

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**Parâmetros de resistência de RSU:
Abordagem probabilística para análises de estabilidade de taludes
de aterros de resíduos**

Leonardo Vinícius Paixão Daciolo

São Carlos
Fevereiro de 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**Parâmetros de resistência de RSU:
Abordagem probabilística para análises de estabilidade de taludes
de aterros de resíduos**

Leonardo Vinícius Paixão Daciolo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para o título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração:
Estruturas e Geotecnia

Orientadora:
Profa. Dra. Natália de Souza Correia

Coorientadora:
Profa. Dra. Maria Eugenia Gimenez Boscov

São Carlos
Fevereiro de 2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Daciolo, Leonardo Vinícius Paixão

Parâmetros de resistência de RSU: Abordagem probabilística para análises de estabilidade de taludes de aterros de resíduos / Leonardo Vinícius Paixão Daciolo. -- 2020.

126 f. : 30 cm.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador: Profa. Dra. Natália de Souza Correia

Banca examinadora: Profa. Dra. Natália de Souza Correia, Profa. Dra. Ana Elisa Silva de Abreu, Prof. Dr. André Luis Christoforo

Bibliografia

1. Resíduos Sólidos Urbanos. 2. Parâmetros Geotécnicos. 3. Confiabilidade Estrutural. I. Correa, Natália de Souza, orientadora. II. Boscov, Maria Eugenia Gimenez, coorientadora. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Parâmetros de resistência de RSU:Abordagem probabilística para análises de estabilidade de taludes de aterros de resíduos.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Ronildo Santos Prado – CRB/8 7325



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Leonardo Vinícius Paixão Daciolo, realizada em 27/02/2020:

Profa. Dra. Natália de Souza Correia
UFSCar

Profa. Dra. Ana Elisa Silva de Abreu
UNICAMP

Prof. Dr. Andre Luis Christoforo
UFSCar

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ão) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

Profa. Dra. Natália de Souza Correia

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais: Walter e Carmem Daciolo, irmãos: Lívia e Lucas Daciolo, por todo apoio, ajuda e incentivo para que fosse realizado. Esta conquista é nossa!

AGRADECIMENTOS

Esta página está carregada dos alicerces que permitiram que este trabalho se realizasse, o qual foi escrito à muitas mãos, que possibilitaram que os avanços pessoais, profissionais e científicos ocorressem.

Agradeço acima de tudo a Deus, pelo seu amor, providência, cuidado e por colocar este sonho em minha vida. Agradeço também à toda intercessão e intermédio de Nossa Senhora, a qual tenho particular devoção.

Agradeço aos maiores apoiadores e incentivadores deste sonho, meus pais Walter e Carmem, irmãos Lívia e Lucas, avós Maria e Onivalda, que sonham e significam a minha vida. Obrigado pelo amor e cuidado, amo vocês!

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento e incentivo desta pesquisa, nestes 2 anos de mestrado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e à Universidade Federal de São Carlos, por acolherem e permitirem o desenvolvimento deste e de tantos outros trabalhos nestes já 7 anos de instituição. Também ao meu grupo de pesquisa de Geotecnia e Geossintéticos da UFSCar (GEGeos/UFSCar), por toda inspiração, crescimento e confiança.

Agradeço de forma especial à minha orientadora Prof. Dra. Natália de Souza Correia e coorientadora Prof. Dra. Maria Eugenia Gimenez Boscov por toda amizade, ensinamento, formação e incentivo durante este trabalho.

Agradeço ao professor André Luis Christoforo por toda contribuição e enriquecimento compartilhado. Também à gentileza da Fral Consultoria, especialmente à Engenheira MSc. Thelma Kamiji, por disponibilizarem as informações que auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho.

Aos queridos professores e amigos, pelas conversas, conselhos, ensinamentos, auxílio nesta pesquisa e amizade. Deus abençoe vocês!

Agradeço a minha família de coração, Marcela, Laís, Rodrigo, João, Camila, Marina, Renato, por me acompanharem e viverem tão proximamente no tempo de mestrado, especialmente ao amigo e afilhado José Wilson. E a tantos outros amigos queridos, por me acompanharem nesta caminhada!

Ao ministério universidades renovadas, através dos GOUs e GPPs, por auxiliar na compreensão e realização deste sonho, na vocação profissional e pelo acolhimento na família MUR.

Por fim, a todos aqueles aos quais pude conviver e partilhar neste tempo, cujos agradecimentos não são comportados apenas nestas folhas, o meu muito obrigado!

“Aí onde estão as nossas aspirações, o nosso trabalho, os nossos amores – aí está o lugar do nosso encontro cotidiano com Cristo. Em meio das coisas mais materiais da terra é que nós devemos santificar-nos, servindo a Deus e a todos os homens.

Na linha do horizonte, meus filhos, parecem unir-se o céu e a terra. Mas não: onde de verdade se juntam é no coração, quando se vive santamente a vida diária...”

(São Josemaria Escrivá, homilia ‘Amar o mundo apaixonadamente’, 8 de outubro de 1967)

RESUMO

DACIOLO, Leonardo Vinícius Paixão. **Parâmetros de resistência de RSU: Abordagem probabilística para análises de estabilidade de taludes de aterros de resíduos.** 2020. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

Para projetos de aterros sanitários, é frequente a prática da adoção de parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU com base nos valores disponíveis na literatura, devido às dificuldades associadas ao procedimento de amostragem e ensaio, principalmente na fase de projeto. A elevada dispersão destes dados, decorrente dos diferentes métodos e amostras utilizados, dificulta a realização de análises geotécnicas, gerando incertezas para os projetistas. Neste cenário, as análises probabilísticas de estabilidade de taludes surgem como alternativa às metodologias tradicionais, possibilitando a avaliação das incertezas no processo de obtenção dos parâmetros de resistência dos RSU e nas condicionantes do projeto. Estas análises demandam do conhecimento e compreensão do comportamento estatístico das variáveis envolvidas na resistência ao cisalhamento de RSU. Apesar de existirem na literatura compilações e recomendações de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU, nenhuma dessas pesquisas concentrou um grande volume de dados pelo tipo de ensaio e características das amostras para analisar a variabilidade. Assim, esta pesquisa objetivou avaliar e caracterizar o comportamento estatístico dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU em vista de análises probabilísticas de estabilidades de aterros de resíduos. Para tanto, foi realizada meta-análise estatística de um extenso levantamento bibliográfico de dados disponíveis de parâmetros geotécnicos dos RSU. Foram analisados ajustes de distribuição, estatísticas descritivas, de posição e dispersão destes dados, segundo metodologias para classificação destas propriedades. Como resultados gerais, verificou-se que a classificação dos resíduos auxiliou na menor dispersão dos dados através da reunião de resíduos com características mecânicas-morfológicas similares. Este processo possibilitou a proposição de recomendações para adoção de parâmetros para cada tipo de RSU. Estes resultados foram aplicados na análise de ruptura do aterro sanitário Sítio São João – SP. As análises de estabilidade probabilísticas conduzidas demonstraram que os resultados obtidos neste estudo podem ser utilizados como ferramenta de análise e tomada de decisão para a mitigação de riscos de projetos geotécnicos, além de auxiliar na avaliação de ensaios e pesquisas com resíduos.

Palavras-chave: resíduos sólidos urbanos; análise estatística; resistência ao cisalhamento de RSU; confiabilidade estrutural, recomendações de projeto.

ABSTRACT

DACIOLO, Leonardo Vinícius Paixão. **MSW shear strength parameters: Reliability approach to landfill slope stability.** 2020. 126f. Thesis (Master in Civil Engineering) – Federal University of Sao Carlos, Sao Carlos, 2020.

For landfill designs, the practice of adopting Municipal Solid Waste (MSW) shear strength parameters is often realized based on the values available in the literature, due to the difficulties associated with sampling and testing procedure, especially in the design phase. The high dispersion of these data, due to different methods and samples used, makes it difficult to carry out geotechnical analyzes with confidence, generating uncertainties for designers. In this scenario, the probabilistic slope stability analyzes appear as an alternative to traditional methodologies, enabling the evaluation of uncertainties in the process of obtaining MSW strength parameters and in during project. These analyzes demand knowledge and understanding of the statistical behavior of the variables involved in MSW shear strength parameters. Although compilations and recommendations for MSW shear strength parameters are available in the literature, none of these studies concentrated a large volume of data by the type of test and sample characteristics to analyze variability. This research aimed to evaluate and characterize the statistical behavior of MSW shear strength parameters regarding probabilistic analyzes of landfill stability. For this purpose, a statistical meta-analysis of an extensive bibliographic survey of available data on MSW geotechnical parameters was conducted. Adjustments of distribution, descriptive statistics, position and dispersion of these data were analyzed, according to methodologies for classifying these properties. As general results, it was found that the classification of MSW data helped in the lower dispersion of data, through the collection of data with similar mechanical-morphological characteristics. This process made it possible to propose recommendations for the adoption of parameters for each type of MSW. These results were applied in the failure analysis of the Sítio São João Landfill, in Sao Paulo State, Brazil. The probabilistic stability analyzes conducted showed that the results obtained here can be used in analysis and as decision-making tools to mitigate the risks of geotechnical designs, also assisting in the evaluation of tests and researches with MSW.

Key-words: *Municipal solid waste, statistical analysis, MSW shear strength parameters, reliability analysis, design recommendations.*

| | |
|---|-----------|
| 1. Introdução..... | 12 |
| 1.1. Justificativa | 14 |
| 1.2. Objetivos..... | 16 |
| 1.3. Estrutura da Dissertação..... | 16 |
| 2. Resistência ao cisalhamento dos resíduos sólidos urbanos | 17 |
| 2.1. Geomecânica dos Resíduos Sólidos Urbanos..... | 17 |
| 2.1.1. Meios multifásicos | 17 |
| 2.1.2. Comportamento Mecânico-Morfológico dos RSU..... | 18 |
| 2.1.3. Mecanismos de cisalhamento dos RSU..... | 21 |
| 2.2. Fatores que afetam a resistência ao cisalhamento dos RSU..... | 25 |
| 2.2.1. Tipo, equipamento e velocidade de ensaio..... | 25 |
| 2.2.2. Nível de Deformação..... | 26 |
| 2.2.3. Composição | 27 |
| 2.2.4. Estágio de Degradação | 31 |
| 2.2.5. Condições operacionais | 36 |
| 2.3. Comentários Gerais | 38 |
| 3. Caracterização estatística dos parâmetros de resistência dos RSU | 39 |
| 3.1. Introdução | 39 |
| 3.2. Método | 40 |
| 3.3. Resultados e Discussões | 45 |
| 3.3.1. Análises Univariadas | 45 |
| 3.3.2. Ajuste de Distribuição | 48 |
| 3.3.3. Dispersão dos parâmetros de resistência ao cisalhamento | 52 |
| 3.4. Limitações e Considerações | 55 |
| 4. Meta-análise de ensaios de cisalhamento direto: Classificação dos Dados | 56 |
| 4.1. Introdução | 56 |
| 4.2. Sistemas de Classificação de RSU | 58 |
| 4.3. Método | 59 |
| 4.3.1. Banco de Dados..... | 59 |
| 4.3.2. Fluxograma de Análise..... | 63 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 4.4. | Resultados e Discussões | 65 |
| 4.4.1. | Variáveis envolvidas nos procedimentos experimentais | 65 |
| 4.4.2. | Definição da categorização dos dados..... | 67 |
| 4.5. | Limitações e Considerações | 71 |
| 5. | <i>Meta-análise de ensaios de cisalhamento direto: Recomendações de Projeto</i> | 72 |
| 5.1. | Introdução | 72 |
| 5.2. | Recomendações de Projeto | 72 |
| 5.3. | Método | 76 |
| 5.4. | Resultados e Discussões | 79 |
| 5.4.1. | Análises Univariadas | 79 |
| 5.4.2. | Dispersão Conjunta | 82 |
| 5.4.3. | Envoltórias de Resistência..... | 86 |
| 5.5. | Limitações e Considerações | 88 |
| 6. | <i>Análises probabilísticas de estabilidade de taludes do aterro sanitário Sítio São João</i> 90 | |
| 6.1. | Introdução | 90 |
| 6.2. | Método | 94 |
| 6.3. | Resultados e Discussões | 100 |
| 6.4. | Limitações e Considerações | 104 |
| 7. | <i>Considerações Finais</i> | 106 |
| | <i>Sugestões de Pesquisa</i> | 108 |
| 8. | <i>Referências Bibliográficas</i> | 109 |
| | <i>Apêndice A – Extrato do banco de dados utilizado na pesquisa</i> | 120 |
| | <i>Apêndice B – Análises Numéricas – Aterro Sítio São João</i> | 121 |
| | Apêndice B.1 – Ru Elevado | 121 |
| | Apêndice B.2 – Ru Médio | 124 |

1. INTRODUÇÃO

Embora a construção de aterros sanitários, unida a técnicas de tratamento e destinação final de resíduos, seja uma alternativa adequada para a disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU), os aterros são obras complexas e interdisciplinares do ponto de vista geotécnico, principalmente pelo fato dos resíduos sólidos comporem parte da estrutura. Neste sentido, os próprios resíduos devem resistir a solicitações construtivas, operacionais e oriundas do pós-fechamento dos aterros. Estas solicitações, bem como altura e inclinação excessiva dos taludes, baixa compactação de resíduos, acúmulo de lixiviados no fundo do aterro, acúmulo de biogás, instabilidade do terreno, dentre outras, podem levar a ruptura dos aterros. Assim, estas características devem ser avaliadas com cautela no projeto e na operação dos aterros sanitários (Colomer-Mendoza, 2013; Jahanfar et al., 2017b).

Entretanto, de acordo com Petrovic (2016), a dificuldade na obtenção de informações e parâmetros de resistência dos RSU, aliada à ausência de normatizações específicas, contribuem para análises e práticas muitas vezes imprecisas nos projetos geotécnicos, especialmente quanto às negligências de se considerar os resíduos como “lixo”, ignorando sua heterogeneidade, comportamento físico, químico e biológico, e seu comportamento ao longo do tempo.

Com relação aos aterros sanitários, infelizmente, nos últimos 30 anos, casos de grandes deslizamentos em aterros sanitários têm sido observados no Brasil e no mundo, trazendo prejuízos econômicos, sociais, ambientais e perdas de vidas (Batista, 2010; Gao et al., 2019). Diante destes casos de deslizamento, verifica-se que o campo de análises de estabilidade de aterros sanitários não é recente na literatura. Landva e Clark (1990b) reuniram alguns dos trabalhos pioneiros da década de 80 em sua publicação, de forma a nortear as metodologias e considerações para a realização de análises de estabilidade de aterros sanitários. Desde então, para auxiliar os projetistas, uma grande quantidade de resultados de obtenção de parâmetros mecânicos dos RSU são encontrados na literatura, sobretudo em trabalhos recentes (Jie et al., 2013; Abreu e Vilar, 2017; Feng et al., 2017; Ramaiah et al., 2017) bem como trabalhos que sugerem intervalos de valores e recomendações de projeto (Dixon e Jones, 2005; Zhan et al., 2008; Reddy et al., 2009a; Stark et al., 2009; Petrovic et al., 2016; Ramaiah et al., 2017).

Para projetos de aterros sanitários, é prática recorrente estimar os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU (ângulo de atrito e coesão) e peso específico com base em valores disponíveis na literatura devido às dificuldades de se realizar ensaios com os resíduos, sobretudo na fase de projeto. Esta etapa de seleção é determinante, pois os parâmetros são utilizados em análise de estabilidade de taludes e permitem obter informações de inclinações críticas, alturas de declives e níveis operacionais de lixiviados para a execução do aterro (Colomer-Mendoza, 2013). Os parâmetros de resistência de RSU disponíveis na literatura são oriundos de ensaios de campo e laboratório, retroanálises e estimativas, apresentando uma grande variabilidade entre os resultados, o que dificulta sua definição e gera insegurança para as análises de estabilidade (Petrovic et al., 2016). Ademais, apesar do conhecimento

da heterogeneidade dos RSU, muitos trabalhos não apresentam características importantes das amostras, como composição, idade, amostragem, características dos ensaios, teor de umidade, peso específico e grau de decomposição (Harris et al., 2006). No entanto, embora seja elevada a dispersão dos resultados, esforços significativos para a obtenção de intervalos de parâmetros para projetos têm sido despendidos na literatura, especialmente para realização de estimativas iniciais quando não se possui informações complementares dos resíduos (Colomer-Mendoza, 2013). De acordo com Harris et al. (2006), o uso destas recomendações deve ser realizado com cautela, especialmente se as características dos resíduos e condições de operação não forem próximas às utilizadas por estes trabalhos.

Jahanfar et al. (2017b) realizaram análises de estabilidade considerando o comportamento estatístico dos parâmetros dos RSU, os quais foram divididos em 4 classes correspondentes aos pares de predominância de composição (orgânica ou inorgânica), e se lançados ou compactados. Os valores de referência utilizados apresentaram, no entanto, baixa dispersão e número amostral. Este fato é presente em trabalhos similares, que utilizam baixos números amostrais para determinação dos parâmetros dos RSU, descrevendo apenas condições específicas para os resíduos, limitando o escopo dos resultados (Srivastava e Reddy, 2012; Reddy et al., 2017).

Petrovic et al. (2016) reuniram resultados de parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU da literatura e observaram intervalos de variação para a coesão (0 – 80 kPa) e para o ângulo de atrito (0 – 55°). Esta variação dos parâmetros de resistência é resultado da influência de vários fatores, como as metodologias de análise utilizadas para sua obtenção, as quais diferem no tipo de ensaio e no método de amostragem, nas condições de compactação e operação do aterro (ou amostra), na composição, umidade, temperatura e idade do resíduo, além da e variabilidade espacial das amostras (Colomer-Mendoza, 2013; Sivakumar Babu et al., 2014; Ramaiah e Ramana, 2017).

Além da variabilidade espacial, física e gravimétrica, o processo de decomposição produz lixiviados e gases no interior do aterro (Berto Neto, 2009). O aumento da taxa de resíduos orgânicos (alimentares) num aterro tem como característica um processo de hidrólise rápida, aumentando a taxa de produção de chorume e gás proveniente da decomposição dos materiais, cuja interação líquido-gás é complexa e um desafio para as pesquisas (Berto Neto, 2009; Zhan et al., 2017).

Apesar dos projetos de aterro sanitário definirem camadas drenantes para os lixiviados, gases e águas pluviais, falhas construtivas aliadas à colmatação de drenos e excessos de pluviosidade podem contribuir para o acúmulo de fluidos no aterro (Jie et al., 2013; Zhan et al., 2017). Petrovic et al. (2016) observaram ainda uma drástica queda no fator de segurança da seção crítica de um aterro sanitário nas condições “seca” e “úmida”, de modo que a não avaliação das condições de pressão neutra podem conduzir a conclusões de estabilidade equivocadas e inseguras, como ressaltam também Colomer-Mendoza (2013) e Jie et al. (2013).

Diante desse cenário, as análises determinísticas tradicionais não conseguem captar a variabilidade presente nos parâmetros dos RSU e nem as associar com suas probabilidades de ocorrência e combinações entre as diferentes variáveis envolvidas no projeto. As análises probabilísticas de

estabilidade de taludes surgem assim como uma alternativa para as análises tradicionais, por permitirem aferir dispersões e variabilidades dos parâmetros, fator este que tem sido tema de recentes trabalhos na literatura (Zhang et al., 2010; Srivastava e Reddy, 2012; Apaza e Barros, 2014; Foye et al., 2014; Javankhoshdel e Bathurst, 2014; Sivakumar Babu et al., 2014; Petrovic et al., 2016; Jahanfar et al., 2017b; Reddy et al., 2018). Tais análises baseiam-se na determinação de índices de confiabilidade associados a probabilidades de ruína de uma estrutura, sendo prática recorrente acoplar análises de sensibilidade de variáveis para verificar sua influência nos parâmetros de interesse (Zekkos et al., 2006; Petrovic et al., 2016; Jahanfar et al., 2017b). Neste sentido, as análises probabilísticas necessitam da caracterização estatística dos parâmetros e das condicionantes de análise, sendo mais adequadas para previsão da estabilidade de aterros sanitários.

Um maior conhecimento e avaliação do comportamento das variáveis presentes no aterro sanitário permitem mitigar o quadro de ruptura destes maciços, principalmente em um cenário de crescente demanda por construção, ampliação e adequação de disposições finais de RSU. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivos principais realizar a categorização do comportamento estatístico dos parâmetros geotécnicos dos resíduos sólidos urbanos presentes na literatura e a proposição de considerações para análises probabilísticas de estabilidade de aterros sanitários, objetivando a compreensão e concepção de projetos mais seguros e otimizados.

1.1. JUSTIFICATIVA

Casos significativos de deslizamentos em aterros sanitários têm sido observados no Brasil e no mundo. Na Tabela 1.1 são apresentados alguns casos de rupturas de aterros sanitários observados no Brasil, enquanto a Tabela 1.2 apresenta os casos de rupturas de aterros encontrados em outros países. Verifica-se especialmente no caso do Brasil que, alguns eventos de ruptura são recentes, e com grande quantidade de material deslizado, tal como em Itaquaquecetuba – SP (em 2011) e em Sítio São João (em 2007), localizado na região de São Mateus no município de São Paulo, com volumes deslizados que ultrapassaram 200.000 m³.

Desta forma, têm-se observado rupturas e falhas nos projetos devido às incompreensões no comportamento dos materiais, o que contrapõem a confiança com relação à crescente demanda por construções e ampliações de aterros sanitários. De fato, é notória a dificuldade para a determinação de parâmetros de projeto, decorrente da variabilidade de propriedades apresentadas pelos resíduos sólidos urbanos (RSU), da ausência de recomendações específicas de parâmetros de projetos (sobretudo em países subdesenvolvidos) e das dificuldades do cômputo de ações atuante no maciço. Nesse cenário, como elucidada Beck (2019), faz-se necessária uma mudança de paradigma sobre o processo de concepção, dimensionamento e monitoramento das estruturas, para mitigação do risco e melhoria do desempenho destas obras.

Tabela 1.1 - Ocorrência de deslizamento em aterros sanitários no Brasil.

| Ano | Aterro | País | Volume deslizado (m³) |
|------------|---------------------------|-------------|---|
| 1991 | Bandeirantes (SP) | Brasil | 65.000 |
| 1992 | Itapecerica da Serra (SP) | Brasil | 8.000 |
| 1995 | Mauá (SP) | Brasil | 100.000 |
| 2000 | Itaquaquecetuba (SP) | Brasil | 1.000.000 |
| 2004 | Juiz de Fora (MG) | Brasil | 70.000 |
| 2004 | Guarujá (SP) | Brasil | 40.000 |
| 2006 | Itapecerica da Serra (SP) | Brasil | 15.000 |
| 2007 | Sítio São João (SP) | Brasil | 220.000 |
| 2011 | Itaquaquecetuba (SP) | Brasil | 300.000 |
| 2018 | Teresópolis (RJ) | Brasil | Não informado |
| 2018 | Guarulhos (SP) | Brasil | Não informado |
| 2019 | Niterói | Brasil | Não informado |
| 2019 | Indiana (SP) | Brasil | Não informado |

Fonte: Adaptado de Batista (2010), Portal G1 (2019a, 2019b, 2019c, 2019d) e Kamiji e Oliveira (2019).

Tabela 1.2 - Ocorrência de deslizamento em aterros sanitários no mundo.

| Ano | Aterro | País | Volume deslizado (m³) |
|------------|-----------------|---------------|---|
| 1988 | Kettleman Hills | EUA | 120.000 |
| 1993 | Istambul | Turquia | 12 a 15.000 |
| 1996 | La Coruña | Espanha | 1.4000.000 |
| 1996 | Rumpke | EUA | 1.200.000 |
| 1997 | Dona Juana | Colômbia | 1.500.000 |
| 1997 | Sarajevo | Iogoslávia | 200.000 |
| 1997 | Durban | África do Sul | 150 a 180.000 |
| 2000 | Payatas | Filipinas | 16.000 |
| 2001 | Navarro | Colômbia | 250.000 |
| 2005 | Leuwigaiah | Indonésia | 2.700.000 |
| 2010 | Xerolaka | Grécia | 12.000 |
| 2015 | Guatemala | Guatemala | Não informado |
| 2015 | Shenzhen | China | 2.750.000 |
| 2016 | Guatemala | Guatemala | Não informado |
| 2017 | Koshe | Etiópia | Não informado |
| 2017 | Meethotamulla | Sri Lanka | Não informado |

Fonte: Adaptado de Batista (2010), Zekkos et al. (2014), Disaster Charter (2015), Exame (2019) e Gao et al. (2019).

1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal propor e adequar recomendações de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU para análises de estabilidade geotécnica. São objetivos específicos deste trabalho:

- Coletar, categorizar e classificar os dados de parâmetros de resistência dos RSU disponíveis na literatura;
- Avaliar os comportamentos estatísticos das distribuições de dados, segundo as classes sugeridas;
- Validar a proposta a partir da realização de retroanálises de um caso de ruptura real de um aterro sanitário no Brasil, com a utilização das classes sugeridas;
- Avaliar a sensibilidade das análises de estabilidade do aterro sanitário frente ao efeito do alteamento e pressão neutra.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é estruturada de forma a potencializar o método científico de cada etapa do trabalho que, apesar de se constituir de pesquisas correlacionadas, apresenta conclusões e observações próprias. O capítulo 1 aborda a problemática geral na qual o trabalho se insere, evidenciando a necessidade de compreensão e aprofundamento no estudo do comportamento de resistência dos RSU visto as dificuldades e falhas de estruturas reais de aterros. No capítulo 2, está reunida uma revisão geral da literatura acerca do comportamento mecânico dos RSU e da dispersão de suas propriedades, bem como da influência qualitativa dos fatores nos resultados dos ensaios de cisalhamento.

O capítulo 3, primeiro capítulo de resultados, apresenta um levantamento das propriedades de resistência dos RSU na literatura, bem como a caracterização estatística, ajustes de distribuição e correlações entre o ângulo de atrito, coesão e peso específico, com finalidade de aplicação em análises de confiabilidade estrutural. Já o capítulo 4 apresenta o estudo da mitigação da variabilidade e da dispersão dos dados de cisalhamento direto, com o objetivo de propor e adequar atuais recomendações de projeto, através da classificação de dados em classes semelhantes. Através desta abordagem, no capítulo 5 é apresentada uma proposta de classificação dos dados de RSU, visando analisar o comportamento de cada classe com o intuito de identificar recomendações para análises determinísticas e probabilísticas de estabilidade. No capítulo 6 são utilizadas as recomendações propostas nesta pesquisa em uma análise de estabilidade de um aterro real, evidenciando a necessidade da visão probabilística para estas estruturas. As conclusões principais obtidas nesta dissertação são apresentadas no capítulo 7, seguido das referências bibliográficas e apêndices.

2. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Considerando-se a variabilidade intrínseca dos RSU e a dificuldade de obtenção de orientações específicas a respeito de valores de referência para parâmetros de resistência em diferentes aterros sanitários, buscou-se neste capítulo retomar estudos prévios acerca do efeito de diferentes fatores (amostrais, procedimentos experimentais e analíticos) nos valores de ângulo de atrito e coesão dos RSU, bem como respectivas orientações e recomendações para projetos de aterros de resíduos.

2.1. GEOMECÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

2.1.1. MEIOS MULTIFÁSICOS

Analogamente aos solos, os RSU são constituídos por diferentes fases: líquida, sólida e gasosa; contudo, as características dos materiais presentes nestas fases são distintas das características dos solos. De acordo com Dixon e Langer (2006), a parte sólida é composta por componentes heterogêneos, de diferentes grupos de materiais, englobando componentes putrescíveis, metálicos, minerais, inertes, deformáveis, incompressíveis, entre outros. Além disto, os componentes podem apresentar alterações físico-químicas, tais como alterações em sua forma, redução de tamanho, fragmentação e alterações químicas e (bio)degradação. Estes fatores alteram o volume e características dos resíduos, além de produzir componentes das fases líquida e gasosa (Machado et al., 2002; Stoltz et al., 2010).

A fase líquida dos resíduos, denominada lixiviado, é resultante da umidade inicial presente nos componentes, de eventuais infiltrações presentes no aterro e principalmente dos subprodutos envolvidos no processo de biodegradação (Keramati et al., 2018; Yang et al., 2018). Já a fase gasosa dos RSU contém além de ar, gases resultantes dos processos de degradação (Grisolia e Napoleoni, 1996). A intensidade de geração e o tipo de gás gerado são dependentes do estágio de decomposição apresentados pelos RSU sendo que, por exemplo, a decomposição aeróbica apresenta alta produção de dióxido de carbono, seguido por posterior redução do pH e produção de gases (fase anaeróbica ácida), enquanto que a fase metanogênica apresenta elevada formação de gás metano e decomposição acelerada de substâncias orgânicas, culminando na etapa residual, com limite de hidrólises e produção de gases diminuída (Hossain et al., 2003; Machado et al., 2009; Derbal et al., 2012).

