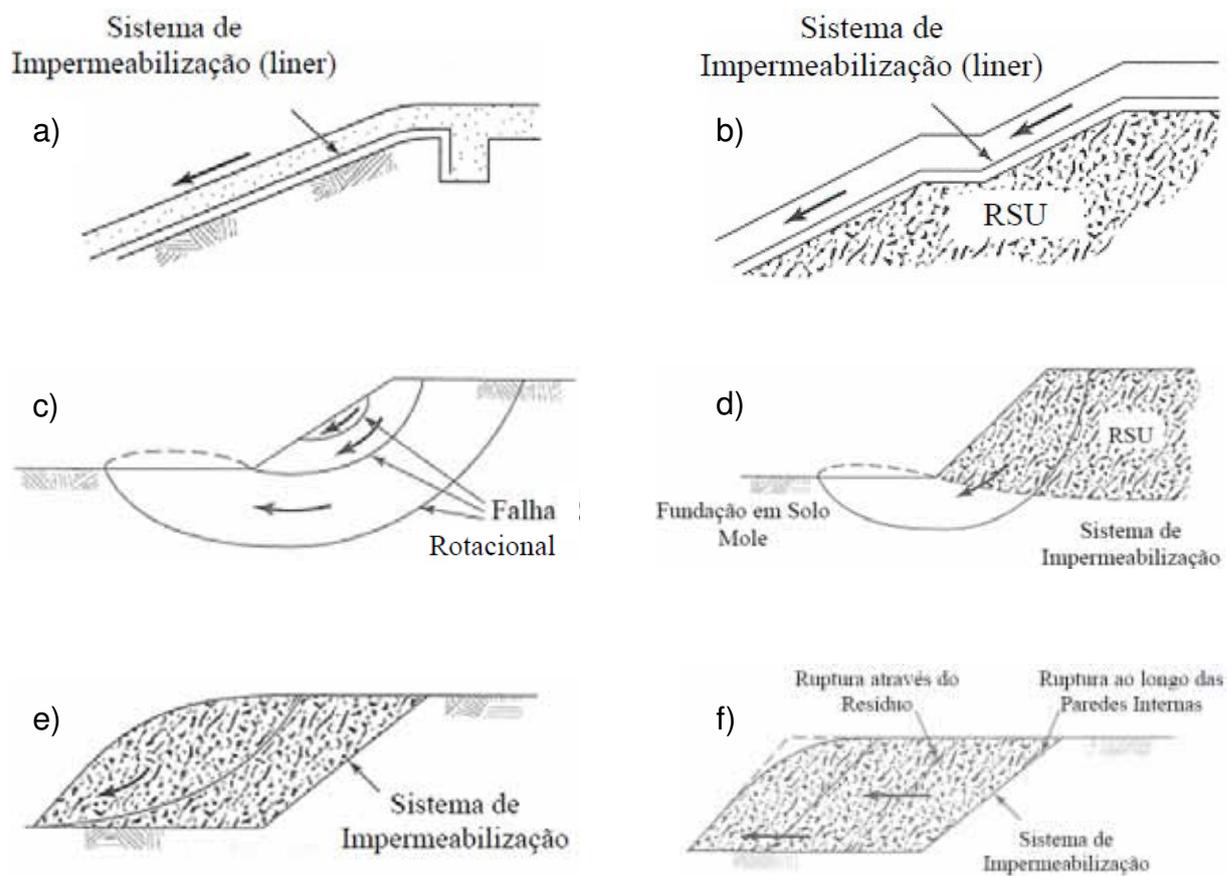


Figura 7 - Principais formas de rompimento em aterros sanitários (adaptado de QIAN *et. al.*, 2002, *apud* BORGATTO, 2006, p. 59 – 63)

5. MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Existem diversos métodos de avaliação de estabilidade, o tipo de análise adotado é dependente da escala de trabalho, da disponibilidade de tempo e dados de trabalho e, sobretudo, da disponibilidade de recursos financeiros (AHRENDT, 2005, p.26), sendo abordados no presente caso os métodos de análise de estabilidade determinísticos.

As análises de estabilidade de taludes determinísticas são realizadas com base no fator de segurança (F_s) definido pela relação entre as tensões cisalhantes mobilizadas e a resistência ao cisalhamento (GERSCOVICH, 2012, p. 85). Para DAS (2007, p. 471), o fator de segurança pode ser dado pela equação:

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d}$$

Onde:

F_s = Fator de segurança

τ_f = Resistência ao cisalhamento

τ_d = Tensões cisalhantes desenvolvidas ao longo da superfície de ruptura

Nesta relação, valores de F_s maiores que 1 indicam condições de estabilidade, valores iguais a 1 representam o limite da estabilidade e valores menores que 1 não possuem significado físico (SCHULER, 2010, p. 79).

A norma ABNT NBR 11682 (2009), trata da estabilidade de taludes incluindo as condições para estudo, projeto, execução, controle e observação de obras de estabilização. Nesta norma são definidos valores de fator de segurança mínimos a serem adotados em projetos de taludes e encostas, de acordo com o grau de segurança definido para o local de implementação da obra.

É definido fator de segurança mínimo de 1,50 para projetos executados em locais com grau de segurança alto, 1,30 para projetos executados em locais com grau de segurança médio e 1,15 para projetos executados em locais com grau de segurança alto, sendo considerados:

- Locais com necessidade de alto grau de segurança, aqueles onde há proximidade imediata de 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;
- Locais com necessidade de médio grau de segurança, referentes a todos os casos citados anteriormente quando houver, entre o talude e o local a ser ocupado, espaço de utilização não permanente considerado como área de segurança. Também no caso de haver 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; e
- Locais com necessidade de baixo grau de segurança, referentes a locais onde sejam instituídos procedimentos capazes de prevenir acidentes em rodovias, tuneis em fase de escavação, minas, bacias de acumulação de barragens e canteiros de obras em geral.

Segundo MASSAD (2003, p. 46), os métodos de equilíbrio limite partem dos seguintes pressupostos:

- O solo se comporta como material rígido-plástico, ou seja, rompe bruscamente sem se deformar;
- As equações de equilíbrio estático são válidas até a iminência da ruptura, quando o processo passa a ser dinâmico; e
- O coeficiente de segurança é constante ao longo da superfície de ruptura.

A partir do conceito de fator de segurança e equilíbrio limite, foram desenvolvidas diversas técnicas analíticas para determinação do fator de segurança, entre as quais, os métodos baseados no equilíbrio limite, que assumem o rompimento do maciço por uma superfície de ruptura circular, poligonal ou de outra geometria qualquer GERSCOVICH (2012, p. 87 - 88).

5.1. Método do Talude Infinito

O método do talude infinito admite uma superfície de ruptura planar e infinita. Sua aplicação exige uma série de simplificações e premissas, entre as quais, a que sua utilização deve ser feita em situações onde o comprimento do talude é muito maior que a profundidade da massa instável. Desta forma, este modelo vem sendo bastante utilizado em análise de encostas naturais (AHRENDT, 2005, p.38). A **Figura 8** apresenta o modelo de um talude infinito com plano de ruptura paralelo a superfície, profundidade “h” e inclinação “ α ”.

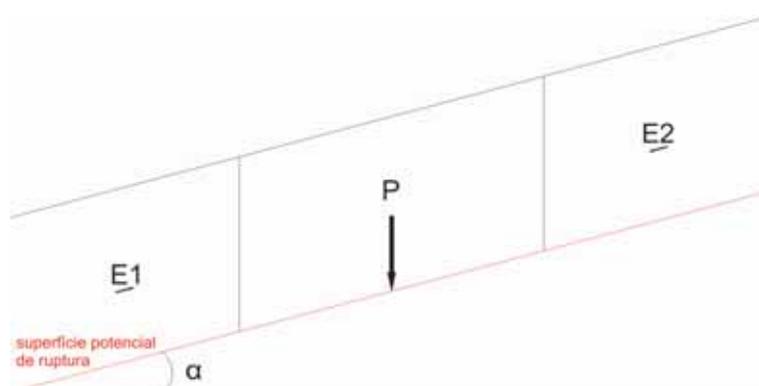


Figura 8 – Método do Talude Infinito.

Segundo GERSCOVICH (2012, p. 105), ao se assumir que as forças E1 e E2 se anulam, tem-se:

$$F_s = \frac{c + (\gamma h \cos^2 \alpha - u) \operatorname{tg} \phi}{\gamma h \operatorname{sen} \alpha \cos \alpha}$$

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
- u = Poropressão

5.2. Método de Culmann

O método de Culmann é utilizado em casos de taludes com alto ângulo de inclinação. Este método assume que a massa de solo encontra-se seca, de forma que não se consideram as poropressões. Além disso, admite uma superfície de ruptura planar que passa pela base do talude (MASSAD, 2003, p. 73 - 74). A **Figura 9** apresenta o modelo de um talude finito com plano de ruptura com inclinação “ α ” e talude com inclinação “ β ”.

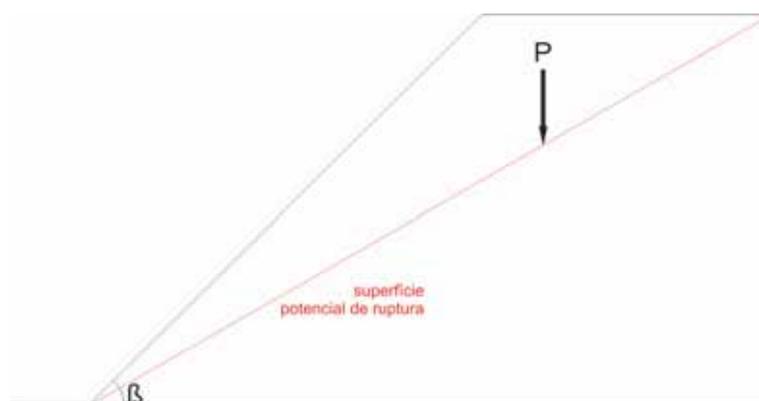


Figura 9 – Método de Culmann.

Neste caso, segundo MASSAD (2003, p. 75), tem-se:

$$\frac{c}{\gamma h} = \frac{1 - \cos(\beta - \phi)}{4 \operatorname{sen} \beta \cos \phi}$$

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
 h = Profundidade do solo

5.3. Método de Fellenius

O método de Fellenius, ou das fatias, admite uma superfície de ruptura circular e considera o volume de material situado acima da ruptura dividido em fatias verticais (FIORI e CARMIGNANI, 2009, p. 211). A medida das fatias não precisa ser a mesma e as poropressões são desconsideradas (DAS, 2007, p. 497).

Este método baseia-se na análise estática do volume de material situado acima da superfície de escorregamento, sendo este volume dividido em fatias verticais. Assim, determinam-se as forças normais às bases das lamelas e aplica-se o equilíbrio de forças na direção da normal à base (BORGATTO, 2006, p. 54).

É um método bastante simples, que negligencia as forças nas laterais das fatias e não satisfaz o equilíbrio das forças horizontais e verticais. Tais simplificações o tornam, na maioria dos casos, um método bem conservador, gerando um erro a favor da segurança. Apesar do rigor na segurança, exageros podem inviabilizar economicamente alguns projetos (TONUS, 2009, p. 46). A **Figura 10** apresenta o modelo de um talude finito com plano de ruptura circular, de raio “ r ”.

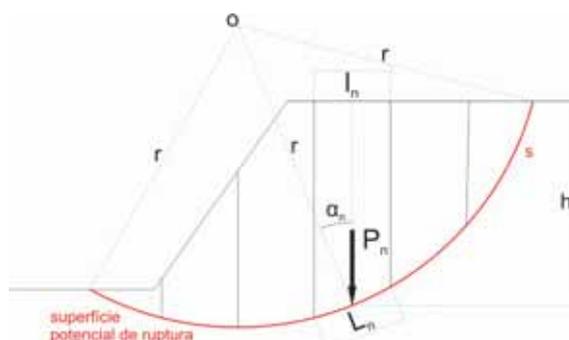


Figura 10 – Método de Fellenius.

De acordo com FIORI e CARMIGNANI (2009, p. 213), tem-se:

$$F_s = \frac{sc' + \sum \gamma' h_n l_n \cos \alpha_n \tan \phi'}{\sum \gamma' h_n l_n \sin \alpha_n}$$

Onde:

- s = Comprimento total da superfície potencial de ruptura
- c' = Coesão ao longo da superfície de ruptura
- ϕ' = Ângulo de atrito interno do solo ao longo da superfície de ruptura
- γ' = Peso específico do solo
- h_n = Profundidade da fatia
- l_n = Comprimento da fatia
- α_n = Ângulo entre o raio da superfície de ruptura e o eixo vertical da fatia

Ou, se considerarmos as poropressões, tem-se:

$$F_s = \frac{\sum [c' L_n + \tan \phi' (P \cos \alpha_n - u' L_n)]}{\sum P \sin \alpha_n}$$

Onde:

- P_n = Peso da fatia
- L_n = Comprimento da base da fatia
- u' = Poropressão no centro da base da fatia

5.4. Método Simplificado de Bishop

O método proposto inicialmente por Bishop representa uma modificação do método de Fellenius, levando em consideração as relações entre as fatias adjacentes (FIORI e CARMIGNANI, 2009, p. 213). De acordo com ROGÉRIO (1977, *apud* BORGATTO, 2006, p. 54), o método de Fellenius apresenta uma superestimação do

fator de segurança em relação ao método de Bishop na ordem de 15%. A **Figura 11** apresenta o modelo de um talude finito com plano de ruptura circular, de raio “r”.

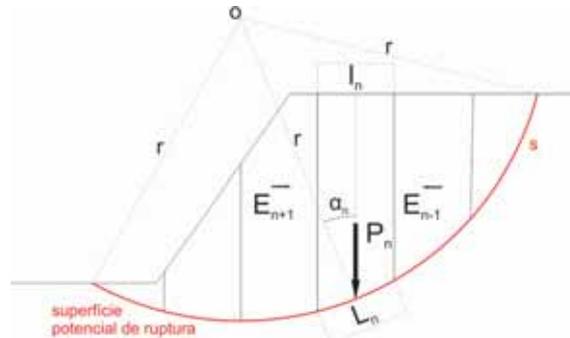


Figura 11 – Método Simplificado de Bishop.

Segundo FIORI e CARMIGNANI (2009, p. 215), tem-se:

$$F_s = \frac{1}{\sum (P_n \operatorname{sen} \alpha_n)} \sum \left[\frac{(P_n + E_{n-1} - E_{n+1} - u_n' \cos \alpha_n) \tan \phi' + c' L_n l_n \cos \alpha_n}{\cos \alpha_n + \frac{\operatorname{sen} \alpha_n}{F_s} \tan \phi'} \right]$$

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
- u_n' = Poropressão no centro da base da fatia
- α_n = Ângulo entre o raio da superfície de ruptura e o eixo vertical da fatia

Neste caso, a diferença $E_{n-1} - E_{n+1}$ pode ser considerada igual a zero, com erro resultante desta simplificação da ordem de 1% (FIORI e CARMIGNANI, 2009, p. 215). Assim, tem-se o método simplificado de Bishop (MASSAD, 2003, p. 51).

$$F_s = \sum \frac{[(c' l_n + P_n \tan \phi') \frac{1}{m_{\alpha n}}]}{\sum P_n \operatorname{sen} \alpha_n} \quad \text{sendo} \quad m_{\alpha n} = \cos \alpha_n + \frac{\tan \phi' \operatorname{sen} \alpha_n}{F_s}$$

Conforme observado, no método de Bishop o fator de segurança está presente em ambos os membros da equação. Na resolução, adota-se para o fator de segurança do segundo termo (Fs'), um valor aproximado, e calcula-se o fator de segurança do primeiro membro (Fs). Se o valor de Fs e Fs' se mostrarem muito distantes, repete-se o procedimento, até que Fs seja aproximadamente igual a Fs' (MASSAD, 2003, p. 52).

5.5. Método Simplificado de Jambu

O método de Jambu simplificado admite uma superfície de ruptura com qualquer geometria, sendo a massa do possível escorregamento subdividida em fatias. O método de Jambu utiliza um fator de correção (F_0), visando minimizar os erros embutidos nas hipóteses adotadas (TONUS, 2009, p. 48). O fator F_0 está relacionado com a geometria da superfície de escorregamento estudada, com os parâmetros c' e ϕ' e com a influência das forças verticais entre as lamelas (FIORI e CARMIGNANI, 2009, p. 219). A **Figura 12** apresenta o modelo de um talude finito com plano de ruptura qualquer.

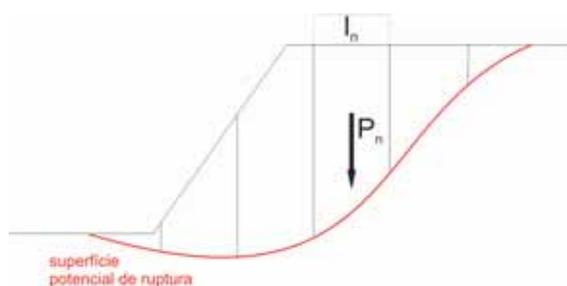


Figura 12 – Método Simplificado de Jambu.

Segundo FIORI e CARMIGNANI (2009, p. 218), tem-se:

$$Fs = F_0 \frac{\sum \left[(c' l_n + (P_n - u_n l_n) \tan \phi' \frac{1}{n_{\alpha n}}) \right]}{\sum P_n \tan \alpha_n} \quad \text{sendo} \quad n_{\alpha n} = \cos^2 \alpha_n \left(1 + \tan \alpha_n \frac{\tan \phi'}{Fs} \right)$$

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 fatia
- u_n' = Poropressão no centro da base da fatia
- α_n = Ângulo entre o raio da superfície de ruptura e o eixo vertical da fatia

5.6. Método de Spencer

O Método de Spencer é um método rigoroso de análise de estabilidade de taludes, que foi desenvolvido para superfície de ruptura circular e, posteriormente, adaptado para superfície de ruptura qualquer (TONUS, 2009, p. 51).

É considerado um método rigoroso por cumprir todas as condições de equilíbrio onde as forças de interação entre as fatias são substituídas por uma resultante Q , atuante no ponto médio da base da fatia (FERREIRA, 2012, p. 18). A **Figura 13** apresenta o modelo de um talude finito com plano de ruptura qualquer.

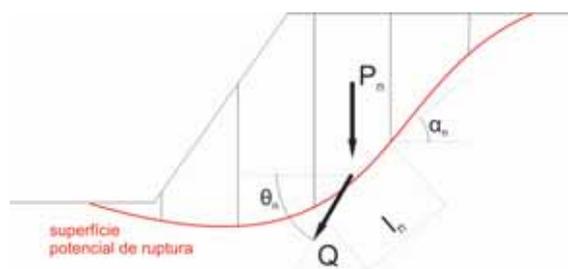


Figura 13 – Método de Spencer.

Segundo (FERREIRA, 2012, p. 18), tem-se:

$$Q = \frac{\frac{c'l_n}{F_s} + \frac{(P_n \cos \alpha_n - u_n l_n) \tan \phi'}{F_s} - P_n \sin \alpha_n}{\cos(\alpha_n - \theta_n) \left[1 + \frac{\tan \phi' \tan(\alpha_n - \theta_n)}{F_s} \right]}$$

Segundo (FERREIRA, 2012, p. 20), tem-se:

$$\begin{aligned} \frac{c'}{F_S}(1 + \tan^2 \alpha_n) + \frac{\tan \phi'}{F_S} \left[\frac{dP}{l} + \frac{dX}{l} - \frac{dE}{l} \tan \alpha_n - u_n(1 + \tan^2 \alpha_n) \right] \\ = \frac{dE}{l} + \frac{dX}{l} \tan \alpha_n + \frac{dP}{l} \tan \alpha_n \end{aligned}$$

Sendo as incógnitas X e E , as forças de interação entre as fatias, com relação expressa p:

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

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
- α_n = Ângulo entre a base da fatia e a horizontal

A solução é alcançada por processo iterativo, procedendo-se a integração das diferenciais.

5.8. Comparações entre os Métodos Convencionais de Análise de Estabilidade de Taludes

O desenvolvimento de softwares especializados que utilizam diversos métodos de análise de estabilidade de taludes permite a realização de comparações entre tais métodos. Na literatura são identificadas comparações entre os métodos convencionais de análise de estabilidade, tratando de casos diferentes, como seções de um talude natural na Serra do Mar (TONUS, 2009) e taludes em uma mina de ferro

(MENEZES, 2012), além de comparações em casos hipotéticos como FERNANDES e SILVA FILHO (2010) e HORST (2007). Não foram identificadas comparações entre os métodos de análise de estabilidade de taludes quando aplicados em aterros sanitários.

FERNANDES e SILVA FILHO (2010) elaboraram planilhas de cálculo no *Software Excel* para avaliação da estabilidade de taludes em barragens de terra. As planilhas foram elaboradas com base nos métodos de Bishop, Fellenius, e Jambu.

O exemplo utilizado foi um caso hipotético de uma barragem de terra, com altura de 15 m e inclinação dos taludes a jusante e a montante de 1:2. Foi adotada a coesão de 10 kPa, ângulo de atrito de 20° e peso específico de 18 kN/m³.

Nas planilhas de cálculo desenvolvidas, o método de Bishop apresentou o maior fator de segurança ($F_s=1,73$) enquanto o método de Jambu apresentou o menor fator de segurança ($F_s=1,47$) (FERNANDES e SILVA FILHO, 2010, p. 97).

HORST (2007) realizou uma comparação entre os resultados de análises de estabilidade, realizadas pelos métodos de Fellenius, Bishop Simplificado e Jambu Simplificado. O autor considerou valores arbitrários para os principais fatores que influenciam a estabilidade de um talude, sendo elas: altura (h) e inclinação (i) do talude; ângulo de atrito (ϕ), coesão (c) e peso específico natural (γ) do solo. O **Quadro 7** foi modificado de HORST (2007, p. 46) e apresenta os valores utilizados.

O cruzamento dessas variáveis resultou em 3.125 combinações diferentes, as quais foram utilizadas para o cálculo de estabilidade de talude pelos métodos de Fellenius, Bishop Simplificado e Jambu Simplificado. A **Figura 15** foi retirada de HORST (2007, p. 62 - 65) e apresenta os resultados das análises de estabilidades em gráficos comparativos.

Quadro 7 – Faixa de valores utilizados por HORST (2007).