Os diferentes componentes sólidos dos RSU apresentam pesos específicos distintos, acarretando gravimetria e volumetria diferentes de acordo com sua composição. Como salientam Machado et al. (2014), porcentagens da ordem de 20% de plástico na composição gravimétrica são consideradas elevadas, implicando em grandes volumes deste material. Além disto, os resíduos apresentam não só vazios intercomponentes (espaços entre os diferentes materiais) mas também vazios intracomponentes,

decorrentes das características de cada material e volumetria dos componentes. Desta forma, as fases líquida, sólida e gasosa estão presentes nestes diferentes vazios, acarretando aumento heterogêneo da pressão neutra, uma vez que nem todos os vazios estão interconectados. Os vazios internos e externos presentes nos RSU também acarretam a alteração do peso específico destes materiais, além de sujeitar os RSU a grandes taxas de deformação devido aos elevados índices de vazios (Dixon e Jones, 2005; Zhang et al., 2010).

2.1.2. COMPORTAMENTO MECÂNICO-MORFOLÓGICO DOS RSU

Dahlén e Lagervist (2008) e Edjabou et al. (2015) sugerem a classificação de componentes de resíduos segundo a hierarquização por grupos principais, para sua melhor avaliação, decorrente da variabilidade de materiais presentes nos resíduos. Neste sentido, diferentes pesquisas têm reunido e utilizado propostas de agrupamentos dos resíduos em componentes (Siegel et al., 1990; Kölsch, 1995; Dixon e Langer, 2006; Dixon et al., 2008). O Quadro 2.1 apresenta uma classificação de componentes comumente visualizadas em trabalhos da literatura.

Quadro 2.1 - Descrição de grupos de componentes segundo o tipo e comportamento apresentado baseado em diferentes trabalhos da literatura (Siegel et al., 1990; Kölsch, 1995; Dixon e Langer, 2006; Dixon et al., 2008).

| Componentes | Descrição |
|-----------------------------|--|
| Pasta orgânica | Compreendem matéria orgânica presente nos RSU. É a parte que mais sofre biodegradação e está associada a geração de lixiviados e gases do aterro. |
| Papéis | Compreendem diferentes espessuras, composições e tamanhos de papéis, papelões e correlatos. |
| Sintéticos Flexíveis | Compreendem diferentes espessuras, composições e tamanhos de plásticos flexíveis (moles), borrachas flexíveis, têxteis flexíveis. Estão sujeitos à efeitos de fluência e deteriorização. |
| Sintéticos Rígidos | Compreendem diferentes espessuras, composições e tamanhos de plásticos rígidos (duros), borrachas rígidas, têxteis rígidos. Estão sujeitos à efeitos de fluência e deteriorização. |
| Metais | Compreendem diferentes espessuras, composições e tamanhos de materiais ferrosos e não ferrosos. Estão sujeitos à corrosão e deteriorização. |
| Minerais | Compreendem diferentes espessuras, composições e tamanhos de materiais cerâmicos, vítreos, rochas fragmentadas/britas e materiais correlatos. Apresentam características incompressíveis mediante às ações convencionais de aterros sanitários. |
| Madeiras | Compreendem diferentes espessuras, composições e tamanhos de madeiras, compósitos e correlacionados. Apresentam características incompressíveis mediante às ações convencionais de aterros sanitários e podem apresentar degradação lenta da matéria orgânica. |
| Miscelânea | Compreendem outros materiais não identificados e partículas pequenas de outros componentes, inferiores a 8 mm, que podem apresentar características de reforço, incompressibilidade ou degradação a depender de seu componente de origem. |

Com relação às propriedades mecânicas dos RSU, o comportamento resultante do compósito fica condicionado às contribuições individuais dos componentes aliadas às interações entre os mesmos. Dixon e Langer (2006) retratam 5 aspectos mecânicos principais para os RSU, associando a cada um, a contribuição principal de cada componente:

- Resistência à tração: Associada aos componentes orgânicos, papel, metais (contudo sua baixa proporção gravimétrica suprime sua contribuição);
- Resistência à Compressão: Cerâmicas e materiais inertes influenciam altamente neste parâmetro, enquanto vidros e metais também contribuem numa magnitude menor, mas significativa;
- Alongamento na Ruptura: Polímeros e plásticos;
- Módulo de Elasticidade: Metais e cerâmicas influenciam altamente no parâmetro, enquanto vidros e inertes também contribuem numa magnitude menor, mas significativa;
- Resistência ao Cisalhamento: Metais e materiais semelhantes ao solo contribuem altamente no parâmetro, seguidos por papel, cerâmicas, vidros, polímeros e plásticos, de uma maneira um pouco menor. Inertes e borracha desempenham uma menor, mas significativa, influência.

As propriedades mecânicas dos RSU ficam condicionadas, além dos componentes e composições, às características morfológicas e granulométricas destes materiais. A separação métrica de cada componente do RSU, aliada com a forma que os componentes se apresentam, permite a determinação do comportamento morfológico preponderante do resíduo e é uma etapa essencial para a classificação mecânica dos materiais (Chen et al., 2009; Abreu e Vilar, 2017). Machado et al. (2014) ressaltam que a granulometria dos resíduos é alterada com o avanço da deterioração dos resíduos, que apresentam uma redução no tamanho e forma de suas partículas. Este fato é retratado por diferentes trabalhos na literatura, onde a predominância das faixas granulométricas se enquadra nas frações de 8 a 120 μm (Dixon e Langer, 2006; Ramaiah et al., 2017; Rakic et al., 2018).

Diferentes trabalhos sugerem a identificação de componentes particulados (dimensão 0) de comportamento semelhante ao solo (terroso), de elementos unidimensionais (dimensão 1) e planares (dimensão 2), cujos vazios internos não afetam significativamente o comportamento dos RSU, e elementos tridimensionais (dimensão 3), geralmente compressíveis (Borgatto, 2006; Dixon e Langer, 2006; Rakic et al., 2018). A Figura 2.1 ilustra as sugestões de identificação morfológica dos componentes dos RSU.

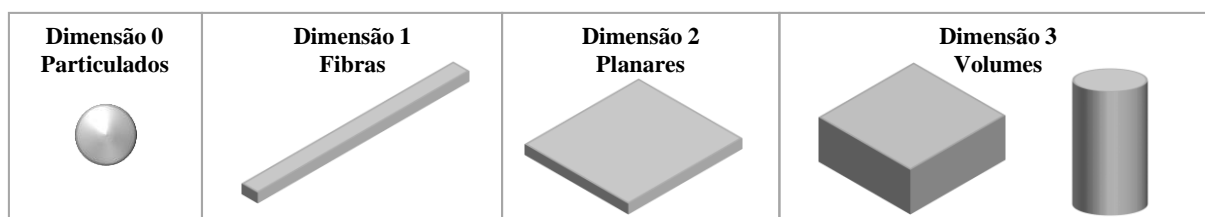


Figura 2.1 - Morfologia dos componentes dos RSU. Fonte: Adaptado de Borgatto (2006).

Dixon e Langer (2006) ressaltam a importância da composição dos resíduos (especialmente a parcela compressível) para a compreensão de mudanças mecânicas resultantes das atividades de disposição e confinamento às quais os RSU serão submetidos à curto prazo (disposição) e longo prazo (fluência e confinamento). Os autores definiram um componente como “incompressível” se este não apresentar compactação (redução de vazios) sob uma carga de 500 kPa (aproximadamente 50m de profundidade em um aterro sanitário). Um componente apresentará comportamento de “reforço” a partir de uma relação entre o tamanho dos componentes fibrosos ou planares e os componentes tridimensionais da amostra. O componente fibroso ou planar será reforço se suas dimensões excederem o diâmetro nominal das partículas regularmente moldadas (Quadro 2.2).

Quadro 2.2 – Classificação Mecânica-Morfológica dos Componentes

| Classificação | Morfologia | Observações |
|------------------------|--|---|
| Reforço | Unidimensionais ou Bidimensionais | Sacolas plásticas, papéis |
| Compressíveis | Tridimensionais de Alta Compressibilidade | Materiais putrescíveis, pacotes plásticos |
| | Tridimensionais de Baixa Compressibilidade | Latas metálicas |
| Incompressíveis | Tridimensionais de Compressibilidade Desprezível | Britas, peças de metal, madeira |

Fonte: Adaptado de Dixon e Langer (2006).

Desta forma, torna-se possível a identificação de duas matrizes presentes nos RSU: uma matriz fibrosa, englobando os componentes de reforço e outra básica, reunindo os demais materiais (Machado et al., 2002; Reddy et al., 2009a). Bareither et al. (2012) observam que os componentes papel e papelão também compõem a matriz fibrosa dos RSU, contudo, Machado et al. (2014) reforçam que este comportamento é dependente do teor de umidade ao qual estão submetidos, diminuindo sua capacidade resistente com o aumento da umidade e tempo de exposição. A Figura 2.2 sumariza as informações correspondentes às diferentes propostas da literatura para o de diagrama de fases e grupos de componentes dos RSU.

| Referência | Relação Volumétrica | Relação Gravimétrica | Distinção por Componentes | Grupos de Materiais | Comportamento Mecânico | Modelo Constitutivo | |
|--------------|-----------------------|----------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------------------|--|
| | Zhang et al. (2010) | Stoltz et al. (2010) | Edjabou et al. (2015) | Dixon e Langer (2006) | Dixon e Langer (2006) | Machado et al. (2002, 2008, 2017) | |
| | Machado et al. (2017) | | Dixon e Langer (2006) | | Chen et al. (2009) | | |
| | | | | | Abreu e Vilar (2017) | | |
| RSU | Sólidos | Resíduos | Plásticos | Sintéticos Moles | Reforço | Fibras | |
| Têxteis | | | Sintéticos Duros | | | | |
| Borracha | | | Metais | | | | |
| Metais | | | Metais | Incompressíveis | | | |
| Solos/Britas | | | Minerais | | | | |
| Cerâmicas | | | Minerais | | | | |
| Vidros | | | Madeiras | | | | |
| Madeiras | | | Papéis | | | | |
| Papéis | | | Papéis | | | | |
| Alimentares | | | Orgânicos | Compressíveis | Pasta Orgânica | | |
| Jardinagem | | | Orgânicos | | | | |
| Particulados | | | Outros | | | | |
| Grande Porte | | | Outros | | | | |
| Infiltração | | | Líquidos | Líquidos | | | |
| Lixiviados | | | Líquidos | | | | |
| Ar | Líquidos | | | | | | |
| Gases | Gases | Gases | | | | | |
| Degradação | Gases | | | | | | |
| Intra-vazios | | | | | | | |
| Inter-vazios | | | | | | | |

Notas: Retângulos em mesma posição vertical e hachuras iguais indicam semelhanças entre as categorias de diferentes classificações.

Figura 2.2 – Sugestões de diagrama de fases e grupos de componentes dos RSU na literatura.

2.1.3. MECANISMOS DE CISALHAMENTO DOS RSU

Mecanismos da interação entre a matriz básica e fibrosa dos resíduos têm sido foco de estudo de diferentes trabalhos que buscam a relação entre tensões e deformações apresentadas pelos RSU por meio de ensaios triaxiais e de cisalhamento direto. Estes ensaios apresentam características distintas de mobilização da resistência ao cisalhamento dos materiais, especialmente quanto aos planos preferenciais de ruptura (Reddy et al., 2009a; Asadi et al., 2017), fato este ilustrado na Figura 2.3.

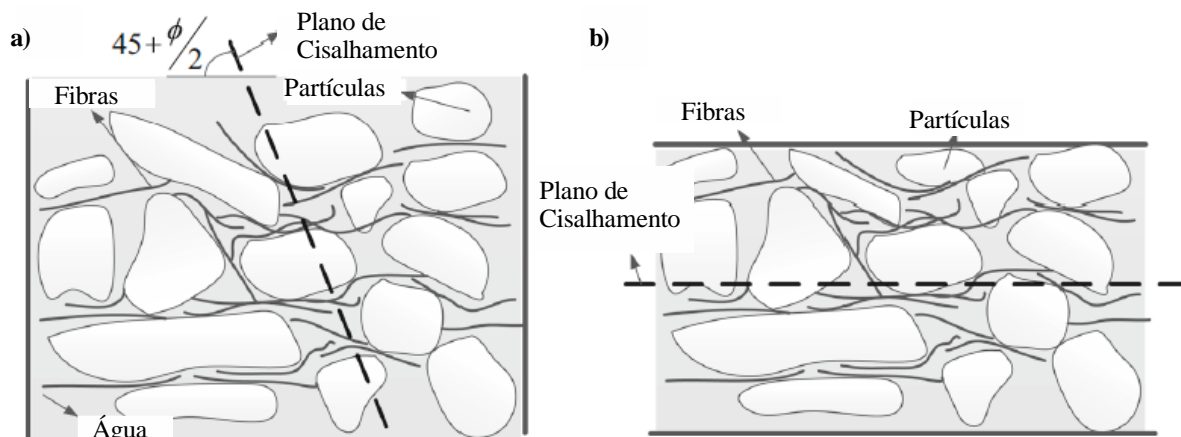


Figura 2.3 - Orientação dos planos de ruptura em diferentes ensaios de resistência de RSU: (a) Triaxiais; (b) Cisalhamento direto. Fonte: Adaptado de Asadi et al. (2017).

O modelo de mecanismo cisalhante dos RSU proposto por Kölsch (1995) apresenta quatro estágios de mobilização de resistência em ensaios de cisalhamento direto (Figura 2.4): inicialmente as fibras não são mobilizadas e o comportamento cisalhante torna-se preponderantemente atritivo (A), enquanto que o avanço da deformação cisalhante inicia a mobilização das forças de tração (B), aumentando sua magnitude consideravelmente. No estágio (C) as fibras são rompidas ou arrancadas, de modo que os parâmetros de resistência diminuem até o ponto (D) onde a mobilização das fibras no plano cisalhante é mitigada. A magnitude da influência das fibras fica dependente de sua orientação no plano cisalhante, de forma que orientações paralelas ao plano não afetam a resistência significativamente, enquanto que orientações que tendem à perpendicularidade influenciam ativamente a resistência (Keramati et al., 2018). O enrijecimento devido à ação das fibras pode ser incorporado em algumas análises de estabilidade de taludes e critérios de ruptura (Kölsch, 1995; Borgatto, 2006; Mahler e Lamare Neto, 2006; Norberto, 2019).

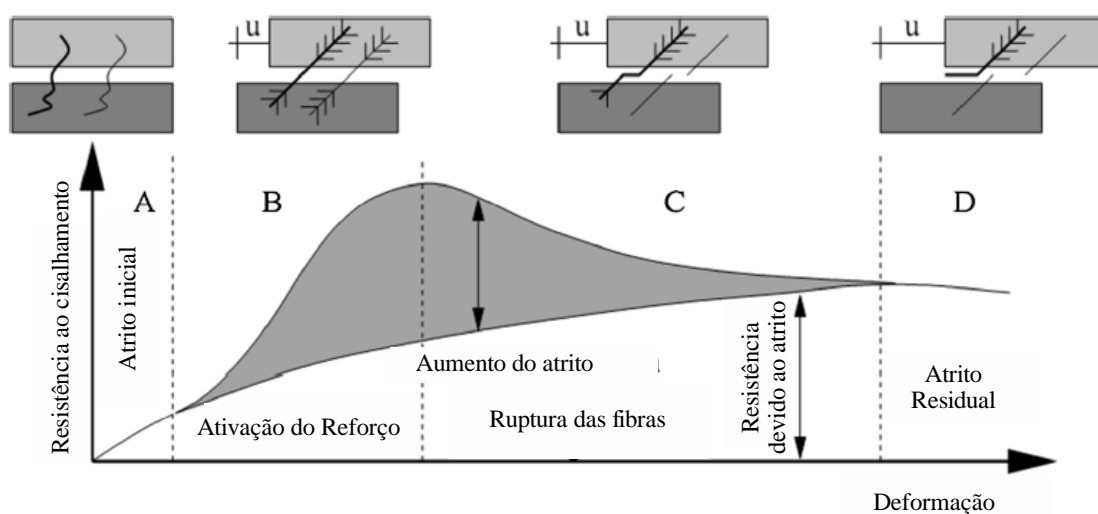


Figura 2.4 – Modelo de mecanismo cisalhante proposto por Kölsch (1995). Fonte: Adaptado de Keramati et al. (2018).

Li e Shi (2014) também constataram o efeito da matriz fibrosa em ensaios triaxiais com diferentes trajetórias de tensão (Figura 2.5). Os autores observaram que para trajetórias de carregamentos anisotrópicos ($\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_3 = 2,5$; $\Delta\sigma_3 > 0$) e compressão triaxial convencional ($\Delta\sigma_1 > 0$; $\Delta\sigma_3 = 0$), o comportamento de tensão deformação no diagrama $q \times \varepsilon_a$ apresenta um ponto de enrijecimento (Figura 2.5a), de forma que deformações inferiores a este ponto ocasionam a mobilização da parcela de atrito interno da matriz básica, enquanto que deformações superiores a este ponto mobilizam também a parcela fibrosa. A partir deste ponto, Li e Shi (2014) recomendam que os parâmetros de resistência dos RSU sejam determinados para o intervalo de $\pm 5\%$ de deformação, recomendação semelhante à Zekkos et al. (2012) e Ramaiah e Ramana (2017) que utilizaram o critério de $\pm 5\%$ de deformação a partir da condição de estado de tensão em repouso ($K_0 = 0,3$).

Para trajetórias de tensão com compressão normal média constante ($\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_3 = -2,0$; $\Delta\sigma_3 < 0$) e compressão anisotrópica reduzida ($\Delta\sigma_1/\Delta\sigma_3 = -0,5$; $\Delta\sigma_3 < 0$), Li e Shi (2014) observam a ausência do ponto de enrijecimento, definindo o ponto de ruptura como referencial da resistência ao cisalhamento dos RSU (Figura 2.5b).

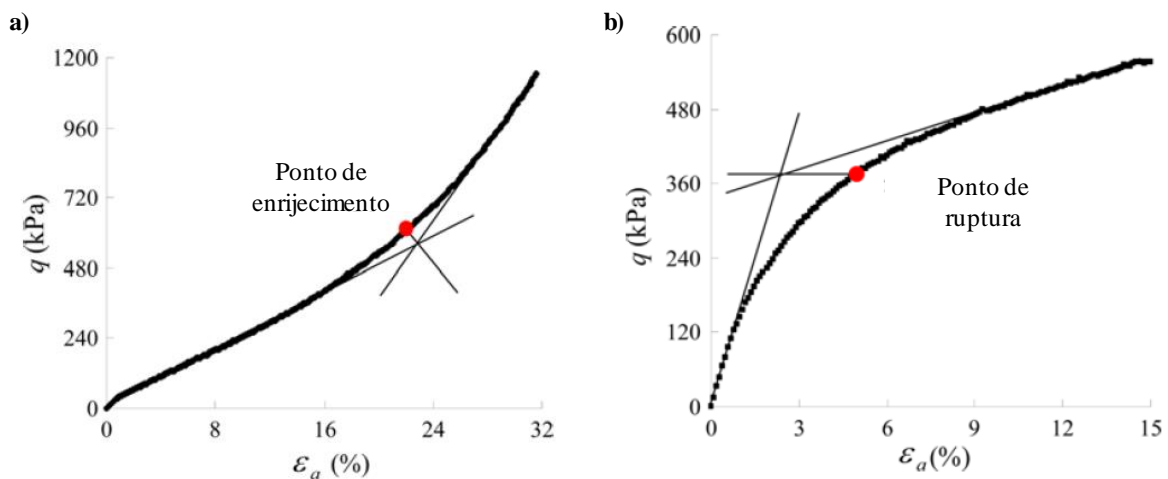


Figura 2.5 – Critérios de ruptura dos RSU para diferentes trajetórias de tensão: (a) Concavidade positiva; (b) Concavidade negativa. Fonte: Adaptado de Li e Shi (2014).

As propostas de consideração do efeito das fibras no reforço dos resíduos e da pasta orgânica governar as deformações iniciais, primárias e secundárias do aterro têm sido aceitas no meio científico a partir de modelos que consideram uma ou mais destas parcelas. As propostas associam contribuições da mecânica dos solos e ciências biológicas analisando, sobretudo, as contribuições das parcelas correspondentes à biodegradação no comportamento mecânico dos RSU (Marques et al., 2003; Sivakumar Babu et al., 2010; Chouksey e Babu, 2015).

Machado et al. (2002) propuseram, inicialmente, um modelo para avaliação das relações tensões-deformações, considerando a influência das fibras no comportamento da massa de resíduos, modelo este posteriormente adaptado incorporando efeitos de deformações secundárias (Machado et al.,

2008) e carregamentos não drenados (Machado et al., 2017). Bareither et al. (2012) observaram um comportamento curvilíneo hiperbólico para as curvas tensão-deformação dos RSU analisados. Para Li e Shi (2014), este comportamento de enrijecimento com o nível de deformação pode se mostrar mais ou menos acentuado de acordo com a trajetória de tensões vivenciada pela amostra. Neste sentido, Asadi et al. (2017) propuseram um modelo constitutivo hiperbólico para a previsão do comportamento tensão-deformação dos RSU, fato este também objeto de estudo do trabalho de Keramati et al. (2018). Atualmente, os modelos constitutivos para os RSU têm incorporado além das características hiperbólicas e comportamento da matriz básica e fibrosa, conceitos de compressibilidade das partículas, carregamentos não drenados, modelagem fractal e critérios não lineares (Gao et al., 2017; Lü et al., 2017, 2018; Machado et al., 2017; Xu, 2018).

Para a compreensão do comportamento mecânico dos RSU, é necessário compreender seu comportamento tensão-deformação, caracterizá-los e definir os parâmetros de resistência ao cisalhamento segundo as envoltórias de Mohr-Coulomb (coesão e ângulo de atrito). Determinações de parâmetros de resistência ao cisalhamento em ensaios de campo e laboratório são frequentes na literatura de RSU. E, apesar de existir uma predominância na consideração de envoltórias lineares, diferentes autores constataam a influência da tensão normal confinante na envoltória de resistência dos RSU (Quadro 2.3), podendo apresentar envoltórias bilineares, trilineares ou não lineares.

Quadro 2.3 – Exemplos de propostas de envoltórias de resistência ao cisalhamento para os RSU

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

Fonte: Adaptado de Ramaiah et al. (2017).

A obtenção dos parâmetros de resistência pode ser realizada em termos de tensões totais ou efetivas, sendo que a utilização de parâmetros de resistência totais permite uma melhor aproximação do comportamento real do aterro, uma vez que em grande parte de sua vida útil, os resíduos apresentam-se não saturados, além de ser complexa sua avaliação no aterro (Bareither et al., 2012). Ademais, o fato de os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU serem influenciados pelas características das amostras (como composição gravimétrica, estágio de degradação e compacidade) e da metodologia de ensaios utilizada (equipamento, velocidade e nível de deformação), deve ser considerado.

2.2. FATORES QUE AFETAM A RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DOS RSU

Observa-se uma grande variação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU na literatura. Por um lado, a composição dos RSU varia em função do local onde é gerado (condição socioeconômica da população, atividades econômicas principais, gestão dos resíduos etc.) e, mesmo em um aterro sanitário, varia com a operação do aterro, o tempo de disposição e a localização no maciço sanitário. Por outro lado, os ensaios de laboratório e de campo para determinar os parâmetros de resistência não são ainda normatizados para RSU. Este capítulo aborda alguns fatores que influem na determinação da resistência ao cisalhamento dos RSU.

2.2.1. TIPO, EQUIPAMENTO E VELOCIDADE DE ENSAIO

Apesar de não haver consenso acerca do método de ensaio mais adequado para a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU, na literatura predominam determinações de ensaios de cisalhamento direto. Segundo Kavazanjian et al. (1995) e Eid et al. (2000), esses valores apresentam melhor proximidade com resultados de retroanálises de rupturas de aterros e análises de aterros estáveis. Contudo, Reddy et al. (2009a, 2009b) e Shariatmadari et al. (2014) também acrescentam a importância da avaliação do comportamento não drenado dos RSU, que afeta a estabilidade global dos aterros sanitário e está associado às sobrepressões geradas por carregamentos rápidos. O comportamento não drenado, segundo os autores, deve ser avaliado por ensaios triaxiais consolidados isotropicamente e não-drenados; realmente, os ensaios de cisalhamento direto, mesmo que realizados com taxa de deformação elevada, não garantem a manutenção das sobrepressões em materiais de permeabilidade média ou elevada, como pode ser o caso dos RSU. Ademais, o próprio processo de amostragem, segregação de componentes e escolha do método de ensaio (tipo, forma e dimensões do equipamento) alteram a moldagem e composição das amostras de RSU, como salientam Harris et al. (2006) e Caicedo et al. (2002).

Embora os RSU sejam muito deformáveis e rompam com grandes deformações, a resistência ao cisalhamento dos RSU pode ser determinada para pequenas deformações em ensaios de cisalhamento direto, uma vez que o plano preferencial de ruptura é imposto pelo próprio equipamento e procedimento experimental. O processo de compactação tende a orientar os materiais fibrosos (Cho et al., 2011), porém no ensaio de cisalhamento direto o efeito de enrijecimento torna-se menos expressivo decorrente da menor mobilização fibrosa no plano de cisalhamento (Zekkos et al., 2010b; Karimpour Fard et al., 2014). Nos ensaios triaxiais, o comportamento tensão-deformação geralmente apresenta uma relação curvilínea de concavidade positiva (para cima) (Machado et al., 2002; Zhan et al., 2008) até determinada tensão, a partir da qual a concavidade da curva pode se tornar negativa com o avanço da deformação, como mostram a Figura 2.4 e a Figura 2.5a. Este comportamento se mantém mesmo em ensaios não

drenados, onde a pressão neutra aumenta rapidamente durante o estágio de cisalhamento e se estabiliza em um valor próximo à pressão de confinamento (Machado et al., 2014).

Com relação à velocidade de ensaio, o aumento de velocidade (0,25 para 2,25%/min) acarretou num ganho de 15% na resistência dos resíduos estudados por Zekkos e Fei (2017), enquanto que para Keramati et al. (2018) o ganho foi da ordem de 25 a 50% (cuja velocidade variou de 0,8 para 8 e para 19 mm/min), decorrente, sobretudo, do maior intertravamento entre os componentes e partículas.

2.2.2. NÍVEL DE DEFORMAÇÃO

A constatação do ganho de resistência com o acréscimo da deformação dos RSU tem sido presente nos trabalhos da literatura por apresentar uma melhor caracterização do comportamento mecânico destes materiais, sobretudo, quanto às orientações de projeto. Na Figura 2.6 verifica-se a mobilização dos parâmetros de resistência frente ao “efeito fibra” investigada nos trabalhos de Zhao et al. (2014) e Gao et al. (2015).

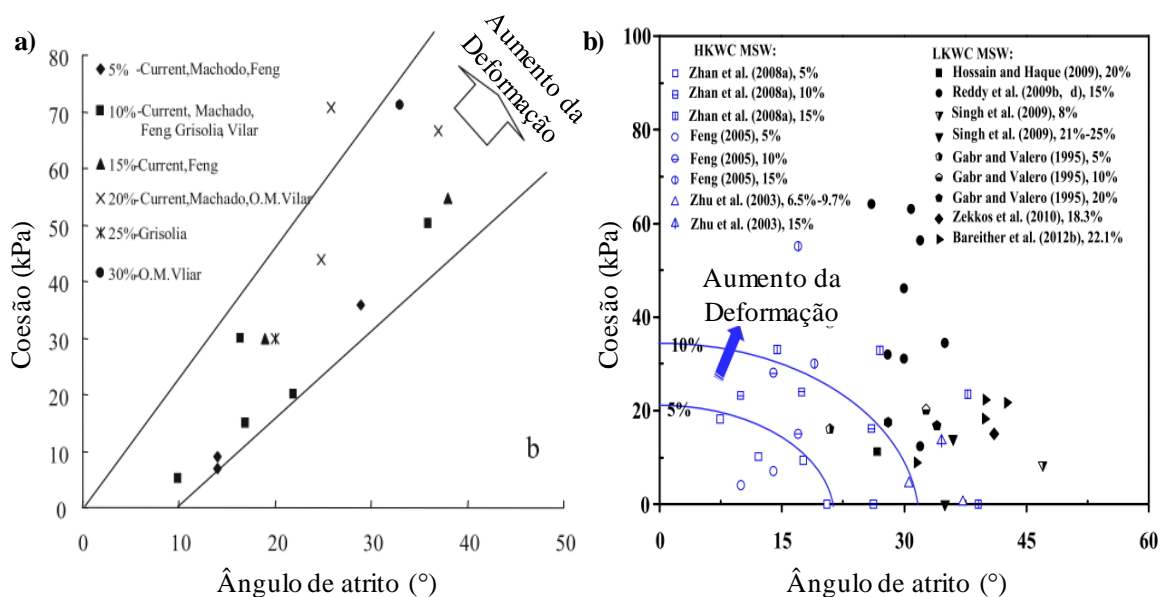


Figura 2.6 – Ganho de resistência dos RSU ao longo da deformação: (a) Adaptado de Zhao et al. (2014); (b) Adaptado de Gao et al. (2015).