Variáveis Estudadas	Faixa de Valores Definidos				
Altura (h)	2 m	4 m	6 m	8 m	10 m
Inclinação (i)	15°	30°	45°	60°	75°
Ângulo de Atrito (ϕ)	25°	30°	35°	40°	45°
Coesão (c)	0 kPa	10 kPa	20 kPa	30 kPa	40 kPa
Peso Específico Natural (γ)	14 N/m ³	16 N/m ³	18 N/m ³	20 N/m ³	22 N/m ³

Fonte: Modificado de HORST (2007, p. 46)

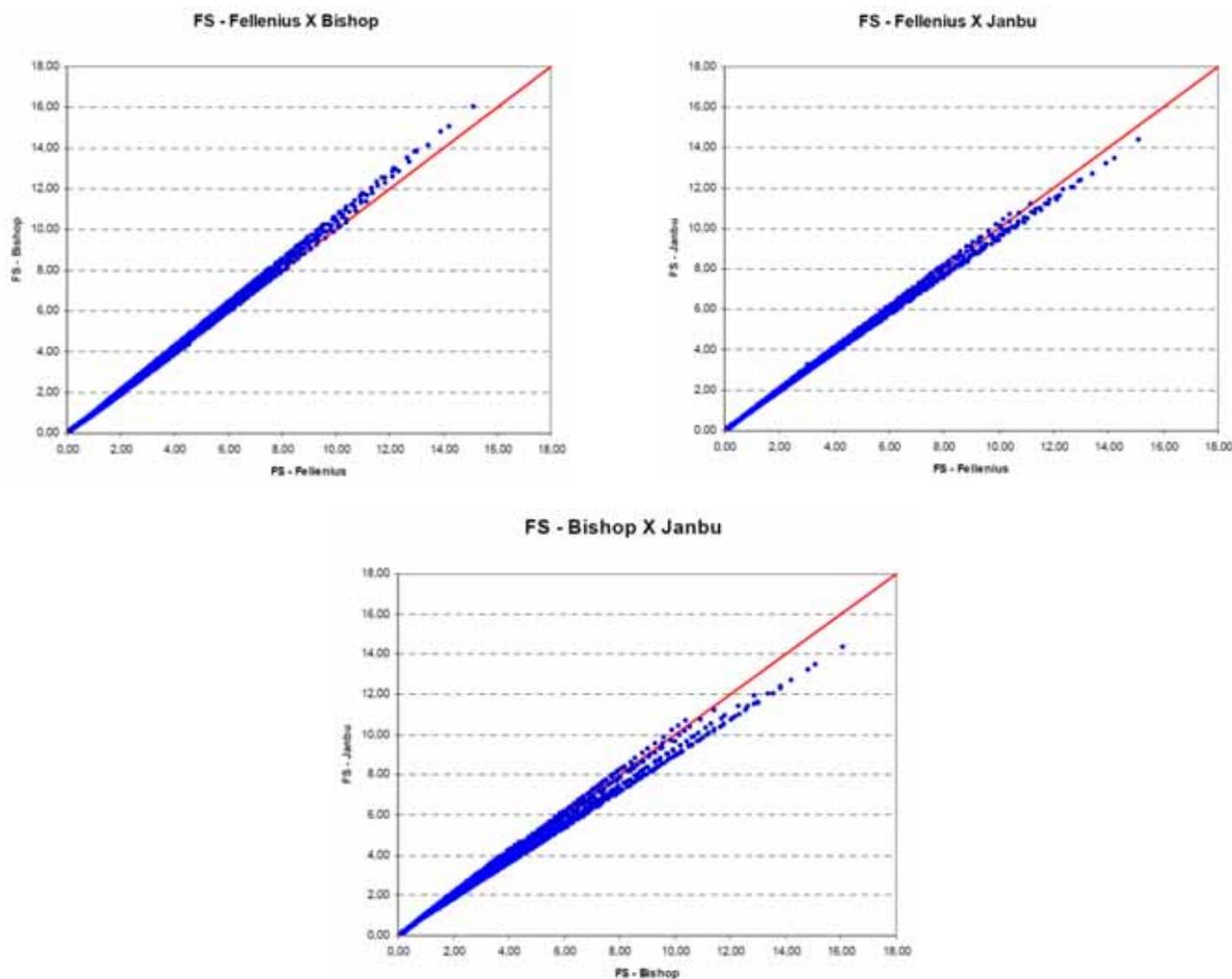


Figura 15 – Comparação gráfica dos resultados obtidos pelos métodos de Fellenius, Bishop Simplificado e Jambu Simplificado (adaptado de HORST, 2007, p. 62 - 65).

Conforme observado na **Figura 15**, o autor obteve valores de fator de segurança mais altos para o método de Bishop, quando comparado ao método de Fellenius (HORST, 2007, p. 62). Na comparação entre os métodos de Fellenius e Jambu o autor obteve um maior equilíbrio, com uma pequena tendência de valores de fator de segurança mais altos para o método de Fellenius (HORST, 2007, p. 64). Na comparação entre os métodos de Bishop e Jambu, o autor observou tendência de valores de fator de segurança maiores no método de Bishop (HORST, 2007, p. 65). Assim, observou-se a tendência de valores de fator de segurança maiores, embora em pequena proporção, para o método de Bishop (HORST, 2007, p. 65). Nas três comparações, as discrepâncias tem tendência a serem maiores para os fatores de segurança com valores mais altos.

TONUS (2009) realizou uma comparação entre os métodos de Fellenius, Jambu, Bishop, Morgenstern & Price e Spencer, aplicados a um caso real de um talude da Serra do Mar paranaense, no município de Guaratuba. Na área de estudos, pela qual passam dois oleodutos, um gasoduto e uma linha de transmissão de energia, foram verificados sinais de instabilidade, sendo instalados dispositivos de drenagem como canaletas superficiais e drenos sub-horizontais profundos, além da realização de obras de contenção em dois pontos da sua superfície.

O autor realizou um estudo bibliográfico dos parâmetros de resistência do solo mais adequados à região e considerou dois cenários para aplicação das análises de estabilidade, sendo um cenário otimista e outro pessimista. As análises também consideraram a presença, ou não, das estruturas de contenção, bem como as variações do nível d'água. Em virtude da grande extensão da encosta, ela foi dividida em 5 trechos para a realização das análises de estabilidade, estando as estruturas de contenção localizadas nos trechos 1 e 4.

Segundo TONUS (2009, p. 139), para análises que não envolvam muitas variáveis, ou seja, análises em solos homogêneos sem intervenção de nível d'água ou de qualquer dispositivo de contenção, o resultado de todos os métodos utilizados seria muito semelhante. Na medida em que são consideradas as peculiaridades do solo e a interferência do nível d'água no problema, verifica-se que métodos mais simplificados, como Jambu e Fellenius, apresentam resultados semelhantes aos de métodos mais rigorosos, como Morgenstern & Price e Spencer, com exceção do método de Bishop, que fornece resultados semelhantes aos dos métodos rigorosos em qualquer situação. A desvantagem do método de Bishop em relação aos métodos de Morgenstern & Price e Spencer é a restrição do método de Bishop a superfícies de ruptura circulares, enquanto os métodos de Morgenstern & Price e Spencer podem ser utilizados com superfícies de ruptura quaisquer.

MENEZES (2012) executou uma análise de estabilidade de taludes, em uma mina de ferro no município de Catas Altas – MG, combinando métodos usuais de investigação e análises geológico geotécnicas. Desta forma, o autor elaborou mapas de declividade, direção de vertente e curvatura, os quais foram complementados por uma caracterização do maciço e análises de estabilidade de taludes utilizando estereogramas e métodos de análise por equilíbrio limite.

As análises de estabilidade pelos métodos de equilíbrio limite foram realizadas pelos métodos de Bishop e Jambu, o que possibilitou uma comparação entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos (MENEZES, 2012, p. 83).

Nas comparações entre os métodos de análise por equilíbrio limite foram consideradas três situações distintas para o nível d'água e para os parâmetros coesão e ângulo de atrito. Além disso, foram realizadas análises de estabilidade limitando o processamento a 50 superfícies potenciais de ruptura e a 5000 superfícies potenciais de ruptura (MENEZES, 2012, p. 121 - 128).

O **Quadro 8** foi adaptado de (MENEZES, 2012, p. 128) e apresenta os valores utilizados, bem como os resultados obtidos nas análises de estabilidade pelos métodos de equilíbrio limite. Os resultados obtidos por MENEZES (2012, p. 120) mostraram os valores de fator de segurança inferiores quando calculados pelo método de Jambu em relação ao método de Bishop.

Quadro 8 – Valores utilizados e resultados obtidos por MENEZES (2012).

Relação Talude//Foliação	Parâmetros		Cota do Nível D'água (m)	Fator de Segurança Mínimo	
	c (KN/m2)	ϕ (Graus)		Jambu Simplificado	Bishop Simplificado
Oblíquo	150	40	850	2,56	2,76
Paralelo	30	32	850	1,55	1,66
Oblíquo	80	38	850	2,17	2,29
Paralelo	30	30	850	1,44	1,55
Paralelo	30	30	950	1,44	1,55
Paralelo	30	30	1000	1,00	1,14

Fonte: Modificado de MENEZES (2012)

5.9. Métodos de Análise de Estabilidade de Taludes Aplicados em Aterros Sanitários

Na literatura são identificados alguns casos de análises de estabilidade de taludes em aterros sanitários utilizando os métodos convencionais de análises de estabilidade de taludes como MAHLER e NETO (2000), OLIVEIRA (2002), BORGATTO (2006), RIBEIRO (2007) e SCHULER (2010).

Análises de estabilidade em aterros sanitários podem ser efetuadas utilizando-se métodos convencionais, entretanto é necessário conceber um projeto conservador, tendo em conta o intervalo de variação das propriedades do lixo municipal (FARIA, 2002, p. 158; LOUREIRO, 2005, p. 95). Apesar da necessidade de rigor na segurança, exageros podem inviabilizar economicamente alguns projetos (TONUS, 2009, p. 46).

Para RIBEIRO (2007, p. 17), o método de Bishop é possivelmente o mais utilizado entre os diversos métodos para análise de estabilidade de taludes, visto que é razoavelmente simples e fornece fatores de segurança próximos dos obtidos por métodos mais precisos. RIBEIRO (2007, p. 52) adotou o método de Bishop na determinação dos parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) de resíduos sólidos através de retroanálises em ensaios de laboratório sendo utilizado o software SLOPE/W, da Geo-Slope International, na aplicação do método.

MAHLER e NETO (2000, p. 1) realizaram a análise da estabilidade de um vazadouro em Petrópolis, sendo adotados, para os resíduos sólidos, parâmetros de coesão e ângulo de atrito, obtidos na bibliografia nacional e internacional.

Os autores admitiram como constantes o peso específico em 10 kN/m^3 e o ângulo de atrito em 25° , fazendo variar os valores de coesão entre 0 kPa e 30 kPa. Nas análises de estabilidade realizadas, foi utilizado o *software* SLOPE/W, da Geo-Slope International, sendo adotado o método de Bishop Simplificado (MAHLER e NETO, 2000, p. 5 - 6). Os resultados obtidos mostraram valores de fator de segurança variando entre 0,812 e 1,965.

OLIVEIRA (2002, p. 7) realizou um estudo de estabilidade de aterros sanitários onde realizou retroanálises em uma seção experimental executada em um aterro sanitário e em um escorregamento ocorrido em um aterro controlado, ambos localizados no município de Salvador – BA. Na obtenção dos parâmetros de resistência dos resíduos foram utilizadas sondagens com ensaios de penetração dinâmica, ensaios de penetração do cone e provas de carga.

Nas provas de carga, executadas no aterro sanitário de Salvador - BA, o autor executou os ensaios em um talude experimental com inclinação de 90° e arbitrou valores de ângulo de atrito para obtenção de valores de coesão (OLIVEIRA, 2002, p. 75). Para os ângulos de atrito de 15° , 20° , 25° , 30° e 35° OLIVEIRA (2002, p. 114) obteve valores de coesão de 27 kPa, 22 kPa, 17 kPa, 14 kPa e 10 kPa, respectivamente. Nas análises realizadas, foi adotado o método de Bishop

Simplificado, um método “consagrado” segundo OLIVEIRA (2002, p. 75), sendo utilizado o software SLOPE/W, da Geo-Slope International, na aplicação do método.

Os ensaios de penetração dinâmica mostraram um valor médio de N_{SPT} de 9 golpes para as camadas superiores e 14 golpes para as camadas inferiores, excluindo-se os valores maiores que 20 golpes (OLIVEIRA, 2002, p. 82). Desta forma, o valor de ângulo de atrito foi estimado entre 31° a 36° , considerando a correlação com N_{SPT} para solos arenosos. Considerando o material puramente coesivo (ângulo de atrito = 0) os valores de resistência não drenada variaram entre 30 kPa e 140 kPa. De forma análoga, os resultados obtidos nos ensaios de penetração do cone permitiram estimar o valor de ângulo de atrito entre 27° a 38° , considerando a correlação para solos arenosos, com valores de resistência não drenada variando entre 80 kPa e 400 kPa (OLIVEIRA, 2002, p. 87).

As retroanálises executadas no aterro controlado mostraram que, para ângulo de atrito variando entre 15° a 35° , o rompimento ocorreria em coesões menores que 2 kPa (OLIVEIRA, 2002, p. 108). Estes valores mostraram-se muito inferiores aos valores obtidos pelo mesmo autor pela correlação entre os parâmetros de resistência de solos arenosos e os resultados dos ensaios de penetração dinâmica e de penetração do cone, bem como as retroanálises executadas na seção experimental. A discrepância entre os resultados obtidos serve como indicativo de que análises de estabilidade em maciços de resíduos sólidos devem ser executadas de forma cautelosa (OLIVEIRA, 2002, p. 109).

BORGATTO (2006, p. 76) realizou retroanálises de estabilidade no Aterro Sanitário Bandeirantes, localizado na cidade de São Paulo – SP, sendo realizadas análises considerando o efeito das fibras e análises convencionais, sem a consideração do efeito das fibras. Nas retroanálises foi utilizado o *software* GGU-Stability da GGU-Software, que possibilita tais análises com ou sem a consideração dos efeitos das fibras.

Foram adotados os mesmos parâmetros adotados pelo relatório técnico elaborado pelo IPT na época (1991), sendo coesão de $13,5 \text{ kN/m}^2$, ângulo de atrito de 22° e peso específico para as condições drenadas e não drenadas em 10 kN/m^2 e $13,5 \text{ kN/m}^2$, respectivamente (BORGATTO, 2006, p. 76). Nas retroanálises com efeito das fibras foram consideradas ainda os parâmetros: ângulo de tensão de tração, que representa a relação entre a resistência à tração e a tensão normal nos resíduos (BORGATTO, 2006, p. 47); fator de correção, utilizado para corrigir a inclinação entre

as fibras e a superfície de ruptura (BORGATTO, 2006, p. 47); e coesão aparente, que representa o reforço de resistência ao cisalhamento advindo do reforço das fibras (BORGATTO, 2006, p. 118). As análises com e sem o efeito das fibras consideraram ainda variações no coeficiente de poropressão. O **Quadro 9** apresenta os resultados obtidos nas retroanálises realizadas com e sem a consideração do efeito das fibras.

Quadro 9 – Resultados obtidos nas retroanálises realizadas por BORGATTO (2006).

Parâmetros	Relatório IPT			Retroanálise com efeito fibra		
Coeficiente de poropressão	0	0,3	0,6	0	0,3	0,6
Ângulo de atrito (°)	22	22	22	22	22	22
Coesão (kN/m²)	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5
Peso específico (kN/m³)	13	13	13	13	13	13
Ângulo tensão tração (°)	-	-	-	35	35	35
Fator de correção	-	-	-	0,5	0,5	0,5
Coesão aparente (kN/m²)	-	-	-	140	140	140
Fator de segurança	2,06	1,55	1	2,25	1,83	1,38

Fonte: Modificado de BORGATTO (2006)

Segundo BORGATTO (2006, p. 118), o fator de segurança encontrado na retroanálise de 1,38 para coeficiente de poropressão em 0,6 indica que o talude se apresenta em condições de estabilidade. Aplicando nesta mesma análise um fator de segurança unitário, o valor da coesão encontrado é de 2 kN/m², conforme apresentado no **Quadro 10** adaptado de BORGATTO (2006, p. 119). Segundo o autor, a discrepância entre os valores de coesão obtidos indicam que o material, na hora do escorregamento, apresentava característica puramente granular, sendo a resistência “coesiva” provinda do reforço das fibras.

Quadro 10 – Parâmetros obtidos por IPT (1991) e por BORGATTO (2006, p. 117).

Parâmetro	Relatório IPT	Retroanálise com efeito das fibras
c (kPa)	22,00	22,00
φ (°)	13,50	2,00
γ(kN/m³)	13,00	13,00

Fonte: Modificado de BORGATTO (2006, p. 117).

BORGATTO (2006, p. 77) realizou ainda a comparação entre o método clássico de análise de estabilidade, utilizando o *software* SLOPE/W, da Geo-Slope International, e o método considerando o efeito das fibras, utilizando *software* GGU-Stability da GGU-Software. As análises foram executadas em duas seções hipotéticas

do aterro sendo uma seção composta por resíduos frescos e outra composta por uma camada de resíduos frescos, sobreposta sobre um pacote de resíduos antigos. As análises consideraram ainda variações no coeficiente de poropressão em ambos os casos. O **Quadro 11** apresenta os resultados obtidos nas análises de estabilidade realizadas nas seções elaboradas por BORGATTO (2006, p. 120 - 123).

Os resultados obtidos por BORGATTO (2006, p. 126) demonstraram o aumento de resistência dos resíduos quando considerado o efeito das fibras sendo verificados ganhos de até 50%.

SCHULER (2010, p. 6) realizou um estudo do comportamento geomecânico de um aterro localizado no estado do Rio de Janeiro. O autor efetuou o monitoramento do aterro utilizando instrumentação geotécnica, incluindo piezômetros, inclinômetros, pluviômetros e marcos superficiais. O autor realizou 03 análises de estabilidade (retroanálises) em casos de ruptura observados durante o monitoramento.

Nas retroanálises, SCHULER (2010, p. 111) adotou o peso específico de 11 kN/m³ e o coeficiente de poropressão de 0,7, obtendo 27° de ângulo de atrito e 15 kPa de coesão para resíduos mais recentes e 25° de ângulo de atrito e 40 kPa de coesão para resíduos mais antigos. O método de Bishop foi adotado em todas as análises realizadas, sendo as simulações realizadas no *software* SLIDE 5.0 da *Rocscience* (SCHULER, 2010, p. 95).

Quadro 11 – Resultados obtidos nas análises de estabilidade realizadas por BORGATTO (2006).

Seção 1							
Parâmetros		Método clássico			Método com o efeito das fibras		
Coeficiente de poropressão		0	0,2	0,5	0	0,2	0,5
Ângulo de atrito (°)	Resíduos frescos	30	30	30	30	30	30
Coesão (kN/m ²)	Resíduos frescos	15	15	15	15	15	15
Peso específico (kN/m ³)	Resíduos frescos	10	10	10	10	10	10
Ângulo tensão tração (°)	Resíduos frescos	-	-	-	35	35	35
Fator de correção	Resíduos frescos	-	-	-	0,5	0,5	0,5
Coesão aparente (kN/m ²)	Resíduos frescos	-	-	-	125	125	125
Fator de segurança	Resíduos frescos	1,72	1,44	1	2,43	2,15	1,72
Seção 2							
Parâmetros		Método clássico			Método com o efeito das fibras		
Coeficiente de poropressão		0	0,2	0,5	0	0,2	0,5
Ângulo de atrito (°)	Resíduos frescos	30	30	30	30	30	30
	Resíduos antigos	38	38	38	38	38	38
Coesão (kN/m ²)	Resíduos frescos	15	15	15	15	15	15
	Resíduos antigos	15	15	15	15	15	15
Peso específico (kN/m ³)	Resíduos frescos	10	10	10	10	10	10
	Resíduos antigos	15	15	15	15	15	15
Ângulo tensão tração (°)	Resíduos frescos	-	-	-	35	35	35
	Resíduos antigos	-	-	-	15	15	15
Fator de correção	Resíduos frescos	-	-	-	0,5	0,5	0,5
	Resíduos antigos	-	-	-	0,5	0,5	0,5
Coesão aparente (kN/m ²)	Resíduos frescos	-	-	-	125	125	125
	Resíduos antigos	-	-	-	75	75	75
Fator de segurança	Resíduos frescos	2,07	1,68	1,10	2,23	1,84	1,33

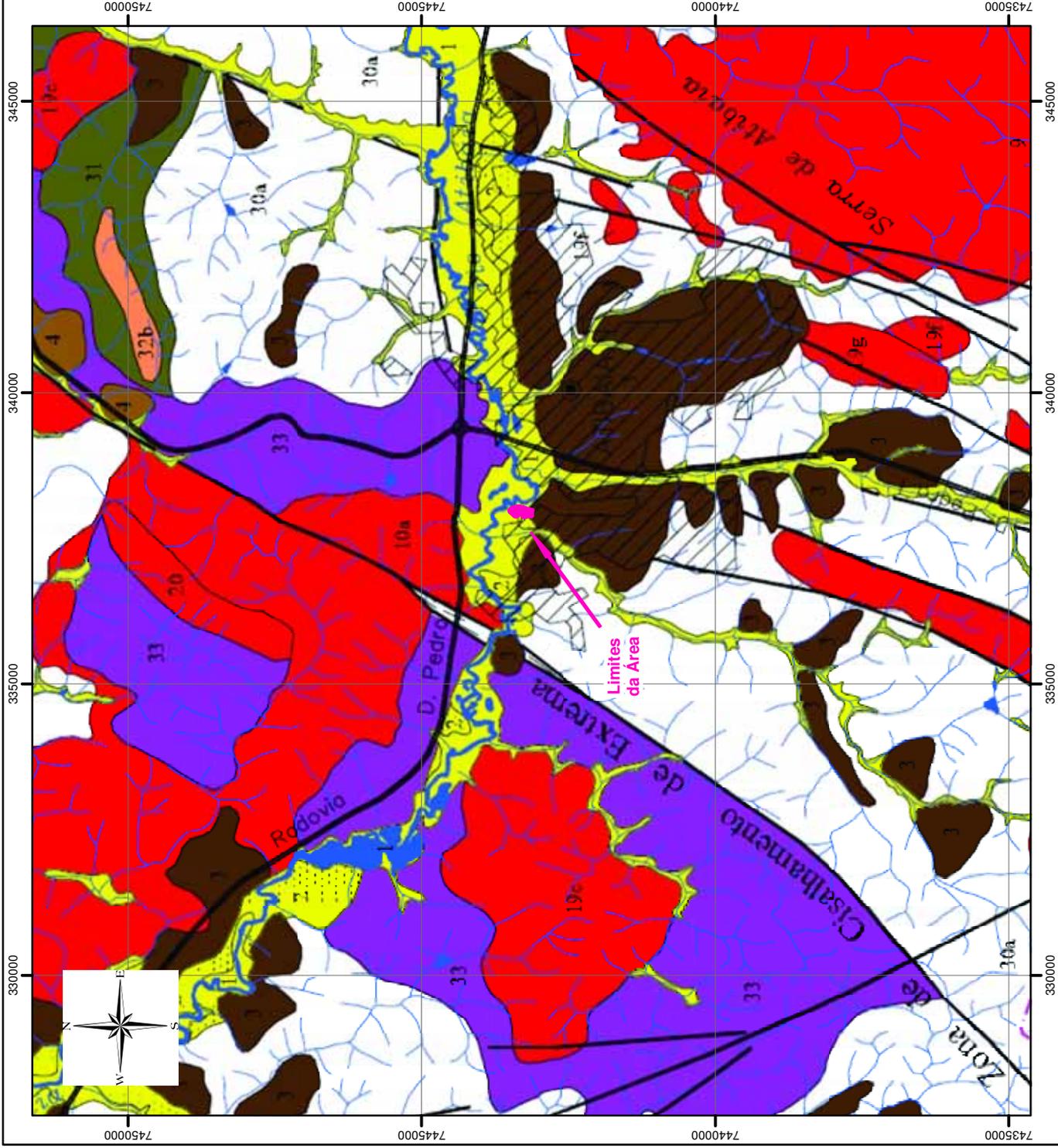
Fonte: Modificado de BORGATTO (2006)

6. ESTUDO DO MEIO FÍSICO

Regionalmente o município de Atibaia está inserido no contexto geológico do Cinturão Ribeira, no Complexo Varginha-Guaxupé, que representa uma unidade de médio a alto grau metamórfico, com idade neoproterozóica onde se associam intercalações de rochas supracrustais (HASUI, 2012, p. 350 - 351).

O mapa geológico da **Figura 16** foi modificado de NEVES (2005, Apêndice A) e apresenta a geologia da região do Aterro de Caetetuba. NEVES (2005, p. 8), elaborou o mapa geológico da Bacia do Rio Jundiáí, em escala 1:100.000, com base na compilação de mapas geológicos preexistentes, realizados durante o convênio entre UNESP e o extinto Pró- Minério, onde foram mapeadas bases cartográficas do IBGE, em escala 1:50.000, incluindo as folhas Atibaia (OLIVEIRA *et al.*, 1985), Jundiáí (BATISTA *et al.*, 1986), Santana de Parnaíba (BATISTA *et al.*, 1987) e Cabreúva (HACKSPACHER *et al.*, 1989). Além destes, foram utilizados o mapeamento geológico em escala 1:50.000 da área do Maciço Granítico Itu realizado por GALEMBECK (1997), e o mapeamento das coberturas cenozoicas da região de Jundiáí realizado por NEVES (1999). Toda a compilação de mapas geológicos foi apoiada em fotointerpretação e trabalhos de campo.

Verifica-se no mapa geológico da **Figura 16** a ocorrência de rochas do Complexo Amparo, que constitui um conjunto de gnaisses bandados e gnaisses graníticos e granodioríticos, de idades entre 3,0 Ma e 2,2 – 2,0 Ga, que ocorrem como intercalações nas rochas supracrustais da porção central do Complexo Varginha-Guaxupé. Associados as rochas do Complexo Amparo, ocorrem rochas intrusivas granitoides em corpos de dimensões variadas. O magmatismo da região é classificado como cálcio-alcálico, evoluindo para termos mais alcalinos nas intrusões tardias. Dentre os diversos tipos de granitos, predominam os porfiróides, de composição variando de granítica a granodiorítica. Possuem colorações brancas, róseas e cinzentas, variam de finos a grossos, são equigranulares ou porfíricos e podem apresentar foliação pronunciada e feições migmatíticas. Há ainda uma suíte charnoquítica, restrita a região de Atibaia (NEVES, 2005, p. 26).



Legenda

Limites da Área

QUATERNÁRIO

- 1 Depósitos aluviais: cascalhos, areias e argilas.
- 2 Depósitos de terraços: cascalhos, areias e argilas pré-atuais em terraços elevados.
- 3 Depósitos coluviais e/ou eluviais: sedimentos argilo-arenosos com grânulos de quartzo, geralmente com linhas de pedras na base.

TERCIÁRIO

- 4 Depósitos terciários: diamictitos, conglomerados, arenitos e argilitos de sisternas de leques aluviais antigos.

PRÉ-CAMBRIANO

- Intrusivos Granitídeos

- 9 Granito Atibaia: hornblenda-biotita granitos e, subordinadamente, sienogramitos porfirídeos, róseos-acinzentados, inequigranulares, foliados a maciços, médios a grossos.
- 10 Granito Bragança Paulista (complexo socorro): magnetita-hornblenda granítide, porfiríode, gnaissificado, protoblastomilítico, quartzomonzonioritos, tonalitos, granodioritos e monzogranitos. Localmente ortognaisses de composição granítica a granodiorítica, com domínios de granitos cinza e róseos.
- 19 Suites graníticas indiferenciadas: granitos foliados cinza (a), ortognaisses graníticos brancos (b) e granitos foliados róseos a cinza, línos, inequigranulares a equigranulares (c).
- 20 Suite charnoquítica.

- Complexo Amparo

- 30 Gnaisses migmatizados ou não, xistosos, línos a médios, com intercalações de gonditos, calcossilicáticas, quartzitos, anfibolitos, micaxistos e xistos básicos (a), metatonalitos e metaquartzodioritos (b) e anfibolitos (c).
- 31 Muscovita-biotita xistos alternados com lentes de quartzitos, localmente anfibolitos, metagabros, metarenitos e calcossilicáticas
- 32 Quartzitos puros (a), quartzitos feldspáticos micáceos e granatíferos com intercalações de biotita xistos, rochas calcossilicáticas, quartzitos conglomeráticos, gonditos e anfibolitos (b)
- 33 Migmatitos diversos



Escala - 1:100.000

Projeção UTM, Fuso 23S, Datum SIRGAS 2000

Figura 16 – Mapa geológico da região do Aterro de Caetuba (modificado de NEVES, 2005, Apêndice A)

O Aterro de Caetetuba está assentado sobre depósitos aluviais quaternários associados à calha do Rio Atibaia, em sua maior parte, sobre a unidade dos Depósitos Aluviais, definida por NEVES (2005), com exceção da porção sudoeste do maciço, disposta sobre a unidade dos Depósitos Coluviais e/ou Eluviais.

Tais depósitos são originados por processos de intemperismo e transporte de curta a média distância, com ou sem atuação de correntes de água canalizada. Constituem coberturas coluviais de encosta e aluviões depositados ao longo dos canais de drenagem (NEVES, 2005, p. 30). Os depósitos quaternários identificados no mapa geológico elaborado por NEVES (2005) foram subdivididos em Depósitos Coluviais e/ou Eluviais, Depósitos de Terraços e Depósitos Aluviais, estando a área do Aterro de Caetetuba assentada sobre Depósitos Aluviais.

Os Depósitos Aluviais ocupam as planícies aluviais ao longo dos canais de drenagem. São compostos por areias inconsolidadas de granulação variada, argilas e cascalheiras fluviais (NEVES, 2005, p. 33). Esta unidade adquire relevada importância no presente estudo de caso, visto que constituem o embasamento do Aterro de Caetetuba. Os Depósitos de Terraços são constituídos por sedimentos aluviais pré-atuais depositados em um sistema de drenagem semelhante ao atual. Os únicos corpos individualizados ocorrem ao longo do rio Atibaia. Estes depósitos compõem patamares elevados a alguns metros acima das planícies aluviais recentes e sua constituição é idêntica à dos Depósitos Aluviais (NEVES, 2005, p. 32). Os depósitos coluviais e/ou eluviais são compostos por coberturas inconsolidadas que se concentram nas áreas de relevo suave e raramente ocorrem nos terrenos mais acidentados. São compostos por material argilo-arenoso com grânulos de quartzo milimétricos a centimétricos dispersos aleatoriamente, apresentando uma típica coloração avermelhada (NEVES, 2005, p. 30).

O aquífero formado pelos depósitos aluviais quaternários, distribuídos ao longo dos canais de drenagem, apresenta porosidade granular, são descontínuos, heterogêneos e anisotrópicos, com espessura média de 30 metros e transmissividade de 2 a 50 m²/dia (NEVES, 2005, p. 23). Estes corpos são bastante limitados e de importância localizada. No presente estudo de caso, este sistema aquífero adquire relevada importância, visto que o mesmo constitui o embasamento do Aterro de Caetetuba e influencia na presença de água no interior do maciço. Como se verá adiante, o Aterro de Caetetuba corresponde a uma antiga área de disposição irregular

de lixo, recuperada parcialmente e, portanto, encontra-se disposto nos sedimentos do Rio Atibaia sem qualquer medida de impermeabilização.

O Rio Atibaia é formado na confluência dos rios Cachoeira e Atibainha, em Bom Jesus dos Perdões, apresentando um vale encaixado sub-transversalmente ao falhamento transcorrente predominante, com planície aluvionar atingindo até 1 km de largura, onde corre deslocado de seu centro. A área apresenta relevo montanhoso, com altitudes acima de 1400 m, contrastado com áreas de relevo suavizado, compostas pelas várzeas do rio Atibaia e alguns de seus afluentes, em níveis próximos dos 740 m (COSTA, 2006, p. 3).

COSTA (2006) realizou um estudo dos efeitos de movimentações neotectônicas no condicionamento estrutural da calha do Rio Atibaia, na região entre Atibaia e Jarinu. De acordo com COSTA (2006, p. 1 - 2), o vale dos rios Atibaia e Atibainha destaca-se pela sua aparência característica de graben. As colinas de entorno do rio Atibaia apresentam diferença contrastante, mostrando vertentes abruptas na margem direita (N) e suavemente inclinadas na margem esquerda (S), sugerindo um hemigraben que condiciona o rio no sentido leste-oeste, ao invés de o superimpor as grandes falhas transcorrentes de nordeste-sudoeste que cortam toda a região.

Dentro deste contexto, a calha do Rio Atibaia estaria sujeita a um condicionamento estrutural e os meandros presentes seriam resultado da movimentação relativamente rápida da calha do rio no sentido norte, seguida de acomodação do leito fluvial às estruturas da área (COSTA, 2006, p. 9).

Na **Figura 17**, adaptada da Folha Cartográfica Atibaia I (SF-23-Y-C-III-2-NE-E) (IGGSP, 1979, escala 1:10.000), observa-se a localização do Aterro de Caetetuba, quase totalmente assentado sobre a várzea do Rio Atibaia, com sua porção sudoeste disposta sobre uma pequena elevação topográfica. Observa-se ainda o caráter meandrante do Rio Atibaia e o deslocamento, para sul, da calha do rio em relação ao centro do vale.

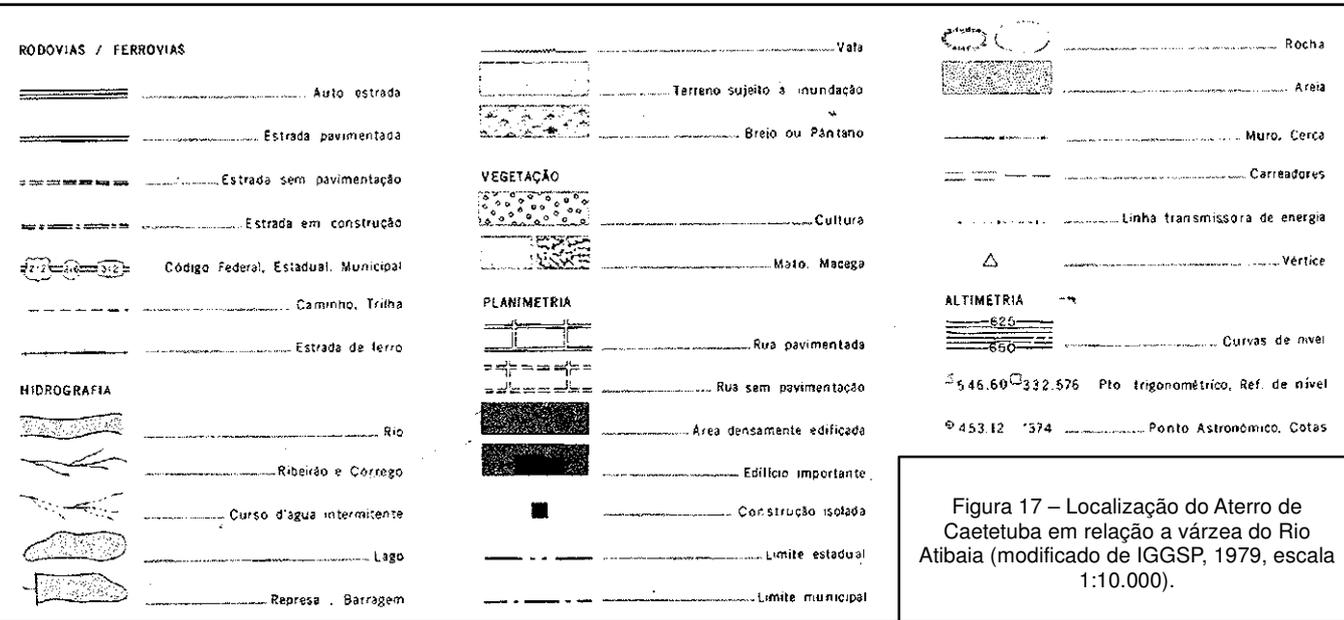
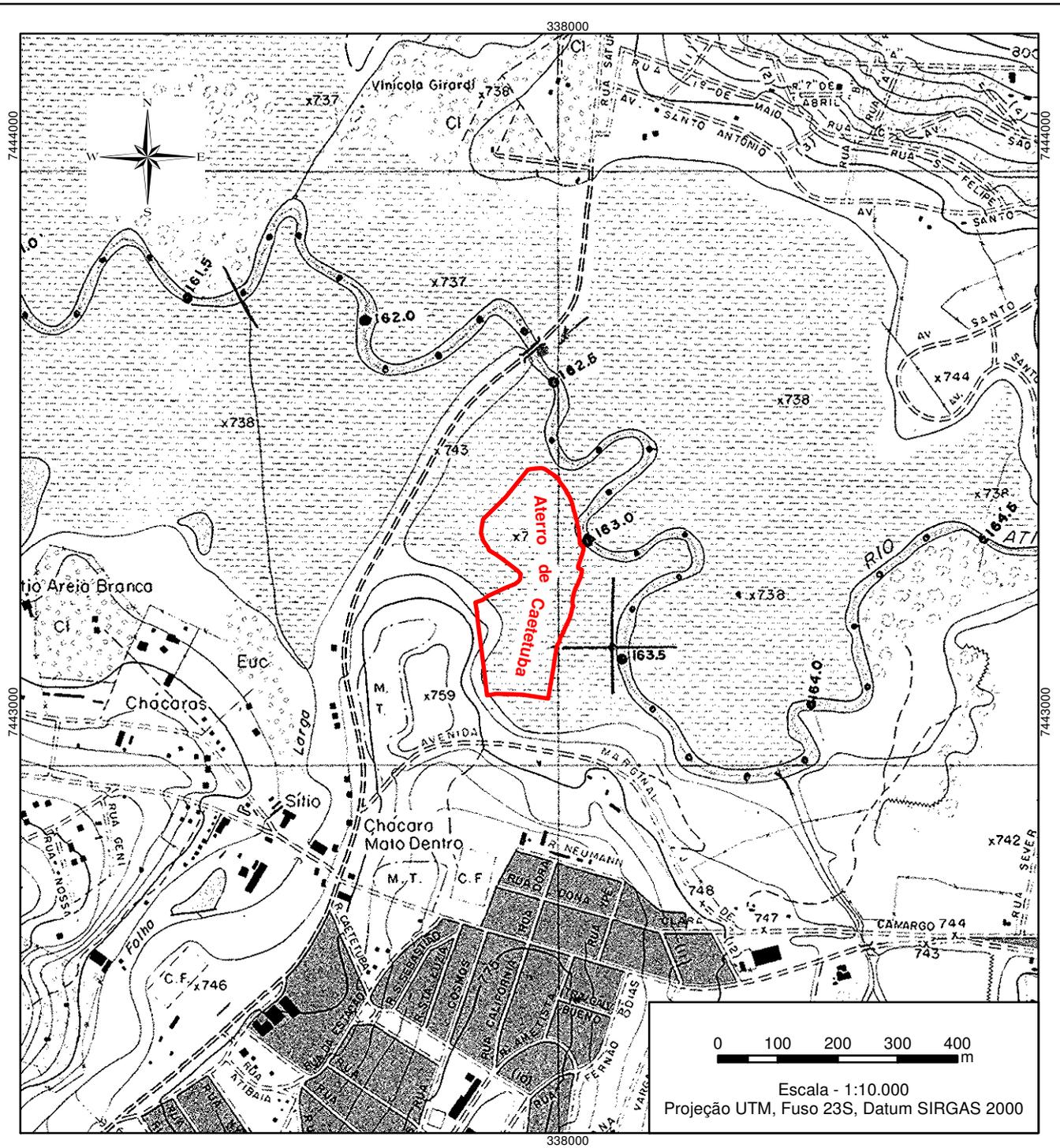


Figura 17 – Localização do Aterro de Caetetuba em relação a várzea do Rio Atibaia (modificado de IGGSP, 1979, escala 1:10.000).

7. CARACTERIZAÇÃO DO ATERRO DE CAETETUBA

A área do Aterro de Caetetuba se mostrou favorável ao desenvolvimento desta pesquisa, tendo em vista as características construtivas e geométricas do maciço além da grande quantidade de informações disponíveis.

Foram utilizados documentos referentes ao processo de investigação ambiental da área em andamento na CETESB, como memoriais e termos de ajustamento além de relatórios técnicos.

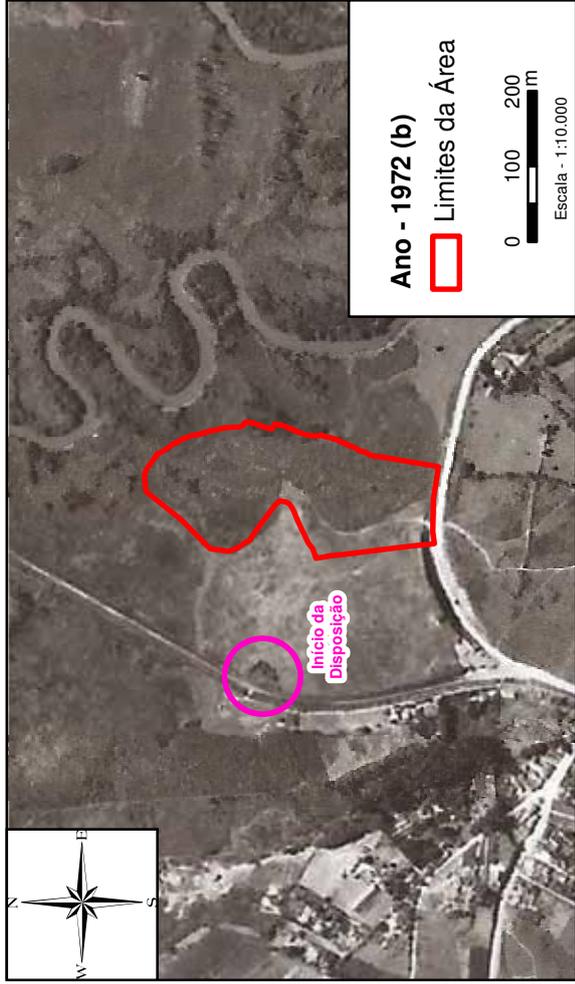
O material consulado na Pesquisa Documental forneceu dados importantes a serem utilizados nas análises de estabilidade do aterro, incluindo geometria e perfil construtivo do maciço, condições de assentamento e presença de água.

Com base nas imagens aéreas e entrevistas contidas nos relatórios fornecidos, foi elaborado o histórico construtivo do maciço. A partir do histórico do aterro, juntamente com os perfis de sondagens e os levantamentos topográficos disponíveis foi possível elaborar um modelo construtivo do maciço.

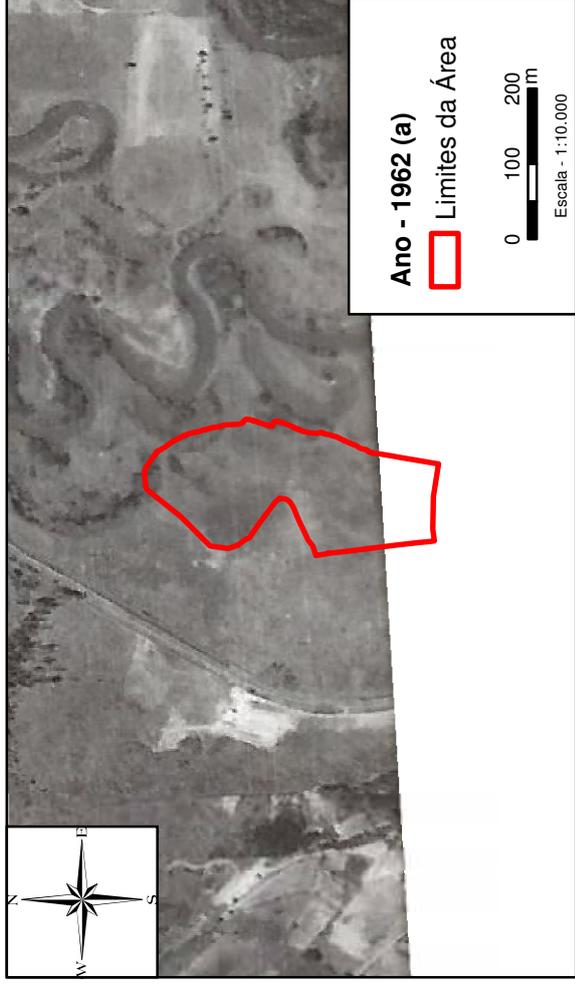
7.1. Histórico

O estudo histórico contido na Avaliação Ambiental Preliminar do Aterro de Caetetuba foi elaborado com base nas informações de funcionários do SAAE ATIBAIA e apoiado em fotos aéreas fornecidas pelos mesmos, além de imagens de satélite disponíveis no *software Google Earth*.

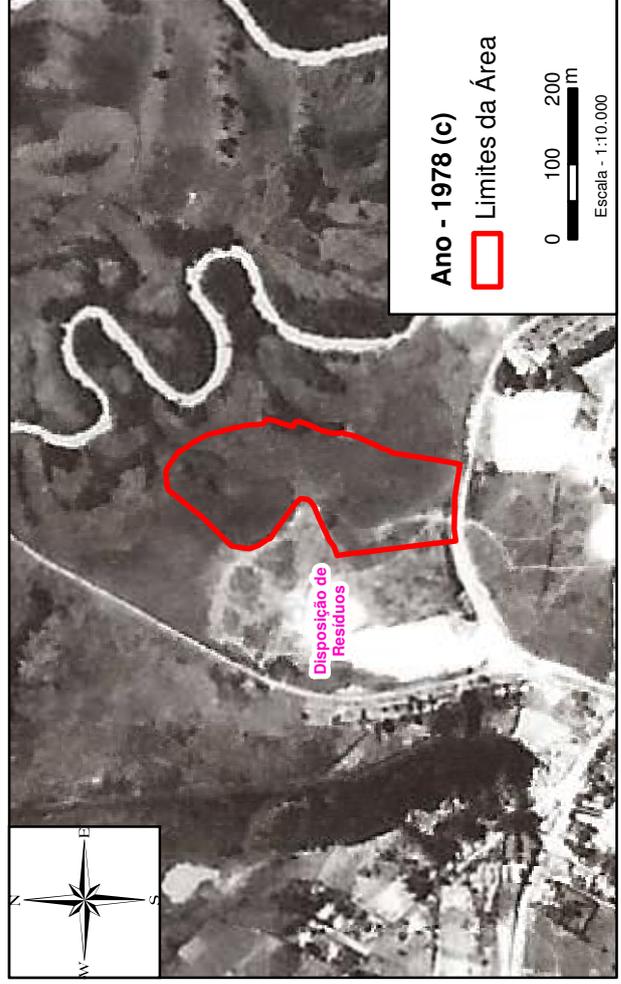
Conforme verificado no relatório técnico, o uso da área para disposição de resíduos se deu a partir do final da década de 1960 e início da década de 1970. A **Figura 18** apresenta as fotos aéreas obtidas na Avaliação Ambiental Preliminar, incluindo fotos datadas dos anos de 1962 (a), 1972 (b) e 1978 (c). Não foram verificadas fotos aéreas relativas às décadas de 80 e 90, época da disposição da maior parte dos resíduos domésticos no local.



1972 - Verificam-se materiais depositados na área adjacente a estrada local.



1962 - Não são identificadas feições de disposição de resíduos no atual local do Aterro de Caetetuba.



1978 - Observam-se feições de disposição de resíduos na área adjacente ao atual aterro, onde hoje está instalada a Vila São José.

Figura 18 - Fotos aéreas dos anos de 1962 (a), 1972 (b) e 1978 (c)

Projeção UTM, Fuso 23S, Datum SIRGAS 2000

Na imagem do ano de 1962 (**Figura 18.a**), não são identificadas feições de disposição de resíduos no atual local do Aterro de Caetetuba, sendo observados alguns meandros abandonados do rio Atibaia.