Ramaiah e Ramana (2017) realizaram ensaios de cisalhamento direto em RSU provenientes de um aterro sanitário da Índia e compararam seus resultados com outros de RSU provenientes de outros países (Figura 2.7). Verifica-se que o aumento da deformação ocasionou no aumento dos parâmetros de resistência, sobretudo na coesão. Este comportamento também é retratado nos trabalhos de Zhan et al. (2008) e Abreu e Vilar (2017), que o relacionam com o efeito da mobilização da matriz fibrosa dos

RSU, diretamente associada à coesão desempenhada pelo material. O efeito do enrijecimento também é observado para o ângulo de atrito, contudo, em magnitudes menores (Cho et al., 2011).

Decorrente do comportamento de enrijecimento e ganho de resistência com o aumento da deformação, faz-se necessária a adoção de níveis de deformação para a determinação dos parâmetros mecânicos dos RSU (Campi e Boscov, 2011; Machado et al., 2014). Através de comparação de resultados de ensaios de laboratório com retroanálises de rupturas de aterro sanitário, Stark et al. (2009) sugeriram a utilização de níveis de deformação da ordem de 20% para a determinação das tensões de picos (máximas atuantes) em projetos de aterro sanitário, valor também recomendado para a utilização dos modelos constitutivos de Machado et al. (2002, 2008, 2017).

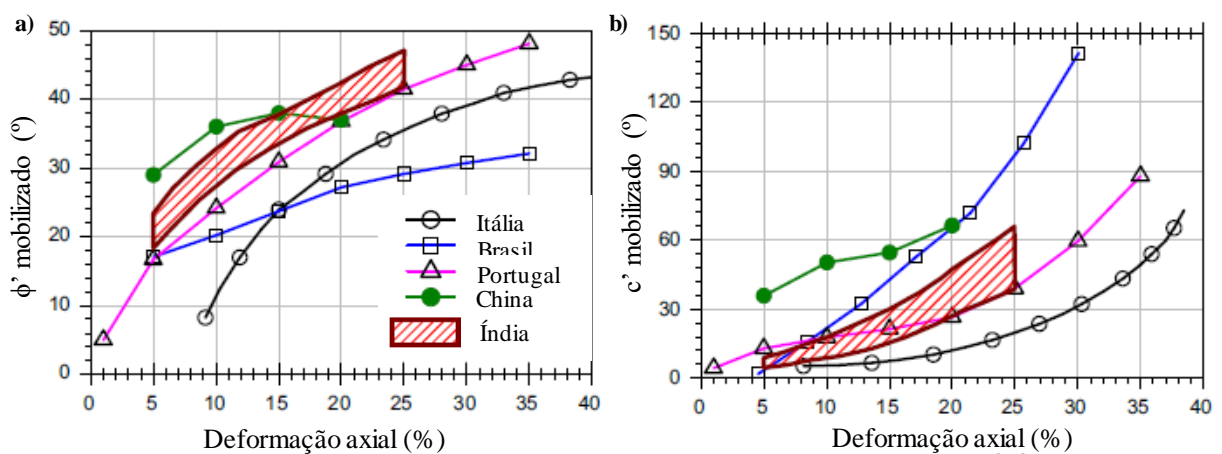


Figura 2.7 – Influência da deformação nos parâmetros de resistência dos RSU: (a) Ângulo de atrito; (b) Coesão. Fonte: Adaptado de Ramaiah e Ramana (2017).

Shariatmadari et al. (2014) elucidam que níveis de deformação superiores a 15% poderiam ocasionar problemas de desempenho no aterro, como a fissuração da camada de cobertura dos aterros sanitários. Borgatto et al. (2014) a partir de recomendações de normas alemãs, também orientam a adoção deste nível para a execução de ensaios de resistência. De forma geral, os trabalhos que avaliam os parâmetros de resistência dos RSU apresentam suas envoltórias em termos de níveis de deformação inferiores a 20% (Zhan et al., 2008; Karimpour-Fard et al., 2011). Outros autores recomendam deformações de 5 a 10%, condizentes com deformações aceitáveis em campo, considerando movimentação de tubulações, canaletas, marcos superficiais, entre outros (Campi e Boscov, 2011).

2.2.3. COMPOSIÇÃO

Além da influência nos procedimentos de execução de aterros sanitários e compactação mecânica dos RSU, a composição afeta diretamente o comportamento dos parâmetros mecânicos dos

RSU. Além disso, como políticas e o apelo ambiental tem gerado uma crescente demanda por aterros, sobretudo em países subdesenvolvidos, faz-se necessária a avaliação do comportamento que estes materiais irão desempenhar sobre diferentes configurações de componentes nos RSU (Cho et al., 2011).

Cho et al. (2011) destacam a influência de diferenças regionais, culturais, sazonais e políticas na composição dos resíduos, ao comparar o teor orgânico médio de aterros chineses (da ordem de 73%) com aterros dos Estados Unidos (12,5%). Em países desenvolvidos predominam frações inorgânicas dos RSU, enquanto as frações orgânicas são majoritárias em países em desenvolvimento e subdesenvolvidos (Gao et al., 2015; Yang et al., 2018). A avaliação das frações quanto ao seu comportamento potencial de biodegradação é apresentada no Quadro 2.4, segundo diferentes propostas para classificação dos grupos de componentes dos RSU.

Quadro 2.4 – Classificações de componentes quanto à composição

| Observação | Referências | Biodegradável | Inorgânico |
|--|-------------------------|---|--|
| Composições presentes em aterros de diferentes países | Gao et al. (2015) | Resíduos Alimentares; Papel; Têxteis e Couro; Madeira | Plásticos; Metais; Outros |
| Categorização dos Componentes | Dixon e Langer (2006) | Papel/Papelão; Parcelas de Plásticos Rígidos; Madeira/Couro; Orgânicos; | Plásticos Flexíveis; Metais |
| | Fricke et al. (1999) | Parcelas de Miscelânea | Minerais; Parcelas de Plásticos Rígidos; Parcelas de Miscelâneas |
| Análise de resíduos combustíveis e inertes | Bareither et al. (2012) | Papel/Papelão; Plástico; Madeira; Têxteis; Orgânicos | Solo/Brita; Vidro; Metais; Variados |
| Potencial e forma de degradação | Landva e Clark (1990b) | Putrescíveis: Resíduos alimentares; Resíduos de poda e jardinagem; Resíduos animais; Materiais contaminados por estes Não putrescíveis: Papéis; Madeiras; Têxteis e Couro; Plásticos e Borracha; Tinta; Óleo e Graxa; Químicos e Lodo | Degradáveis: Metais Não degradáveis: Vidro; Cerâmica; Solo Entulho; Cinzas; Concreto; Alvenaria |

Para a determinação da porcentagem orgânica presente nos RSU, definem-se indicadores, tais como o teor de sólidos voláteis - TSVs, o teor de conteúdo orgânico – TOC (Zhao et al., 2014) e a razão resíduos combustíveis/inertes – C/I (Bareither et al., 2012). A definição desses indicadores auxilia na avaliação da influência dos componentes orgânicos nos parâmetros de resistência dos RSU.

Cho et al. (2011) avaliaram a influência do teor orgânico nos parâmetros de resistência dos RSU, sobretudo, sua influência no ângulo de atrito. Os autores constataram que, à medida que o teor de resíduos alimentares aumenta, o ângulo de atrito diminui, uma vez que os RSU se tornam mais pastosos (Figura 2.8a). Observações semelhantes foram encontradas por Bareither et al. (2012) confrontando envoltórias para diferentes valores de C/I e Zhao et al. (2014) para diferentes valores de TOC de RSU (Figura 2.8). Os efeitos do conteúdo orgânico na parcela coesiva foram inconclusivos nesses trabalhos.

Para Pulat e Yukselen-Aksoy (2017), a diminuição da parcela biodegradável nos RSU sintéticos moldados em laboratório resultou em um expressivo aumento do ângulo de atrito e diminuição da

parcela coesiva, observação também constatada previamente por Gao et al. (2015) e Abreu e Vilar (2017).

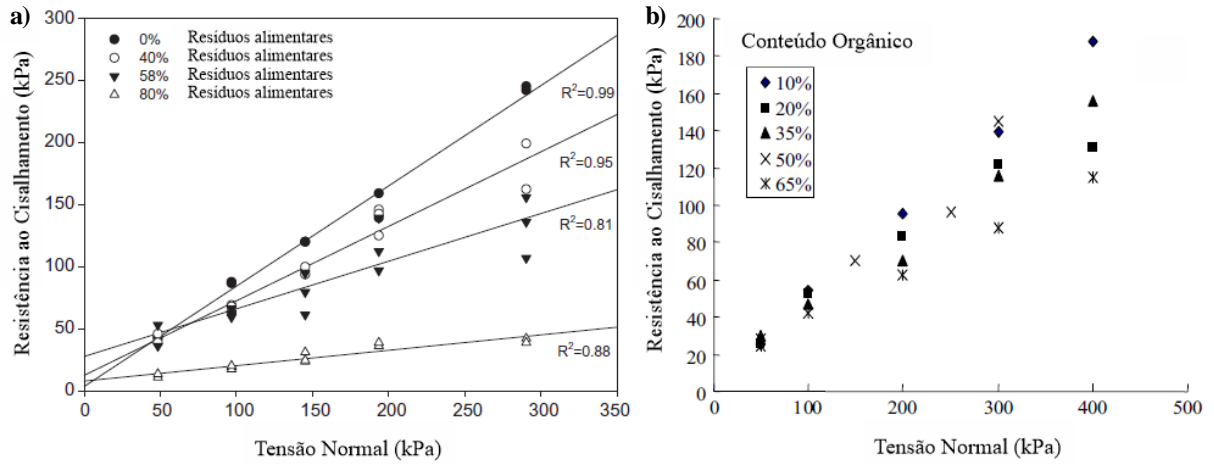


Figura 2.8 – Envolórias de resistência para diferentes TOC: (a) Adaptado de Cho et al. (2011); (b) Zhao et al. (2014).

Outro aspecto que altera a resistência dos RSU é a parcela da matriz fibrosa, avaliada em termos de teor e orientação das fibras. Da variabilidade regional da composição gravimétrica dos resíduos decorre a variabilidade das porcentagens gravimétricas dos elementos fibrosos (reforços) presente na massa de RSU. Machado et al. (2014) reforçam que teores de sintéticos (plástico, borracha, têxteis) da ordem de 20% a 25% são considerados elevados na literatura, decorrente do volume associado a estes materiais de baixo peso específico.

De forma geral, estudos de diferentes localidades retratam a alteração do comportamento tensão-deformação dos RSU devido ao aumento da parcela fibrosa nestes materiais, apresentando ausência de picos de resistência e apresentando enrijecimento com o aumento da deformação (Figura 2.9). Este comportamento implica na alteração das envolórias de resistência, que apresentam aumento significativo na parcela coesiva e menos expressivo na parcela de atrito com o incremento do teor de fibras (Borgatto, 2006; Reddy et al., 2009a).

As fibras ainda auxiliam para o suporte lateral das amostras, desempenhando um papel de contenção durante carregamentos não drenados, evitando o fenômeno de liquefação estática (Ramaiah e Ramana, 2017). Já em RSU com baixo ou nenhum teor de fibras, a resistência ao cisalhamento se dá mediante a interação das partículas (pasta) da matriz básica (Reddy et al., 2009a).

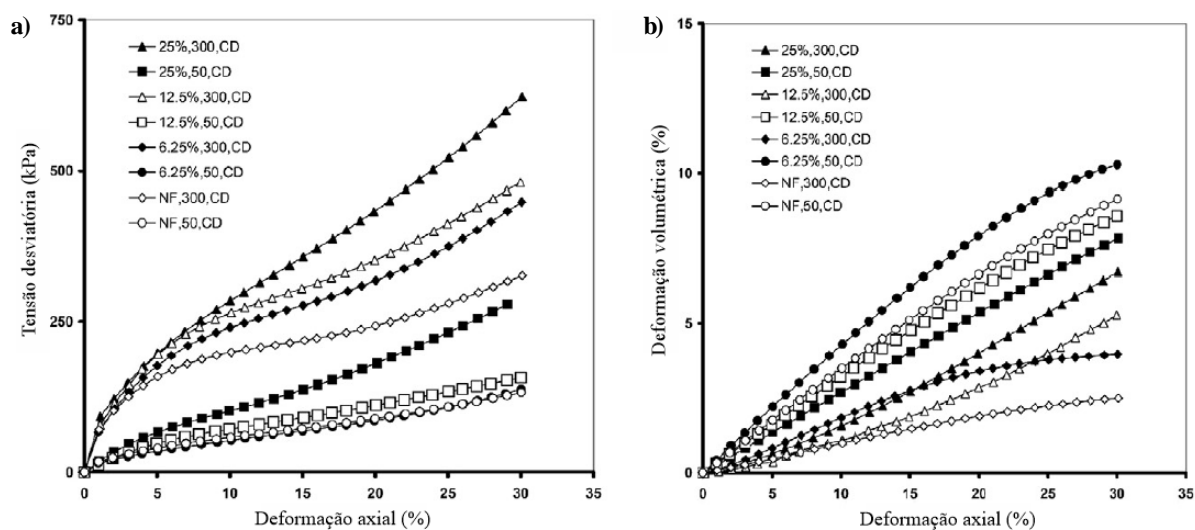


Figura 2.9 – Influência do teor de fibras nos ensaios triaxiais de RSU: (a) Tensão desviatória; (b) Deformação volumétrica. Fonte: Adaptado de Karimpour-Fard et al. (2011).

Na Figura 2.10, verifica-se que, em termos quantitativos, o aumento do teor de fibras ocasionou aumento das envoltórias de resistência dos resíduos estudados por Karimpour-Fard et al. (2011). De modo análogo, Abreu e Vilar (2017) observaram um aumento expressivo para a coesão de resíduos brasileiros, da cidade de São Carlos (SP), com teores de fibras de 40 a 80%.

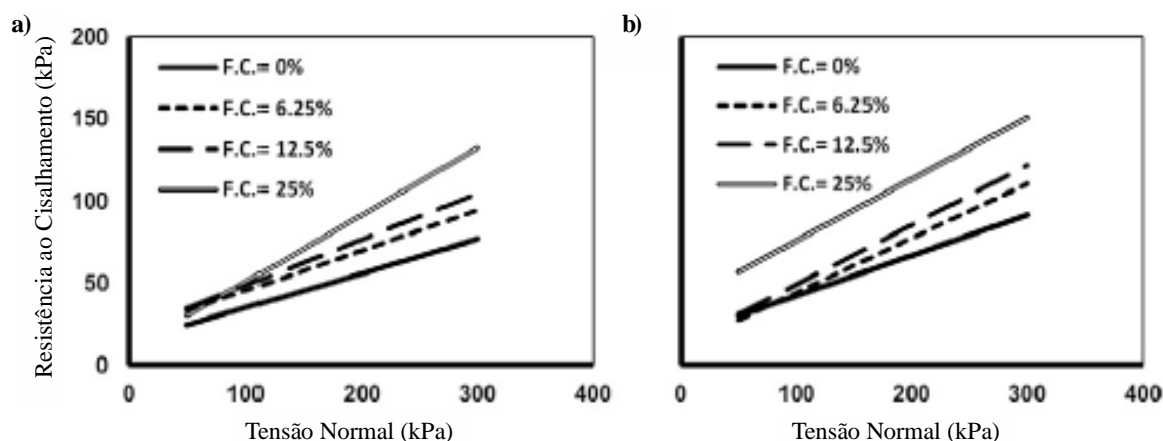


Figura 2.10 – Influência do teor de fibras nas envoltórias de resistência ao cisalhamento dos RSU: (a) Condições não-drenadas; (b) Condições drenadas. Fonte: Adaptado de Karimpour-Fard et al. (2011).

A orientação das fibras internamente aos RSU influencia na mobilização de tensões internas dos elementos de reforço, potencializando ou mitigando seu efeito no compósito de RSU. Karimpour-Fard et al. (2014) observaram um aumento superior a 50% na magnitude do ângulo de atrito com o aumento da orientação das fibras, para orientações superiores a 60°. De forma geral, orientações preferencialmente horizontais e sub-horizontais são observadas na literatura (Reddy et al., 2009a; Zekkos et al., 2010b; Ramaiah et al., 2017). Estas orientações são mobilizadas de formas distintas em

ensaios de cisalhamento direto e triaxiais, o que justifica a diferença entre os parâmetros de resistência obtidos em cada ensaio (Marques et al., 2003; Zekkos et al., 2010a, 2010b; Li e Shi, 2014).

2.2.4. ESTÁGIO DE DEGRADAÇÃO

Reddy et al. (2015) e Pulat e Yukselen-Aksoy (2019) definem a degradação como a conversão da matéria orgânica presente nos RSU em biogás e lixiviados, cujo processo é resultante de ações físicas (diminuição das partículas), químicas (hidrólise, sorção, troca iônica e precipitação) e biológicas (processos aeróbios e anaeróbios, como a metanogênese). O processo de degradação depende de diferentes fatores, como condições climáticas, temperatura, condições biológicas, umidade, pH, condições químicas, componentes dos resíduos, dentre outras.

De maneira geral, a degradação dos RSU passa por cinco fases biogeoquímicas (Farquhar e Rovers, 1973; Rees, 1980; Pohland e Harper, 1987; Fannin e Roberts, 2006). Simplificadamente, a fase 1 se caracteriza principalmente pela digestão aeróbia (curto prazo), seguida da fase 2 (transição) onde condições anaeróbias começam a se estabelecer. Na fase 3 (acidogênese), o oxigênio é consumido e ocorre gerações de ácidos, reduzindo pH e aumentando DQO e DBO do aterro. Na fase 4 (metanogênese) a geração de gás metano e dióxido de carbono se intensifica. A fase 5 (maturação) se inicia após o consumo dos materiais orgânicos facilmente degradáveis, caracterizando uma queda na produção dos gases da fase anterior. O Quadro 2.5 reúne as informações correspondentes às fases de degradação e as respectivas estimativas de duração.

Quadro 2.5 - Esquema geral das fases de degradação do RSU

| Fase (Pohland e Harper) | Processo Biogeoquímico (Fanin e Roberts) | Duração (Fanin e Roberts) |
|----------------------------|--|------------------------------|
| I Aeróbia | Hidrólise e degradação (ambiente aeróbio) | Horas a dias |
| II Transição | Hidrólise e fermentação (ambiente anaeróbio) | Dias a semanas |
| III Acidogênese | Acetogênese (ambiente anaeróbio) | 6 a 18 meses |
| A A IV Metanogênese | Metanogênese (ambiente anaeróbio) | Anos a décadas |
| V Maturação | Oxidação | |

Fonte: Alves e Bertolo (2012).

No tangente ao comportamento mecânico, Grisolia e Napoleoni (1996) explicam que os RSU passam por etapas de deformação acordo com seu processo de degradação, percorrendo a compressão inicial, adensamento primário, adensamento secundário (fluência), conclusão da decomposição da parcela orgânica e deformação residual, conforme observado na Figura 2.11. Este comportamento dependente do tempo contribui significativamente para a deformação dos aterros e influencia na capacidade de armazenamento e integridade das estruturas internas (Gao et al., 2017).

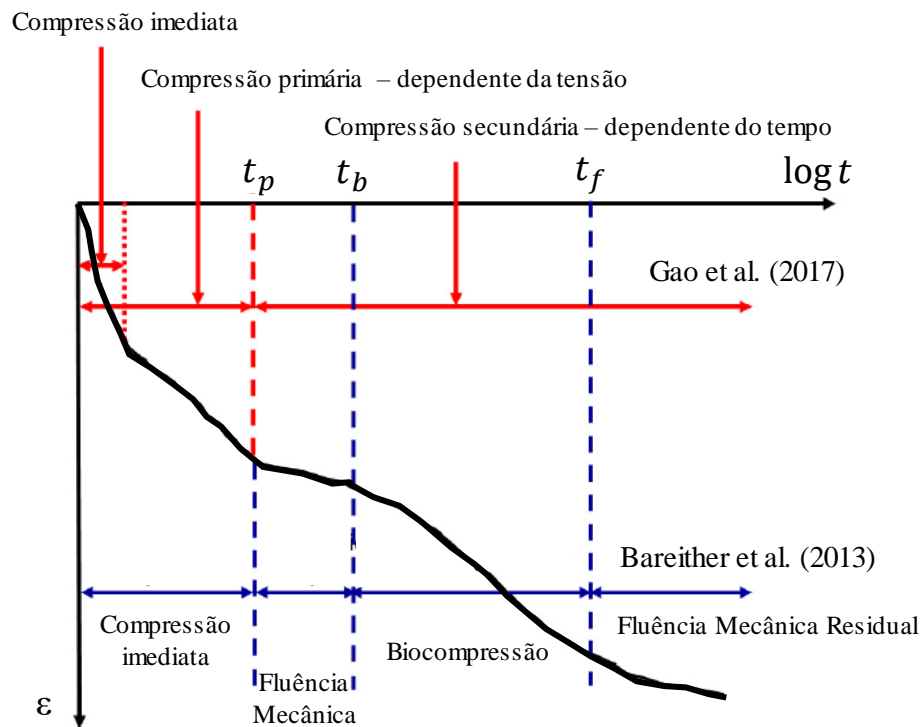


Figura 2.11 – Evolução da compressão dos RSU. Fonte: Adaptado de Gao et al. (2017).

Abreu e Vilar (2016) realizaram diferentes ensaios bioquímicos com amostras de resíduos coletados no aterro sanitário de São Carlos (Brasil), observando que o processo de biodegradação apresenta um significativo avanço após 5 anos de disposição no aterro. Diferentes processos físico-bioquímicos ocorrem no interior dos RSU que alteram a composição dos RSU ao longo do tempo. Como exemplos existe a deterioração por corrosão de componentes metálicos, dissoluções em componentes químicos, intemperismo, putrefação do conteúdo orgânico, este último correspondente à biodegradação que atua como principal agente degradador dos RSU. Neste sentido, se identificam os componentes orgânicos putrescíveis e não putrescíveis, e inorgânicos, degradáveis ou não (Landva e Clark, 1990b; Dixon e Langer, 2006).

Fricke et al. (1999) observam que a parcela de degradação mais significativa dos RSU se deve à biodegradação de restos de alimentos, varrição completar, seguida pelos papéis e madeiras. Nesses, a celulose é mais facilmente degradável em relação à hemicelulose e à lignina, sendo a lignina ainda mais persistente do que a hemicelulose (Gao et al. (2015). Reddy et al. (2015) categorizaram os componentes de RSU presentes no aterro sanitário dos EUA de forma a identificar componentes com maior facilidade de degradação. O Quadro 2.6 sintetiza os resultados destas duas pesquisas.

Quadro 2.6 – Potencial de degradação dos componentes de RSU

| Componentes | Potencial de degradação de acordo com a massa seca (%) (Fricke et al., 1999) | Dificuldade de Biodegradação (Reddy et al., 2015) |
|-----------------------------|---|--|
| Pasta orgânica | 76 | Fácil |
| Papéis | 76 | Média |
| Sintéticos Flexíveis | 0 | Difícil/Inerte |
| Sintéticos Rígidos | 23 | Difícil/Inerte |
| Metais | 0 | Inerte |
| Minerais | 0 | Inerte |
| Madeiras | 85 | Difícil |
| Miscelânea | 28 | Finos Residuais |

De forma análoga à composição, alguns indicadores qualitativos e quantitativos podem ser utilizados para a mensuração do estágio de degradação em que se encontram os RSU. O estágio de degradação dos RSU pode ser determinado através de análises bioquímicas, como teor de conteúdo orgânico (TOC), teor de sólidos voláteis (TVS), perda por ignição (LOI) e a determinação do grau de decomposição (DOD), este último apresenta diferentes definições, sendo frequente o uso da proposta de Andersland (1981) em trabalhos atuais (Reddy et al., 2011; Shariatmadari et al., 2014; Zhao et al., 2014). Análises bioquímicas dos RSU podem ser realizadas para determinar as taxas de celulose (C), hemicelulose (H) e lignina (L), de forma a correlacionar a razão entre os valores das substâncias de degradação facilitada (C+H) com a de difícil degradação (L). Ainda, o monitoramento dos tipos e volumes de gases gerados pela massa de resíduos pode ser realizado, associando-os aos estágios típicos de maturação (Hossain e Haque, 2009; Lakshmikanthan et al., 2018). O Quadro 2.7 sintetiza esses indicadores, bem como os associa qualitativamente com a intensidade de degradação.

Como ressaltam Bareither et al. (2012), é importante considerar as alterações das propriedades mecânicas dos RSU ao longo do tempo, sobretudo os parâmetros de resistência, para a avaliação do comportamento e estabilidade do aterro em todas as operações e etapas do ciclo de vida. A influência da degradação na resistência ao cisalhamento dos RSU é retratada em diferentes trabalhos, sem que haja consenso a respeito dos efeitos diretos desse processo no ângulo de atrito e na coesão dos resíduos. Para Machado et al. (2014), de forma geral, o avanço da degradação diminui a fração pastosa dos resíduos, de comportamento terroso, e aumenta a fração lamelar e planar, de comportamento fibroso, aumentando assim, a resistência ao cisalhamento dos RSU. Por outro lado, projetistas têm associado valores mais baixos de ângulo de atrito e de coesão a RSU mais degradados, com base em observações de campo (Boscov, 2008), possivelmente porque parte do material granular torna-se pastoso, diminuindo o atrito, sem que esse material pastoso seja coesivo.

Quadro 2.7 – Indicadores do Estágio de Degradação dos Resíduos

| Método | Observação | Referências | Inicial ⁽¹⁾ | Moderado ⁽²⁾ | Avançado ⁽³⁾ |
|----------------------------|--|--|--|--|--|
| Idade do RSU | Relacionada ao tempo previsto para cada um dos 5 estágios de degradação dos resíduos | Fannin e Roberts (2006) Zhan et al. (2008) | RSU com idade inferior a 3 anos | RSU com idade entre 3 e 6 anos | RSU com idade superior a 6 anos |
| | | Grisolia e Napoleoni (1996) Zhao et al. (2014) | Inferior a 1 ano | Entre 1 e 50 anos | Superior a 50 anos |
| (C+H)/L | Razão das concentrações de Celulose, Hemicelulose e Lignina | Gabr et al (2007) Lakshmikanthan et al. (2018) | RSU que apresentarem relação superior a 2 | RSU que apresentarem relação entre 1 e 2 | RSU que apresentarem relação inferior a 1 |
| | | Gao et al. (2015) | Elevadas parcelas de celulose e hemicelulose | Diminuição dos teores de celulose e hemicelulose | Aumento da fração de lignina sobre às demais |
| DOD (Grau de decomposição) | Determina os percentuais de degradação a partir do TOC | Shariatmadari et al. (2014) Zhao et al. (2014) Reddy et al. (2015) | RSU com DOD inferior a 40% | RSU com DOD entre 40 e 70% | RSU com DOD superior a 70% |

Notas: (1) Fases aeróbia e de transição; (2) Acidogenese; (3) Metanogenese e Maturação.

Reddy et al. (2011) realizaram ensaios triaxiais e de cisalhamento direto com RSU sintéticos (criados em laboratório a partir de composições de resíduos dos EUA) e observaram que o comportamento inicial da resistência ao cisalhamento apresenta preponderância de atrito, sendo que com o decorrer da degradação há uma diminuição do ângulo de atrito e um aumento da coesão. Os autores atribuíram este comportamento à seleção dos componentes para composição dos RSU, que apresentaram comportamento mais coesivo que o retratado nos estudos prévios. O comportamento granular dos resíduos jovens é mencionado na literatura desde os primeiros trabalhos técnicos e científicos sobre RSU, e é coerente com o fato de que os componentes ainda se encontram íntegros, ainda não sujeitos a avançados estágios de degradação. O comportamento mecânico durante o processo de degradação, no entanto, ainda é motivo de pesquisas. Bareither et al. (2012) obtiveram diferentes envoltórias de resistência para amostras com estágios de degradação distintos (Figura 2.12). Zhao et al. (2014) verificaram que após 30 dias os efeitos da biodegradação começam a afetar os parâmetros de resistência, de forma que durante os 270 dias de análises dos autores o ângulo de atrito aumentou de 14,4 para 27,9° e depois diminuiu para 20,4°, enquanto que a coesão atingiu seu maior valor de 22,2 kPa neste intervalo de tempo. Este comportamento foi atribuído à composição inicial de cada amostra. Deve-se também lembrar que o valor da coesão resulta do intercepto do ajuste linear de uma curva que é notoriamente não linear, como mostra a Tabela 2.3. O avanço de degradação de 6 meses aumentou em 10% os parâmetros de resistência dos RSU, no estudo de Keramati et al. (2018).

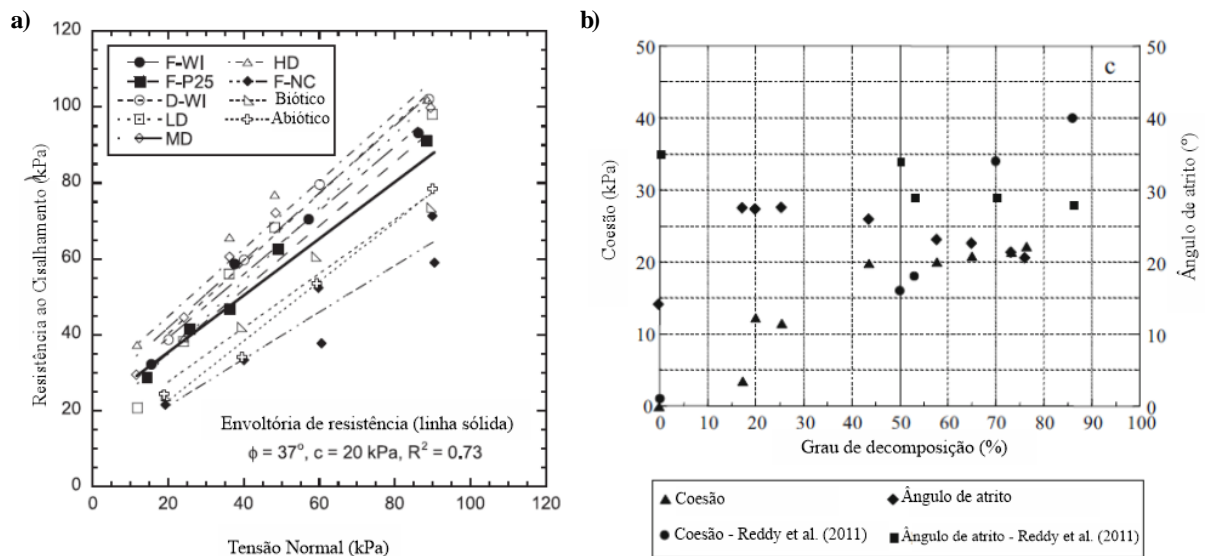


Figura 2.12 – Variação da resistência dos RSU com a degradação das amostras: (a) Pesquisa de Bareither et al. (2012); (b) Pesquisa de Zhao et al. (2014). Fonte: Adaptado de Bareither et al. (2012) e Zhao et al. (2014).

Gao et al. (2015) analisaram, a partir de resultados de ensaios de resistência com resíduos chineses, que a degradação potencializou o comportamento de atrito dos materiais ao passo que diminuiu a parcela coesiva de resistência (Figura 2.13). Ramaiah et al. (2017) também observaram a diminuição da coesão e aumento do atrito com o avanço da degradação, conclusão também presente no trabalho de Pulat e Yukselen-Aksoy (2017), que obtiveram uma redução de 10% na coesão e um aumento de 8% no ângulo de atrito no decorrer do processo.

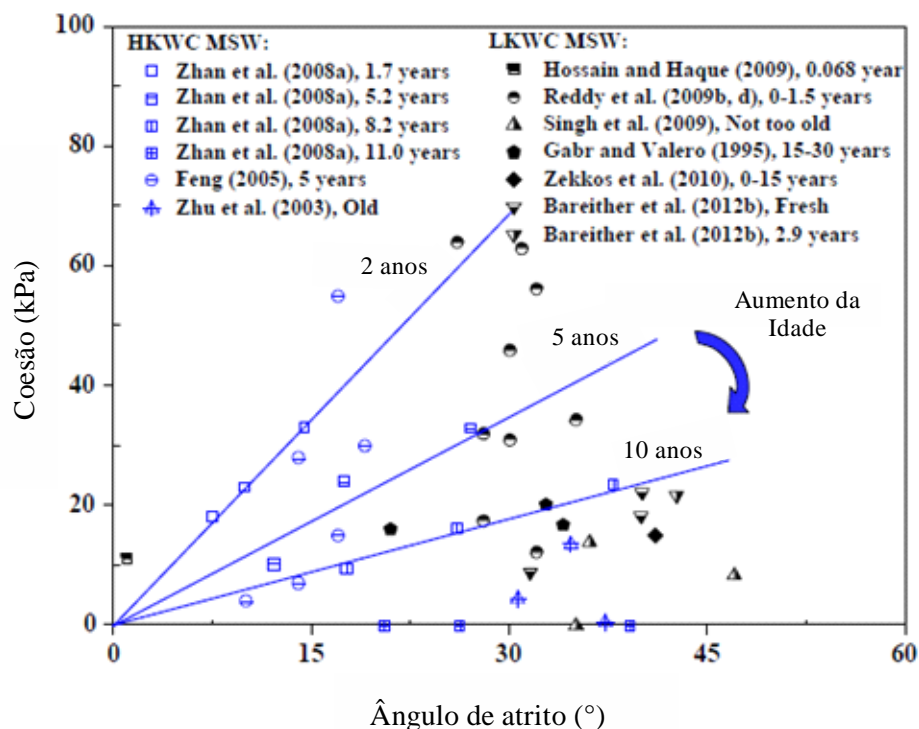


Figura 2.13 – Efeito da degradação nos parâmetros de resistência dos RSU. Fonte: Adaptado de Gao et al. (2015).

2.2.5. CONDIÇÕES OPERACIONAIS

Condições operacionais do aterro sanitário, como o emprego de camada de cobertura diária (Hossain e Haque, 2009), processo de compactação e teor de umidade inicial (Hanson et al., 2010; Cox et al., 2015), alteração do teor de umidade através de recirculação de lixiviado (Keramati et al., 2018), ou biodegradação (Abreu e Vilar, 2017), afetam diretamente os parâmetros de resistência dos RSU.

A compacidade (relação entre índices de vazios) dos RSU afeta condicionantes de capacidade de operação (vida útil do aterro, capacidade de alteamento), estabilidade de taludes, capacidade de carga da fundação, interfaces de *liners* do aterro e níveis de deformação que o maciço pode sofrer. Estas análises estão atreladas ao nível de sobrecarga a elas empregada e dependente, dentre outros fatores, do peso específico dos resíduos (Zekkos et al., 2006). A compacidade pode ser alterada pela compactação dos RSU em campo, que melhora as propriedades mecânicas dos resíduos, resultando no aumento da estabilidade de taludes, capacidade de carga. Cox et al. (2015) destacam a necessidade de se compreender o comportamento do peso específico dos RSU, sobretudo em situações de campo, para a determinação dos processos executivos e desempenho do aterro sanitário.

A influência do teor de umidade nas condições de compactação em diferentes amostras de RSU foi verificada no trabalho de Cox et al. (2015), que realizaram ensaios de compactação de meso e grande escala, observando a variabilidade dos parâmetros de compactação das amostras (Figura 2.14). Observaram que a variação no teor de umidade de 11 – 110% acarretou uma alteração do ângulo de atrito de 40 para 30°, uma vez que a exposição à umidade altera a absorção de água pelos componentes e aumenta a quantidade de líquido nos vazios internos e nos vazios intercomponentes (Dixon e Jones, 2005). Machado et al. (2014) atribuíram parcialmente a diferença dos parâmetros de resistência obtidos em sua pesquisa em relação a outros valores da literatura à umidade elevada dos RSU brasileiros, associada à fração orgânica, que é maior do que a encontrada nos RSU de países mais desenvolvidos.

Dixon e Jones (2005), Hanson et al. (2010) e Cox et al. (2015) observaram que inicialmente o peso específico é mais dependente de fatores como composição, teor de umidade, cobertura diária e grau de compactação nas condições operacionais. Com o tempo, o peso específico torna-se mais afetado por fatores climáticos, pela profundidade da amostra (níveis de tensão normal confinante) e grau de decomposição dos componentes. O Quadro 2.8 reúne alguns indicadores acerca da compacidade dos RSU.

O peso específico das amostras de RSU pode variar entre 3 a mais de 20 kN/m³, uma vez que condições de execução, composição, degradação e drenagem afetam significativamente este índice físico, além disto, a variação é observada entre aterros distintos e ao longo de um mesmo (Dixon e Jones, 2005; Zekkos et al., 2006; Zhan et al., 2008). Apesar da variabilidade espacial, é comum a utilização de valores médios em intervalos específicos para determinação de tensões verticais e horizontais em projetos de aterro sanitário (Dixon e Jones, 2005). Ramaiah et al. (2017) reuniram observações de peso específico em diferentes aterros (Figura 2.15a) enquanto Gao et al. (2015) observaram variações ao

longo da profundidade de aterros sanitários chineses com elevada porcentagem de resíduos orgânicos (Figura 2.15b), ilustrando a flutuação deste parâmetro.

Zekkos et al. (2006) reuniram diferentes trabalhos de determinação de peso específico em campo e laboratório, com valores em diferentes profundidades. Os autores observaram a predominância de um comportamento hiperbólico do aumento no valor do peso específico com a profundidade. O peso específico dos RSU ao longo da profundidade fica dependente do valor do peso específico superficial, que por sua vez é função das condições operacionais do aterro, variando de acordo com a energia de compactação empregada no aterro (baixa, típica e elevada).

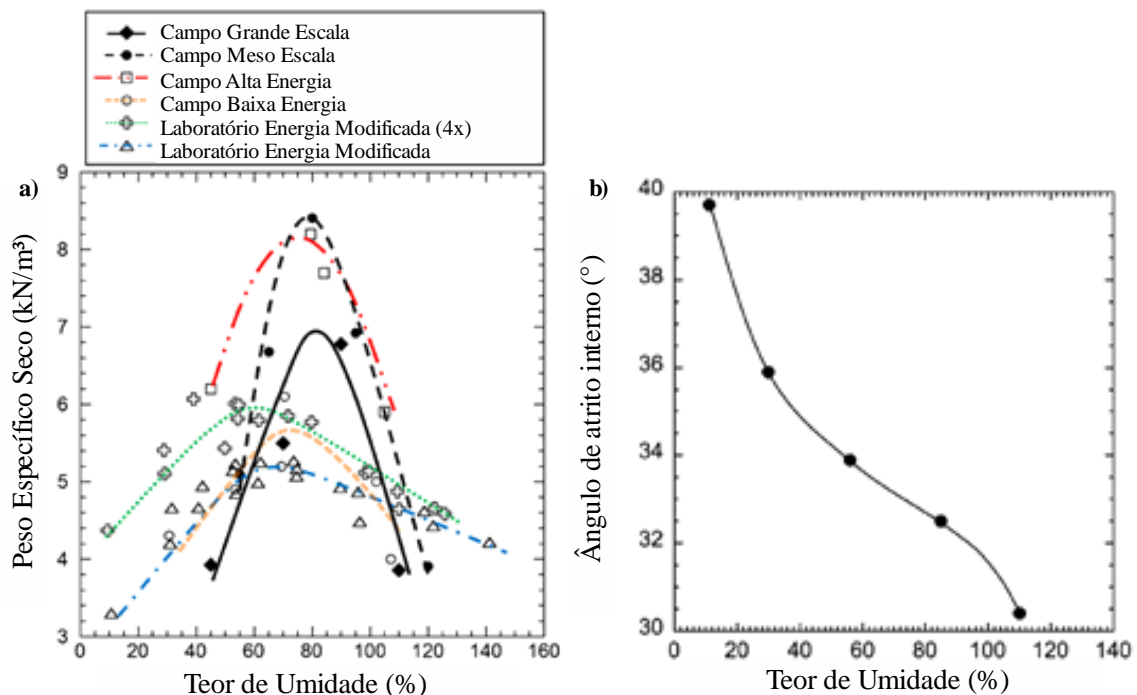


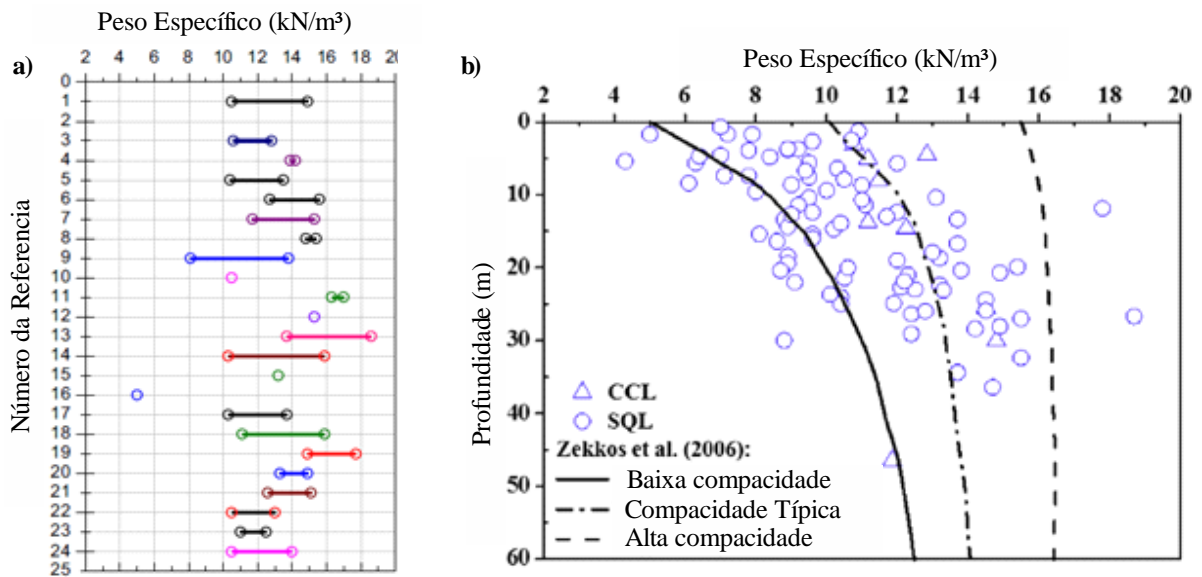
Figura 2.14 – Influência do teor de umidade nos parâmetros mecânicos dos RSU: (a) Peso específico seco; (b) Ângulo de atrito. Fonte: Adaptado de Cox et al. (2015).

Quadro 2.8 – Indicadores do nível de compactação dos resíduos sólidos urbanos.

| Indicador de compactidade | Referências | Baixa Compactidade | Típica Compactidade | Elevada Compactidade |
|--------------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Método de Disposição | Jahanfar et al. (2017b) | Vazadouro (Dumpsite) | --- | Aterro Sanitário (Landfill) |
| Peso Específico superficial | Zekkos et al. (2006) | Ordem de 5 kN/m³ | Ordem de 10 kN/m³ | Ordem de 15,5 kN/m³ |
| Análises da literatura internacional | Fassett et al. (1994) Dixon e Jones (2005) | Média de 5,3 – 7,0 kN/m³ 5 kN/m³ | Média de 9,6 kN/m³ 8 kN/m³ | --- |

O efeito da densificação e variação das propriedades dos RSU com a profundidade foi também observado por Abreu et al. (2016), cujas análises geofísicas constaram alteração no perfil de velocidades, frequência e propagação de ondas sísmicas ao longo da profundidade de um aterro sanitário brasileiro. Com relação aos parâmetros de resistência ao cisalhamento, Feng et al. (2017) realizaram ensaios com

amostras extraídas a 16 metros de profundidade, que apresentaram ganho da ordem de 40% no valor do ângulo de atrito decorrente da densificação, quando comparadas à amostras extraídas superficialmente. A alteração da compactação dos RSU também afetou os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos por Ramaiah et al. (2017), que apresentaram um aumento de 11 kPa para 28 kPa e 35,4° para 40,4°, para a variação de peso específico seco de 7,5 – 10,5 kN/m³. Este aumento também é relacionado ao incremento da tensão normal confinante nos ensaios. Zekkos e Fei (2017) alertam sobre o risco associado aos baixos valores de compactação na estabilidade de aterros de resíduos, uma vez que diminuem a resistência dos RSU.



Notas: (a) 1-11 Canadá; 12: EUA; 13:Brasil; 14-15: França; 16: Espanha; 17-18: Canadá; 19-21: EUA; 22: Irã; 23-24: Índia. (b) CCL: Chengdu Chang'an Landfil (China). SQL: Suzhou Qizishan Landfill (China).

Figura 2.15 - Variação do peso específico dos RSU: (a) Faixas Gerais; (b) Influência da profundidade. Fonte: Adaptado de Ramaiah et al. (2017) e Gao et al. (2015).

2.3. COMENTÁRIOS GERAIS

Diferentes fatores afetam a resistência ao cisalhamento dos RSU e devem ser considerados em aplicações e análises estruturais. Ainda não existe um consenso na literatura sobre os mecanismos de influência de cada fator na resistência dos RSU, devido às particularidades de cada pesquisa, compreendendo materiais, métodos e equipamentos diferentes. As recomendações para projetos de estabilidade de taludes de aterros sanitários devem atentar para esta variabilidade, incorporando continuamente os novos conhecimentos sobre o comportamento mecânico dos RSU. Nesse contexto, análises estatísticas de dados bibliográficos podem auxiliar na compreensão da influência desses fatores no comportamento da resistência ao cisalhamento dos RSU e auxiliar os geotécnicos na estimativa de parâmetros para projeto.

3. CARACTERIZAÇÃO ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DOS RSU

3.1. INTRODUÇÃO

A construção de aterros sanitários, combinada às técnicas de tratamento e disposição de resíduos, é uma alternativa ambientalmente adequada para a disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU). No entanto, os aterros sanitários são estruturas complexas do ponto de vista geotécnico, principalmente devido ao fato de os RSU comporem parte da estrutura. Conseqüentemente, os próprios resíduos devem resistir às solicitações durante a construção, operação e pós-fechamento dos aterros. Várias rupturas de taludes ocorridas na última década destacam a necessidade de melhorar as análises de estabilidade de aterros sanitários (Datta e Sivakumar Babu, 2016), por exemplo, por meio de mais rigor na estimativa das características de resistência e deformabilidade dos RSU (Colomer-Mendoza, 2013; Jahanfar et al., 2017b; Ramaiah et al., 2017; Keramati et al., 2018; Pulat e Yukselen-Aksoy, 2019).

Segundo Petrovic (2016), à dificuldade em se obter parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU soma-se a ausência de especificações normativas. A heterogeneidade dos RSU, a necessidade de entendimento dos comportamentos físico, químico e biológico, bem como a alteração da composição dos RSU ao longo do tempo dificultam a análise e o projeto de aterros sanitários (Singh et al. (2009); Datta e Sivakumar Babu (2016))

Para projetos de aterros sanitários, é frequente a prática de estimar parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU (ângulo de atrito e coesão) com base nos valores disponíveis na literatura, devido às dificuldades associadas à realização de ensaios, principalmente na fase de projeto (Dixon e Jones, 2005; Harris et al., 2006; Díaz-Beltrán et al., 2016; Ramaiah et al., 2017). A escolha do peso específico dos RSU também é crítica na análise da estabilidade do aterro (Zekkos et al., 2010b). A seleção desses parâmetros é uma etapa crucial na análise de estabilidade de taludes, pois determina as declividades e alturas máximas dos taludes e os níveis operacionais aceitáveis de lixiviado dentro do aterro (Colomer-Mendoza, 2013). De acordo com Datta e Sivakumar Babu (2016), muitas falhas podem ser atribuídas a composição heterogênea, avaliação inadequada dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e não consideração da variabilidade do material.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU disponíveis na literatura são obtidos a partir de ensaios de campo, laboratoriais ou de retroanálises e apresentam uma grande variabilidade entre os resultados (Gao et al., 2015; Reddy et al., 2015; Petrovic et al., 2016; Ramaiah et al., 2017). Apesar do conhecimento da heterogeneidade dos RSU, muitas pesquisas não informam características importantes da amostra, como composição gravimétrica, idade, amostragem, características dos ensaios, teor de umidade in situ, peso específico e grau de decomposição (Harris et al., 2006). Embora a dispersão dos resultados apresentados na literatura seja alta, esforços significativos estão sendo realizados para a

obtenção de faixas de parâmetros apropriados para a resistência ao cisalhamento, especialmente para serem utilizados nas estimativas iniciais de projetos quando não se dispõem de informações complementares sobre resíduos (Colomer-Mendoza, 2013; Petrovic et al., 2016).

Vários autores recomendam faixas de parâmetros de resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos (Landva e Clark, 1990a; Singh e Murphy, 1990; Kavazanjian et al., 1995; Gotteland et al., 2000; Miyamoto et al., 2014; Petrovic et al., 2016; Jahanfar et al., 2017b). De acordo com Harris et al. (2006), para o uso dessas informações é necessário verificar se as características dos resíduos e as condições operacionais são próximas às utilizadas para a construção dessas faixas. Díaz-Beltrán et al. (2016), ao invés de introduzirem uma nova faixa recomendada de parâmetros de projeto de RSU, interpretaram os dados compilados em seu estudo por meio de análises estatísticas. Petrovic et al. (2016) sugerem que, no caso de aterros onde as incertezas sobre os parâmetros de resistência de resíduos sólidos são muito altas, o uso de métodos probabilísticos são uma alternativa atraente e adequada.

Uma compilação de parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU relatada na literatura por Díaz-Beltrán et al. (2016) demonstrou uma independência estatística entre a coesão dos RSU e o ângulo de atrito que pode ser usada para alimentar análises estatísticas e probabilísticas. Petrovic et al. (2016) e Jahanfar et al. (2017b) também apresentaram análises estatísticas e correlações de modelos de distribuição de parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU para a abordagem de análise probabilística. No entanto, nenhuma dessas pesquisas concentrou um grande volume de dados para analisar melhor a variabilidade dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU.

Assim, o objetivo deste capítulo foi apresentar a variabilidade dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU disponíveis na literatura, utilizando análises estatísticas que descrevem e correlacionam características e parâmetros de RSU (ângulo de atrito, coesão e peso específico) para análise de confiabilidade estrutural. A análise foi conduzida a partir de resultados de ensaios de laboratório de cisalhamento direto, cisalhamento simples e triaxial, tendo sido utilizados 780 pares de ângulo de atrito e coesão de RSU, além de 178 dados distintos de peso específico, advindos de 16 países.

3.2. MÉTODO

Foram coletados dados sobre ângulo de atrito, coesão e peso específico dos RSU, em publicações disponíveis na literatura, que apresentassem informações detalhadas sobre as amostras de RSU e a metodologia de ensaio utilizada. Foram avaliados diferentes documentos científicos (artigos de periódicos, artigos de congressos, documentos acadêmicos) com resultados laboratoriais de ensaios de cisalhamento direto (CD), cisalhamento simples (CS) e compressão triaxial (TRX) consolidada isotropicamente e drenada (CID), consolidada isotropicamente e não drenada (CIU) e não consolidada e não drenada (UU). No total, 51 estudos foram selecionados para esta pesquisa. Para o banco de dados,

os resultados de ensaios *in situ* não foram considerados, porque os parâmetros de resistência são obtidos indiretamente por meio de correlações. Os resultados de retroanálises também não foram considerados por razões semelhantes.

Para cada observação da literatura, foram identificados pares de ângulo de atrito e coesão dos RSU e respectivo peso específico da amostra. As observações são oriundas de diferentes localidades e metodologias de ensaio (além de distintos níveis de deformação) para garantir a diversidade amostral. A obtenção dos valores de ângulo de atrito e coesão se deu pela captação direta dos trabalhos, quando disponíveis, ou através da construção da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb (pelo autor) a partir dos resultados de três ou mais ensaios apresentados na forma de curvas tensão-deformação (ou força-deslocamento), nesse caso possibilitando a obtenção dos parâmetros em diferentes níveis de deformação (geralmente da ordem de 5 a 20%, conforme práticas usuais de projeto). Grandes esforços foram realizados para a obtenção de parâmetros de resistência ao cisalhamento, de forma a realizar um maior aproveitamento dos resultados presentes (e muitas vezes não analisados) das pesquisas da literatura, onde nem sempre todos os detalhes dos procedimentos experimentais são claramente apresentados (Colomer-Mendoza, 2013; Petrovic et al., 2016).

Os níveis de tensão normal confinante aplicados nos ensaios de resistência são predominantemente presentes no intervalo de 50 a 400 kPa, decorrentes muitas vezes de limitações experimentais, sobretudo para equipamentos de grandes dimensões. Em relação as informações pesquisadas, poucas observações extrapolaram estes limites, de forma que o intervalo de variação é aproximadamente de 5 a 800 kPa.

Uma das propostas do estudo é a investigação das relações existentes entre os parâmetros $c - \phi$, além de possíveis correlações com o peso específico dos RSU. Desta forma, os dados coletados foram organizados em uma extensa planilha, contendo as informações presentes em cada estudo. As seguintes tabelas sumarizam o banco de dados, onde a Tabela 3.1 apresenta dados de ensaios de cisalhamento direto e simples com informações de amostragem (N), país da amostra (localidade), origem dos RSU (aterros sanitários, aterros controlados, lixões) e tipo de amostragem (coletados diretamente do despejo de caminhões ou reproduzidos artificialmente em laboratório). A Tabela 3.2 apresenta as mesmas informações gerais para ensaios de compressão triaxial (CID, CIU e UU). Uma visão geral dos locais de dados usados nesta pesquisa é apresentada na Figura 3.1.

Como uma mesma série de ensaios de resistência pode gerar resultados de curva tensão-deformação que possibilitem a definição de diferentes envoltórias (de acordo com o nível de deformação analisado), este conjunto de ensaios apresenta o mesmo valor de peso específico. Por este motivo, nesta pesquisa, optou-se por computar apenas uma vez este valor de peso específico nas análises de dispersão de resultados, o que justifica a diferença o número de observações de parâmetros de resistência (655) e o de pesos específicos (178) nas tabelas. Foram utilizados nas análises correlações para cada parâmetro de resistência ($c-\phi$) e respectivo peso específico.

Tabela 3.1 - Visão geral do banco de dados coletados da literatura (ensaios de cisalhamento direto e simples)

| Referência | Pares ϕ (°) – c (kPa) | γ_{lab} (kN/m ³) | País | Tipo de Amostragem |
|-------------------------------|-------------------------------|--|--|----------------------|
| Abreu e Vilar (2017) | 18 | 6 | Brasil | AC, V, AE, AS |
| Awad-Allah (2019) | 4 | 4 | China, Japão | V |
| Bareither et al. (2012) | 9 | 9 | EUA | REA, AS |
| Borgatto et al. (2014) | 2 | 2 | Alemanha | MBT |
| Caicedo et al. (2002) | 2 | 1 | Colômbia | AS |
| Cardim (2008) | 15 | 1 | Brasil | COL |
| Cho et al. (2011) | 40 | 8 | China | SIN |
| Correa et al. (2015) | 40 | 5 | Brasil | SIN |
| Feng et al. (2017) | 12 | 4 | China | AS |
| Gabr e Valero (1995) | 2 | 1 | EUA | AS |
| Gabr et al. (2007) | 4 | 0 | EUA | REA |
| Harris et al. (2006) | 5 | 0 | EUA | AS |
| Hossain et al. (2009) | 3 | 0 | EUA | COL |
| Jie et al. (2013) | 8 | 8 | China | V |
| Karimpour-Fard et al. (2014) | 8 | 8 | Irã | AS |
| Keramati et al. (2018) | 18 | 2 | Irã | AS |
| Kölsch (1995) | 2 | 2 | Alemanha | AS |
| Lamare Neto (2004) | 6 | 2 | Brasil | MBT |
| Martins (2006) | 24 | 2 | Brasil | COL |
| Ng e Lo (2007) | 8 | 0 | China | SIN |
| Ojuri e Adegoke (2015) | 2 | 2 | Nigéria | SIN |
| Okonta e Tchane (2017) | 6 | 0 | África do Sul | SIN |
| Pandey e Tiwari (2015) | 1 | 1 | Índia | V |
| Pandey et al. (2017) | 4 | 0 | Índia | V |
| Petrovic et al. (2016) | 38 | 0 | Diversos países | Diversos |
| Pulat e Yukselen-Aksoy (2017) | 13 | 7 | Finlândia, França, Alemanha, Itália, Turquia EUA | SIN, AS |
| Pulat e Yukselen-Aksoy (2019) | 6 | 1 | Finlândia, França, Alemanha, Itália, Turquia EUA | SIN |
| Ramaiah et al. (2017) | 22 | 4 | Índia | AC |
| Reddy et al. (2009a) | 4 | 4 | EUA | AS |
| Reddy et al. (2009b) | 4 | 4 | EUA | AS |
| Reddy et al. (2011) | 11 | 1 | EUA | SIN |
| Reddy et al. (2015) | 6 | 6 | EUA | AC |
| Shariatmadari et al. (2011) | 4 | 1 | Irã | AS |
| Shariatmadari et al. (2017) | 12 | 3 | Irã | COL |
| Singh et al. (2009) | 8 | 1 | Canadá (e outros) | AS (e outros) |
| Sivakumar Babu et al. (2012) | 1 | 1 | Índia | AS |
| Zekkos e Fei (2017) | 4 | 3 | EUA | AS |
| Zekkos et al. (2010b) | 3 | 3 | EUA | AS |
| Zhang e Wu (2011) | 8 | 0 | China | COL |
| Zhao et al. (2014) | 20 | 13 | China (e outros) | AS (e outros) |
| Zhu et al. (2003) | 1 | 0 | China | AC |
| Total: 41 pesquisas | 408 | 120 | 15 países | 8 amostragens |

Notas: AC/AE/AS–Aterro Controlado/Experimental/Sanitário; COL–Coleta; MBT–RSU tratado; REA–Reator; SIN –Sintético; V–Vazadoiro.