Na imagem do ano de 1972 (**Figura 18 b**), já se verificam materiais depositados na área adjacente a estrada local, identificados como um aspecto escuro nas imagens. Segundo informações da administração, os resíduos foram dispostos diretamente no solo, na planície aluvial do Rio Atibaia, não sendo registrada qualquer instalação de proteção.

Na imagem de 1978 (**Figura 18 c**), não foram observadas feições de disposição de resíduos na área do aterro, no entanto, as mesmas foram identificadas na área adjacente ao atual aterro, onde hoje está instalada a comunidade denominada Vila São José.

Não foram encontrados registros aéreos nas décadas de 80 e 90, época da disposição da maior parte dos resíduos domésticos no local. A partir do ano de 2005, estão disponíveis imagens de satélite da área, com periodicidade anual, no *software Google Earth*.

No ano de 1996, após notificação da gerencia regional da CETESB, a Prefeitura Municipal de Atibaia instalou uma unidade de reciclagem e compostagem aeróbica, conforme verificado no memorial de caracterização técnica (MCE) da licença de instalação de 1996, elaborado pela Prefeitura Municipal de Atibaia. A unidade de reciclagem e compostagem seria destinada ao tratamento do lixo disposto irregularmente no Aterro de Caetetuba bem como do lixo proveniente do município. As obras foram concluídas em 2002, incluindo o retaludamento da massa dos resíduos com posterior cobertura com terra e plantio de grama, instalação de alambrado em parte da extensão recuperada, sistema de drenagem de águas pluviais com canaletas de concreto, sistema de drenagem de líquidos percolado com drenos de pedra rachão e caixa de concreto para acumulação.

Na **Foto 1**, retirada da Avaliação Ambiental Preliminar do Aterro de Caetetuba, observam-se as obras de recuperação do maciço realizadas no ano de 2002. Destaca-se a diferença no tratamento dado a porção oeste do aterro (esquerda da foto), onde se verificam taludes bem definidos, e a porção leste do aterro (direita da foto), alvo do presente estudo de caso, onde se verifica o domínio da vegetação. Observa-se ainda a instalação da área de triagem e compostagem próxima ao limite sudoeste do aterro (canto inferior esquerdo da foto).



Foto 1 – Obras de recuperação do maciço realizadas no ano de 2002. Destaca-se a diferença no tratamento dado a porção oeste do aterro (esquerda da foto), onde se verificam taludes bem definidos, e a porção leste do aterro (direita da foto), onde se verifica o domínio da vegetação.

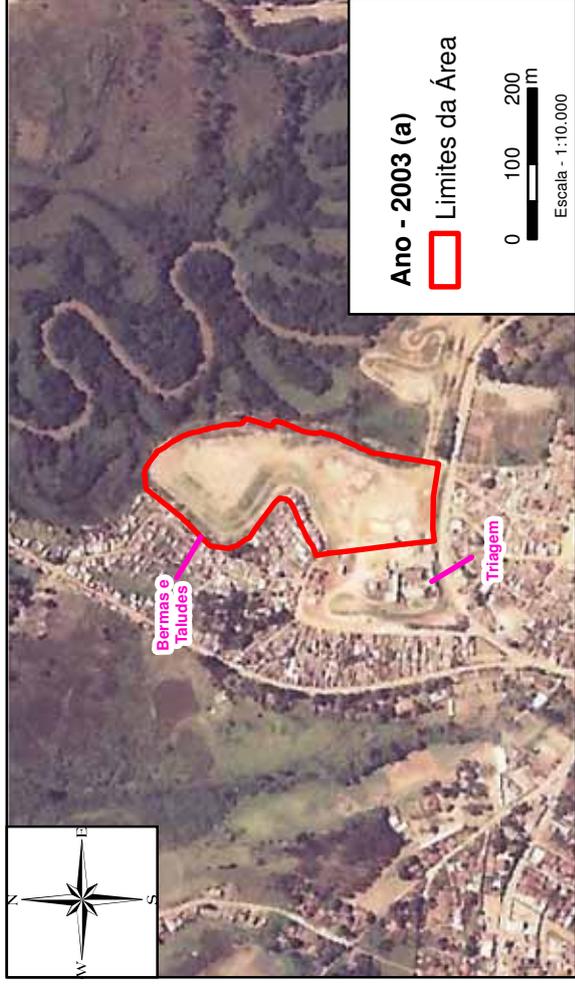
A **Figura 19** apresenta as imagens aéreas posteriores às obras de recuperação do Aterro de Caetetuba, incluindo uma foto aérea do ano de 2003 (a), obtida na Avaliação Ambiental Preliminar, e duas imagens de satélite, retiradas no *software Google Earth*, referentes aos anos de 2008 (b) e 2010 (c).

Na imagem do ano de 2003 (**Figura 19 a**), é possível observar que a disposição de resíduos domiciliares já havia sido paralisada, sendo verificada a regularização do maciço de resíduos, com a implementação de bancadas e taludes, vegetados com gramíneas.

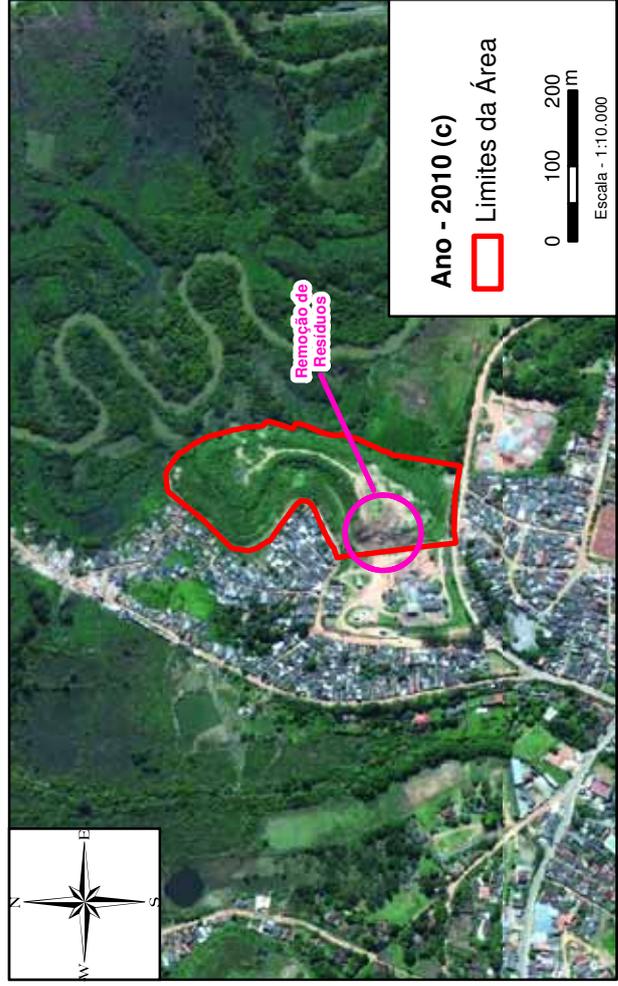
Na imagem do ano de 2008 (**Figura 19 b**), observa-se uma intensa disposição de resíduos que, segundo a administração do aterro, correspondem a resíduos de construção civil. Neste período, formou-se o talude íngreme na porção leste do aterro, principal alvo das análises de estabilidade a serem realizadas no presente estudo de caso.



2008 - Verifica-se a disposição de resíduos de construção civil, sendo formado o talude na porção leste do aterro, principal alvo do presente estudo de caso.



2003 - Verifica-se o resultado das obras de regularização do maciço de resíduos, com a implementação da área de triagem e bancadas e taludes, vegetados com gramíneas.



2010 - Verifica-se o crescimento da vegetação, indicando a baixa movimentação no local. Observa-se ainda parte do material retirado na porção sudoeste do maciço.

Figura 19 – Imagens aéreas dos anos de 2003 (a), 2008 (b) e 2010 (c).
Projeção UTM, Fuso 23S, Datum SIRGAS 2000

De acordo com a administradora, a deposição de resíduos da construção civil se perpetuou até o ano de 2010, quando se iniciou a retirada de parte do material para triagem no centro instalado a sudoeste do aterro. Na imagem de 2010 (**Figura 19 c**) pode-se observar parte do material sendo retirado na porção sudoeste do maciço. Nas demais regiões, observa-se o crescimento da vegetação, indicando a baixa movimentação no local.

Na **Foto 2**, retirada da Avaliação Ambiental Preliminar do Aterro de Caetetuba, observa-se as obras de triagem na porção sudoeste do aterro. Na foto é possível verificar o perfil do Aterro de Caetetuba, onde camadas de resíduos são alternadas com camadas de solo de no máximo 1m. Destaca-se que o maciço se mostra estável durante os procedimentos de escavação, mesmo sujeitado a taludes de quase 90°.

No ano de 2010 foram realizados ainda os primeiros procedimentos de investigação ambiental na área do Aterro de Caetetuba, pela empresa Gisante – Serviços de Engenharia S/S Ltda. Os trabalhos de investigação ambiental foram continuados pela empresa Geocia - Consultoria, Serviços em Geologia e Engenharia Ambiental LTDA-EPP, sendo realizados os procedimentos de avaliação ambiental preliminar e de investigação ambiental confirmatória no ano de 2012.

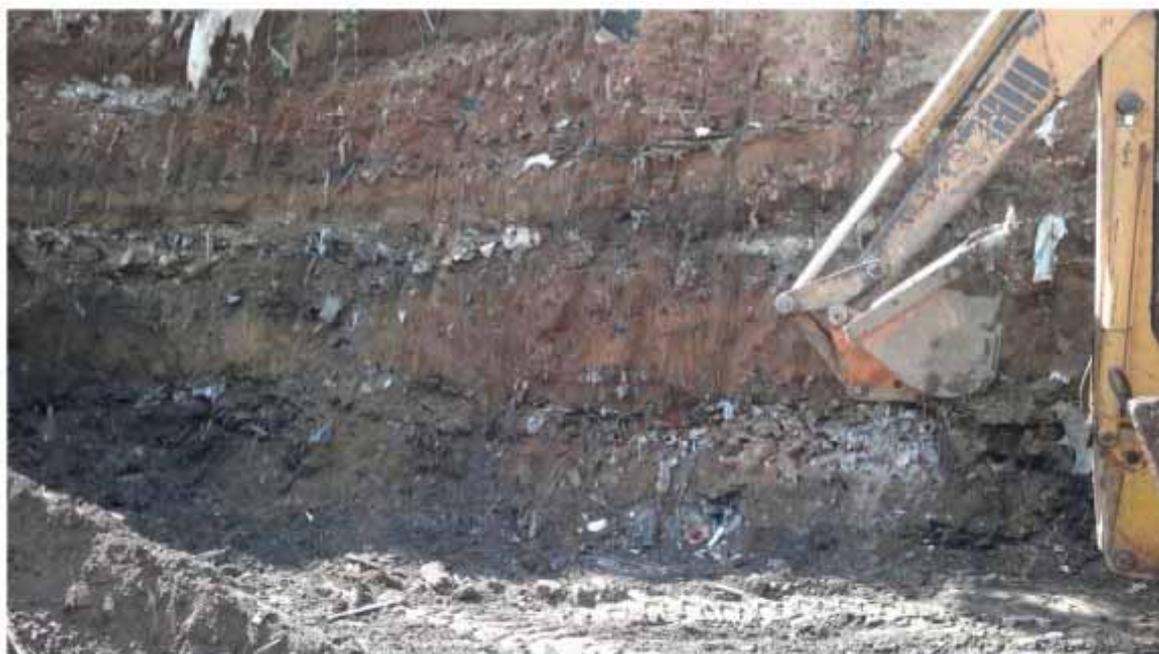


Foto 2 – Obras para triagem na porção sudoeste do aterro. Verifica-se camadas de resíduos alternadas com camadas de solo de no máximo 1m. Destaca-se que o maciço se mostra estável durante os procedimentos de escavação, mesmo sujeitado a taludes de quase 90°.

7.2. Dados Geotécnicos e Seções Litoconstrutivas

Os relatórios de investigação ambiental forneceram dados fundamentais a serem utilizados nas análises de estabilidade do aterro, incluindo geometria e perfil construtivo do maciço, condições de assentamento, parâmetros geotécnicos dos solos e dos resíduos e presença de água.

Na Investigação de Passivo Ambiental foi obtida a planta topográfica da área, que representa a situação do maciço no ano de 2010. Conforme verificado no relatório elaborado pela empresa Gisante, foram realizadas 04 sondagens com amostragem de solo e instalação de poços de monitoramento com amostragem de água subterrânea, incluindo 01 poço entre o maciço e a várzea do Rio Atibaia e 03 poços entre o maciço e a Vila São Jose.

Na Investigação Ambiental Confirmatória, foram obtidos diversos perfis de sondagem, referentes a sondagens com teste de penetração (SPT) e sondagens a trado para instalação de poços de monitoramento. Conforme verificado no relatório elaborado pela empresa Geocia, foram realizadas 12 sondagens a trado, para instalação de 08 poços de monitoramento de água subterrânea e 04 poços para amostragem de gás, além da execução de 05 sondagens com ensaio de penetração (SPT). Foram identificadas sondagens no topo do maciço, na lateral imediata à base e no entorno próximo ao Aterro de Caetetuba, sendo obtidas descrições dos resíduos e das formações geológicas que compõe o embasamento. Destaca-se que os trabalhos de investigação ambiental abrangeram a área do Aterro de Caetetuba bem como a área da Vila São José. Desta forma, na presente dissertação de mestrado, as sondagem e poços localizadas fora do entorno imediato do maciço foram desconsideradas.

A **Figura 20** ilustra a situação do aterro em 2010 juntamente com a localização das sondagens executadas nas proximidades do aterro. O **Quadro 12** apresenta as principais características das sondagens executadas nas proximidades. Os níveis d'água indicados representam as condições em setembro de 2012. O **Quadro 13** apresenta a resenha meteorológico do município de Atibaia, retirada do site da CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura), mostrando que, na data, o município encontrava-se em um período pouco chuvoso.

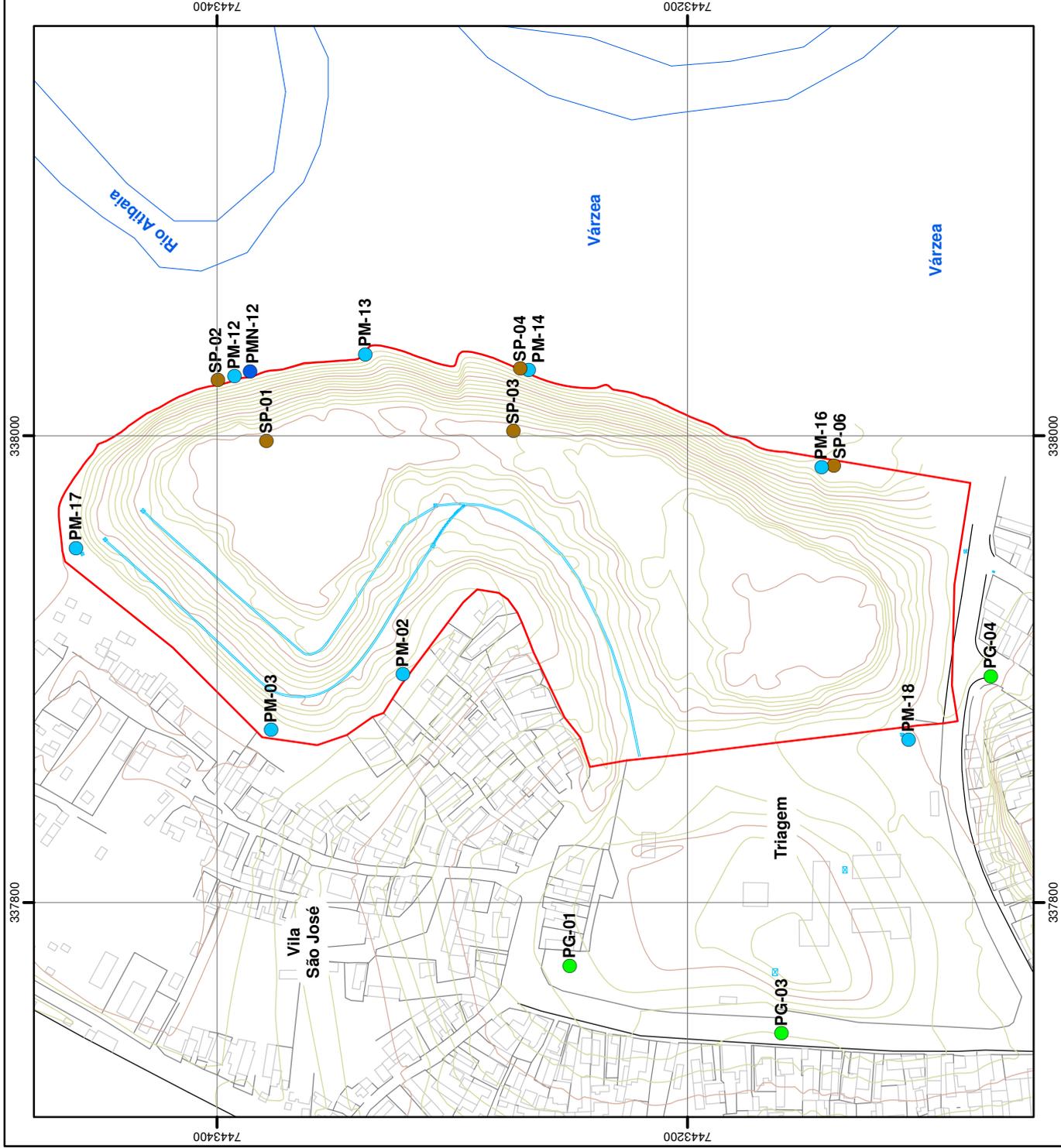
A **Figura 21** apresenta os perfis de sondagem com ensaio de penetração (SPT). A **Figura 22** apresenta os perfis de sondagens a trado para instalação de poços de monitoramento de água subterrânea e gás. Ressalta-se que os poços instalados para monitoramento de gás não atingiram o nível d'água.

Quadro 12 – Principais características das sondagens executadas no Aterro de Caetetuba (Projeção UTM, Fuso 23S, Datum SIRGAS 2000)

Tipo	Nome	UTM_E	UTM_N	Prof. (m)	Cota (m)	N.A.(m)
Sondagem com Teste de Penetração (SPT)	SP-01	337991	7443345	16,30	755,50	-
	SP-02	338017	7443366	10,36	739,50	0,62
	SP-03	337995	7443240	23,60	755,50	17,3
	SP-04	338022	7443237	8,39	739,80	0,58
	SP-06	337980	7443104	9,30	741,50	1,93
Poço de Monitoramento de Água Subterrânea	PM-02	337891	7443287	2,30	740,00	0,75
	PM-03	337867	7443343	3,30	740,00	0,52
	PM-12	338018	7443359	2,50	739,50	1,02
	SPMN-12	338020	7443352	6,00	739,50	0,99
	PM-13	338028	7443303	3,00	740,00	0,9
	PM-14	338021	7443233	3,00	739,80	0,98
	PM-16	337980	7443109	3,20	741,50	2,33
	PM-17	337945	7443426	3,60	740,00	0,88
Poço de Monitoramento de Gás	PM-18	337863	7443072	6,00	750,50	4,09
	PG-01	337766	7443216	5,00	753,50	-
	PG-03	337737	7443126	5,00	752,00	-
	PG-04	337890	7443037	4,00	750,20	-

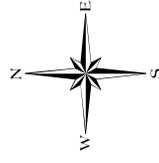
Quadro 13 - Resenha meteorológico do município de Atibaia (CEPAGRI, site oficial)

MÊS	TEMPERATURA DO AR (C°)			CHUVA (mm)
	mínima	média	máxima	
JAN	17.3	22.8	28.3	263.3
FEV	17.6	22.9	28.3	212.7
MAR	16.7	22.3	27.9	176.5
ABR	14.1	20.1	26.1	71.7
MAI	11.4	17.8	24.2	66.5
JUN	9.8	16.4	23.0	53.9
JUL	9.3	16.2	23.2	41.4
AGO	10.5	17.8	25.1	34.2
SET	12.5	19.3	26.2	75.0
OUT	14.3	20.5	26.7	138.3
NOV	15.2	21.3	27.3	160.1
DEZ	16.6	22.0	27.4	216.5



Legenda

- Poço de Monitoramento de Gás (PG)
- Poço de Monitoramento (PM)
- Poço de Mon. Multinível (PMN)
- Sondagem a Percussão (SP)
- Limites do Aterro de Caetetuba
- Ruas
- Muros e Cercas
- Edificações
- Canaletas e Caixas de Drenagens
- Drenagens
- Curvas de Níveis Intermediárias
- Curvas de Níveis Mestras



Escala - 1:2.500

Projeção UTM, Fuso 23S, Datum SIRGAS 2000

Figura 20 – Situação do aterro em 2010 e a localização das sondagens próximas ao Aterro de Caetetuba