Tabela 3.2 - Visão geral do banco de dados coletados da literatura (ensaios triaxiais).

| Referência | Pares ϕ (°) – c (kPa) | γ_{lab} (kN/m ³) | País | Tipo de Amostragem |
|------------------------------|-------------------------------|--|-------------------|----------------------|
| Bray et al. (2009) | 4 | 0 | EUA | COL |
| Caicedo et al. (2002) | 1 | 1 | Colômbia | AS |
| Carvalho (1999) | 80 | 5 | Brasil | AS |
| Gabr and Valero (1995) | 2 | 2 | EUA | AS |
| Gomes et al. (2013) | 22 | 4 | Portugal | AS |
| Harris et al. (2006) | 1 | 0 | EUA | AS |
| Hossain and Haque (2009) | 12 | 3 | EUA | COL |
| Jie et al. (2013) | 24 | 14 | China | V |
| Karimpour-Fard et al. (2011) | 76 | 3 | Brasil | AS |
| Lakshmikanthan et al. (2018) | 2 | 2 | Índia | MBT |
| Machado et al. (2014) | 2 | 1 | Brasil | AS |
| Nascimento (2007) | 40 | 5 | Brasil | COL, AS |
| Pandey et al. (2017) | 4 | 0 | Índia | V |
| Reddy et al. (2009a) | 2 | 1 | EUA | AS |
| Reddy et al. (2009b) | 2 | 2 | EUA | AS |
| Reddy et al. (2011) | 26 | 3 | EUA | SIN |
| Shariatmadari et al. (2014) | 8 | 1 | Irã | AS |
| Shariatmadari et al. (2017) | 11 | 3 | Irã | COL |
| Singh et al. (2009) | 8 | 1 | Canadá (e outros) | AS (e outros) |
| Sivakumar Babu et al. (2012) | 2 | 2 | Índia | AS |
| Zhan et al. (2008) | 12 | 4 | China | AS |
| Zhao et al. (2014) | 4 | 1 | China | AS |
| Zhu et al. (2003) | 27 | 0 | China | AC |
| Total: 23 pesquisas | 372 | 58 | 8 países | 6 amostragens |

Notas: AC/AS–Aterro Controlado/Sanitário; COL–Coletado; MBT–RSU tratado; SIN–Sintético; V–Vazadoiro.

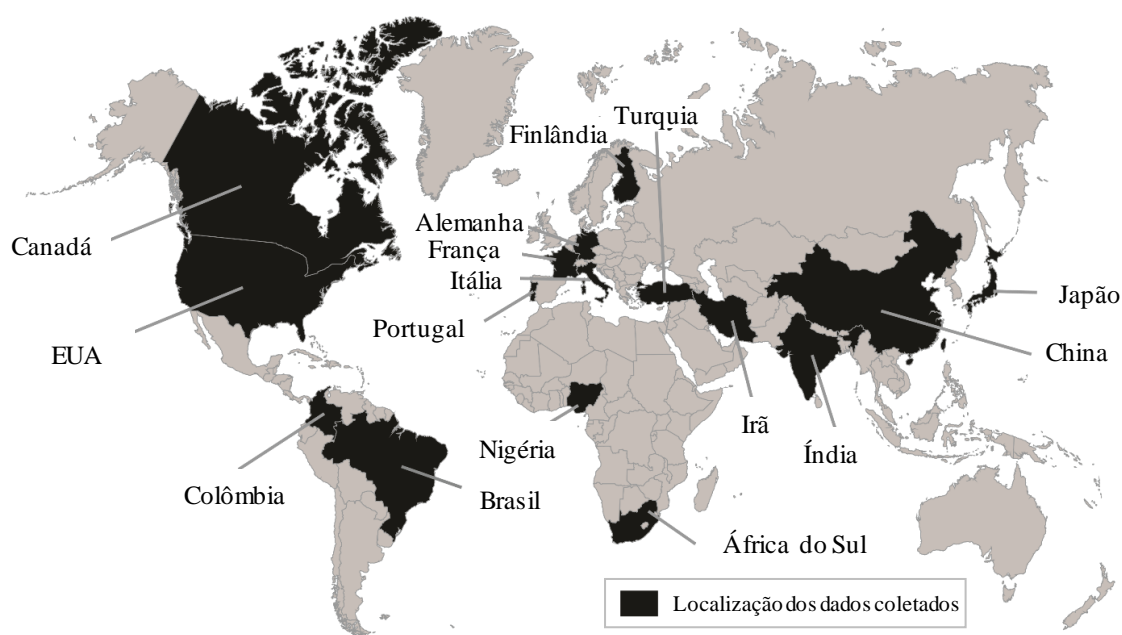


Figura 3.1 – Localização dos dados de RSU coletados para esta pesquisa.

Com base na coleta de dados, foram realizadas análises estatísticas para observar e correlacionar o comportamento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU. Nas pesquisas em que os dados coletados (peso específico, ângulo de atrito e coesão) foram apresentados como faixas de valores (por exemplo, 12° – 23°), o valor médio do respectivo intervalo foi escolhido como representativo da faixa. Entre as análises estatísticas realizadas, são apresentados os melhores ajustes de distribuição de probabilidade dos dados coletados. Valores nulos para o ângulo de atrito e/ou de coesão foram desconsiderados nas análises de ajuste de distribuição devido às restrições matemáticas presentes em alguns modelos estatísticos, o que não influenciou significativamente o comportamento de dispersão dos resultados dado o baixo número de dados nulos.

As funções de densidade de probabilidade (FDP) podem ser usadas para descrever as regiões com maior ou menor incidência de uma variável, bem como seu comportamento de flutuação para análises probabilísticas de estabilidade ou outra análise de confiabilidade estrutural. A integração de regiões de uma FDP fornece uma função de probabilidade cumulativa (FCP) que determina a probabilidade acumulada de ocorrência para um determinado intervalo de valores.

Para verificar o ajuste da distribuição, foram realizados testes de aderência utilizando 7 modelos de distribuição de frequências comumente utilizados em análises estatísticas. (Quadro 3.1). Além das verificações de aderência à distribuição, foram analisadas estatísticas descritivas, dispersões das variáveis (peso específico, ângulo de atrito e coesão) e possíveis correlações entre estes parâmetros.

Quadro 3.1 - Funções densidade de probabilidades (FDP) utilizadas nesta pesquisa.

| Distribuição | Função Densidade de Probabilidades | Observações |
|---------------------|---|--|
| Exponencial | $f(x) = \frac{1}{\theta} \exp\left(-\frac{x}{\theta}\right)$ | $x > 0, \theta > 0$ $\theta^{(2)}$ |
| Gama | $f(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha}$ | $\alpha > 0, \beta > 0$ $\beta^{(2)}, \alpha^{(3)}$ |
| Maior Valor Extremo | $f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \exp\left(-\exp\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right)$ | $\mu^{(1)}, \sigma^{(2)}$ |
| Menor Valor Extremo | $f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp\left(\frac{\mu-x}{\sigma}\right) \exp\left(-\exp\left(\frac{\mu-x}{\sigma}\right)\right)$ | $\mu^{(1)}, \sigma^{(2)}$ |
| Lognormal | $f(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$ | $x > 0, \sigma > 0$ $\mu^{(2)}, \sigma^{(3)}$ |
| Normal | $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(\frac{-(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$ | $\sigma > 0$ $\mu^{(1)}, \sigma^{(2)}$ |
| Weibull | $f(x) = \frac{\beta}{\alpha^\beta} (x)^{(\beta-1)} \exp\left(-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right)$ | $x \geq 0$ $\alpha > 0, \beta > 0$ $\alpha^{(2)}, \beta^{(3)}$ |

Notas: ⁽¹⁾ Parâmetro de localização; ⁽²⁾ Parâmetro de escala; ⁽³⁾ Parâmetro de forma.

Na Figura 3.2 é apresentada um fluxograma da metodologia utilizada para se chegar à análise final dos dados. Salienta-se que diferentes técnicas foram utilizadas até a definição do método, tal como a análise dos dados sem agrupamento por tipos de ensaios, como verificado no fluxograma. A alteração e escolha do método fez parte do processo de compreensão e maturação da pesquisa.

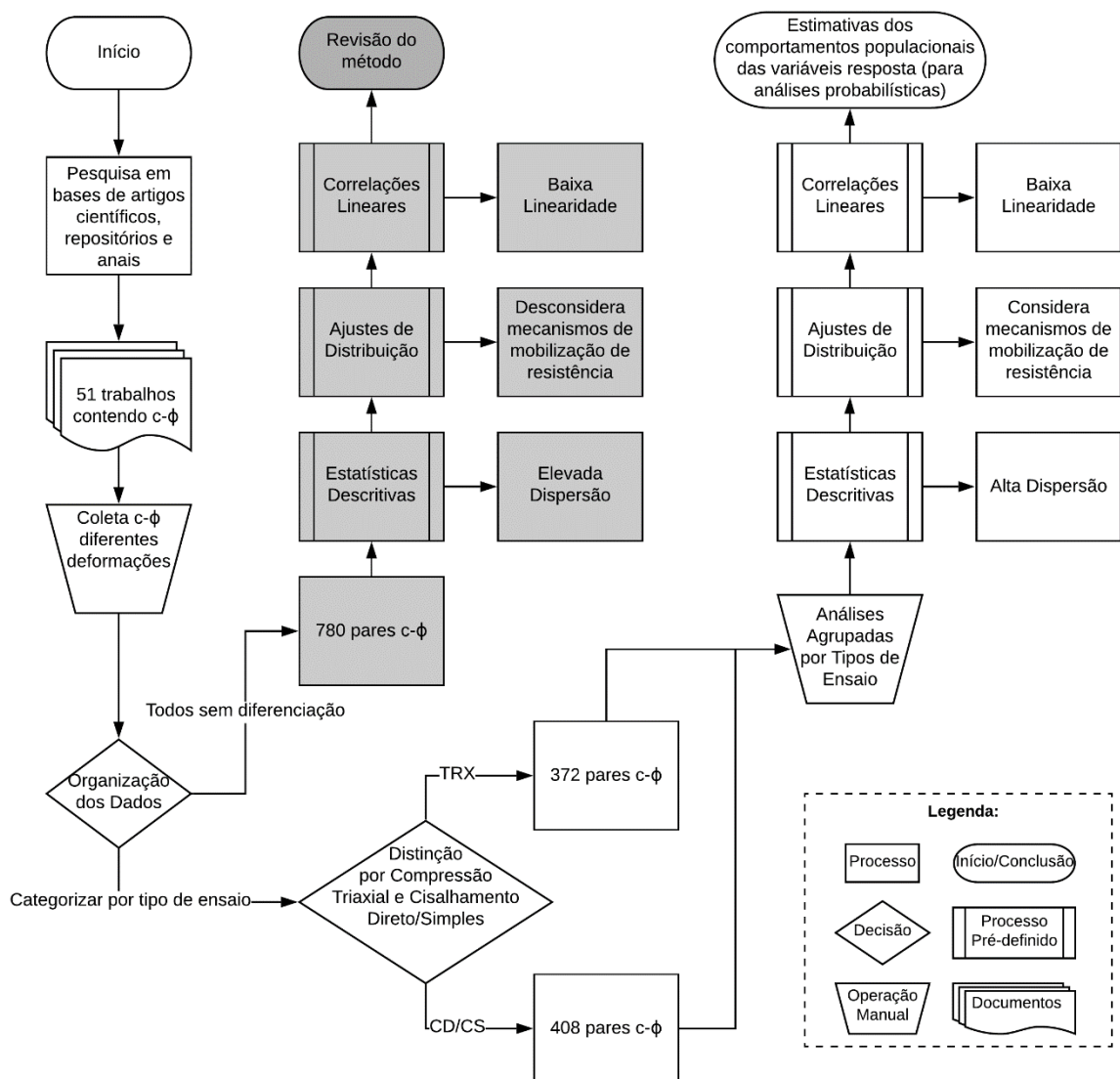


Figura 3.2 – Fluxograma dos métodos testados para definição do ajuste de distribuição dos parâmetros de resistência dos RSU (método definitivo em branco).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.3.1. ANÁLISES UNIVARIADAS

Os comportamentos estatísticos de cada variável (pares de ângulo de atrito e de coesão e valores de peso específico dos RSU) obtidos na literatura foram analisados para verificar as regiões de ocorrência desses valores. A Tabela 3.3 apresenta as estatísticas descritivas referentes aos 780 pares de ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c) coletados na literatura para os ensaios de cisalhamento direto/simples (CD/CS), compressão triaxial (TRX) e todos os dados. Também são apresentados os dados de 178 observações distintas de peso específico (γ), referentes a todos os ensaios laboratoriais. Os valores

médios de cada parâmetro apresentaram proximidade às respectivas médias aparadas (que desprezam os 5% menores e os 5% maiores valores), com relativa proximidade à mediana e baixo erro padrão, o que evidenciou a qualidade da previsão dos parâmetros populacionais. Também se verifica na Tabela 3.3 que o banco de dados utilizado permitiu uma melhor avaliação do comportamento das amostras, uma vez que os erros padrões são baixos devido ao extenso tamanho amostral.

Tabela 3.3 – Estatísticas descritivas para os diferentes parâmetros analisados.

| Estatísticas Descritivas | ϕ (°) | | | c (kPa) | | | γ lab (kN/m ³) |
|---|----------------|-------|------|----------------|-------|-------|-----------------------------------|
| | Todos os dados | CD/CS | TRX | Todos os dados | CD/CS | TRX | |
| Tamanho amostral (N) | 780 | 400 | 372 | 780 | 400 | 372 | 178 |
| Média (\bar{x}) | 25,6 | 27,6 | 23,5 | 22,0 | 18,5 | 25,8 | 11,3 |
| Desvio Padrão (\hat{s}) | 10,9 | 10,1 | 11,4 | 24,4 | 15,9 | 30,6 | 3,9 |
| Coef. de Variação (COV) | 43% | 37% | 48% | 111% | 86% | 119% | 35% |
| Erro Padrão (SE) | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,9 | 0,8 | 1,6 | 0,3 |
| Média Aparada ⁽¹⁾ (\bar{x}') | 25,5 | 27,8 | 23,0 | 18,8 | 17,2 | 21,8 | 11,2 |
| Mínimo | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,1 |
| P15 ⁽²⁾ | 14,0 | 17,0 | 12,3 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 7,9 |
| Mediana (P50 ⁽²⁾) | 25,0 | 28,0 | 21,3 | 14,7 | 15,0 | 14,0 | 11,0 |
| P85 ⁽²⁾ | 37,5 | 38,4 | 36,1 | 40,0 | 35,0 | 54,6 | 14,6 |
| Máximo | 66,0 | 53,0 | 66,0 | 163,8 | 83,7 | 163,8 | 24,0 |
| Amplitude | 66,0 | 53,0 | 66,0 | 163,8 | 81,6 | 160,7 | 21,9 |

Notas: ⁽¹⁾ desprezando *outliers*. ⁽²⁾ Correspondente ao 15°, 50° e 85° percentis, respectivamente. CD – Ensaios de cisalhamento direto; CS – Ensaios de cisalhamento simples; TRX – Ensaios de compressão triaxial.

Os valores dos ângulos de atrito dos RSU apresentaram variação de 66° nos ensaios triaxiais e 53° nos ensaios de cisalhamento direto e simples. Com base nessa amplitude, se observa um coeficiente de variação (COV) entre 37-48%, que é relativamente menor que os resultados obtidos para o parâmetro de coesão (86-119%), que apresentou variação de 0 a 160 kPa. Esse resultado constata a elevada amplitude de parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU relatados na literatura (Sivakumar Babu et al., 2014; Petrovic et al., 2016; Jahanfar et al., 2017b). Ao se comparar todos os dados ϕ - c, os valores de COV permanecem elevados. O parâmetro de peso específico dos RSU obtido em ensaios de laboratório apresentou menor COV (35%), cuja incidência de valores abrangeu desde resíduos soltos a altamente compactados, de acordo com os valores obtidos e retratados na literatura (Fasset et al., 1994; Dixon e Jones, 2005; Zekkos et al., 2006; Gao et al., 2015; Jahanfar et al., 2017b; Ramaiah et al., 2017). Os resultados desta análise estão semelhantes aos obtidos nas análises de Sivakumar Babu et al. (2014), onde através da reunião de um número amostral menor de dados do peso específico, os autores obtiveram desvio padrão de 1,8 – 3,4 kPa e coeficiente de variação de 20 – 26 %. Contudo, ressalta-se que estes parâmetros são referentes a montagens laboratoriais decorrentes dos procedimentos e adequações experimentais, os quais nem sempre retratam as condições reais dos RSU nos aterros. Como presente em Ramaiah et al. (2017), a média dos pesos específicos dos RSU em campo geralmente assume valores

superiores a 10 kN/m³, podendo chegar a valores superiores a 20 kN/m³. Apesar deste fato, é comum de valores da ordem de 10 kN/m³ em análises de estabilidade de taludes de aterros sanitários, sobretudo para camadas superiores de RSU e situações com baixo emprego de energia de compactação, uma vez que nestes materiais a presença de vazios é maior, como pode ser observado para os valores típicos de camadas superiores analisadas por Zekkos et al. (2006).

O processo de compactação da amostra tende a orientar as fibras dos RSU, em procedimentos laboratoriais ou *in situ* (Kavazanjian et al., 1999), de forma que a imposição de um plano de ruptura preferencial resulta na ocorrência de planos de cisalhamento paralelos a essa orientação, prejudicando o ganho de força do RSU pelo “efeito da fibra” (Shariatmadari et al., 2017). Essas observações podem ser verificadas pelos maiores valores descritivos (\bar{x} , x' , P15, P50, P85) da parcela coesiva relativos aos ensaios de compressão triaxial, quando comparados aos de cisalhamento direto/simples (Tabela 3.3).

Uma análise típica de diagrama de caixas (*boxplot*) é apresentada na Figura 3.3, cujas caixas evidenciam regiões entre os percentis 15 e 85. Esses percentis foram escolhidos por possibilitar maior amplitude da porcentagem de dados observados na literatura (70%) sem perturbação excessiva devido à dispersão de dados. Apesar das amplitudes de dados obtidas na Tabela 3.3, os *outliers* (ponto de dados em asterisco) dos *boxplots* observados na Figura 3.3 ocorreram majoritariamente no parâmetro de coesão, em todos os tipos de ensaio, predominando para valores acima de 70 kPa. A elevada dispersão na coesão pode estar relacionada à natureza fibrosa dos resíduos e sua alteração com o envelhecimento, que se reflete num comportamento mais coeso do RSU para resíduos sem pré-tratamento (Gabr e Valero, 1995; Shariatmadari et al., 2014; Reddy et al., 2015; Keramati et al., 2018).

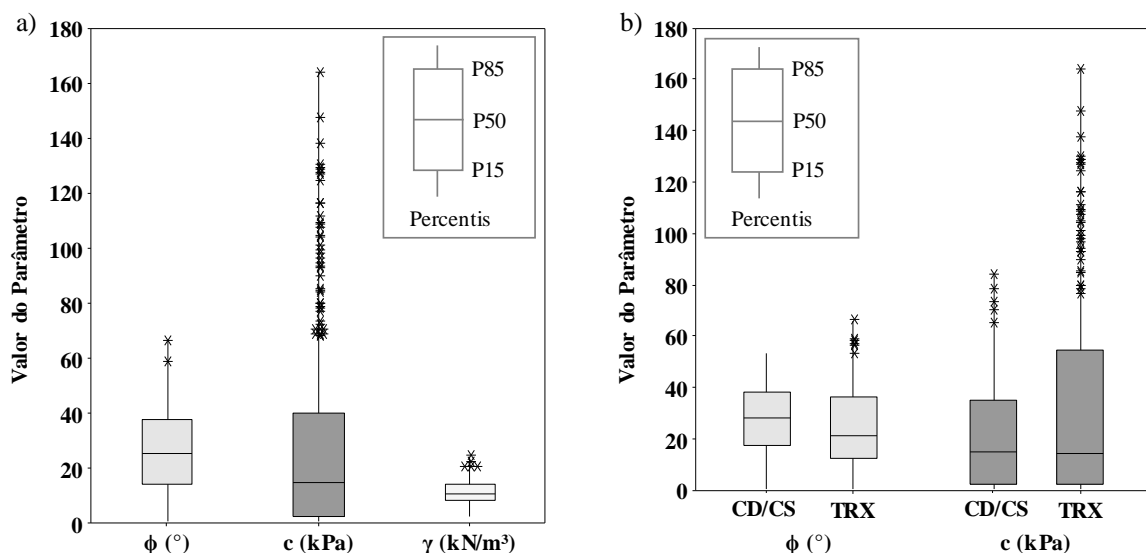


Figura 3.3 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento e peso específico: (a) Todos os dados; (b) Dados por tipo de ensaio.

Na Figura 3.3a, ao analisar dispersões individuais de cada parâmetro, observa-se que 70% das ocorrências de ângulo de atrito dos RSU estão na faixa de 14 a 37,5°, enquanto o parâmetro de coesão

localiza-se na faixa de 2 a 40 kPa. Esse fato novamente destaca a ampla dispersão dos dados apresentados na literatura, que pode ser atribuída principalmente à variabilidade inerente ao material RSU (Abreu e Vilar, 2017; Ramaiah et al., 2017; Pulat e Yukselen-Aksoy, 2019). A coesão, que resulta do intercepto da linearização da envoltória de resistência com o eixo de tensão normal nula, está sujeita a uma variação advinda do próprio ajuste (Pinto, 2000), além daquela inerente às propriedades físicas e químicas do material. Além disso, outro aspecto que pode ser enfatizado é que geralmente a resistência ao cisalhamento dos resíduos é composta por coesão e atrito, e não por essas parcelas separadamente.

Em relação ao parâmetro de peso específico dos RSU (Figura 3.3a), os resultados apresentaram uma leve assimetria em sua distribuição, concentrando valores na faixa de 10 kN/m³. Essa ordem de magnitude do peso específico dos RSU está de acordo com recomendações e constatações de diferentes autores (Zekkos et al., 2006; Jie et al., 2013; Feng et al., 2017; Ramaiah et al., 2017; Zekkos e Fei, 2017).

A Figura 3.3b apresenta o *boxplot* dos dados dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU, agrupados por tipo de ensaio. A partir das regiões de incidência, observa-se que o tipo de ensaio ocasionou pouca influência no comportamento das observações do ângulo de atrito, fato também visualizado pelas estatísticas descritivas obtidas na Tabela 3.3. Estas distribuições distinguiram-se principalmente pela localização da mediana, devido à ocorrência de *outliers* nos ensaios triaxiais. Embora o mecanismo de cisalhamento seja diferente nos ensaios de compressão triaxial e cisalhamento direto/simples, as distribuições estatísticas dos dados parecem ser semelhantes.

A coesão foi mais sensível ao tipo de ensaio, como mostram os parâmetros descritivos (Tabela 3.3) e as regiões de ocorrência do *boxplot* (Figura 3.3b), embora as medianas sejam muito próximas. Verifica-se também que os resultados de ensaios de compressão triaxial são responsáveis pelos maiores valores de coesão e elevadas dispersões apresentadas na literatura. As diferenças entre resultados dos dois tipos de ensaio estão relacionadas aos mecanismos de mobilização de resistência ao cisalhamento, que mobilizam componentes e fibras de RSU de maneiras distintas (Karimpour-Fard et al., 2011; Machado et al., 2017; Shariatmadari et al., 2017; Zekkos e Fei, 2017).

3.3.2. AJUSTE DE DISTRIBUIÇÃO

Para entender e extrapolar o comportamento estatístico das variáveis coletadas, diferentes modelos de distribuição foram analisados, cujos resultados são apresentados na Tabela 3.4. Essa identificação é importante, uma vez que esses parâmetros se relacionam à localização, forma e escala de ocorrência dos dados. Para avaliar a adequação de uma distribuição de probabilidade, o teste estatístico de Anderson-Darling (1954) foi realizado no nível de significância de 5%. De acordo com a Tabela 3.4, verifica-se a qualidade de ajuste para cada parâmetro de RSU, de acordo com o tipo de ensaio, baseada na estatística de Anderson-Darling (1954) e no valor-p associado. Salienta-se que valores substancialmente menores de Anderson-Darling (1954) geralmente indicam que a distribuição

se ajusta melhor aos dados. Cabe observar que todas as funções foram testadas para todos os dados, e na Tabela 3.3 apresentam-se os melhores ajustes.

Tabela 3.4 – Resultados do teste de qualidade do ajuste

| Parâmetros de ajuste de distribuição | ϕ (°) | | | c (kPa) | | |
|--------------------------------------|----------------|---------|---------|----------------|---------|---------|
| | Todos os dados | CD/CS | TRX | Todos os dados | CD/CS | TRX |
| Tamanho amostral (dados não nulos) | 776 | 407 | 369 | 693 | 360 | 333 |
| 1° Melhor ajuste de distribuição | Weibull | Normal | Gama | Gama | Weibull | Lognor |
| Estatística de Anderson-Darling | 0,63 | 0,87 | 0,70 | 1,70 | 0,54 | 2,57 |
| Valor-p (5% significância) | 0,100 | 0,025 | 0,072 | <0,005 | 0,18 | <0,005 |
| Parâmetro de localização | --- | 27,68 | --- | --- | --- | 2,79 |
| Parâmetro de forma | 2,56 | --- | 4,08 | 1,20 | 1,35 | --- |
| Parâmetro de escala | 28,98 | 10,01 | 5,80 | 20,57 | 22,85 | 1,20 |
| 2° Melhor ajuste de distribuição | Normal | Weibull | Weibull | Weibull | Gama | Weibull |
| Estatística de Anderson-Darling | 1,65 | 1,63 | 1,72 | 2,33 | 1,11 | 3,03 |
| Valor-p (5% significância) | <0,005 | <0,010 | <0,010 | <0,010 | 0,008 | <0,010 |
| Parâmetro de localização | 25,76 | --- | --- | --- | --- | --- |
| Parâmetro de forma | --- | 3,07 | 2,23 | 1,09 | 1,57 | 0,98 |
| Parâmetro de escala | 10,78 | 30,90 | 26,75 | 25,64 | 13,37 | 28,52 |

Notas: CD – Ensaios de cisalhamento direto; CS – Ensaios de cisalhamento simples; TRX – Ensaios de compressão triaxial.

Na Tabela 3.4, as estatísticas de ajuste demonstraram boa aderência para as FDPs, especialmente em relação à função Normal de densidade de probabilidades. Em concordância, Petrovic et al. (2016) e Jahanfar et al. (2017b) obtiveram o melhor ajuste de suas análises para o ângulo de atrito com o mesmo tipo de distribuição (Normal), apesar de considerarem um banco de dados significativamente menor. A FDP Lognormal também foi identificada por Petrovic et al. (2016), enquanto Jahanfar et al. (2017b) consideraram o melhor ajuste para a coesão dos RSU como sendo a FDP Normal. Essas diferenças podem ser atribuídas ao número amostral de RSU e às características, localização e composição dos dados utilizados pelos autores. A Figura 3.4 apresenta o ajuste de distribuição e frequências do ângulo de atrito e coesão dos RSU para cada método de ensaio.

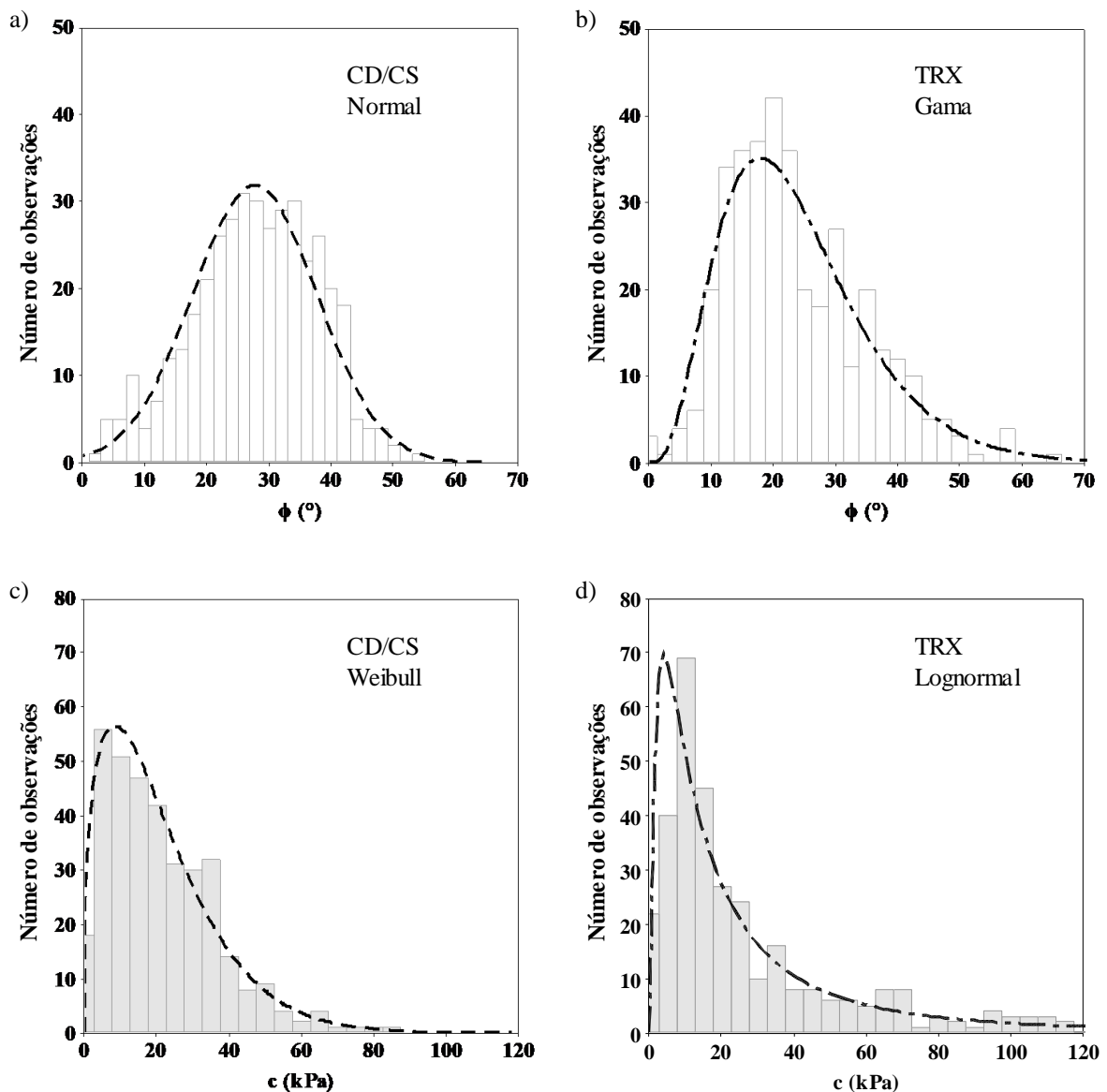


Figura 3.4 – Qualidade do ajuste dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU pelo tipo de ensaio: (a) ângulo de atrito em ensaios de cisalhamento direto/simples; (b) ângulo de atrito em ensaios de compressão triaxial; (c) coesão em ensaios de cisalhamento direto/simples; (d) coesão em ensaios de compressão triaxial.

Considerando o ângulo de atrito, existe uma boa aderência à distribuição Normal para ensaios de cisalhamento direto e simples (Figura 3.4a), enquanto os dados dos ensaios triaxiais são melhores ajustados à distribuição Gama (Figura 3.4b). O parâmetro coesão apresentou boa aderência à função de densidade de probabilidade Weibull para ensaios de cisalhamento direto e simples (Figura 3.4c) e distribuição Lognormal para ensaios de compressão triaxial (Figura 3.4d). Como o número amostral de cada tipo de ensaio é semelhante, pode-se inferir que condições experimentais e falta de padronização dos ensaios afetaram significativamente o comportamento da resistência ao cisalhamento dos RSU, evidenciando a necessidade de abordagens estatísticas nas recomendações de projeto. A Figura 3.5 apresenta uma comparação entre FDPs e FCPs, para todos os dados e também para cada tipo de ensaio.

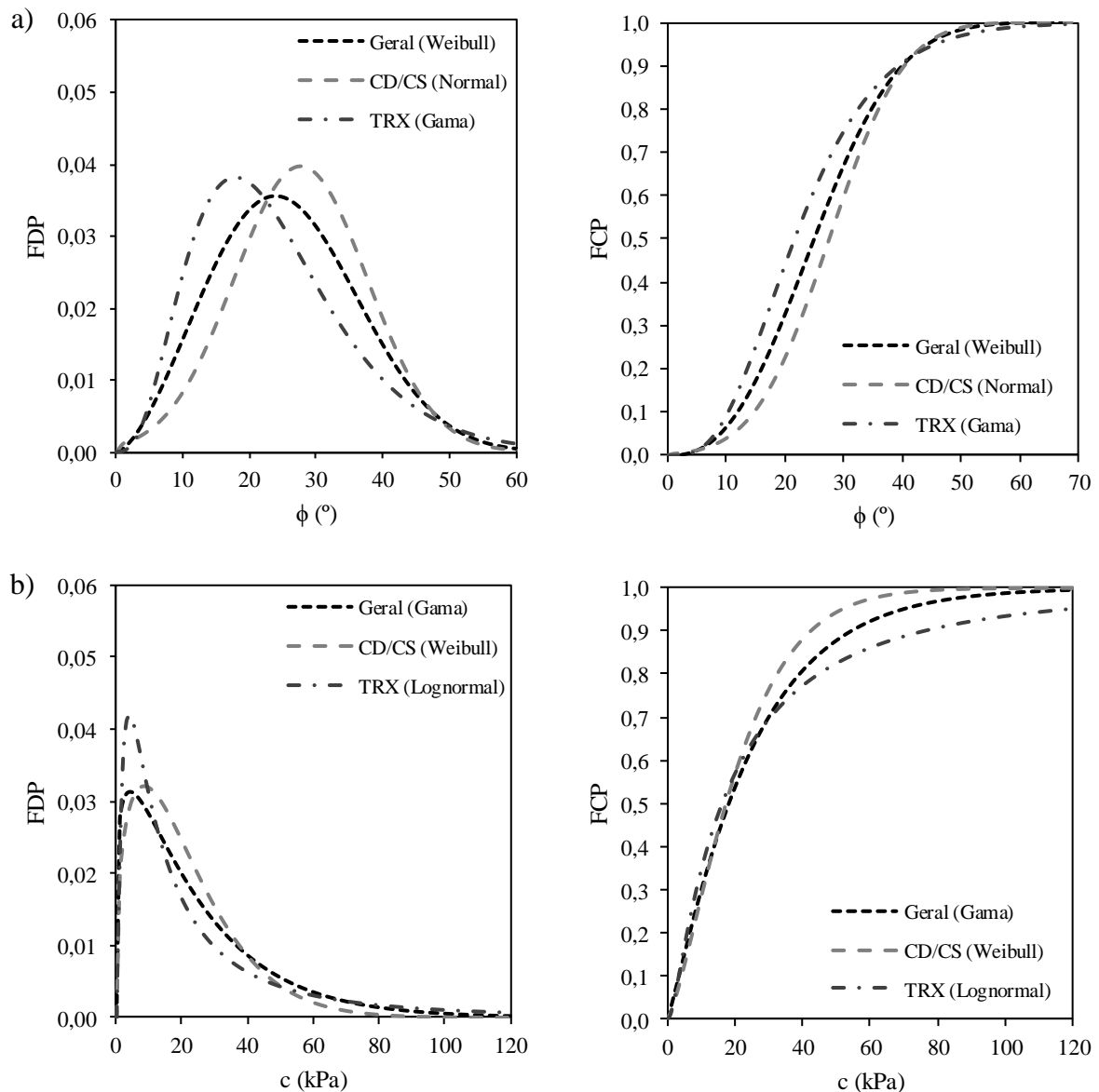


Figura 3.5 – Comparação das FDPs e FCPs: (a) ângulo de atrito; (b) coesão.

A curva de distribuição de ângulo de atrito tende a ser simétrica (Figura 3.5a), mesmo tendo sido obtido melhor ajuste por Weibull para todos os dados e por Gama para os ensaios de compressão triaxial. A distribuição Normal poderia representar satisfatoriamente os três conjuntos de dados. Já a coesão tem distribuição assimétrica, com maior concentrações de observações nos baixos valores, e maior sensibilidade ao tipo de ensaio (Figura 3.5b). Embora Petrovic et al. (2016) tenham encontrado distribuição de frequência Lognormal do parâmetro coesão para resultados de ensaios de cisalhamento direto e retroanálises, a presente pesquisa demonstra melhor ajuste usando distribuição Gama quando se consideram todos os dados laboratoriais.

Ainda na Figura 3.5b, embora as FDPs obtidas para coesão apresentem comportamento visual semelhante, a influência do tipo de ensaio é observada com maior evidência. A escolha do tipo de distribuição permite, com maior ou menor intensidade, a geração de elevados valores de coesão em

análises probabilísticas de estabilidade. Essa diferença é evidenciada na FCP com valores de coesão superiores a 40 kPa. Para o ângulo de atrito (Figura 3.5a), esse efeito é menos impactante, pois as FCPs tendem a convergir para valores superiores a 40°. A diferença observada para valores abaixo de 40° deve-se às considerações de simetria e medidas de posição dos dados em cada modelo de distribuição. Os efeitos das diferenças de distribuição obtidas podem ser mitigados através de testes de convergência em análises probabilísticas de estabilidade.

O peso específico dos RSU não foi avaliado em termos de ajuste de distribuição, uma vez que os dados são oriundos de amostras construídas ou adaptadas em laboratório. Como este parâmetro trata-se de uma variável que envolve procedimentos, a descrição estatística de sua distribuição não representa a magnitude fiel da variação *in situ* do peso específico.

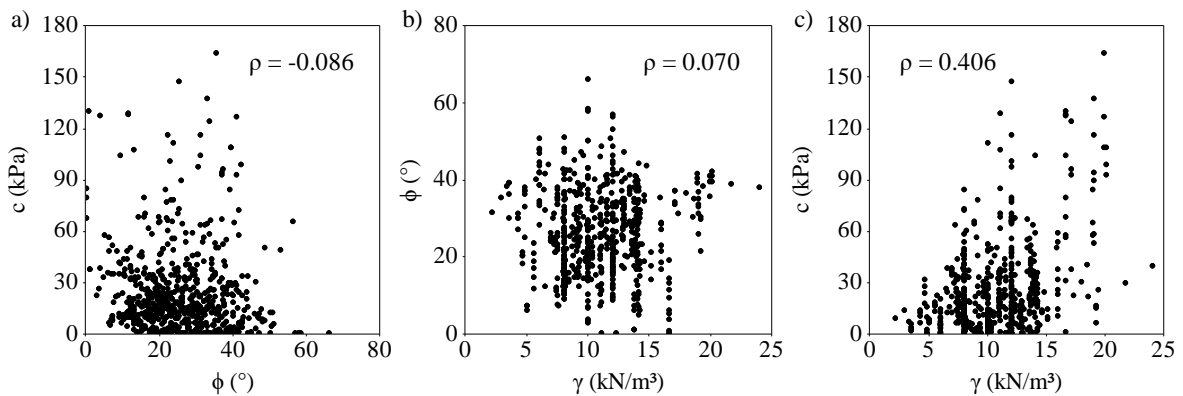
As análises estatísticas conduzidas por Petrovic et al. (2016) consideraram um levantamento de dados diferentes e reduzidos (82 valores de coesão e 103 valores de ângulo de atrito), obtendo uma média de 28,95° (desvio padrão de 9,79°) para o ângulo de atrito e 27,19 kPa (desvio padrão de 19,58 kPa) para coesão. Por outro lado, Jahanfar et al. (2017b), usando o método de Duncan (2000) para análise de desvio padrão, obtiveram ângulo de atrito de 34° (Classe 1), 22,2° (Classe 2), 27,2° (Classe 3) e 17,7° (Classe 4) com desvio padrão entre 1° e 2°. Os parâmetros de coesão apresentaram 14 kPa (Classe 1), 19,2 kPa (Classe 2), 11,2 kPa (Classe 3) e 15,4 kPa (Classe 4), com desvio padrão entre 1 kPa e 2 kPa. O peso específico obtido por Jahanfar et al. (2017b) resultaram em faixas de 10 a 14 kN/m³ (Classes 1 e 2) e 5 a 12,5 kN/m³ (Classes 3 e 4), com desvio padrão de 1 kN/m³. Embora a divisão por classes diminua a variabilidade dos parâmetros, eles foram determinados com um banco de dados amostral limitado, não captando a variabilidade intrínseca já observada por Petrovic et al. (2016), cujos resultados são mais consistentes com os encontrados nesta pesquisa.

Apesar da variação de distribuições e da existência de diferentes modelos estatísticos, a distribuição de frequência desses parâmetros pode ser aproximada pelas funções de densidade Normal, Lognormal, Gama e Weibull, comumente usadas na análise de confiabilidade estrutural e descrição de distribuições (Basha et al., 2016; Petrovic et al., 2016; Jahanfar et al., 2017b; Reddy et al., 2018).

3.3.3. DISPERSÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Devido às relações física e matemática dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU, é apropriado analisar esses parâmetros conjuntamente para fornecer informações sobre seu comportamento estatístico e, assim, refinar as regiões de incidência e os valores de previsão. A Figura 3.6 apresenta as correlações entre coesão, ângulo de atrito e peso específico dos RSU, verificadas segundo o coeficiente de correlação linear de Pearson (ρ). Estas correlações foram verificadas segundo as 655 observações de valores dos pares dos parâmetros de resistência com seus respectivos pesos específicos laboratoriais coletados das pesquisas. Embora não seja possível definir uma relação linear

direta entre as variáveis, observa-se um coeficiente de correlação linear de $-0,086$ para o ângulo de atrito e coesão (Figura 3.6a), $0,070$ para ângulo de atrito e peso específico (Figura 3.6b) e $0,406$ para coesão e peso específico (Figura 3.6c). Para Diaz-Beltrán et al. (2016), esse pequeno valor de correlação pode ser desconsiderado, interpretando estas variáveis como independentes. Por outro lado, Petrovic et al. (2016) sugerem que apesar da correlação entre o ângulo de atrito e a coesão não ser forte, permanece significativa e está em boa concordância com vários ensaios de laboratório em solos, onde o ângulo de atrito e a coesão são frequentemente correlacionados negativamente. Contudo, a correlação entre ângulo de atrito e coesão em solos é explicada pela natureza dos grãos minerais e não pode ser estendida para os RSU, como bem mostram os resultados obtidos nesta pesquisa. Hammah et al. (2004) sugerem que correlações positivas entre parâmetros de cisalhamento (atrito-coesão) estão relacionadas à maior probabilidade de falha de estruturas geotécnicas.



Notas: ρ – coeficiente de correlação linear de Pearson.

Figura 3.6 – Correlações entre ângulo de atrito, coesão e peso específico dos RSU.

Feng et al. (2017) conduziram testes de laboratório em amostras retiradas em um aterro sanitário chinês procurando relacionar resistência com densidade no campo, reproduzindo os ensaios com o nível de tensões normais confinantes entre 50 e 400 kPa. A variação do peso específico de 7,2 a 12,5 kN/m³ a 16 m de profundidade afetou diretamente a resistência ao cisalhamento das amostras, obtendo resultados de 15,7° e 29,1 kPa a 21,9° e 18,3 kPa em uma faixa de 12 m (Feng et al., 2017). Jie et al. (2013) verificaram que a densificação de amostras de RSU melhorou o comportamento mecânico desses materiais, aumentando os parâmetros de resistência ao cisalhamento para um intervalo de tensões normais confinantes semelhantes (50 a 300 kPa). Zekkos e Fei (2017) realizaram ensaios com menor peso específico dos RSU, observando resultados de resistência inferiores aos da literatura e alertando sobre os riscos associados à estabilidade de aterros de resíduos.

A Figura 3.7 compara os intervalos de variação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU obtidos na literatura com os dados desta pesquisa. A Figura 3.7a mostra intervalos tradicionais publicados por vários autores (Landva e Clark, 1990b; Singh e Murphy, 1990; Kavazanjian et al., 1995; Gotteland et al., 2000; Miyamoto et al., 2014). Os valores de atrito-coesão obtidos nesta pesquisa

mostraram elevada dispersão e não foram bem representados pelas recomendações internacionais, principalmente pelo escopo mais limitado desses trabalhos. A Figura 3.7b apresenta as recomendações recentes para intervalos realizadas por Petrovic et al. (2016) e regiões de envelhecimento e deformação propostas por Zhan et al. (2008). A maior incidência de pontos obtidos nesta pesquisa não está bem representada por essas recomendações e esses não se ajustam necessariamente às regiões de avanço de deformação propostas por Zhan et al. (2008). As recomendações de intervalos desses autores podem, em muitos casos, superestimar os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU.

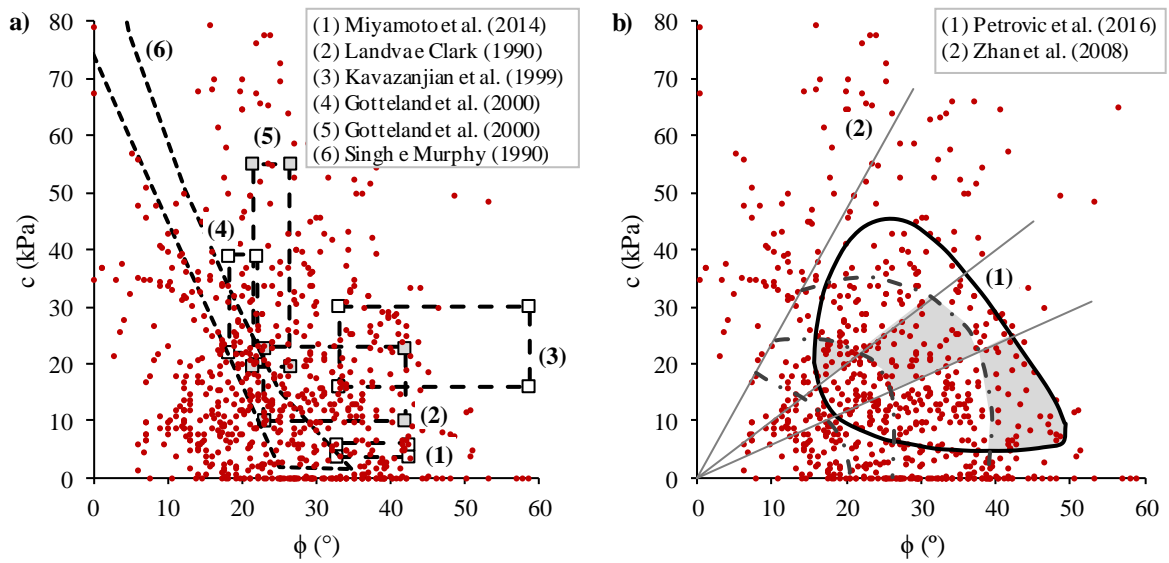


Figura 3.7 – Comparação dos intervalos da literatura dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU com os dados obtidos nesta pesquisa (pontos).

A alta dispersão dos resultados dificulta o processo de determinação de regiões de incidência e recomendações de projeto. Uma alternativa para diminuir essa dispersão e permitir uma análise mais aprofundada dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU é agrupar dados de acordo com características semelhantes (composição, compactação, estágio de degradação, níveis de tensão, tensões limites), bem como o método de ensaio. Essas variáveis foram previamente estudadas na literatura (Zekkos et al., 2006; Zhan et al., 2008; Cho et al., 2011; Abreu e Vilar, 2017; Shariatmadari et al., 2017) e podem contribuir para melhor previsão da resistência ao cisalhamento dos RSU.

Um estudo do detalhamento das características dos RSU e dos métodos de ensaio para diminuir a dispersão nos resultados é apresentado no Capítulo 4.

3.4. LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES

Como verificado neste estudo, a análise de dados é afetada pelo banco amostral utilizado. Nesse sentido, algumas limitações da pesquisa devem ser destacadas:

(1) As análises foram realizadas com resultados de ensaios laboratoriais (cisalhamento direto, cisalhamento simples e compressão triaxial), obtidos de estudos internacionais que apresentaram todas as informações sobre RSU e o método dos ensaios (não apenas parâmetros de resistência ao cisalhamento). Isso é extremamente importante para técnicas posteriores de redução de dispersão;

(2) Existe uma variabilidade intrínseca nas amostras e métodos de ensaio, que contribuem para a dispersão dos resultados coletados;

(3) Ao contrário de outras pesquisas, foram adicionadas observações de RSU de países em desenvolvimento, cujas características são marcadamente diferentes das de países desenvolvidos, contribuindo para a divergência entre observações e recomendações.

Esta pesquisa identificou a variabilidade e o comportamento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU disponíveis na literatura, utilizando análises estatísticas que descrevem e correlacionam parâmetros e métodos de ensaios para análise de confiabilidade estrutural. A análise foi baseada em resultados de ensaios laboratoriais de cisalhamento direto, cisalhamento simples e compressão triaxial, utilizando-se 780 pares de ângulo de atrito e coesão de RSU, além de 655 dados de peso específico de 16 países. Com base nas análises, as seguintes considerações podem ser realizadas:

- Os dados de peso específico de RSU obtidos em ensaios de laboratório apresentaram baixa dispersão de resultados com valores médios em torno de 11 kN/m³.
- O ângulo de atrito mostrou uma distribuição de tendência simétrica dos valores, tanto na análise do tipo de ensaio quanto na análise geral dos dados.
- O parâmetro coesão apresentou comportamento assimétrico das ocorrências, com maior concentração de menores valores em sua distribuição. Este parâmetro demonstrou maior sensibilidade ao tipo de ensaio e presença de valores extremos.
- Não foram encontradas correlações diretas estatisticamente significativas entre os parâmetros estudados. Estas correlações podem ocorrer considerando-se outros aspectos, tais como envelhecimento dos RSU, e refinando-se as análises.
- As recomendações de intervalos da literatura analisadas neste trabalho podem levar à superestimação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU em muitos casos.
- Para diminuir a variabilidade dos resultados da resistência ao cisalhamento dos RSU, recomenda-se analisar os resíduos por agrupamento de dados em classes com características semelhantes, juntamente com a metodologia de ensaio.

4. META-ANÁLISE DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO: CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS

4.1. INTRODUÇÃO

A determinação dos parâmetros de resistência dos RSU em laboratório, ou o uso de recomendações da literatura para tal, é prática recorrente nos projetos de aterros sanitários. Kavazanjian et al. (1995) e Eid et al. (2000) constataram que resultados de ensaios de cisalhamento direto apresentaram adequadas aproximações de parâmetros de resistência quando comparados a valores estimados por análise de estabilidade de aterros sanitários rompidos e estáveis. A realização de ensaios de campo e laboratório com RSU fica condicionada a diferentes variáveis de ensaio, cuja influência nos resultados dos parâmetros de resistência dos resíduos tem sido relatada na literatura atual (Harris et al., 2006; Colomer-Mendoza, 2013; Reddy et al., 2018).

A composição das amostras afeta diretamente o comportamento dos parâmetros mecânicos dos RSU. Diferenças regionais, culturais, sazonais e políticas alteram a composição dos RSU e, conseqüentemente, o comportamento que estes desempenharão no aterro. Cho et al. (2011) ilustram esta diferença comparando o teor orgânico médio presente nos resíduos nos aterros sanitários dos EUA (12,5%) e na China (73%). A composição média dos RSU se altera em cada país, podendo variar também entre regiões de um mesmo país. De forma geral, observa-se que frações inorgânicas nas composições dos RSU tendem a predominar em países desenvolvidos e as orgânicas em países subdesenvolvidos e em desenvolvimento (Gao et al., 2015; Yang et al., 2018). Para Reddy et al. (2015), as propriedades dos RSU também dependem do estágio de degradação das amostras, uma vez que existe a alteração da composição e comportamento mecânico dos componentes frente às ações físicas, químicas e biológicas oriundas desse processo.

Para Caicedo et al. (2002), o processo de escolha da metodologia de ensaio e equipamento utilizado ocasiona diferenças nos resultados de resistência ao cisalhamento. O próprio processamento e segregação dos componentes dos RSU, devido às dimensões dos equipamentos, altera os valores obtidos nos ensaios (Caicedo et al., 2002; Harris et al., 2006). As condições de moldagem e confinamento das amostras também afetam os parâmetros de resistência dos RSU. Ramaiah et al. (2017) realizaram ensaios de cisalhamento direto com RSU da Índia, e verificaram que um aumento de 33% na compactação inicial das amostras resultou em aumento de 37% na tensão cisalhante para uma tensão normal de 25 kPa e 43% para uma tensão de 200 kPa. Com relação aos parâmetros de resistência, houve um aumento de 11 kPa para 28 kPa e 35,4° para 40,4°. Efeitos semelhantes de aumento de resistência dos RSU devido à densificação podem ser observados nos trabalhos de Feng et al. (2017) e Zekkos e Fei (2017).

Dixon e Jones (2005) atribuem a redução de resistência dos RSU à absorção da umidade pelos seus componentes e aumento do líquido nos vazios intra e intercomponentes. Cox et al. (2015) constataram este efeito, verificando que uma alteração do teor de umidade de 11% para 110% reduziu de 40° para 30° o ângulo de atrito dos RSU estudados. Zekkos e Fei (2017) observaram um aumento de 15% na resistência dos RSU quando a velocidade de execução do ensaio foi modificada de 0,25 para 2,25%/min. O aumento da velocidade ocasionou um ganho de 25 a 50% nos parâmetros de resistência dos RSU estudados por Keramati et al. (2018), decorrente do maior intertravamento entre as partículas.

Com efeito, o comportamento tensão-deformação dos RSU depende das variáveis intrínsecas dos componentes dos resíduos e das condições experimentais dos ensaios. Ademais, decorrente da parcela fibrosa e da interação entre os componentes dos RSU, existe um mecanismo de enrijecimento (ganho de resistência com o aumento da deformação), que afeta os parâmetros de resistência ao cisalhamento, sobretudo a coesão desses materiais (Asadi et al., 2017; Feng et al., 2017; Lü et al., 2018).

Embora a estimativa e avaliação das propriedades embasadas em resultados publicados seja prática corrente, as diferentes metodologias aplicadas em cada trabalho contribuem para a dispersão dos resultados dos parâmetros de resistência dos RSU (Capítulo 3). Metodologias de meta-análise de dados apresentam potencial promissor para a interpretação e análise dessas informações.

Meta-análises de dados são metodologias que utilizam revisão da literatura ou revisão sistemática para inferir novas análises e resultados e reunir o conhecimento disperso sobre um determinado assunto, integrando as observações, principalmente com o auxílio de análises estatísticas (Glass, 1976). Metodologias de análise estatística e meta-análise têm sido incorporadas em algumas pesquisas geotécnicas recentes, no entanto, de forma não simultânea e com base de dados limitada (Diambra e Ibraim, 2015; Basha et al., 2016; Bayard et al., 2018; Zeraatpisheh et al., 2019).

As metodologias de meta-análise de pesquisas são uma possibilidade de identificar padrões de comportamento sobre resistência ao cisalhamento de RSU e de padronizar métodos experimentais e análise de dados. Aliadas a essas metodologias, as propostas de classificação de dados podem ajudar a prever e recomendar valores para projetos de aterros de resíduos.