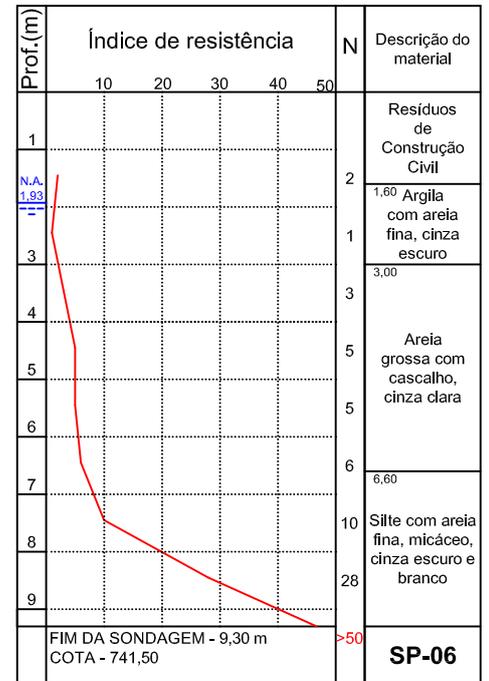
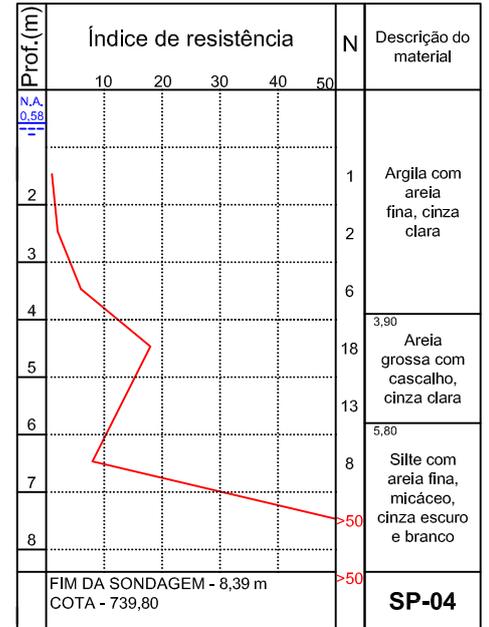
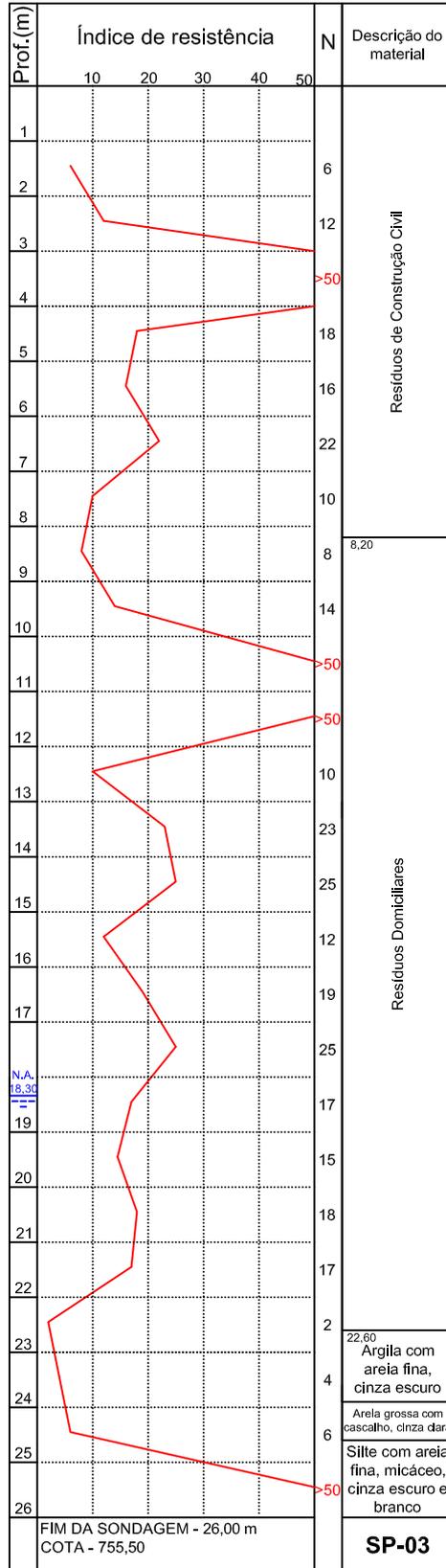
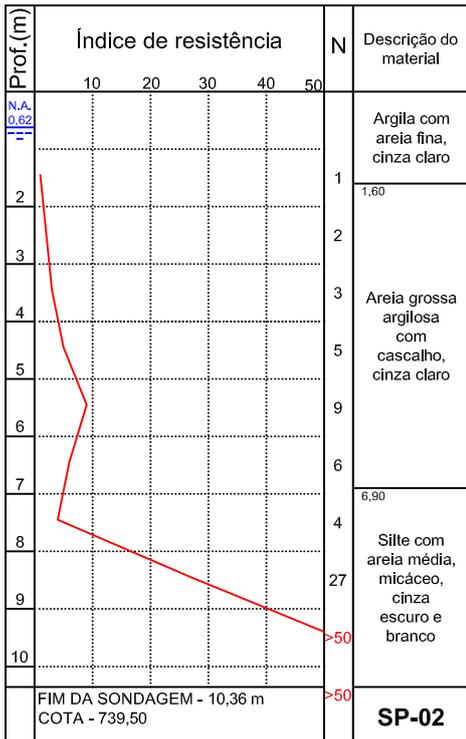
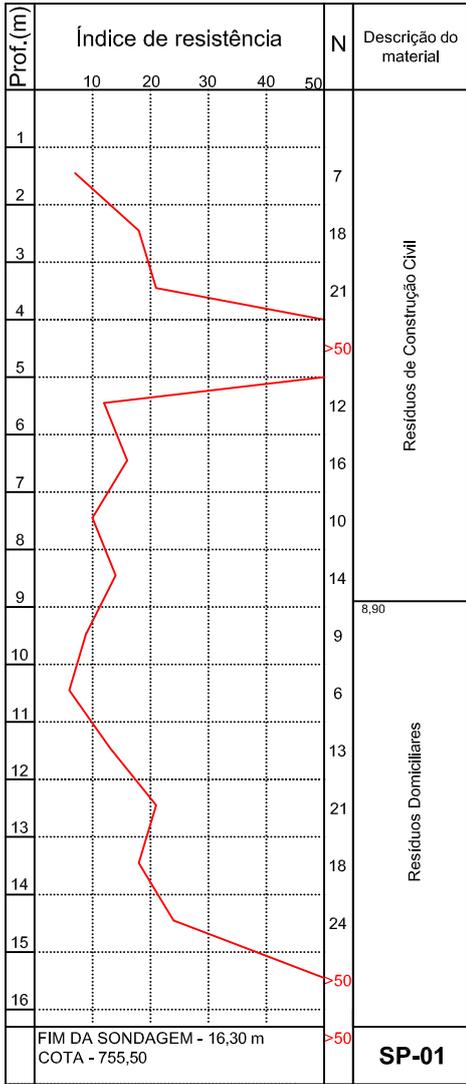


Figura 21 - Perfis de sondagem com ensaio de penetração (SPT)

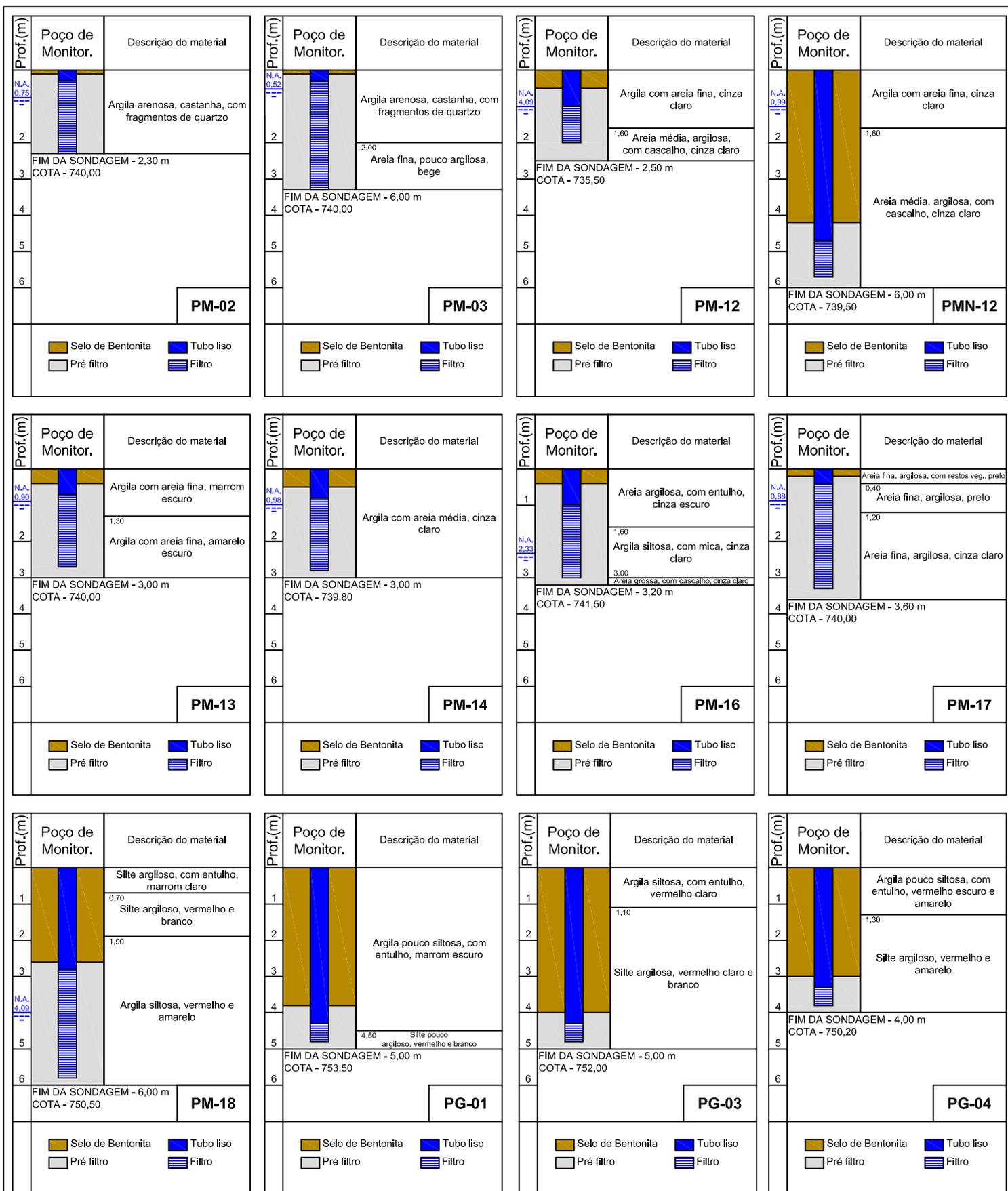


Figura 22 - Perfis de sondagens a trado

Nota-se na **Figura 20** que, entre as 05 sondagens realizadas com ensaio de penetração (SPT), apenas as sondagens SP-01 e SP-03 estão localizadas no interior do maciço, enquanto a sondagem SP-06 foi realizada na base do aterro, atingindo os resíduos parcialmente. As sondagens SP-02 e SP-04 foram realizadas diretamente sobre os sedimentos aluviais do Rio Atibaia.

Devido às dificuldades de perfuração, a sondagem SP-01 foi paralisada aos 16,30 m enquanto a sondagem SP-03 ultrapassou todo o aterro. Desta forma, a sondagem SP-01 não atingiu o nível d'água, sendo este observado na sondagem SP-03, aproximadamente a 18,30 m de profundidade.

Nos perfis das sondagens executadas no interior do maciço, apresentados na **Figura 21**, a perfuração se inicia em um pacote de resíduos de construção civil, com espessura variando entre 08 m e 09 m. Este pacote é composto por camadas de entulho, madeira, plásticos e metais diversos, intercalados a camadas de solo argiloso. Imediatamente abaixo dos resíduos de construção civil encontra-se um pacote de resíduos domiciliares que alcança a profundidade de 22,60 m. Este pacote é composto por camadas e plásticos diversos, tecidos e embalagens, intercalados a camadas de solo argiloso. Após o pacote de resíduos domiciliares são verificados os sedimentos aluviais da planície do Rio Atibaia.

Ao se ultrapassar o aterro, os sedimentos da planície aluvial do Rio Atibaia são atingidos, sendo verificado, inicialmente, um pacote argilo-arenoso com ocorrência de argilas orgânicas. Na sequência são atingidas lentes de areia média a grossa, típicos de depósito de canal. Abaixo dos sedimentos da várzea do Rio Atibaia, as sondagens atingiram pacotes silto-arenosos relativos aos solos de alteração do embasamento local.

Conforme verificado na **Figura 20** o Aterro de Caetetuba possui aproximadamente 20 m de altura, no entanto na sondagem SP-03 foi verificada uma profundidade de 22,60 m até a base dos resíduos. O rebaixamento da base do Aterro de Caetetuba em relação à superfície pode ser explicado pela utilização de meandros abandonados no início da disposição de resíduos no local, ou mesmo por um rearranjo da estrutura do aterro em decorrência do peso dos resíduos agindo sobre os solos pouco resistentes da planície aluvial do Rio Atibaia. Destaca-se que foi verificado o nível d'água em 18,30 m na sondagem SP-03 mostrando que a base dos resíduos ultrapassou o nível d'água.

As sondagens com ensaio de penetração (SPT), realizados diretamente sobre os sedimentos da várzea do Rio Atibaia (SP-02 e SP-04) mostraram continuidade lateral, sendo verificados sedimentos argilo-arenosos com argilas orgânicas superficiais seguidas de lentes de areia média a grossa e, abaixo, pacotes silto-arenosos relativos aos solos de alteração do embasamento local. O nível d'água das sondagens realizadas na várzea do rio Atibaia mostrou-se subsuperficial, atingindo até 0,62 m de profundidade.

Durante a perfuração do aterro, observam-se alguns picos de resistência causados por objetos impenetráveis. Não são verificadas diferenças significativas entre o índice N_{SPT} obtido nos ensaios realizados em resíduos de construção civil ou em resíduos domésticos, sendo alta a variação em ambos os casos (N_{SPT} entre 6 e 25). No momento em que a sondagem ultrapassa o aterro e atinge os sedimentos da várzea do Rio Atibaia, o índice N_{SPT} cai drasticamente, se equivalendo ao índice das sondagens realizadas no entorno imediato do aterro, diretamente sobre os sedimentos da várzea do rio. O índice N_{SPT} obtidos nos sedimentos aluviais ficaram entre 1 e 6 para o pacote de argila arenosa orgânica e entre 2 e 18 para o pacote de areia média a grossa. O índice N_{SPT} obtidos no pacote silto-arenosos relativo aos solos de alteração do embasamento local ficou entre 4 e 28, atingindo índices maiores que 50 golpes no fim da sondagem, indicando proximidade com rochas alteradas.

O **Quadro 14** apresenta os valores máximos e mínimos do índice N_{SPT} obtidos nos ensaios de penetração considerando os pacotes identificados.

Quadro 14 – Valores máximos e mínimos do índice N_{SPT} obtidos

Pacote considerado	SP-01		SP-02		SP-03		SP-04		SP-06	
	mín.	máx.								
Resíduos de construção civil	7	21	-	-	6	22	-	-	-	-
Resíduos domésticos	9	24	-	-	8	25	-	-	-	-
Argila arenosa orgânica	-	-	1	1	2	4	1	6	1	1
Areia média a grossa	-	-	2	9	6	6	13	18	3	6
Silte arenoso	-	-	4	27	-	-	8	8	10	28

Conforme ilustrado na **Figura 22**, as sondagens a trado realizadas a noroeste do Aterro de Caetetuba, entre o mesmo e a Vila São José (PM-02, PM-03 e PM-17), atingiram uma camada superficial de aterro argilo-arenoso, com até 2,00 m de profundidade, seguida dos sedimentos arenosos relativos à várzea do Rio Atibaia. O nível d'água mostrou-se subsuperficial, atingindo até 0,98 m.

As sondagens a trado realizadas nos sedimentos da várzea do Rio Atibaia, para a instalação de poços de monitoramento (PM-12, PM-13 e PM-14), mostraram o mesmo perfil litológico das sondagens com teste de penetração realizadas neste local, sendo verificados sedimentos argilo-arenosos com argilas orgânicas superficiais seguidas de lentes de areia média a grossa e, abaixo, pacotes silto-arenosos relativos aos solos de alteração do embasamento local.

As sondagens a trado realizadas a sudoeste do Aterro de Caetetuba, próximas a unidade de reciclagem e compostagem (PG-01, PG-03, PG-04 e PM-18), atingiram uma camada de aterro argilo-arenoso com até 4,50 m de profundidade. O nível d'água nestas sondagens mostrou-se pouco mais profundo, atingindo 4,09 m na sondagem PM-18. Após o aterro as sondagens não atingiram os sedimentos do Rio Atibaia, sendo verificado um pacote de silte argiloso, de coloração vermelho, amarelo e branco variegado.

Desta forma, as sondagens verificadas corroboram com o mapa geológico apresentado no estudo do meio físico modificado de NEVES (2005, Apêndice A), estando a maior parte do aterro de Caetetuba, instalada sobre a unidade dos Depósitos Aluviais, compostos por areias inconsolidadas de granulação variada, argilas e cascalheiras fluviais (NEVES, 2005, p. 33), enquanto a porção sudoeste do aterro encontra-se assentada sobre a unidade dos Depósitos Coluviais e/ou Eluviais, compostos por material argilo-arenoso de cor avermelhada, (NEVES, 2005, p. 30).

Com base nas informações levantadas para o Aterro de Caetetuba, incluindo imagens aéreas, perfis de sondagens e levantamentos topográficos foi elaborado um modelo construtivo do maciço.

Conforme verificado na **Figura 20**, o Aterro de Caetetuba possui formato alongado, em um eixo de aproximadamente 400 m, de alinhamento Norte-Sul, com o centro ligeiramente mais estreito que as extremidades. A base do aterro abrange uma área de pouco mais de 45.000 m³. A altura da pilha de resíduos é de aproximadamente 20 m, no entanto nas sondagens executadas no topo do maciço, foi verificada uma profundidade de 22,60 até a base dos resíduos.

A encosta oeste do aterro, em decorrência das obras de recuperação finalizadas em 2002, se apresenta dividida em três taludes separados por bermas de aproximadamente 5 m. O talude leste, alvo das análises de estabilidade do presente estudo de caso, se mostra mais inclinado, apresentando uma única face.

Neste trecho é possível observar indícios de movimentação do maciço, registrados por meio de vegetação curvada, na porção norte do maciço e saia de escorregamento na porção sul do mesmo.

Destaca-se que a saia de escorregamento formada na porção sul do talude leste, lançou resíduos e solo de compactação sobre uma pequena porção da várzea do Rio Atibia. Em virtude das características de baixa renda do Bairro Caetetuba, esta área acabou sendo ocupada por moradias construídas com madeira, plásticos e outros materiais oriundos dos resíduos. Durante a construção dos “barracos”, os moradores acabaram mobilizando mais resíduos e solo de compactação, descaracterizando a superfície de ruptura formada e dificultando o acesso ao local.

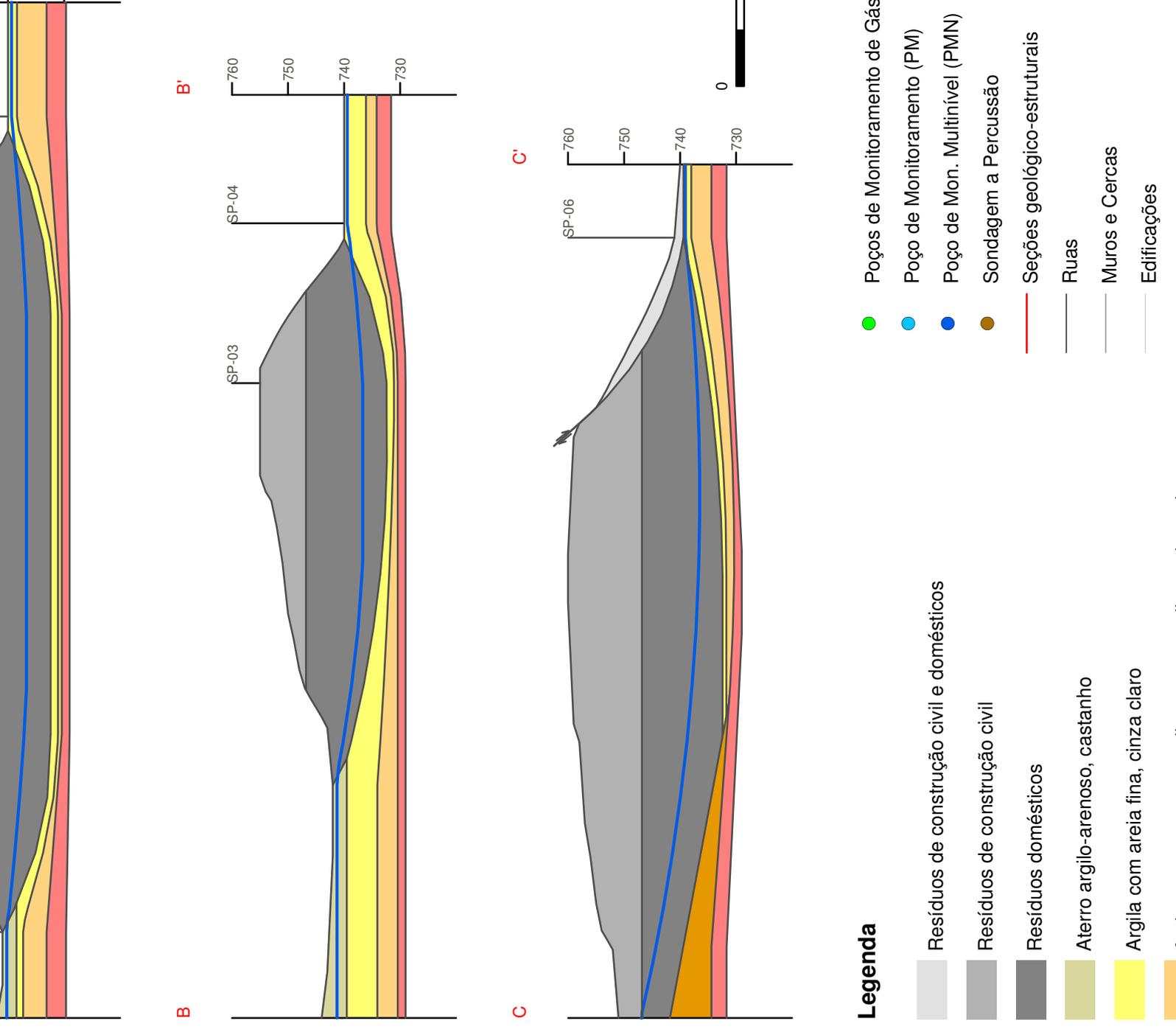
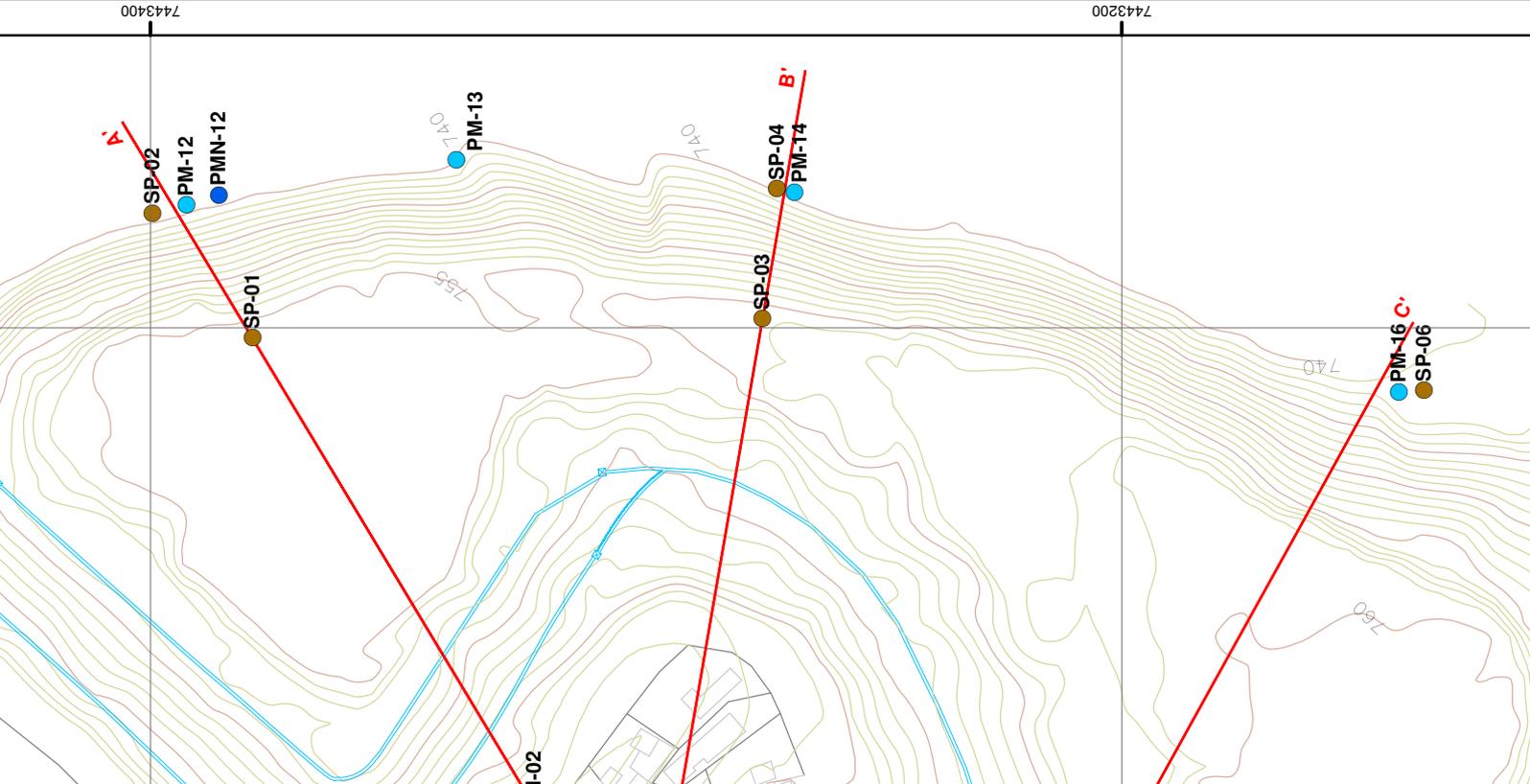
Na **Foto 3**, retirada da Avaliação Ambiental Preliminar do Aterro de Caetetuba, observa-se a movimentação da vegetação presente no talude leste do Aterro de Caetetuba, em virtude de movimentações do maciço.



Foto 3 – Movimentação da vegetação presente no talude leste do aterro

A **Figura 23** apresenta as seções geológico-construtivas elaboradas com base no levantamento topográfico e nos perfis de sondagens consultados. Foram elaboradas 03 seções geológico-construtivas sendo: a seção A-A' localizada na porção norte do maciço, com inclinação do talude leste de aproximadamente 30°; a seção B-B' localizada na porção central do maciço, com inclinação do talude leste de

aproximadamente 33° e a seção C-C' localizada na porção sul do maciço, com inclinação do talude leste de aproximadamente 27°. Conforme verificado nas sondagens, as seções apresentam no topo, um pacote de resíduos de construção civil seguido de um pacote de resíduos doméstico que por sua vez estão sotopostos aos pacotes sedimentares da calha do Rio Atibaia. Na base das seções observa-se o pacotes silto-arenoso relativo aos solos de alteração do embasamento local. A profundidade da base das seções representam a profundidade impenetrável ao avanço das sondagens a percussão realizadas.



Legenda

- Resíduos de construção civil e domésticos
- Resíduos de construção civil
- Resíduos domésticos
- Aterro argilo-arenoso, castanho
- Argila com areia fina, cinza claro
-
- Poços de Monitoramento de Gás
- Poço de Monitoramento (PM)
- Poço de Mon. Multinível (PMN)
- Sondagem a Percussão
- Seções geológico-estruturais
- Ruas
- Muros e Cercas
- Edificações

8. ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Após a caracterização do Aterro de Caetetuba, realizado a partir do tratamento dos dados coletados durante a etapa da Pesquisa Documental, foram realizadas as análises de estabilidade de taludes, sendo estas iniciadas pela definição do método analítico a ser empregado.

8.1. Definição do Método Analítico

Após o levantamento dos diversos métodos de avaliação de estabilidade de taludes, realizado durante a etapa da Pesquisa Bibliográfica, foi realizada uma consulta a profissionais especializados na área, sendo estes profissionais solicitados a apontar, entre os métodos analíticos identificados, qual o método, ou os métodos mais adequados para análises de estabilidade em aterros sanitários.

Conforme resposta por e-mail de um dos pesquisadores e docentes do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (USP), para rupturas em aterros sanitários (maciço terroso e lixo), atualmente os métodos analíticos mais utilizados (disponíveis em programas de computador), são os métodos de Jambu, Spencer e Bishop Simplificado.

Na pesquisa referente ao comportamento de resíduos sólidos foram identificadas análises de estabilidade de taludes em aterros sanitários realizadas por diferentes metodologias, apresentando resultados diversos, incluindo os trabalhos de MAHLER e NETO (2000), OLIVEIRA (2002), BORGATTO (2006), RIBEIRO (2007) e SCHULER (2010), onde foi adotado o método de Bishop Simplificado.

Para OLIVEIRA (2002, p. 75), o método de Bishop Simplificado foi adotado visto que se trata de um método “consagrado”. Para RIBEIRO (2007, p. 17), o método de Bishop é possivelmente o mais utilizado entre os diversos métodos para análise de estabilidade de taludes, visto que é razoavelmente simples e fornece fatores de segurança próximos dos obtidos por métodos mais precisos.

Foram identificadas ainda, algumas comparações entre os métodos convencionais de cálculo de estabilidade de taludes, quando aplicadas a casos gerais de engenharia, sendo os resultados obtidos nestas comparações expressos em virtude do fator de segurança obtido.

Conforme demonstrado por HORST (2007), FERNANDES e SILVA FILHO (2010) e (MENEZES, 2012), na utilização dos métodos de Bishop, Jambu e Spencer, aplicados a um mesmo caso de análises de estabilidade, os fatores de segurança obtidos pelo método de Bishop são ligeiramente superiores.

Para TONUS (2009, p. 139), em análises que não envolvam muitas variáveis, ou seja, análises em solos homogêneos sem intervenção de nível d'água ou de qualquer dispositivo de contenção, o resultado de todos os métodos utilizados é semelhante. Na medida em que são consideradas as peculiaridades do solo e a interferência do nível d'água no problema, verifica-se que métodos mais simplificados, como Jambu e Fellenius, apresentam resultados semelhantes aos de métodos mais rigorosos, como Morgenstern & Price e Spencer, com exceção do método de Bishop, que fornece resultados semelhantes aos dos métodos rigorosos em qualquer situação. Sendo assim, na presente dissertação de mestrado optou-se pela ênfase no método de Bishop Simplificado, sendo ainda realizadas análises pelos métodos de Fellenius, Jambu Simplificado, Spencer e Morgenstern e Price.

8.2. Definição do Software

Durante a etapa de Pesquisa Bibliográfica, verificou-se nas análises de estabilidade de taludes em aterros sanitários, ou mesmo em corpos naturais, o uso comum de *softwares* especializados na modelagem dos corpos analisados. Entre os principais *softwares* relacionados à modelagem ambiental identificados, o conjunto de programas desenvolvidos pela Geo-Slope International se destacou por sua praticidade e por possuir versões gratuitas para estudantes.

Entre as ferramentas no pacote da Geo-Slope International, o SLOPE/W é o produto utilizado para calcular o fator de segurança através de diversas metodologias que utilizam análises de equilíbrio limite, podendo modelar tipos heterogêneos de

materiais com complexa geometria, considerando diferentes superfícies de deslizamento e poropressão (GEO-SLOPE INTERNATIONAL).

Sendo assim, na presente dissertação de mestrado optou-se pelo uso da versão gratuita do *software* SLOPE/W, da Geo-Slope International, a qual disponibiliza análises de estabilidade de taludes pelo método de Bishop Simplificado, entre outros.

Inicialmente, as seções litológico-construtivas, elaboradas durante a modelagem do aterro, foram exportadas para o *software* SLOPE/W, onde foram implementados os parâmetros geotécnicos inerentes aos materiais presentes no modelo. Foram utilizadas as seções A-A' e B-B', apresentadas na **Figura 23**, sendo a seção C-C' desconsiderada, visto que o local já passou por eventos de escorregamento, e não possui sondagens realizadas no topo do maciço.

8.3. Definição dos Parâmetros Geotécnicos dos Materiais

Posteriormente à definição do método analítico a ser utilizado, foram definidos parâmetros geotécnicos para todos os materiais presentes nas seções transversais elaboradas, incluindo os resíduos presentes no Aterro de Caetetuba e os litotipos que constituem o substrato onde se assenta o maciço. Entre as propriedades designadas aos pacotes definidos inclui-se peso específico, ângulo de atrito e coesão, de acordo com o método analítico utilizado.

Os parâmetros geotécnicos inerentes aos litotipos que constituem o substrato local foram definidos pelas propostas de correlação empírica entre o índice N_{SPT} e os parâmetros de resistência do solo, sendo adotada a correlação entre N_{SPT} e ângulo de atrito para solos arenosos proposta por DÉCOURT (1989, *apud* FONSECA, 1996, p. 53), a correlação entre N_{SPT} e a resistência não drenada para argilas proposta por U. S. NAVY (1986, *apud* VELLOSO e LOPES, 2004, p. 48) e a correlação entre N_{SPT} e o peso específico dos solos propostos por GODOY (1972, *apud* CHRISTA;N, 2013 p. 51).

Na definição da coesão dos pacotes argilosos, considerou-se a correlação para argilas de alta plasticidade, de acordo com a realidade local. Na definição do peso específico a partir das correlações empíricas adotadas, para os pacotes arenosos foi considerado o valor sugerido para meios saturados.

Desta forma, na definição dos parâmetros geotécnicos dos pacotes que constituem o substrato local a partir dos ensaios de penetração, foi considerada a média dos valores de N_{SPT} obtidos ao longo de cada pacote. Destaca-se que, a versão gratuita do *software* SLOPE/W, disponível para estudantes, permite apenas análises de estabilidade em perfis que apresentem no máximo 03 litotipos diferentes. Desta forma, o pacote silto-arenoso, relativos aos solos de alteração do embasamento local, foi integrado ao pacote de areia média a grossa.

O **Quadro 15** apresenta os valores de N_{SPT} adotados bem como os parâmetros geotécnicos definidos para os pacotes que constituem o substrato local. A **Figura 24** apresenta os ábacos de correlação empírica para coesão e ângulo de atrito, adotados na definição dos parâmetros geotécnicos, sendo: a) correlação entre N_{SPT} e ângulo de atrito para solos arenosos (DÉCOURT, 1989) e b) correlação entre N_{SPT} e a resistência não drenada de argilas (U. S. NAVY, 1986). O quadro de correlação entre N_{SPT} e o peso específico dos solos de GODOY (1972) foi apresentado anteriormente.

Na definição dos parâmetros geotécnicos dos resíduos dispostos no aterro, foram consideradas diversas possibilidades. Inicialmente foram utilizados os resultados das sondagens com ensaio de penetração, realizadas nos resíduos, pelas mesmas correlações adotadas para definição dos parâmetros geotécnicos inerentes aos litotipos que constituem o substrato local.

Em um segundo plano, os parâmetros geotécnicos dos resíduos foram definidos a partir das propostas levantadas na etapa da Pesquisa Bibliográfica, obtidos por diversos autores a partir de retroanálises, por meio de ensaios de laboratório ou por meio de ensaios *in situ*.

Quadro 15 – Valores de NSPT adotados e parâmetros geotécnicos definidos para os pacotes que constituem o substrato local

Sondagem	Unidade	N_{SPT}	Coesão	Ângulo de Atrito	Peso Específico
SP-02	Argila Orgânica	1	12,5	0	13
	Areia Média a Grossa	5	0	28	19
SP-03	Argila Orgânica	3	37,5	0	15
	Areia Média a Grossa	6	0	29	19
SP-04	Argila Orgânica	3	37,5	0	15
	Areia Média a Grossa	16	0	35	20

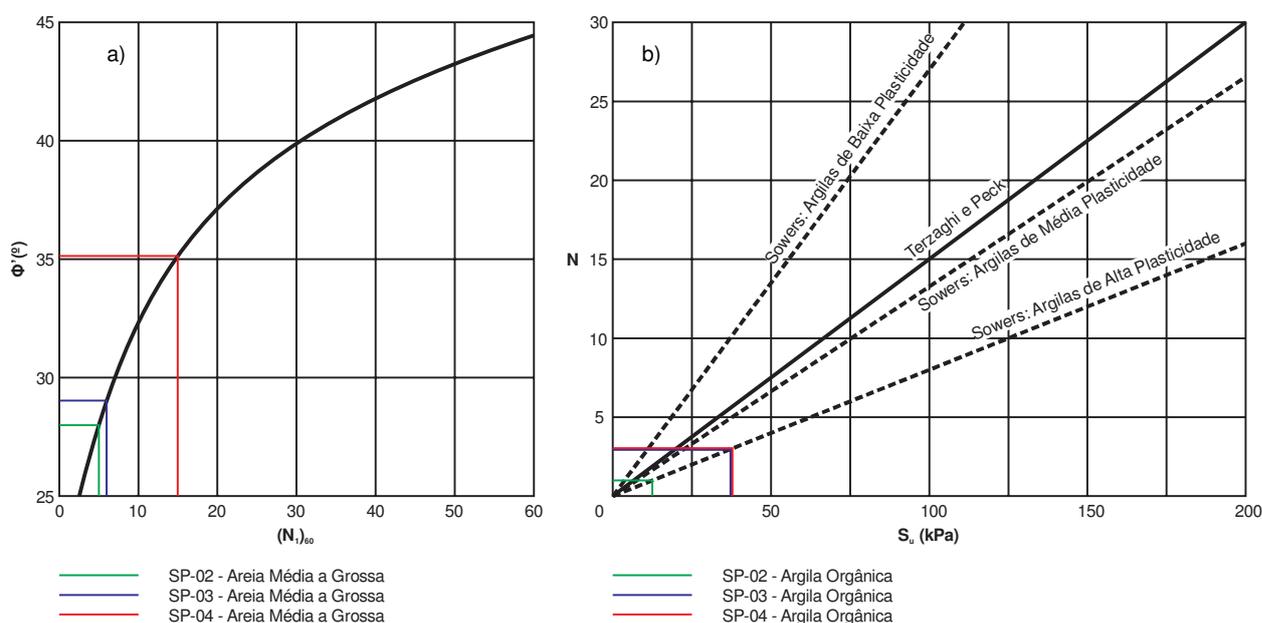


Figura 24 – Ábacos de correlação empírica e valores de NSPT corrigidos para os pacotes que constituem o substrato local (modificado de a) DÉCOURT (1989 apud FONSECA, 1996, p. 53) e b) U. S. NAVY, 1986 apud VELLOSO e LOPES, 2004, p. 48).

8.3.1. Definição dos Parâmetros Geotécnicos dos Resíduos com Base em Testes de Penetração

Segundo FUCALE (2002), a determinação dos parâmetros de resistência de resíduos a partir de ensaios de penetração em solos pode ser realizada utilizando as correlações empíricas e semi-empíricas entre a resistência à penetração *in situ* e o comportamento de resistência e deformabilidade dos solos, desde que sejam reconhecidas as diferenças entre os materiais.

De acordo com CARVALHO (1999, p. 68), na determinação dos parâmetros de resistência de resíduos a partir de ensaios de penetração, é usual considerar os resíduos como puramente coesivos ($\Phi=0$) ou puramente não coesivos ($c=0$). Alguns autores discordam destas proposições, como MITCHELL e MITCHELL (1992, *apud* CARDIM, 2008, p. 26) que alegam que embora não haja uma coesão verdadeira, é razoável a inclusão da componente coesiva nas avaliações de resistência ao cisalhamento. Os mesmos se baseiam no fato de que cortes praticamente verticais em aterros permanecem estáveis por longos períodos.

Para SANCHEZ-ALCITURRI *et. al.* (1993, *apud* CARVALHO, 1999, p. 68), tais suposições podem ser aplicadas apenas nos solos. No caso dos resíduos, onde não existem bases firmes para tais afirmações, são mais adequadas as análises considerando valores de coesão e ângulo de atrito.

OLIVEIRA (2002, p. 82) e CARVALHO (1999, p. 182) utilizam os valores médios de N_{SPT} obtidos para resíduos, excluindo-se os picos de resistência, e sua correlação com solos arenosos para determinação do ângulo de atrito e coesão.

Conforme descrito por CARVALHO (1999, p. 182) os valores de N_{SPT} maiores que 20 golpes não correspondem ao N_{SPT} real do material perfurado e representam o esforço exercido para ultrapassar objetos resistentes presentes nos pacotes de resíduos, como pedaços de borracha e madeira. De fato, os perfis de sondagens com ensaio do tipo SPT contidos nos relatórios consultados na presente dissertação, apresentam picos de resistência, os quais foram desconsiderados.

Desta forma, na definição dos parâmetros geotécnicos dos resíduos a partir dos ensaios de penetração foram consideradas três possibilidades:

- Valores de coesão, ângulo de atrito e peso específico obtidos com base nas correlações adotadas;
- Resíduos puramente coesivos ($\Phi=0$) com valor de coesão e peso específico obtidos pelas correlações adotadas.
- Resíduos puramente não coesivos($c=0$) com valor de ângulo de atrito e peso específico obtidos pelas correlações adotadas.

Nos três casos foi considerada a média dos valores de N_{SPT} obtidos ao longo do pacote, excluindo-se os picos de resistência ($N_{SPT} > 20$). Os valores médios de N_{SPT} foram plotados nos ábacos de correlação entre N_{SPT} e ângulo de atrito de solos

arenosos (DÉCOURT 1989), N_{SPT} e a resistência não drenada de argilas (U. S. NAVY, 1986) e N_{SPT} e peso específico dos solos úmidos de (GODOY, 1972).

Diferentemente da correlação para os pacotes do substrato, na definição da coesão dos resíduos, considerou-se a correlação para argilas de baixa plasticidade, em virtude dos altos valores obtidos nas correlações para argilas de média e alta plasticidade, quando comparadas aos demais valores identificados na literatura. Na definição do peso específico para os resíduos foi considerado o valor para meios úmidos.

Destaca-se que nos perfis das sondagens executadas no aterro, foram identificados dois pacotes de resíduos, sendo um pacote de resíduos de construção civil sobreposto a um pacote de resíduos domésticos. No entanto, não foram identificadas grandes diferenças entre o N_{SPT} obtido no pacote de resíduos de construção civil e o N_{SPT} obtido no pacote de resíduos domésticos, de forma que toda a pilha de resíduos foi considerada como um único pacote.

O **Quadro 16** apresenta os valores de N_{SPT} adotados bem como os parâmetros geotécnicos definidos para os resíduos presentes. A **Figura 25** apresenta os ábacos de correlação empírica para coesão e ângulo de atrito, adotados na definição dos parâmetros geotécnicos mesmos, sendo: a) correlação entre N_{SPT} e ângulo de atrito para solos arenosos (DÉCOURT, 1989) e b) correlação entre N_{SPT} e a resistência não drenada de argilas (U. S. NAVY, 1986). O quadro de correlação entre N_{SPT} e o peso específico dos solos de GODOY (1972) foi apresentado anteriormente.

8.3.2. Definição dos Parâmetros Geotécnicos dos Resíduos com Base em Propostas Literárias

Na etapa de Pesquisa Bibliográfica foram levantadas diversas propostas para valores de coesão, ângulo de atrito e peso específico de resíduos sólidos (**Quadro 6**). Entre as diversas propostas identificadas, foram selecionados os valores de coesão, ângulo de atrito e peso específico sugeridos por duas propostas, sendo elas a proposta de BENVENUTO e CUNHA (1991) e de KAVAZANJIAN *et. al* (1995).

Quadro 16 – Valores de parâmetros geotécnicos definidos para os resíduos a partir dos resultados dos testes de penetração

	Sondagem	N _{SPT}	Coesão	Ângulo de Atrito	Peso Específico
Correlações empíricas	SP-01	12	48 kPa	34°	19 kN/m ³
	SP-03	14	51 kPa	35°	19 kN/m ³
Resíduos puramente coesivos	SP-01	12	48 kPa	0°	19 kN/m ³
	SP-03	14	51 kPa	0°	19 kN/m ³
Resíduos puramente não coesivos	SP-01	12	0 kPa	34°	19 kN/m ³
	SP-03	14	0 kPa	35°	19 kN/m ³

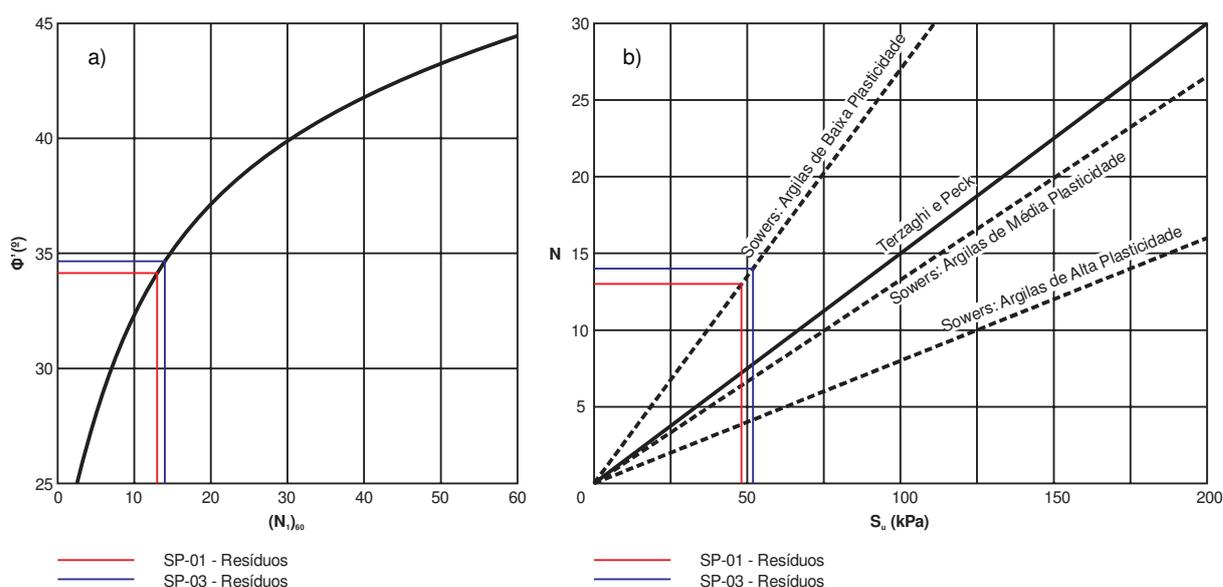


Figura 25 – Ábacos de correlação empírica e valores de NSPT corrigidos para os resíduos (modificado de a) DÉCOURT (1989 apud FONSECA, 1996, p. 53) e b) U. S. NAVY, 1986 apud VELLOSO e LOPES, 2004, p. 48).

Os valores sugeridos por BENVENUTO e CUNHA (1991), se mostraram, adequados visto que foram definidos com base em retroanálises de escorregamentos ocorridos no Aterro Bandeirantes, no município de São Paulo – SP.

A relativa proximidade entre os municípios de São Paulo e Atibaia sugerem uma composição dos resíduos domésticos presentes em ambos os maciços sem grandes diferenças. Além disso, ambos os aterros sanitários são antigos e por isso, os resíduos foram submetidos a condições de decomposição semelhantes. BENVENUTO e CUNHA (1991), indicam valores de 13,5 kPa para coesão de resíduos, 22° para ângulo de atrito e 13 kN/m³ para o valor de peso específico.

Por sua vez, os valores sugeridos por KAVAZANJIAN *et. al* (1995) foram adotados em virtude da ampla citação de sua proposta nos artigos identificados durante a pesquisa bibliográfica incluindo CARVALHO (1999, p. 68), CARDIM (2008,

p.48), FUCALE (2005, p. 72), MARQUES (2001, p. 42) NASCIMENTO (2007, p. 78) NETO (2004, p. 35) OLIVEIRA (2002, p. 104).

A proposta de KAVAZANJIAN *et. al* (1995) é baseada em resultados de ensaios de cisalhamento direto *in situ* e em laboratório, ensaios de carregamento de placas e retroanálise (CARVALHO, 1999, p. 68), sendo os resíduos considerados como puramente coesivos, com coesão de 24 kPa, para maciços submetidos a tensões normais inferiores a 30 kPa. Para maciços submetidos a tensões normais superiores a 30 kPa, os autores consideram os resíduos como não coesivos, com ângulo de atrito de 33°. Para o peso específico foi adotada a proposta de KAVAZANJIAN (2001), que sugere valores entre 10 kN/m³ e 20 kN/m³, sendo considerado a pior situação (20 kN/m³).

Destaca-se que, entre as diversas propostas literárias, para definição dos parâmetros geotécnicos dos resíduos, não foram identificadas propostas onde são diferenciados os tipos de resíduos. Desta forma, toda a pilha de resíduos foi novamente considerada como um único pacote.

O **Quadro 17** apresenta os valores dos parâmetros geotécnicos adotados para os resíduos de acordo com as propostas literárias selecionadas.