Considerando a variabilidade intrínseca dos RSU e a dificuldade de obtenção de orientações específicas a respeito de valores de referência de parâmetros de resistência para aterros sanitários, buscou-se neste capítulo analisar o efeito das diferentes variáveis empregadas nos métodos de ensaios laboratoriais de cisalhamento direto dos RSU, classificando os resultados de ângulo de atrito e coesão segundo características predominantes nas observações realizadas.

4.2. SISTEMAS DE CLASSIFICAÇÃO DE RSU

Decorrente da variabilidade dos componentes e propriedades dos RSU em diferentes lugares do mundo e ao longo dos estágios de degradação, a literatura tem retratado formas de classificar os resíduos de acordo com propriedades de interesses. Dixon e Jones (2005) reiteram a necessidade de se estabelecer um sistema de classificação mecânica para os RSU, uma vez que classificações comuns que englobam potencial de biodegradação, poder calorífico e potencial de reciclagem são destinadas a outros fins que não a avaliação mecânica do aterro sanitário. Ainda segundo Dixon e Jones (2005), uma metodologia de classificação deve englobar informações acerca da distinção de grupos de componentes e sua predominância na proporção; da forma dos componentes (e sua influência no comportamento mecânico da massa de resíduos); da granulometria de cada grupo de componentes; do potencial de compressibilidade e alteração de forma dos componentes e do potencial de degradação da parcela orgânica e inorgânica dos componentes.

Observando que a degradação e deterioração dos materiais afetam a composição, tamanho e forma dos componentes dos RSU, Landva e Clark (1990b) classificaram os RSU considerando o comportamento e forma de degradação apresentados, resultando em 4 categorias: orgânicos putrescíveis, orgânicos não putrescíveis, inorgânicos degradáveis e inorgânicos não degradáveis.

Grisolia et al. (1995), classificam os resíduos em três grupos com características geotécnicas distintas: o primeiro correspondente aos resíduos inertes que apresentam pouca influência no comportamento geral dos RSU, o segundo contendo os resíduos altamente deformáveis e o terceiro com os resíduos biodegradáveis que influenciam significativamente nas propriedades físicas e mecânicas dos RSU. A partir da determinação das frações destes grupos, os autores identificaram regiões de incidência de resíduos de diferentes países em um diagrama ternário.

Dixon e Langer (2006) retomaram propostas de classificação prévias, apontando deficiências existentes. A proposta dos autores foi classificar os RSU segundo 5 etapas: descrição dos componentes; propriedades mecânicas dos componentes; subdivisão morfológica dos componentes; classificação métrica dos componentes; potencial de degradação das amostras. Após a classificação, torna-se possível análise do comportamento da composição dos RSU frente a outras variáveis (disposição, degradação, propriedades mecânicas, por exemplo) por meio de um diagrama ternário de classificação mecânica-morfológica dos RSU, como realizado por Dixon e Langer (2006) e Dixon et al. (2008).

Petrovic et al. (2016) reuniram parâmetros de resistência dos RSU de diferentes trabalhos e os subdividiram segundo critério de estágio de degradação nos estados: frescos ou moderadamente degradados, média a elevada degradação e degradados. Jahanfar et al. (2017b) classificaram os RSU segundo 4 classes de acordo com sua composição predominante e compacidade. Uma visão geral dos sistemas de classificação de RSU para diferentes propostas é apresentada no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Reunião de sistemas de categorização dos RSU apresentados por Dixon e Langer (2006) e Rakic et al. (2018).

| Referência | Critério(s) – Chave(s) | Parâmetros utilizados |
|-------------------------|--|---|
| Sowers (1973) | Teor em massa | Teor de umidade |
| Turczynski (1988) | Tipo de resíduo | Densidade, parâmetros de resistência, limites de consistência, permeabilidade |
| Barlaz (1990) | Inspeção visual | Composição química |
| Landva e Clark (1990b) | Materiais orgânicos e inorgânicos | Potencial de degradação dos materiais e forma dos componentes |
| Siegel et al. (1990) | Grupos de componentes | Composição gravimétrica |
| Westlake (1995) | Comparação de características dos RSU em diferentes países | Relação de peso e densidade |
| Grisolia et al. (1995) | Degradabilidade, inação e deformabilidade | Resistência, deformabilidade e potencial de degradação |
| Kölsch (1996) | Grupos de materiais | Dimensões e formas |
| Manassero et al. (1997) | Comportamento semelhante ao solo | Índices físicos |
| Thomas et al. (1999) | Similaridade e diferenças com o solo | Grupos de materiais |
| Zekkos (2005) | Composição de fases | Composição, idade, temperatura, teor de umidade, tamanho e teor de solos |
| Kavazanjian (2006) | Mudança da coloração e compacidade | Grau de decomposição |
| Dixon e Langer (2006) | Metodologia de classificação mecânica a partir da amostragem | Gravimetria, forma, dimensões, deformabilidade e potencial de degradação |
| Rakic (2013) | Inspeção visual, composição de fases | Forma, comportamento mecânico |
| Petrovic et al. (2016) | Classificação mecânica a partir do estágio de degradação | Estágio de degradação |
| Jahanfar et al. (2017b) | Classificação mecânica a partir da composição e compacidade | Composição principal e compacidade estimada no aterro sanitário |

4.3. MÉTODO

4.3.1. BANCO DE DADOS

Para a identificação dos fatores que apresentam maior relação com a dispersão dos parâmetros, foram coletados resultados de ensaios laboratoriais de cisalhamento direto oriundos de diferentes trabalhos da literatura (Tabela 4.1), que apresentavam informações completas sobre as variáveis dos procedimentos experimentais de interesse (Quadro 4.2). Os dados são oriundos de amostras de diversas localidades, conforme apresentado no Capítulo 3. Optou-se pela utilização de ensaios de cisalhamento direto, uma vez que são ensaios consolidados na literatura e possuem elevada aplicabilidade em análises de estabilidade de taludes.

Grande parte do estudo realizado nesta pesquisa foi concentrado nas etapas de definição das variáveis e coleta dos dados. Muitas vezes, os trabalhos da literatura não apresentavam informações detalhadas ou específicas da definição do estágio de degradação, peso específico, velocidade, procedimento experimental ou composição gravimétrica, sendo necessárias aproximações e adoção de valores com base na interpretação do autor, sobretudo para variáveis binárias (que assumem apenas dois valores possíveis, como jovem e degradado para a variável “estágio de degradação”). Quando não havia informação, optou-se por não preencher esta informação, motivo pelo qual são relatadas 290

observações completas e 23 parciais, dentre as 313 observações da Tabela 4.1. Como retratado no método adotado no Capítulo 3, muitas vezes se fez necessária a definição manual dos parâmetros de resistência dos RSU, construindo-se inúmeras envoltórias de Mohr-Coulomb a partir de resultados de ensaios de cisalhamento direto com RSU disponibilizado pelos autores. Este fato também possibilitou a captação de resultados de envoltórias em diferentes níveis de deformação.

Tabela 4.1 – Observações gerais dos dados coletados da literatura (ensaios de cisalhamento direto)

| Referência | Número de Observações | Informações das variáveis | País | Tipo de amostragem |
|-------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|--|----------------------|
| Abreu e Vilar (2017) | 18 | Completas | Brasil | AC, V, AE, AS |
| Awad-Allah (2019) | 4 | Parciais | China, Japão | V |
| Bareither et al. (2012) | 9 | Completas | EUA | REA, AS |
| Borgatto et al. (2014) | 2 | Completas | Alemanha | MBT |
| Caicedo et al. (2002) | 2 | Parciais | Colômbia | AS |
| Cardim (2008) | 15 | Completas | Brasil | COL |
| Cho et al. (2011) | 40 | Completas | China | SIN |
| Correa et al. (2015) | 40 | Completas | Brasil | SIN |
| Feng et al. (2017) | 12 | Completas | China | AS |
| Gabr e Valero (1995) | 2 | Completas | EUA | AS |
| Karimpour-Fard et al. (2014) | 8 | Completas | Irã | AS |
| Keramati et al. (2018) | 18 | Completas | Irã | AS |
| Kölsch (1995) | 2 | Completas | Alemanha | AS |
| Lamare Neto (2004) | 6 | Completas | Brasil | MBT |
| Martins (2006) | 24 | Completas | Brasil | COL |
| Ojuri e Adegoke (2015) | 2 | Completas | Nigéria | SIN |
| Pandey e Tiwari (2015) | 1 | Parciais | Índia | V |
| Pulat e Yukselen-Aksoy (2017) | 13 | Completas | Finlândia, França, Alemanha, Itália, Turquia EUA | SIN, AS |
| Pulat e Yukselen-Aksoy (2019) | 6 | Completas | Finlândia, França, Alemanha, Itália, Turquia EUA | SIN |
| Ramaiah et al. (2017) | 22 | Completas | Índia | AC |
| Reddy et al. (2009a) | 4 | Parciais | EUA | AS |
| Reddy et al. (2009b) | 4 | Parciais | EUA | AS |
| Reddy et al. (2011) | 11 | Completas | EUA | SIN |
| Reddy et al. (2015) | 6 | Completas | EUA | AC |
| Shariatmadari et al. (2011) | 4 | Parciais | Irã | AS |
| Shariatmadari et al. (2017) | 12 | Completas | Irã | COL |
| Singh et al. (2009) | 2 | Completas | Canadá (e outros) | AS (e outros) |
| Sivakumar Babu et al. (2012) | 1 | Parciais | Índia | AS |
| Zekkos et al. (2010b) | 3 | Parciais | EUA | AS |
| Zhao et al. (2014) | 20 | Completas | China (e outros) | AS (e outros) |
| Total: 30 pesquisas | 313 pares | 290 completas 23 parciais | 14 países | 8 amostragens |

Notas: AC – Aterro Controlado; AE – Aterro Experimental; AS – Aterro Sanitário; COL – Coletado; MBT – Tratamento Mecânico-Biológico; REA – Reator de Resíduos; SIN – Sintético; V – Vazado.

Para a seleção dos trabalhos da literatura, foram avaliadas as características e informações cujos procedimentos são comuns na literatura, de forma que releituras foram realizadas para a escolha das 17 variáveis que iriam compor as componentes de cada observação de procedimentos experimentais. Estas variáveis estão relacionadas aos materiais analisados (composição e estado de degradação dos RSU), condições de moldagem da amostra (dimensões, forma, peso específico, umidade) e condições experimentais (velocidade, níveis de tensão normal confinante e deformação imposta), bem como as variáveis de resposta (ângulo de atrito e coesão), que foram os parâmetros de interesse. O Quadro 4.2 ilustra as 17 variáveis de interesse e 2 variáveis de resposta coletadas, agrupadas conforme sua similaridade conceitual. Foram identificadas variáveis numéricas contínuas e categóricas, de acordo com o comportamento típico (valores) observado para cada variável.

Quadro 4.2 – Identificação das variáveis de interesse.

| Grupo | Variável | Tipo | Natureza | Níveis | Observações |
|-------------|----------------------|------------|----------|------------------|---------------------------------------|
| Material | %Orgânico | Numérica | Contínua | --- | Porcentagem (0% - 100%) |
| | %Papel | Numérica | Contínua | --- | Porcentagem (0% - 100%) |
| | %Sintético | Numérica | Contínua | --- | Porcentagem (0% - 100%) |
| | %Metal | Numérica | Contínua | --- | Porcentagem (0% - 100%) |
| | %Mineral | Numérica | Contínua | --- | Porcentagem (0% - 100%) |
| | %Madeira | Numérica | Contínua | --- | Porcentagem (0% - 100%) |
| | %Outros | Numérica | Contínua | --- | Porcentagem (0% - 100%) |
| | Método | Categórica | Nominal | 4 | Idade, Composição, DOD, RAT |
| Degradação | Categórica | Binária | 2 | Jovem, Degradado | |
| Moldagem | Umidade | Numérica | Contínua | --- | Porcentagem (0% - 100%) |
| | Peso Específico | Numérica | Contínua | --- | Diversos |
| | Dimensões | Categórica | Binária | 2 | Pequena (< 300 mm), Grande (≥ 300 mm) |
| | Forma | Categórica | Binária | 2 | Circular, Retangular |
| Experimento | Velocidade | Numérica | Contínua | --- | Diversos |
| | Tensão Normal Mínima | Numérica | Contínua | --- | Diversos |
| | Tensão Normal Máxima | Numérica | Contínua | --- | Diversos |
| | Nível de Deformação | Numérica | Discreta | 7 | 5%, 10%, 15%, 20%, 30%, 40%, 50% |
| Resposta | Ângulo de Atrito | Numérica | Contínua | --- | Diversos |
| | Coesão | Numérica | Contínua | --- | Diversos |

Notas: DOD = grau de decomposição, RAT = razão bioquímica.

Com relação às características das amostras (grupo material), foram coletadas informações relacionadas à composição gravimétrica (porcentagens em massa, preferencialmente seca, dos componentes dos RSU) e ao estágio de degradação (idade, teor de conteúdo orgânico, indicadores de estágio de degradação). O Quadro 4.3 descreve os componentes e potenciais de degradação utilizados nesta pesquisa. A escolha desta divisão de componentes foi realizada a partir dos trabalhos de Dixon e Langer (2006) e Chen et al. (2009). Para os estudos que apresentaram informações de gravimetria dos RSU com categorias distintas às estipuladas, os dados foram alocados em categorias equivalentes.

Quadro 4.3 – Grupos de componentes adotados na pesquisa a partir de Fricke et al. (1999) e Reddy et al. (2015).

| Componente | Descrição geral | Potencial de degradação |
|------------|---|---|
| Orgânicos | Resíduos de origem natural/orgânica, como alimentos, aparas de capim, plantas | Biodegradáveis |
| Papéis | Resíduos de papel ou fibras semelhantes ao papel, como papelão, embalagens de papel, impressos, fraldas | Biodegradáveis |
| Sintéticos | Resíduos sintéticos fibrosos, de alta ou baixa deformabilidade, de baixo potencial de degradação, como plásticos, têxteis, borracha, couro, lâminas | Inorgânicos |
| Metais | Resíduos de metais ferrosos e não ferrosos | Inorgânicos |
| Minerais | Resíduos minerais ou que apresentem comportamento biológico inerte e mecânico semelhante, como vidro, cerâmica, rocha, tijolos, telhas, brita | Inorgânicos |
| Madeiras | Resíduos de madeira, como ripas, toras, fragmentos de peças de madeira | Biodegradáveis |
| Outros | Resíduos cujos componentes não foram classificados nas demais categorias (não apresentados ou indistinguíveis), como resíduos de grandes dimensões, ossos, colchões, móveis, rejeitos, material de fração particulada, solo | Parte dos componentes biodegradáveis, parte inorgânicos |

O estágio de degradação foi avaliado segundo os indicadores “idade”, “composição”, “grau de decomposição” e “razão bioquímica”, de maneira binária: “resíduos jovens” e “resíduos degradados”. A idade média de cada amostra de resíduos foi comparada ao tempo médio de maturação necessário para alcançar o quinto estágio de degradação proposto por Grisolia e Napoleoni (1996). Foram considerados resíduos jovens aqueles que apresentaram idade média igual ou inferior a 3 anos, e degradados os resíduos com idade superior. Consideraram-se também como resíduos jovens ou degradados aqueles assim informados pelos autores de cada trabalho, identificados como indicadores de “composição”. Com informações acerca do teor de conteúdo orgânico (TOC) em diferentes estágios de degradação dos RSU, foram determinados graus de decomposição (DOD) através da Equação (1), que correlaciona o TOC após determinado tempo (X_i) com o TOC inicial (X_0) (Andersland et al., 1981).

$$DOD = \left(1 - \frac{X_i}{X_0}\right) \frac{1}{(1 - X_i)} \quad (1)$$

Análises bioquímicas dos RSU podem ser realizadas para determinar as taxas de celulose (C), hemicelulose (H) e lignina (L), de forma a correlacionar a razão entre os valores das substâncias de maior e menor facilidade de degradação (Gabr et al., 2007; Gao et al., 2015; Lakshmikanthan et al., 2018). Nesta pesquisa, esta relação foi definida como o indicador “razão bioquímica” (RAT), conforme Equação (2). Adotou-se como resíduos degradados aqueles que apresentaram $RAT < 0.4$, indicando predominância da lignina em relação às parcelas de celulose e hemicelulose e como resíduos jovens aqueles que apresentam comportamento predominante oposto (conforme Quadro 2.7).

$$RAT = \frac{C + H}{L} \quad (2)$$

Informações sobre as condições de moldagem dos exemplares foram coletadas, como as dimensões do corpo de prova, avaliadas binariamente como pequena (< 300 mm) ou grande dimensão (> 300 mm), forma (retangulares ou circulares), teor de umidade e peso específico aparente.

As variáveis experimentais exercem influência direta nos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU. Informações sobre a velocidade de ensaio, níveis de tensão normal confinante dos corpos de prova e níveis de deformação impostos nos ensaios estão altamente relacionados às condições de projeto ou situações de campo de interesse. A velocidade de execução do ensaio está associada às taxas de dissipação de pressão neutra e condições de drenagem, enquanto os níveis de tensões confinantes e deformações se relacionam com critérios de ruptura, condições de serviço e solicitações impostas aos materiais. A variável velocidade de ensaio foi tratada neste estudo como uma covariável para as análises estatísticas, uma vez que não apresenta uniformidade nas metodologias das pesquisas analisadas. Além disto, a utilização deste parâmetro para categorização de dados e recomendações de projeto apresentaria dificuldades e impraticabilidade nas situações usuais.

Os parâmetros de resistência foram captados nos diferentes trabalhos, considerando-se a envoltória de Mohr-Coulomb (relação linear) para a descrição do comportamento de resistência dos RSU. Devido ao comportamento de enrijecimento dos RSU com a deformação, pode ser realizada a determinação de diferentes envoltórias de resistência a partir da adoção de níveis de deformação (Chen et al., 2009; Machado et al., 2014; Zhao et al., 2014; Gao et al., 2015). De forma análoga à metodologia apresentada no Capítulo 3, os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram coletados diretamente dos resultados apresentados no trabalho, quando disponibilizados. No caso de não disponibilizados, os parâmetros foram determinados a partir dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto. Muitas vezes foram necessárias construções manuais de envoltórias de resistência a partir de resultados de ensaios de cisalhamento direto, a fim de identificar os parâmetros de resistência ao cisalhamento em diferentes níveis de deformação para os trabalhos em questão.

Apesar do esforço na coleta de dados, foram constatadas omissão e ausência de informações nos trabalhos analisados, também relatadas por outros autores (Dixon e Jones, 2005; Petrovic et al., 2016; Jahanfar et al., 2017b).

4.3.2. FLUXOGRAMA DE ANÁLISE

Diferentes métodos e técnicas de agrupamentos foram realizados para possibilitar a mitigação da variação amostral do banco de dados. Inicialmente, foram verificadas possibilidades de agrupamento segundo indicadores de composição, compacidade e estágio de degradação. Contudo, as classes resultantes ainda apresentavam alta variabilidade e pouca robustez em suas análises (em cinza na Figura 4.1).

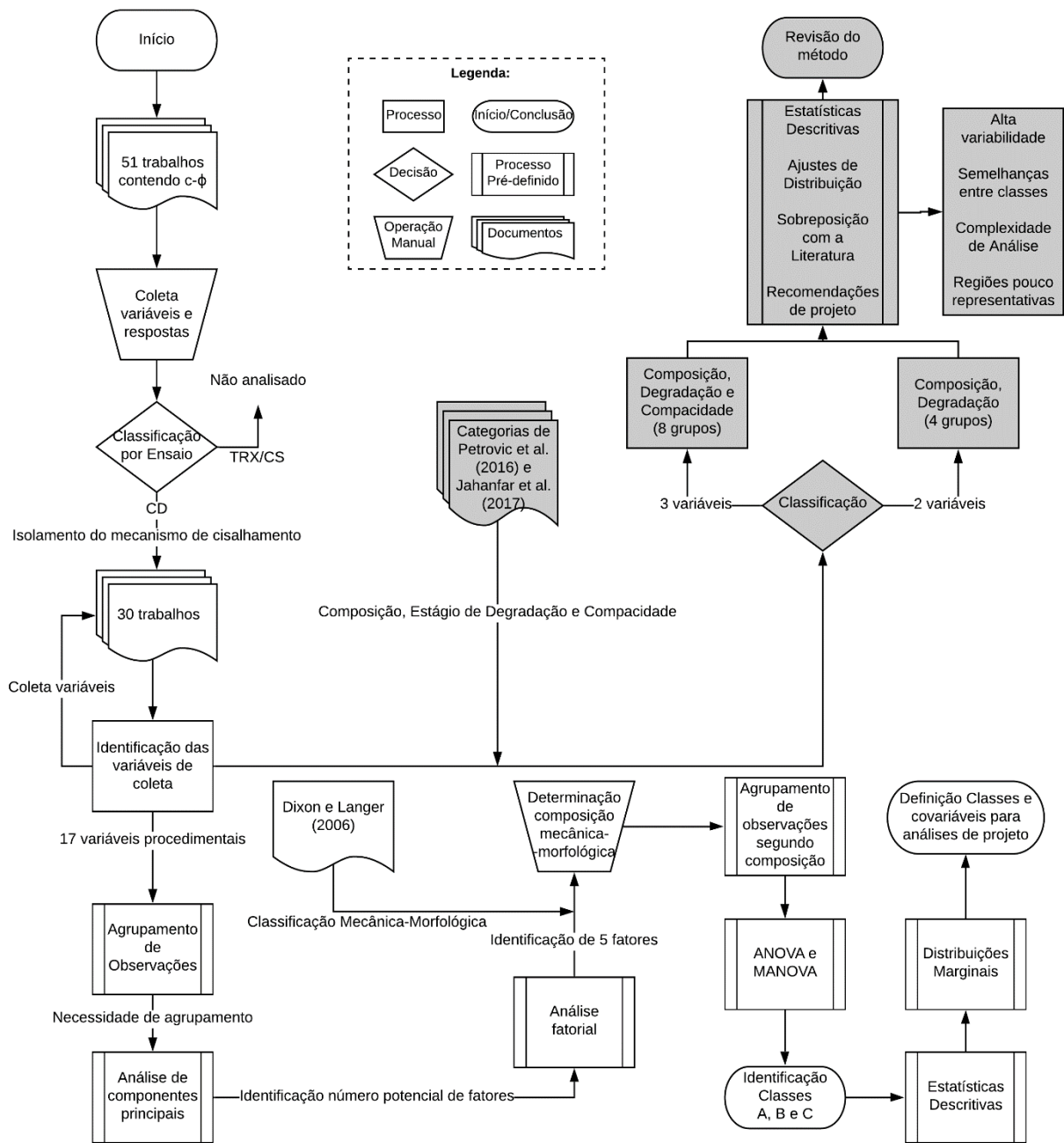


Figura 4.1 – Fluxograma de método para classificação dos RSU (método definitivo em branco).

Após diferentes arranjos de classificações e técnicas empregadas, foi definido que o procedimento de classificação dos dados de resistência dos RSU seria realizado a partir de testes estatísticos para mitigação da variabilidade e aumento da robustez dos resultados. O banco de dados foi analisado segundo ferramentas estatísticas de agrupamento de observações (*clusters*), avaliação de agrupamentos (similaridade e distância), análise e identificação de fatores comuns (análise fatorial e componentes principais), descrição dos dados (estatísticas descritivas, dispersão e distribuição dos dados), comparação de amostras e verificação de efeitos de tratamento em amostras (análises de variância univariável e multivariável).

4.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.4.1. VARIÁVEIS ENVOLVIDAS NOS PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Em virtude da elevada dispersão apresentada pelos parâmetros de resistência dos RSU obtidas no Capítulo 3, foi realizado o levantamento das variáveis envolvidas nos procedimentos experimentais de cada pesquisa (Quadro 4.2) para averiguar sua influência nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto disponibilizados na literatura. A Tabela 4.2 apresenta um extrato de resultados de uma análise de agrupamento por observações (conjunto completo de informações para cada par ângulo de atrito-coesão). Aplicações desta metodologia podem ser observadas nos trabalhos de Souza e Ebecken (2012), Bayard et al. (2018) e Zeraatpisheh et al. (2019).

Tabela 4.2 – Teste de agrupamento das variáveis.

| Passo | Agrupados | Similaridade | Distância |
|-------|-----------|--------------|-----------|
| 1 | 312 | 100,0% | 0,0 |
| 2 | 311 | 100,0% | 0,0 |
| ... | ... | ... | ... |
| 304 | 9 | 87,5% | 2,7 |
| 305 | 8 | 86,6% | 2,9 |
| 306 | 7 | 86,0% | 3,1 |
| 307 | 6 | 83,7% | 3,6 |
| 308 | 5 | 79,1% | 4,6 |
| 309 | 4 | 74,8% | 5,5 |
| 310 | 3 | 63,2% | 8,1 |
| 311 | 2 | 40,1% | 13,1 |
| 312 | 1 | 0,0% | 22,0 |

Considerando as variáveis numéricas contínuas e categóricas binárias, verificou-se que existem diferenças significativas entre as observações dos procedimentos experimentais da literatura, caracterizando o banco de dados como heterogêneo, uma vez que as variáveis não apresentam similaridade e distância adequadas para sua avaliação estatística direta, nem com agrupamentos por 2 ou 3 *clusters*. Portanto, inferências sobre os parâmetros de resistência sem a realização de um agrupamento adequado de observações poderiam fornecer resultados equivocados.

Uma alternativa para redução da heterogeneidade amostral é a identificação de fatores comuns que possibilitem reduzir o número de variáveis dos estudos sem grandes perdas de informações. A ferramenta utilizada para tal procedimento foi a análise fatorial baseada em uma análise preliminar de componentes principais. Estas análises foram conduzidas com as variáveis contínuas e binárias presentes nos grupos apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultados da análise fatorial realizada nesta pesquisa.

| Variáveis | Fator 1 | Fator 2 | Fator 3 | Fator 4 | Fator 5 | Geral |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| Orgânicos | 0,19 | 0,90 | -0,18 | -0,04 | 0,25 | 0,93 |
| Papel | -0,75 | 0,07 | -0,25 | -0,34 | -0,04 | 0,75 |
| Sintéticos | 0,07 | -0,11 | -0,05 | -0,03 | -0,87 | 0,78 |
| Metal | -0,48 | 0,03 | -0,58 | -0,10 | -0,31 | 0,68 |
| Minerais | 0,01 | -0,28 | 0,73 | -0,25 | -0,22 | 0,73 |
| Madeira | 0,27 | -0,65 | -0,07 | -0,14 | 0,57 | 0,84 |
| Outros | -0,25 | -0,25 | -0,24 | 0,77 | -0,16 | 0,81 |
| Estágio de Degradação | 0,27 | -0,67 | 0,28 | 0,37 | 0,06 | 0,74 |
| Teor de Umidade | 0,08 | 0,06 | -0,74 | -0,16 | -0,09 | 0,59 |
| γ (kN/m ³) | 0,14 | 0,05 | 0,19 | 0,81 | 0,10 | 0,72 |
| Dimensões da Amostra | 0,72 | -0,31 | -0,01 | -0,14 | -0,04 | 0,63 |
| Forma da Amostra | -0,71 | -0,25 | 0,18 | 0,11 | 0,01 | 0,62 |
| Variância | 2,09 | 1,98 | 1,73 | 1,65 | 1,35 | 8,80 |
| % Variância | 17,4% | 16,5% | 14,4% | 13,8% | 11,2% | 73,4% |

A análise fatorial acoplada com análise de componentes principais permitiu a identificação de 5 fatores responsáveis por 73% da flutuação dos valores das observações de procedimentos experimentais (Tabela 4.3). A partir da interação das variáveis coletadas com cada fator determinado e do conhecimento prévio do comportamento dos RSU, pode-se inferir que:

- Fator 1 está relacionado à Morfologia da amostra (forma e dimensões);
- Fator 2 está relacionado aos Componentes Biodegradáveis (teores de matéria orgânica, madeira e estágio de degradação da amostra);
- Fator 3 está relacionado aos Componentes Inertes (teor de minerais e umidade do solo);
- Fator 4 está relacionado à Compacidade (peso específico);
- Fator 5 está relacionado aos Componentes Fibrosos (sintéticos).

Apesar da ausência de padronização de metodologia das observações e da elevada heterogeneidade e quantidade das variáveis coletadas, a maior causa de variação dos resultados (73%) está relacionada à composição morfológica (Fator 1), à compacidade (Fator 4) e ao comportamento mecânico dos resíduos (Fatores 2, 3 e 5). Desta forma, uma reorganização dos dados em categorias e subdivisões que envolvam estes fatores, pode mitigar a variação dos procedimentos experimentais de forma que os resultados obtidos em cada um possam ser melhor interpretados (garantindo a similaridade de observações, mesmo em diferentes pesquisas).