Quadro 17 – Valores de parâmetros geotécnicos adotados para os resíduos de acordo com as propostas literárias

Proposta		Coesão	Ângulo de Atrito	Peso Específico
BENVENUTO e CUNHA (1991)		13,50 kPa	22,00°	13,00 kN/m ³
KAVAZANJIAN <i>et. al</i> (1995)	Tensão Normal > 30 kPa	0,00 kPa	33,00°	20,00* kN/m ³
	Tensão Normal < 30 kPa	24,00 kPa	0,00°	20,00* kN/m ³

*KAVAZANJIAN (2001)

8.4. Execução das Análises de Estabilidade de Taludes

Após a definição do método analítico e dos parâmetros geotécnicos inerentes aos resíduos e aos pacotes que constituem o substrato local, foram executadas as análises de estabilidade de taludes do Aterro de Caetetuba.

Conforme mencionado anteriormente, análises de estabilidade de taludes foram realizadas considerando 06 cenários para os parâmetros geotécnicos dos

resíduos, denominados 01 até 06, sendo os cenários 01 a 03 com parâmetros definidos a partir dos resultados dos ensaios de penetração e os cenários 04 a 06 com parâmetros definidos a partir de propostas identificadas na pesquisa bibliográfica. O fluxograma da **Figura 26** apresenta um resumo dos parâmetros geotécnicos adotados para os resíduos nas análises de estabilidade.

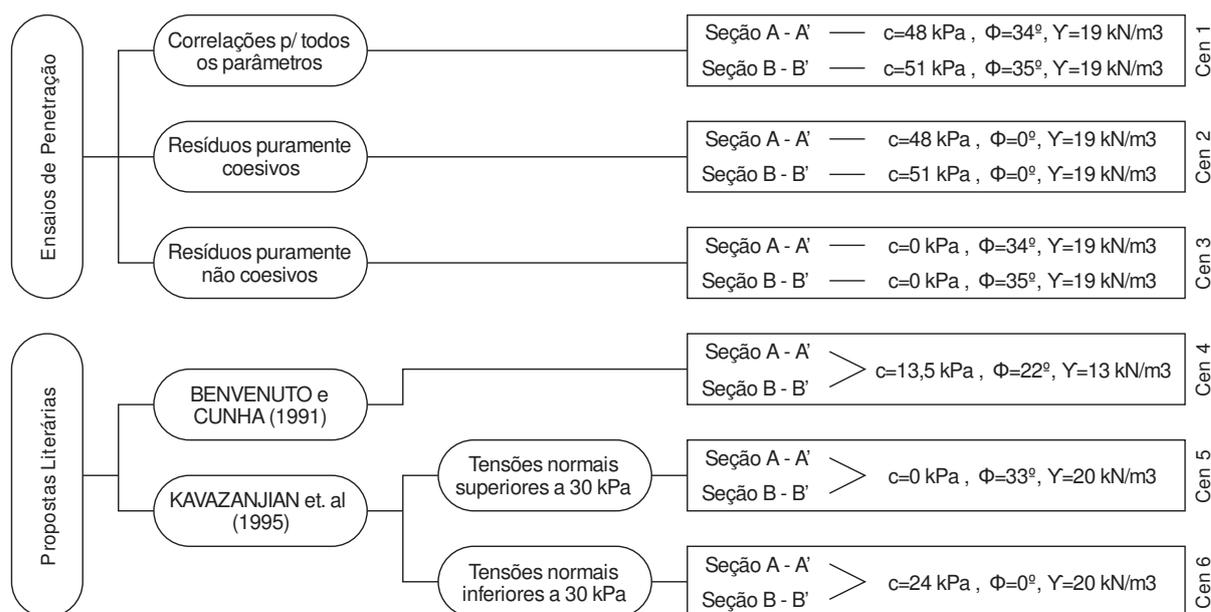
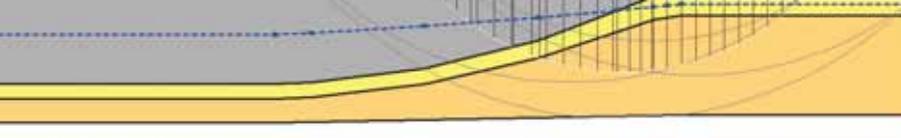


Figura 26 – Resumo dos parâmetros geotécnicos adotados para os resíduos nas análises de estabilidade realizadas

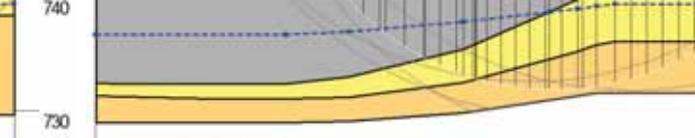
As análises de estabilidade foram realizadas inicialmente pelo método de Bishop Simplificado, sendo as análises por outros métodos analíticos realizadas posteriormente. Estipulou-se um número duas mil interações para cada uma das análises de estabilidade realizadas, sendo geradas aproximadamente 120 superfícies potenciais de ruptura a cada análise. Nas seções geradas no software é destacada a superfície potencial de ruptura crítica (com menor fator de segurança), seguida das próximas 4 superfícies mais críticas.

A **Figura 27** apresenta as seções implementadas no *software* SLOPE/W com as análises de estabilidade realizadas para os 06 cenários definidos. O **Quadro 18** apresenta os fatores de segurança calculados para os 06 cenários.

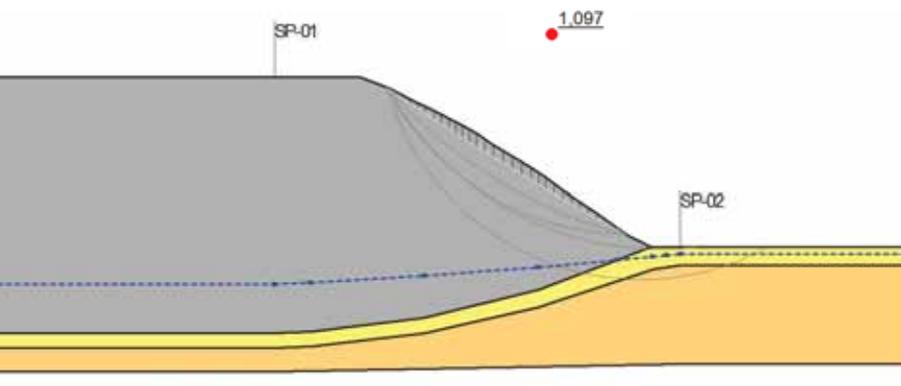
Conforme observado na **Figura 27** e no **Quadro 18**, os resultados das análises de estabilidade variam amplamente em função dos parâmetros geotécnicos adotados, sendo obtidos valores entre 1,939, indicativo de estabilidade do maciço, e 0,468, indicativo de instabilidade do maciço.



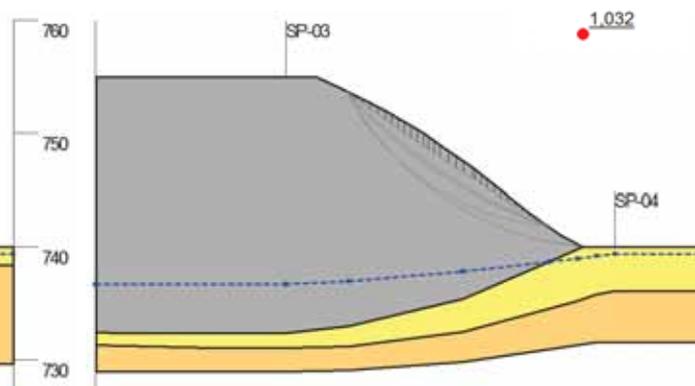
Seção A - A'



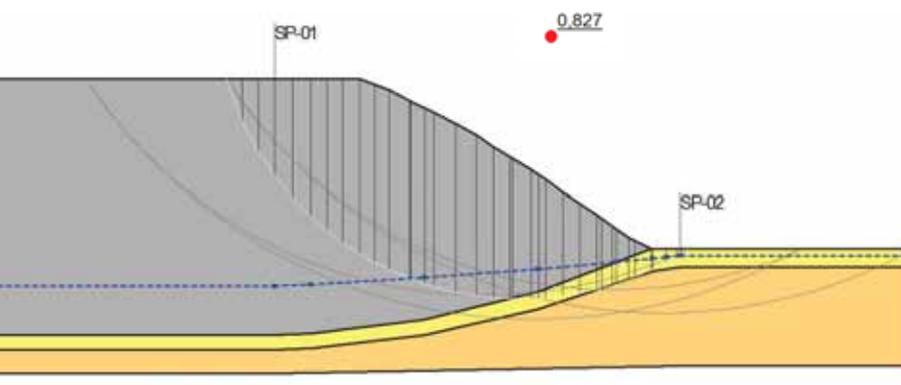
Seção B - B'



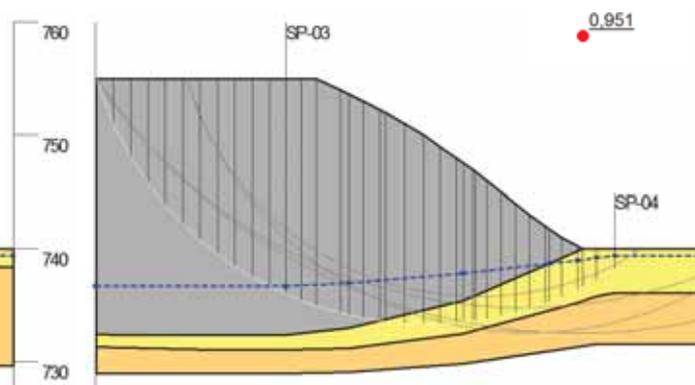
Seção A - A'



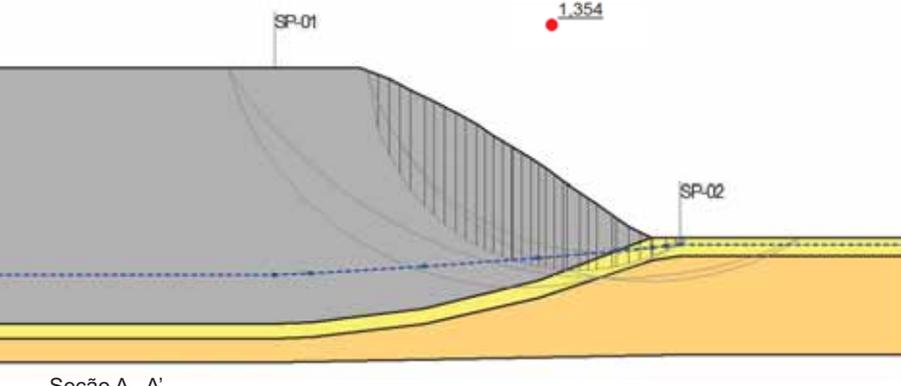
Seção B - B'



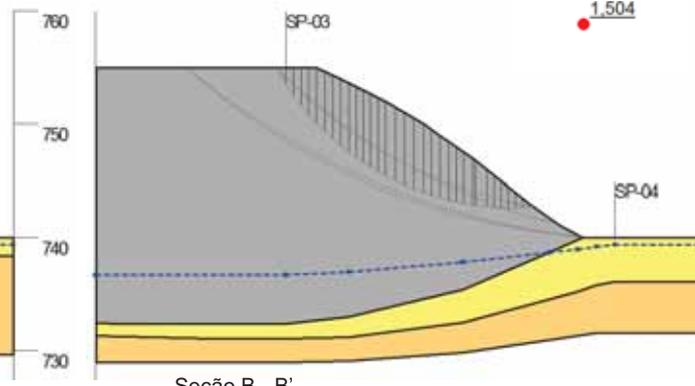
Seção A - A'



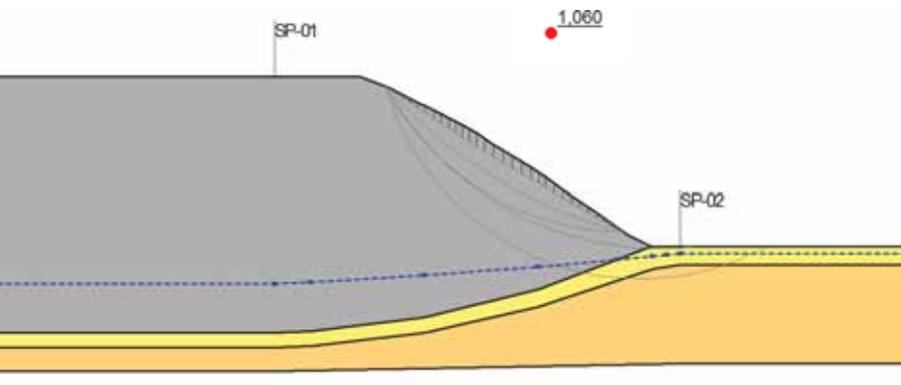
Seção B - B'



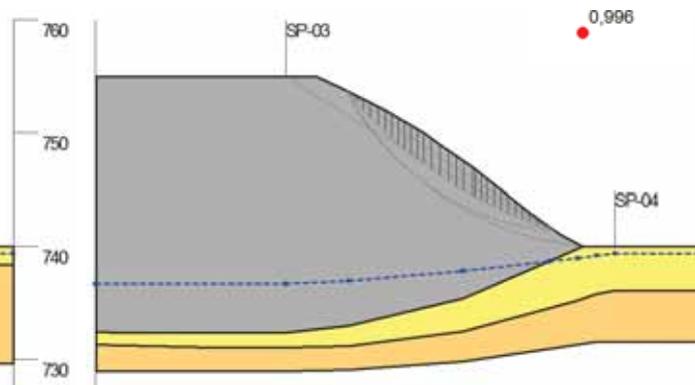
Seção A - A'



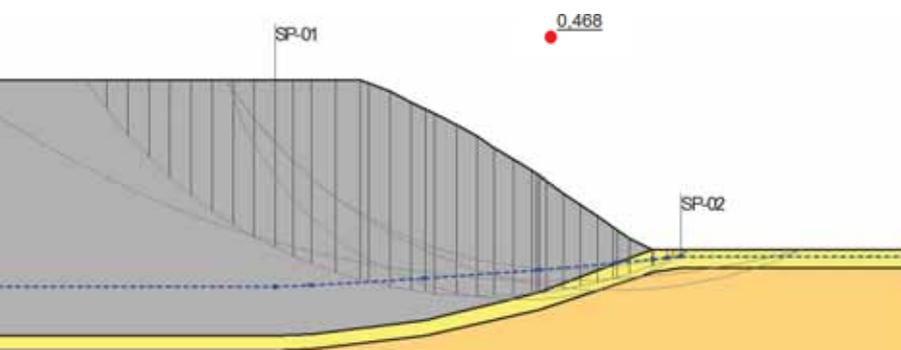
Seção B - B'



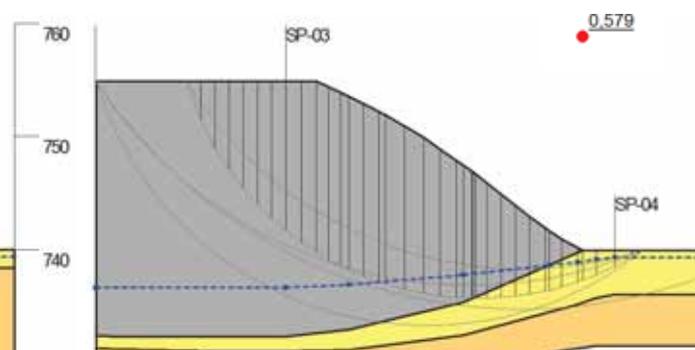
Seção A - A'



Seção B - B'



Seção A - A'



Seção B - B'

Quadro 18 – Fatores de segurança calculados para os 06 cenários definidos

Cenário	Seção	Fator de Segurança	Situação
Cenário 1	Seção A - A'	1,936	Estável
	Seção B - B'	1,939	Estável
Cenário 2	Seção A - A'	1,097	Estável
	Seção B - B'	1,032	Estável
Cenário 3	Seção A - A'	0,827	Instável
	Seção B - B'	0,951	Instável
Cenário 4	Seção A - A'	1,354	Estável
	Seção B - B'	1,504	Estável
Cenário 5	Seção A - A'	1,060	Estável
	Seção B - B'	0,954	Instável
Cenário 6	Seção A - A'	0,468	Instável
	Seção B - B'	0,579	Instável

Os resultados obtidos no primeiro cenário, no qual todos os parâmetros geotécnicos dos resíduos foram definidos pelas correlações empíricas adotadas, atingiram valores de 1,936 para a seção A – A' e 1,939 para a seção B – B', ambos indicativas de condições de estabilidade.

Os resultados obtidos no segundo cenário, onde os resíduos foram considerados como puramente coesivos ($\Phi=0$), foram obtidos valores de 1,097 para a seção A – A' e 1,032 para a seção B – B', ambos indicativas de condições de estabilidade, apesar de próximos da condição de equilíbrio limite ($F_s=1$).

No terceiro cenário, onde os resíduos foram considerados como puramente não coesivos ($c=0$), foram obtidos valor de 0,827 para a seção A – A' e 0,951 para a seção B – B', indicando condições de instabilidade.

No quarto cenário, onde as análises foram realizadas a partir dos parâmetros sugeridos por BENVENUTO e CUNHA (1991), foram obtidos valores de 1,354 pra a seção A – A' e 1,504 para a seção B – B', ambos indicativos de condições estáveis para o Aterro de Caetetuba.

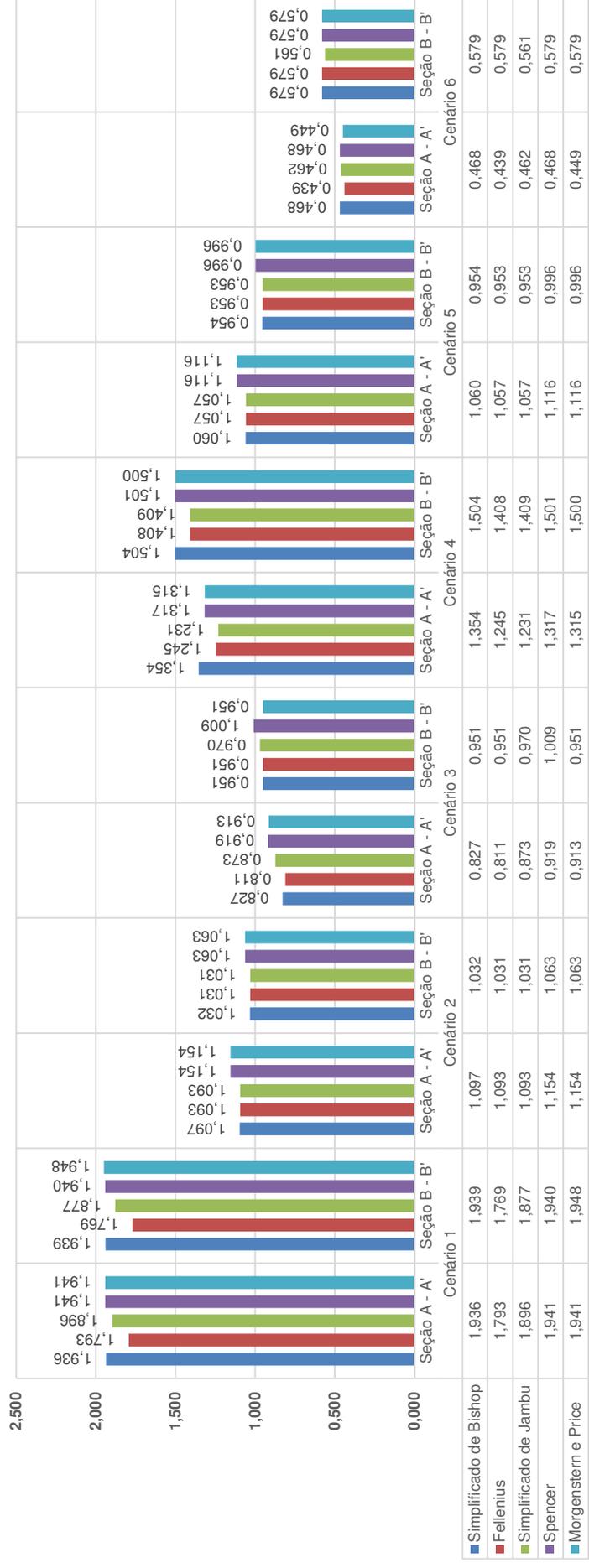
Os resultados obtidos no quinto cenário, onde foram considerados os valores de KAVAZANJIAN *et. al* (1995), para maciços submetidos a tensões normais superiores a 30 kPa, com peso específico de 20 kN/m³, conforme proposta de KAVAZANJIAN (2001), foram obtidos valores de fator de segurança de 1,060 para a seção A – A' e 0,954 para a seção B – B'.

Finalmente, os resultados obtidos no sexto cenário, onde foram considerados os valores de KAVAZANJIAN *et. al* (1995) para maciços submetidos a tensões normais inferiores a 30 kPa, com peso específico de 20 kN/m³, conforme proposta de

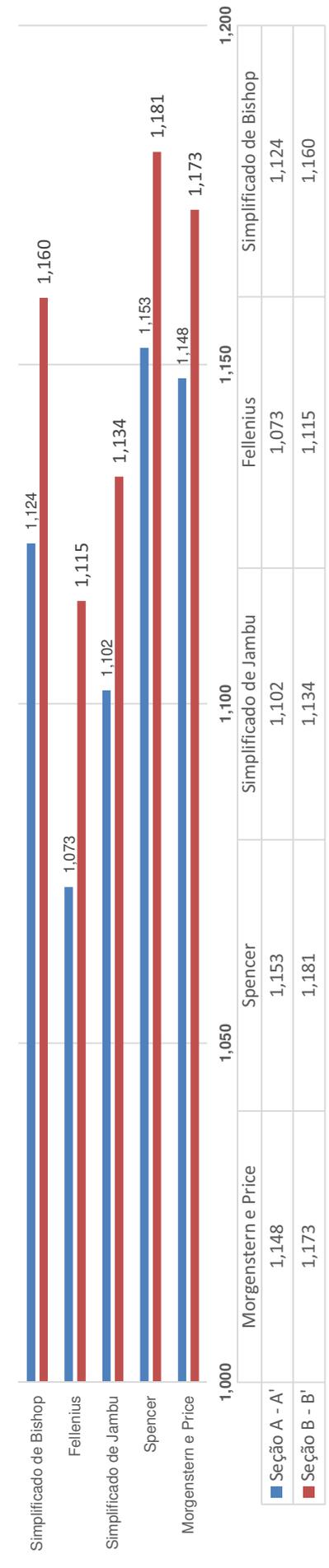
KAVAZANJIAN (2001), foram obtidos valores de fator de segurança de 0,468 para a seção A – A' e 0,579 para a seção B – B', ambos indicativos de condições de instabilidade.

Após a execução das análises de estabilidade de taludes do Aterro de Caetetuba, pelo método de Bishop Simplificado, as mesmas foram novamente realizadas, utilizando outros métodos analíticos disponíveis no *software* SLOPE/W. Entre os métodos identificados na pesquisa bibliográfica da presente dissertação, são oferecidos no *software* SLOPE/W, além do método simplificado de Bishop, os métodos: de Fellenius; Simplificado de Jambu; de Spencer; e de Morgenstern e Price.

A **Figura 28** apresenta uma comparação entre os fatores de segurança calculados pelos diversos métodos oferecidos pelo *software* SLOPE/W, sendo realizada a comparação entre os valores obtidos individualmente e uma comparação entre a média de cada seção dos valores obtidos pelos diferentes métodos



Resultados das análises de estabilidade executadas por diferentes métodos



Média dos resultados por método analítico

Figura 28 – Comparação entre os fatores de segurança calculados através de diferentes métodos

9. CONCLUSÕES

Conforme observado na **Figura 27**, são grandes as diferenças obtidas nos fatores de segurança calculados em função das variações nos parâmetros de resistência adotados.

Os resultados obtidos nas análises de estabilidade de taludes realizadas no primeiro cenário, foram os maiores valores obtidos em todas as análises de estabilidade realizadas, sendo o fator de segurança de 1,936 para a seção A – A' e 1,939 para a seção B – B'. Em ambos os casos observa-se uma ampla nuvem de superfícies de ruptura, com as superfícies críticas se iniciando próximas a crista do talude passando pela base dos mesmos, sendo a seção B – B' um pouco mais profunda. Nota-se que o primeiro cenário apresenta os maiores valores de parâmetros de resistência adotados para os resíduos entre todos os cenários analisados.

A relação direta entre parâmetros de resistência e fatores de segurança calculados fica clara ao se analisar separadamente os resultados dos três primeiros cenários, onde os parâmetros geotécnicos dos resíduos foram definidos com base nos resultados das sondagens com teste de penetração.

Temos no primeiro cenário valores definidos para coesão e ângulo de atrito. No segundo cenário manteve-se o valor de coesão e minimizou-se o valor do ângulo de atrito ($\Phi=0$), sendo verificado a diminuição do fator de segurança calculado. No terceiro cenário manteve-se o valor de ângulo de atrito e minimizou-se o valor de coesão ($c=0$), sendo novamente verificado a diminuição do fator de segurança calculado.

Os resultados obtidos nas análises de estabilidade de taludes realizadas no segundo cenário se mostraram próximas da condição de equilíbrio limite ($F_s=1$) sendo obtido valor de 1,097 para a seção A – A' e 1,032 para a seção B – B'. Em ambos os casos observa-se uma superfície crítica de ruptura subsuperficial, contida entre a crista e a base dos taludes sendo as superfícies de ruptura mais profundas representadas, referentes a fatores de segurança mais altos. No caso da seção A – A', que apresenta uma nuvem de superfícies de ruptura pouco mais ampla que a seção B – B', a superfície potencial de ruptura mais profunda representada corresponde a um fator de segurança de 1,316. Na seção B – B' a superfície potencial

de ruptura mais profunda representada corresponde a um fator de segurança de 1,162.

No terceiro cenário ambos os fatores de segurança obtidos se mostraram inferiores a situação de equilíbrio limite, sendo obtido o valor de 0,827 para a seção A – A' e 0,951 para a seção B – B'. Em ambos os casos observa-se uma ampla nuvem de superfícies de ruptura. Destaca-se que entre as superfícies potenciais de ruptura geradas para a seção B – B', a superfície de ruptura crítica é a única com valor do fator de segurança inferior a 1, com todas as outras superfícies geradas, apresentando fatores de segurança superiores a 1,008. Destaca-se ainda que esta superfície crítica, gerada na seção B – B', se inicia nos limites da seção implementada, sendo a superfície correspondente ao fator de segurança de 1,008 a mais crítica entre as superfícies que não interceptam os limites da seção. No caso da seção A – A', a superfície crítica de ruptura se inicia antes da crista do talude passando próximo a base do mesmo.

Nas análises de estabilidade de taludes realizadas com parâmetros definidos a partir de propostas literárias (Cenários 04 até 06), percebe-se que os maiores valores de segurança foram obtidos no quarto cenário com análises realizadas a partir dos parâmetros para resíduos sugeridos por BENVENUTO e CUNHA (1991). No quarto cenário, onde foram obtidos valores de 1,354 pra a seção A – A' e 1,504 para a seção B – B', ambas as seções apresentam superfícies críticas de ruptura com profundidade intermediária (quando comparadas aos outros cenários), com a superfície crítica de ruptura do cenário A – A' passando próxima a crista e a base do talude e a superfície crítica de ruptura do cenário B – B' se iniciando pouco antes da crista do talude e terminando pouco antes da base do mesmo. A seção A – A' apresenta nuvem de superfícies de ruptura pouco mais ampla que a seção B – B'.

Os resultados obtidos no quinto cenário, onde foram considerados os valores de KAVAZANJIAN *et. al* (1995), para maciços submetidos a tensões normais superiores a 30 kPa, e os valores de KAVAZANJIAN (2001) para o peso específico, foram obtidos valores de fator de segurança de 1,060 para a seção A – A' e 0,954 para a seção B – B'. Em ambos os casos observa-se resultados próximos a condição de equilíbrio limite ($F_s=1$), com superfície crítica de ruptura subsuperficial, contida entre a crista e a base dos taludes sendo as superfícies de ruptura mais profundas geradas nas análises, referentes a fatores de segurança mais altos. No caso da Seção A – A', que apresenta uma nuvem de superfícies de ruptura pouco mais ampla que a

seção B – B', a superfície potencial de ruptura mais profunda representada corresponde a um fator de segurança de 1,264. Na seção B – B' a superfície potencial de ruptura mais profunda representada corresponde a um fator de segurança de 1,076.

Os resultados obtidos no sexto cenário, onde foram considerados os valores de KAVAZANJIAN *et. al* (1995) para maciços submetidos a tensões normais inferiores a 30 kPa, e os valores de KAVAZANJIAN (2001) para peso específico foram obtidos os menores fatores de segurança entre todas as análises de estabilidade realizadas. As superfícies críticas geradas se iniciam antes da crista do talude passando próximo a base dos mesmos. Em ambos os casos observa-se uma ampla nuvem de superfícies de ruptura.

Considerando a hipótese de que a situação de estabilidade do Aterro de Caetetuba encontre-se próxima as condições de equilíbrio limite ($F_s=1$), visto que apresenta feições de estabilidade mas permanece relativamente estável, pode-se afirmar que os cenários de parâmetros geotécnicos mais adequados sejam os parâmetros dos segundo, terceiro e quinto cenários, visto que apresentaram fatores de segurança próximos a 1. Destaca-se que os segundo e quinto cenários apresentaram superfícies potenciais de ruptura pouco profundas, podendo ser o terceiro cenário considerado como mais representativo das condições de estabilidade do aterro. Conforme mencionado anteriormente, na seção B – B' do terceiro cenário, a superfície de ruptura crítica é a única com valor do fator de segurança inferior a 1, com todas as outras superfícies geradas, apresentando fatores de segurança superiores a 1,008.

Neste contexto, o primeiro cenário, que apresentou os maiores resultados de fator de segurança, e o sexto cenário, que apresentou os menores resultados de fator de segurança, representariam os cenários com parâmetros geotécnicos de resíduos menos adequados.

Conforme observado na **Figura 28**, não se verificam diferenças significativas nos fatores de segurança calculados em função da variação do método adotado, sendo a máxima variação observada na comparação entre o fator de segurança calculado pelo método de Fellenius ($F_s=1,769$) e pelo método de Morgenstern e Price ($F_s=1,948$) na seção B-B' do segundo cenário, com diferença de 0,179, ou seja, aproximadamente 10%.

Em geral, nota-se uma tendência de valores mais altos para os métodos de Spencer e de Morgenstern e Price, os quais apresentaram fatores de segurança muito semelhantes, sendo verificado igualdade de resultados na seção A – A' dos primeiro, segundo, terceiro e quinto cenários e na seção B –B' dos segundo, quinto e sexto cenários. Destaca-se que estes são os mesmos cenários a apresentar superfícies potenciais de ruptura pouco profundas.

Os valores de fator de segurança mais baixos foram obtidos pelo Método de Fellenius, que por sua vez apresentou resultado iguais aos obtidos pelo Método Simplificado de Jambu para ambas as seções nos segundo e quinto cenários.

Quando analisadas as médias dos resultados obtidos por cada método analítico observa-se novamente valores mais altos para os fatores de segurança calculados pelos métodos de Spencer e de Morgenstern e Price, e valores mais baixos para o Método de Fellenius.

Considerando o Método de Fellenius como o método com menores fatores de segurança, pode-se dizer o mesmo apresenta resultados mais favoráveis a segurança, no caso de projeção de aterros sanitários. Apesar do rigor na segurança, exageros podem inviabilizar economicamente alguns projetos (TONUS, 2009, p. 46).

Considerando a norma ABNT NBR 11682 que define valores de fator de segurança mínimos para projetos de taludes e encostas, de acordo com o grau de segurança exigido pelo local, pode-se afirmar que o fator de segurança mínimo aceito para a área do Aterro de Caetetuba é de 1,50, visto que o local apresenta proximidade imediata com edificações habitacionais, sendo enquadrado como locais com necessidade de alto grau de segurança. Neste caso, apenas os resultados obtidos em ambas as seções do primeiro cenário e na seção B – B' do quarto cenário atenderiam os requisitos mínimos de segurança.

A implementação dos métodos de análise de estabilidade de taludes no software SLOPE/W, apesar das limitações impostas em sua versão gratuita, se mostrou uma boa ferramenta de análise de estabilidade de taludes, visto que foi possível realizar as análises de estabilidade do Aterro de Caetetuba utilizando apenas dados básicos de investigação, como plantas topográficas, sondagens com ensaios de penetração e propostas literárias. Estas informações correspondem a dados de acesso fácil e barato, compatíveis com o orçamento da maioria dos administradores de aterros sanitários e lixões, como no caso da Prefeitura de Atibaia.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENDT, A. **Movimentos de massa gravitacionais – proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP.**

2005. 334 p. + Anexos. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo Disponível em:

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-06102006-090547/pt-br.php>>. Acessado em 25 jul. 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.** São Paulo, 2013. Disponível em:

<<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2013.pdf>>. Acessado em 12 nov. 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR. 8419:** Apresentação de projetos de aterros. Rio de Janeiro, 1992. Versão Corrigida: 1996.

Disponível em:

<<http://www.abntcolecao.com.br/norma.aspx?ID=80554>>. Acessado em 22 jul. 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR. 10004:** Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em:

<<http://www.abntcolecao.com.br/norma.aspx?ID=936#>>. Acessado em: 22 jul. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR. 11682:** Estabilidade de Taludes. Rio de Janeiro, 1991. Disponível em:

<<http://www.abntcolecao.com.br/norma.aspx?ID=51490#>>. Acessado em 24 jul. 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR. 12069**: Solo - Ensaio de penetração de cone in situ (CPT) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991. Disponível em:

<<http://www.abntcolecao.com.br/norma.aspx?ID=51490#>>. Acessado em 24 jul. 2013

BENVENUTO, C. e CIPRIANO, M. A. Modelo Reológico de Comportamento de Resíduos e Aterros Sanitários, Segundo Critérios de Projeto e Operação Atuais no Brasil. **Revista Limpeza Pública**, nº 74, p. 42 – 47. 2010.

Disponível em:

<http://www.geotech.srv.br/imagens/noticia_artigo_tecnico_2.pdf>. Acessado em 05 abr. 2014.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. 1999. 234 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BORBA, S. M. P. **Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso**. 2006. 134 p. Dissertação (Mestrado) -

Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em:

<http://teses.ufrj.br/COPPE_M/SilviaMaryPereiraBorba.pdf>. Acessado em: 12 ago. 2013.

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

– Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em:

<http://teses.ufrj.br/COPPE_M/AndreViniciusAzevedoBorgatto.pdf>.

Acessado em 22 mai. 2014.

BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248 p.

CARDIM, R. D. **Estudo da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões**. 2010. 91 p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília. Disponível em:

<<http://repositorio.unb.br/handle/10482/3290>>. Acessado em 22 mai. 2014.

CARVALHO, M. F. **Comportamento Mecânico de Resíduos Sólidos Urbanos**.

1999. 278 p. + Anexos. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Disponível em:

<<http://www.eesc.usp.br/ppgsgs/dissertes/carvalho.pdf>>. Acessado em 29 jul. 2013.

CAVALCANTE, I. N.; SANTIAGO, M. M. F.; REBOUÇAS, A. C. Hidroquímica dos Sistemas Aquíferos Manto de Intemperismo e Meio Fraturado na Região de Atibaia, Estado de São Paulo. **Revista de Geologia**, v. 11, p. 31-39, 1998.

Disponível em:

<http://www.revistadegeologia.ufc.br/documents/revista/1998/04_1998.pdf>.

Acessado em 19 de jun. 2014.

CHRISTAN, P. **Estudo da Interação Solo-estaca Sujeito a Carregamento**

Horizontal em Ambientes Submersos. 2013. 194 P. Exame de

qualificação – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Disponível em:

<<http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/handle/1/584>>. Acessado em 16

mai. 2014.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, **CETESB**

P4.2471: Norma para apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, São Paulo, 1982. Disponível em:

<<http://www.cetesb.sp.gov.br/servicos/normas---cetesb/43-normas-tecnicas--cetesb>>. Acessado em 24 jul. 2013

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (Site oficial)

Biogás. Aterro Sanitário. Disponível em:

<<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Aterro%20Sanit%C3%A1rio/21-Aterro%20Sanit%C3%A1rio>>. Acessado em: 22 jul. 2013.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - **CONAMA. 1993. Resolução**

Conama nº005. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=130>>. Acessado em 29 jul. 2013.

COSTA, M. P. S. e VITTE, A. C. Condicionamento estrutural progressivo da calha do Rio Atibaia entre as Cidades de Atibaia e Jarinu (SP), Atribuível A Neotectônica. 2006. *In: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia*. Goiânia – GO setembro de 2006. Disponível em:

<<http://www.labogef.iesa.ufg.br/links/sinageo/articles/310.pdf>>. Acessado em 25 jun. 2014.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo. Cengage Learning, 2007.612 p.

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>>.

Acessado em 31 jul. 2013.

FARIA, F. S. **Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos Urbanos**. 2002. 311 p.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em:

<http://www.getres.ufrrj.br/pdf/FARIA_FS_02_t_M_int.pdf>. Acessado em: 23 jul. 2013.

- 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. Disponível em:
<<http://ojs.unifor.br/index.php/tec/article/view/1187/738>>. Acessado em 15 de mai. 2014.
- FERREIRA, J. L. F. Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Jambu e Spencer. 2012. 122 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia. Disponível em:
<<http://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/64689/1/000151854.pdf>>.
Acessado em: 15 ago. 2013.
- FONSECA, A. J. P. V. Geomecânica dos solos residuais do Granito do Porto: Critérios para dimensionamento de fundações diretas. 1996. 773 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia. Disponível em:
<<http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/11101>>. Acessado em: 18 ago. 2013.
- FUCALE, S. P.; JUCÁ, J. F. T. Estudo da resistência à penetração dinâmica (SPT) em aterros de resíduos sólidos urbanos. In: **XXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental**. 2002, Cancun. Disponível em:
<<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/iv-026.pdf>>. Acessado em: 07 ago. 2013.
- GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 166 p.
- HAMADA, J. Estimativas de geração e caracterização do chorume em aterros sanitários. **19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. 1997. P. 1801-10. Disponível em:
<<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes97/chorume.pdf>>. Acessado em: 07 ago. 2013.

HASUI, Y. et al. **Geologia do Brasil**. São Paulo: Oficina de textos, 2012. 900 p.

HORST, R. **Avaliação dos Métodos para Cálculo de Estabilidade de Taludes em Maciço Terroso**. 2007. 129 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Departamento de Tecnologia. Disponível em: <[http://www.projetos.unijui.edu.br/petegc/wp-content/uploads/tccs/tcc-titulos/2006/Avaliacao dos Metodos Para Calculo de Estabilidade de Taludes em Macico Terroso.pdf](http://www.projetos.unijui.edu.br/petegc/wp-content/uploads/tccs/tcc-titulos/2006/Avaliacao%20dos%20Metodos%20Para%20Calculo%20de%20Estabilidade%20de%20Taludes%20em%20Macico%20Terroso.pdf)>. Acessado em: 15 mai. 2014.

HUNT, R. E. **Geotechnical engineering analysis and evaluation**. USA, Mc Graw-Hill. 1986. 729 p.

IGGSP, Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo – **Folha Topográfica de Atibaia. São Paulo**: IGGSP, Região Sul do Brasil – 1:10.000, Folha SF-23-Y-C-III-2-NE-E, 1ª edição, 1979.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA; ESTATÍSTICA. Departamento de população; indicadores sociais. **Pesquisa nacional de saneamento básico: 2008**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2013.

IRITANI, M. A. e EZAKI, S. As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. In: **Cadernos de Educação Ambiental**. São Paulo (Estado). Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2009. Disponível em: <http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/livros/cart_AG_SB.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2013.

JARDIM, N. S. et. al. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado**. São Paulo. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. 1995. 278 p.

- KNOCHENMUS, G.; WOJNAROWICZ, M.; VAN IMPE. Stability of Municipal Solid Wastes. In: **Proc. Of the Third International Congresso n Environmental Geotechnics**, 1998, Lisboa, Portugal, Seco e Pinto (ed.), Balkema, Rotterdam, Isbn p. 977 – 1000.
- LOUREIRO, S. M. **Índice de qualidade no sistema da gestão ambiental em aterros de resíduos sólidos urbanos - IQS**. 2005. 425 p. + apêndices. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em:
<http://www.getres.ufri.br/pdf/LOUREIRO_SM_05_t_M_int.pdf>. Acessado em: 23 jul. 2013.
- MACHADO, S. L., CARVALHO, M. F. e VILAR, O. M. Modeling the influence of biodegradation on sanitary landfill settlements, in: **Soil and Rocks**, nº 3, Vol. 32. P 123 – 134. 2009. Disponível em:
<<http://www.meau.ufba.br/site/artigos/modeling-influence-biodegradation-sanitary-landfill-settlements>>. Acessado em 30 mai. 2014.
- MACHADO, S. L. et. al. Estudo da compressibilidade de resíduos sólidos urbanos da região metropolitana de Salvador - BA. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 23., 2005, Campo Grande. Disponível em:
<<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes23/III-167.pdf>>. Acessado em 07 ago. 2013.
- MAHLER, C. F. e NETO, A. L. Análise da 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 milenio**. 2000. p. 1-8. Disponível em:
<<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/resisoli/iii-118.pdf>>. Acessado em 07 ago. 2013.

- MARQUES, A. C. M. **Compactação e compressibilidade de resíduos sólidos urbanos**. 2001. 350 p. + anexos. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-07082007-162407/pt-br.php>>. Acessado em: 19 jul. 2013.
- MARTINS, H. L. **Avaliação da Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos por Meio de Ensaios de Cisalhamento Direto em Equipamento de Grandes Dimensões**. 2006. 110 p. + Anexos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/FRPC-6ZNJ2D/henrique_lembi_martins.pdf?sequence=1>. Acessado em: 29 jul. 2013.
- MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. São Paulo. Oficina de Textos, 2003. 170 p.
- 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 (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-08112012-111427/pt-br.php>>. Acessado em 24 jul. 2013.
- NASCIMENTO, J. C. F. **Comportamento mecânico dos resíduos sólidos urbanos**. 2007. 160 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-10082007-132150/pt-br.php>>. Acessado em 23 jul. 2013.

- NEVES, M. A. **Evolução cenozóica da região Jundiaí (SP)**. 1999. 125 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista. Disponível em:
<http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/brc/33004137035P2/1999/neves_ma_me_rcla.pdf>. Acessado em 03 jun. 2014.
- NEVES, M. A. **Análise integrada aplicada à exploração de água subterrânea na Bacia do Rio Jundiaí (SP)**. 2005. 200 p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista. Disponível em:
<http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/brc/33004137035P2/2005/neves_ma_dr_rcla.pdf>. Acessado em 03 jun. 2014.
- OLIVEIRA, D. A. F. **Estabilidade de Taludes de Maciços de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2002. 154p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília. Disponível em:
<<http://www.geotecnia.unb.br/dissertacao/GDM09502.pdf>>. Acessado em: 08 nov. 2012.
- PEREIRA NETO, J. T.; LELIS, M. P. N. Variação da composição gravimétrica e potencial de reintegração ambiental dos resíduos sólidos urbanos por região fisiográfica do estado de Minas Gerais. **20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental** 1999, Rio de Janeiro.
- RIBEIRO, A. G. C. **Determinação de Parâmetros de Resistência de Resíduos Sólidos Urbanos por Meio de Retro-análises de Testes em Laboratório**. 2007. 100 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. Disponível em:
<http://www.tede.ufv.br/tedesimplificado/tde_arquivos/42/TDE-2007-10-09T111807Z-773/Publico/texto%20completo.pdf>. Acessado em: 29 jul. 2013

ROCHA, G. **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo: escala 1:**

1.000. 000: IG-Instituto Geológico: IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo: CPRM Serviço Geológico do Brasil, 2005.

Disponível em:

<http://www.igeologico.sp.gov.br/ler_noticia.asp?id=122>. Acessado em: 27 jul. 2013.

SCHALCH, V. et. al. Aterro sanitário considerações sobre escolha do sítio, projeto, implantação, operação e monitoramento. **Águas Subterrâneas**, São Paulo.1992. p. 123 – 127. Disponível em:

<<http://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24159>>.

Acessado em: 23 jul. 2013.

SCHALCH, V. et. al. **Gestão e gerenciamento de resíduos sólido.** 2002. 93 p.

Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Disponível em:

<[http://www.deecc.ufc.br/Download/Gestao de Residuos Solidos PGTGA/Apostila Gestao e Gerenciamento de RS Schalch et al.pdf](http://www.deecc.ufc.br/Download/Gestao%20de%20Residuos%20Solidos%20PGTGA/Apostila%20Gestao%20e%20Gerenciamento%20de%20RS%20Schalch%20et%20al.pdf)> Acessado em: 22 jul. 2013.

SCHNAID, F. **Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações.** 2^o ed. São Paulo. Oficina de Textos. 2000. 233 p.

SCHULER, R. S. **Análise do Comportamento de um Aterro Municipal de**

Resíduos Sólidos Urbanos Instrumentado. 2010. 152 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em:

<http://www.getres.ufrj.br/pdf/SCHULER_AR_10_t_M_.pdf>. Acessado em: 24 jul. 2013.

SILVEIRA, A. M. M. **Estudo do peso específico de resíduos sólidos urbanos.**

2004. 101 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Disponível em:

<<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd48/estudopeso.pdf>>. Acessado em: 29 jul. 2013.

- SIVRIKAYA, O.; TOĞROL, E. Determination of undrained strength of fine-grained soils by means of SPT and its application in Turkey. **Engineering geology**, v. 86, n. 1, 2006, p. 52-69. Disponível em:
<<http://ac.els-cdn.com/S0013795206001487/1-s2.0-S0013795206001487-main.pdf?tid=fbce7b96-0cd2-11e3-9fb3-00000aab0f27&acdnat=1377358786ccb7681368a0e9ea68c1b50117f06b66>>. Acessado em: 24 ago. 2013.
- 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**. 2009. 147 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Disponível em:
<<http://www.ppgcc.ufpr.br/dissertacoes/d0116.pdf>>. Acessado em: 24 jul. 2013.
- VELLOSO, D. A. e LOPES, F. R. **Fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, v. 1, 2004.
- VILAR, O. M.; CARVALHO, M. Mechanical properties of municipal solid waste. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 32, n. 6, 2004. p. 438-449.
- ZHU, D. Y. et. al. A concise algorithm for computing the factor of safety using the Morgenstern–Price method. **Canadian Geotechnical Journal**. 2005. vol:42, p. 272 - 278 Disponível em:
<<http://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.1139/t04-072>>. Acessado em: 08 ago. 2013.
- ZHU, D. Y. et. al. A new procedure for computing the factor of safety using the Morgenstern-Price method. **Canadian Geotechnical Journal**. 2001. vol:38, p. 882 - 888 Disponível em:
<<http://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.1139/t01-002>>. Acessado em: 08 ago. 2013.