4.4.2. DEFINIÇÃO DA CATEGORIZAÇÃO DOS DADOS

A necessidade de se analisar o comportamento mecânico dos componentes dos RSU já foi observada previamente na literatura. Dixon e Langer (2006) propuseram um sistema para a classificação dos RSU considerando as propriedades mecânicas-morfológicas dos resíduos por meio de um diagrama ternário com as classes: compressíveis, incompressíveis e de reforço. Esse sistema foi utilizado por Dixon et al. (2008) e Abreu e Vilar (2017) para determinação da composição gravimétrica dos RSU e será adotado neste trabalho visando reduzir de forma simplificada a variabilidade do banco de dados.

Para o sistema de classificação de Dixon e Langer (2006) são necessárias informações sobre a distribuição granulométrica dos RSU. Nesta pesquisa, como os trabalhos não dispunham de informações detalhadas acerca da granulometria e morfologia das amostras, a classificação foi feita utilizando-se a composição gravimétrica de cada amostra e agrupando-se os componentes da amostra segundo sua natureza: “compressíveis” foram considerados os orgânicos, papéis e outros; “incompressíveis”, as madeiras, metais e minerais; e “reforço”, os sintéticos. Seguindo Machado et al. (2002), os papéis não foram considerados como componentes de reforço devido à diminuição de sua contribuição na resistência com o aumento da deformação e tempo de exposição à umidade.

Os pontos amostrais coletados foram dispostos no diagrama ternário de composições (Figura 4.2). Este trabalho propõe distinguir 3 regiões principais de incidência de dados no diagrama ternário, denominadas Classes A, B e C, às quais estão associadas as observações com predominância (porcentagem principal maior que 60%) de componentes compressíveis (A), incompressíveis (B) e de composição mista (C). Essas três classes foram definidas utilizando-se uma técnica de agrupamento de observações segundo sua composição, de forma a otimizar o número de classes em relação à similaridade e distância entre elas. Isso significa que as três regiões são estatisticamente semelhantes.

Após a categorização dos dados, observou-se que 168 observações corresponderam à classe A, 85 à classe B e 60 à classe C, apresentando números amostrais adequados para análises estatísticas posteriores. Em virtude da região definida por porcentagens de componentes de reforço maior que 40% ser dificilmente verificada na prática (salvo composição sintética em laboratório ou alguma especificidade de aterros de resíduos), sobretudo com ações de reaproveitamento e reciclagem que atingem boa parcela destes componentes, pode-se afirmar que o banco de dados amostral abrangeu toda a diversidade de composições de RSU (Figura 4.2a).

Salienta-se que muitas observações de ângulo de atrito e coesão estão associadas a diferentes níveis de deformação de um mesmo ensaio e também de amostras com composições semelhantes, o que justifica as sobreposições de pontos do diagrama ternário (Figura 4.2a), conforme pode ser observado no gráfico de barras da Figura 4.2b, que exhibe a composição mecânica-morfológica das 313 observações analisadas.

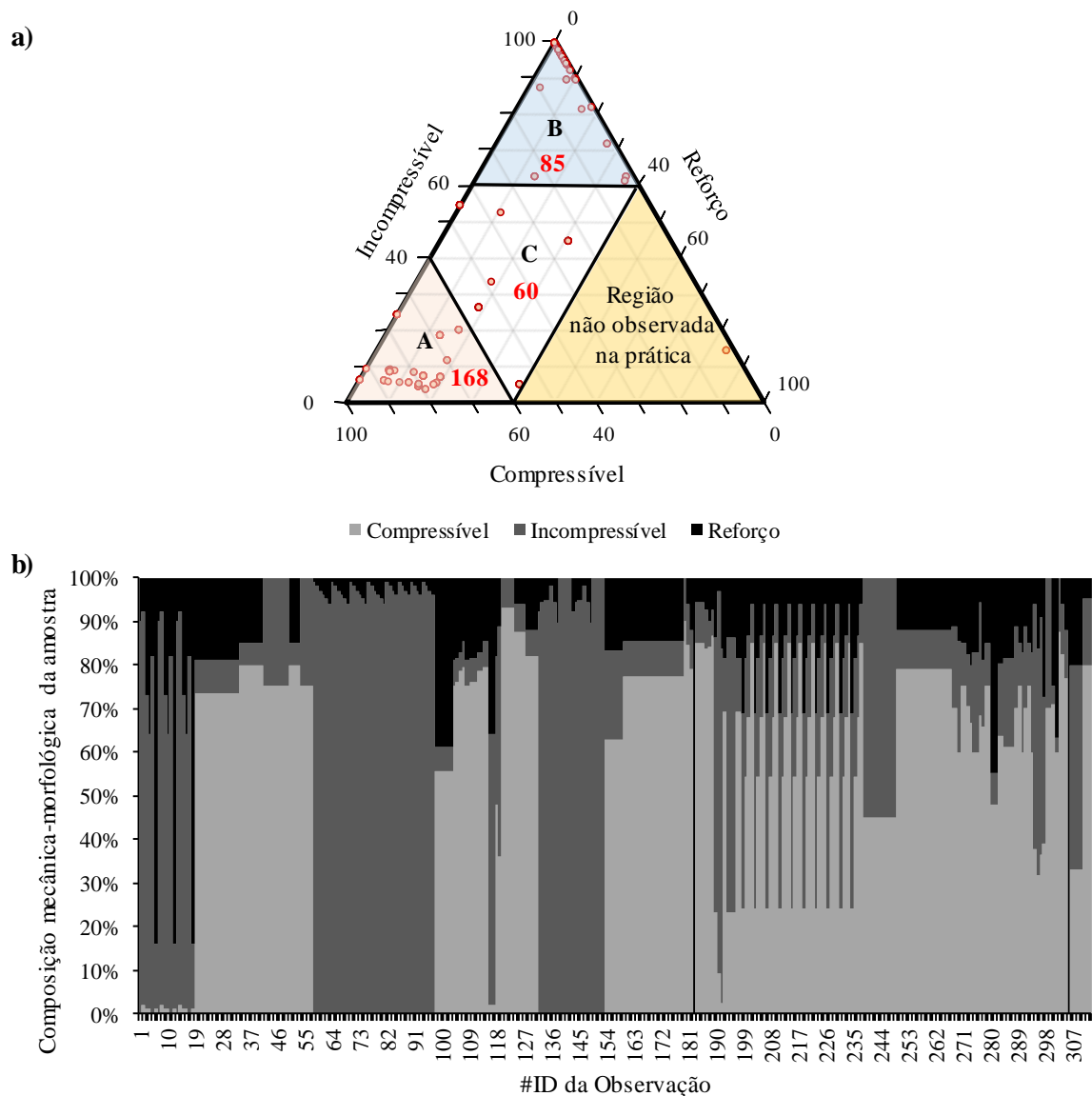


Figura 4.2 – Agrupamento das observações em classes: a) Diagrama Ternário; b) Diagrama de barras da composição (compressível, incompressível, reforço) de todas as observações.

A seguir, foram realizadas análise da variância (ANOVA) e análise multivariada da variância (MANOVA) com os dados de cada grupo para verificar o efeito da classificação proposta nos valores simultâneos e individuais dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, acoplado na análise as condições experimentais de ensaio como covariáveis (velocidade, níveis de tensão e deformação). O teste de ANOVA é um teste estatístico que verifica possível igualdade entre a média de duas ou mais populações, faz-se necessário o atendimento às premissas de homogeneidade de variâncias, normalidade e independência dos resíduos. Destaca-se que o elevado número amostral possibilita a análise de variância mesmo em distribuições não-normais. Além disso, a premissas de homogeneidade de variâncias foi confirmada pelo teste de Levene (Brown e Forsythe, 1974), enquanto a normalidade e independência dos resíduos foram atendidas segundo verificações visuais dos gráficos de resíduos por

ordem de coleta dos dados, histograma dos resíduos e resíduos ajustados. De forma semelhante, a MANOVA é um teste estatístico que verifica a relação entre um conjunto comum de preditores e diversas variáveis respostas. Os valores-p obtidos para as ANOVAs univariadas e multivariadas são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Análise de variâncias univariadas (ANOVA) e multivariadas (MANOVA).

| Variáveis (V) e Covariáveis (CV) | Valor-P (M)ANOVA | | |
|-------------------------------------|------------------|-------------|-------------|
| | ϕ | c | ϕ -c |
| (V) Classificação | 0,00 | 0,20 | 0,00 |
| (CV) Velocidade | 0,12 | 0,38 | 0,12 |
| (CV) Tensão Mínima | 0,03 | 0,26 | 0,08 |
| (CV) Tensão Máxima | 0,42 | 0,00 | 0,01 |
| (CV) Nível de Deformação | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Considerando um nível de significância de 5%, verifica-se que as ANOVAs univariadas detectaram que o efeito de classificação foi mais significativo sobre o ângulo de atrito, onde a variação da tensão normal confinante mínima e nível de deformação também apresentaram importância significativa, ao passo que a tensão normal confinante máxima e o nível de deformação apresentaram maior influência sobre a coesão. Contudo, uma vez que os parâmetros de resistência estão correlacionados fisicamente, torna-se mais adequada a análise MANOVA. Considerando a variável classificação e covariáveis velocidade, níveis de tensão e deformação, constata-se que a classificação afetou estatisticamente os resultados dos pares atrito-coesão, tornando mais relevantes a tensão normal confinante máxima e o nível de deformação.

Portanto, as 313 observações podem ser reunidas nessas 3 classes de observações (A, B, C), uma vez que este tratamento reduziu a dispersão dos parâmetros de resistência. A Figura 4.3 reúne o comportamento de dispersão dos parâmetros de resistência após a classificação das observações (para os níveis de tensão das observações, situadas no intervalo 5 – 800 kPa, com predominância entre 50 – 400 kPa).

Apesar da diferença amostral, pode-se verificar que maiores dispersões no parâmetro de coesão estão associadas às parcelas compressíveis e orgânicas dos RSU, cujos dados estão presentes em maior intensidade nas classes A e C, ao passo que maiores mobilizações por atrito tendem a ocorrer na classe B, que reúne RSU com maior predominância de componentes inorgânicos e incompressíveis. A sobreposição das regiões de maior incidência de dados de ângulo de atrito e coesão (indicadas nos *box-plots* da Figura 4.3d) nos gráficos de dispersão (Figuras 4.2 a, b e c) possibilita verificar o comportamento de incidência dos dados para cada classe.

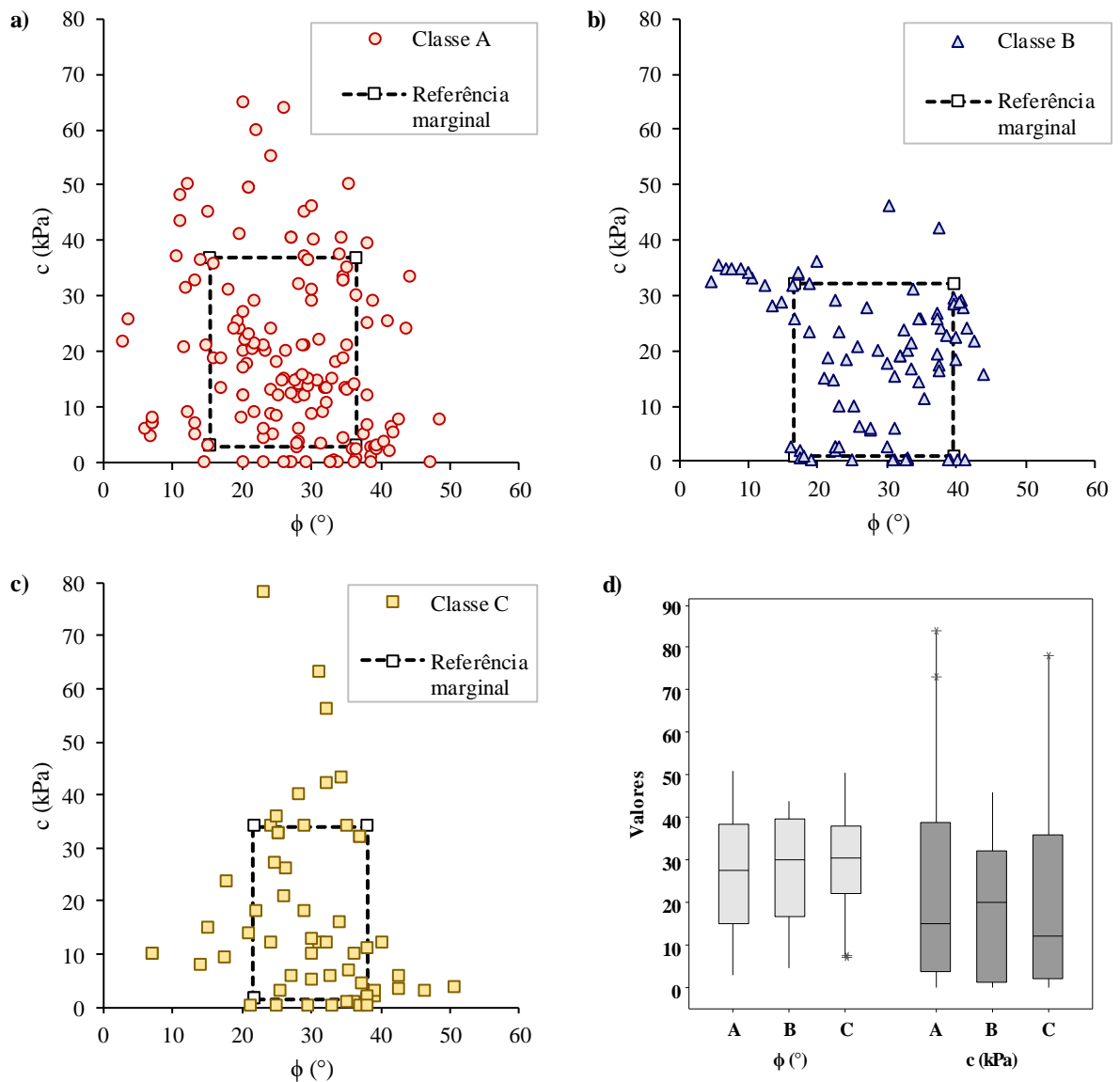


Figura 4.3 – Comportamento geral dos parâmetros de resistência em cada classe proposta. a) Dispersão na classe A; b) Dispersão na classe B; c) Dispersão na classe C; d) Box-plot das diferentes classes (70% dos dados nas caixas).

Observa-se que as amplitudes dos intervalos são moderadamente distintas de acordo com as composições mecânica-morfológicas dos RSU (Figura 4.3a – 4.2c). A dispersão de dados já diminuiu com a classificação mecânica-morfológica, mas os resultados ainda podem ser refinados identificando-se as condições experimentais segundo as quais foram obtidos os dados de cada observação (níveis de tensão normal confinante, deformação, velocidade do ensaio).

4.5. LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES

Apesar do esforço para redução da variabilidade dos dados, esta pesquisa possui limitações e considerações gerais da metodologia que devem ser salientadas. Dentre as limitações, destacam-se:

(1) Existe variabilidade intrínseca de cada trabalho utilizado, uma vez que são experimentos com materiais e condições diferentes, não existindo repetibilidade das observações. A metodologia aplicada visa contribuir para reduzir esta variabilidade das amostras, de forma simplificada e aplicável, para possibilitar análises estatisticamente menos sensíveis. Contudo, para a adoção de valores das variáveis utilizadas nesta pesquisa, interpretações dos resultados da literatura foram realizadas para a construção do banco de dados, sendo decorrentes do não detalhamento de informações nos trabalhos

(2) Algumas simplificações de covariância foram realizadas, como a consideração de independência das variáveis envolvidas nos procedimentos experimentais (materiais e moldagem).

(3) Muitas observações foram oriundas de diferentes níveis de deformação de um mesmo conjunto de ensaios de resistência, a fim de se considerar o efeito do enrijecimento dos RSU nas envoltórias de resistência;

(4) As observações realizadas nesta pesquisa limitam-se ao banco de dados analisado;

Assim, com o intuito de reduzir a variação de procedimentos experimentais e consequente dispersão dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de RSU presentes na literatura, este capítulo reuniu dados provenientes de diferentes pesquisas internacionais. Deste modo, constatou-se que:

- Para realizar inferências sobre os parâmetros de resistência da literatura deve-se considerar as diferenças procedimentais dos ensaios, uma vez que no contexto geral dos trabalhos existem muitas diferenças nas condições e métodos experimentais;
- Existe a necessidade de uma normatização acerca dos métodos de ensaio de cisalhamento direto de RSU, uma vez que diferentes fatores foram identificados como agentes contribuidores para divergências nos procedimentos experimentais. Dentre eles, a composição das amostras destaca-se como um dos principais fatores.
- A categorização dos dados segundo a composição mecânica-morfológica apresentou resultados promissores e melhor representatividade das observações da literatura, nas condições deste trabalho.
- As classes propostas para os resíduos apresentaram diferenças estatísticas entre si, uma vez que os diferentes níveis (A, B, C) apresentaram influência nos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU, mesmo com as covariáveis de condições experimentais dos ensaios. A possibilidade para análises mais aprofundadas e recomendações de projeto a partir das classes utilizadas torna-se promissora.

5. META-ANÁLISE DE ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO: RECOMENDAÇÕES DE PROJETO

5.1. INTRODUÇÃO

Segundo Keramati et al. (2018), as orientações de projeto hoje são proporcionadas principalmente por trabalhos realizados com RSU de países desenvolvidos, onde os padrões de consumo e gerenciamento dos resíduos diferem dos demais países. Contudo, a composição dos RSU, densidade, teor de umidade, entre outros fatores, influem significativamente no comportamento mecânico dos resíduos, particularmente na resistência ao cisalhamento. Ademais, verifica-se ausência de especificações e normatizações para caracterização e determinação de propriedades dos RSU. Portanto, são necessárias adequações das atuais recomendações de projeto e orientações específicas para o desenvolvimento de métodos de análise de estabilidade de aterros de resíduos, sobretudo para países menos desenvolvidos.

A partir do embasamento da metodologia de classificação realizado no Capítulo 4, este capítulo tem como objetivo analisar o comportamento dos parâmetros de resistência dos RSU em cada classe morfológica, a fim de se obter recomendações específicas para análises determinísticas e probabilísticas da estabilidade de taludes de aterros de resíduos. Ainda, são contempladas recomendações em termos de critérios de ruptura para pequenas e grandes deformações deste material.

5.2. RECOMENDAÇÕES DE PROJETO

Diversas recomendações de faixas de parâmetros de resistência são encontradas na literatura sobre RSU. Na década de 90, Landva e Clark (1990b) consideraram a resistência ao cisalhamento dos RSU devida puramente ao atrito, obtendo uma variação de 27° a 41° para o ângulo de atrito. Gotteland et al. (2000) apresentaram faixas de variação de envoltórias lineares de resistência ao cisalhamento para resíduos sintéticos, enquanto outros trabalhos consideraram envoltórias bilineares ou trilineares (Kavazanjian et al., 1995; Manassero et al., 1996; Van Impe, 1998; Stark et al., 2009).

Stark et al. (2009) reunindo diferentes recomendações de projeto e confrontando-as com seus resultados de ensaios de laboratório, recomendam, para tensões inferiores a 200 kPa, coesão de 6 kPa e ângulo de atrito de 35°, e para tensões superiores, com a parcela coesiva sendo mobilizada, coesão de 30 kPa e ângulo de atrito reduzido para 30°. Análises em termos de envoltórias de resistência ao cisalhamento também foram realizadas por Singh et al. (2009) a partir da comparação dos resultados dos seus ensaios de laboratório com resultados de ensaios e retroanálises disponibilizados previamente na literatura (Figura 5.1).

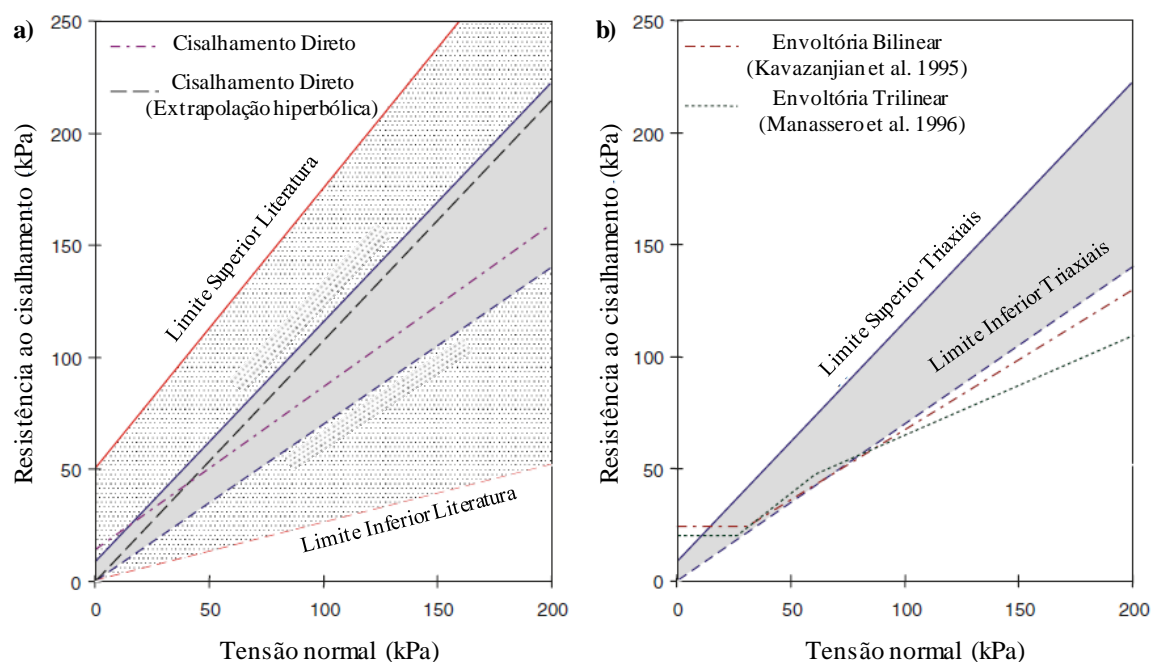


Figura 5.1 – Envoltórias e recomendações realizadas por Singh et al. (2009): (a) Recomendações gerais; (b) Envoltórias bilineares e trilinares. Fonte: Adaptado de Singh et al. (2009).

De modo semelhante, Machado et al. (2014) confrontaram os resultados de ensaios triaxiais de resíduos do aterro metropolitano de Salvador (35% de pasta orgânica) com algumas recomendações de projeto vigentes, observando que as envoltórias de resistência ao cisalhamento dos RSU brasileiros ficavam fora da zona recomendada, com ângulo de atrito de 22 e 29°. Como retratado por Gao et al. (2015), a composição gravimétrica dos RSU difere entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, assim as recomendações internacionais podem não corresponder ao desempenho de resíduos locais.

Na literatura, orientações para valores de resistência dos RSU são também encontradas em gráficos de dispersão conjunta do ângulo de atrito e da coesão (Zekkos et al., 2010b; Cho et al., 2011; Petrovic et al., 2016), como mostrado na Figura 5.2. Verifica-se que, apesar de existir intersecções entre as recomendações, não existe um consenso acerca do comportamento dos RSU, uma vez que Zekkos et al. (2010b) retratam regiões de incidência predominantemente de atrito, enquanto Cho et al. (2011) apresentam regiões de comportamento misto (atrito e coesão).

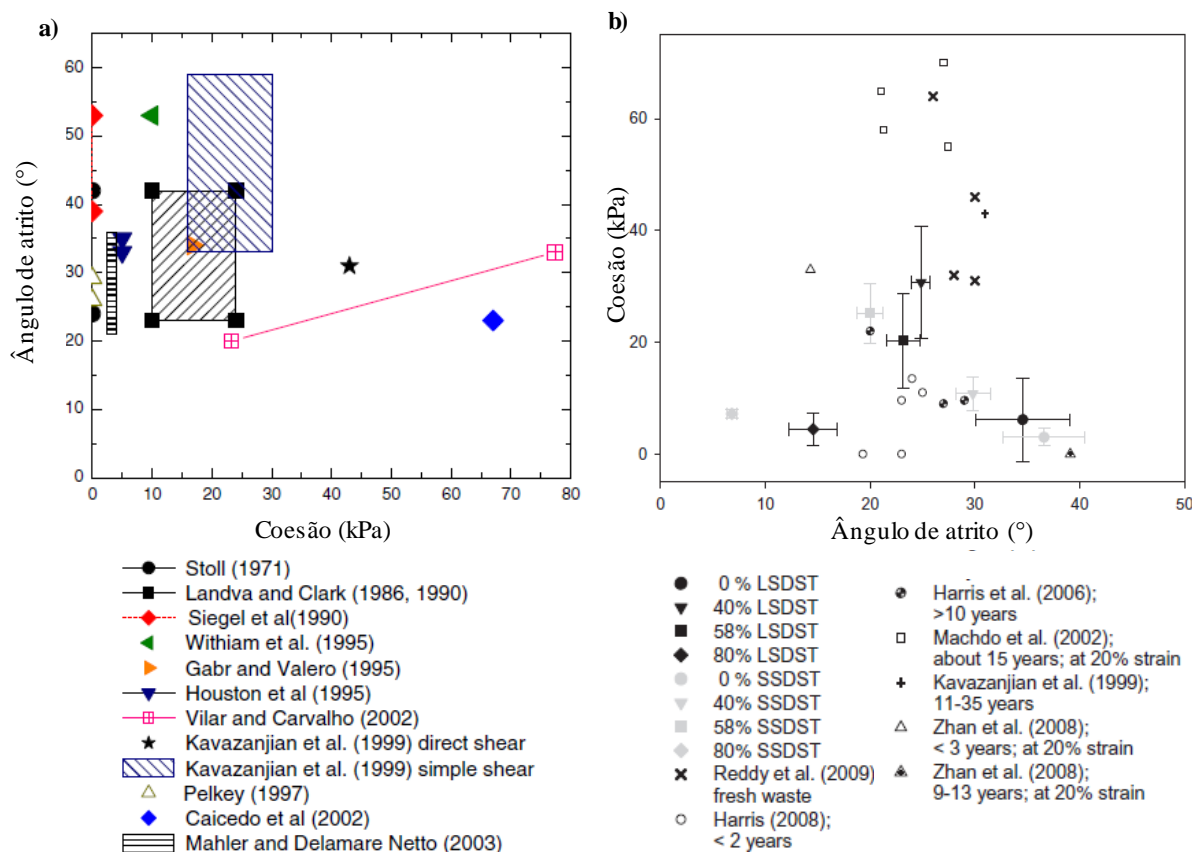


Figura 5.2 – Recomendações de regiões de incidência dos parâmetros de resistência dos RSU: (a) Resultados de Zekkos et al. (2010b); (b) Resultados de Cho et al. (2011). Fonte: Adaptado de Zekkos et al. (2010b) e Cho et al. (2011).

Ramaiah et al. (2017) exibiram uma visão geral das recomendações e resultados de ensaios com 288 pontos obtidos a partir de diferentes ensaios e retroanálises da literatura, os quais estão apresentados na Figura 5.3. A maior incidência de parâmetros pode ser verificada no intervalo de 15 – 35° de ângulo de atrito e 20 – 40 kPa de coesão. Através dos ajustes, Ramaiah et al. (2017) propuseram uma envoltória linear de resistência com os valores de 17 kPa para a coesão e 32° para o ângulo de atrito dos RSU.

Singh e Murphy (1990) sugeriram proporcionalidade inversa entre coesão e ângulo de atrito. Zhan et al. (2008) observaram esse comportamento em ensaios com resíduos de um aterro sanitário chinês, verificando o efeito de enrijecimento dos RSU com o avanço da deformação e a tendência de aumento da resistência por atrito dos RSU com o envelhecimento (degradação) das amostras.

Mais recentemente, a pesquisa de Petrovic et al. (2016) reuniu 82 valores de coesão e 103 valores de ângulo de atrito da literatura, propondo um modelo de dispersão bivariada e analisando seu comportamento estatístico. A partir da intersecção de sua região com os trabalhos de Singh e Murphy (1990) e Zhan et al. (2008), Petrovic et al. (2016) propuseram três regiões para parâmetros de projeto, considerando o estágio de degradação dos RSU e relações atrito e coesão. Estas regiões correspondem aos estágios de degradação inicial (frescos), moderadamente degradados e de elevada degradação, de

acordo com as idades e deslocamentos obtidos pelo comportamento de trajetórias de tensão de ensaios triaxiais com resíduos chineses (de predominância orgânica quando frescos) de Zhan et al. (2008).

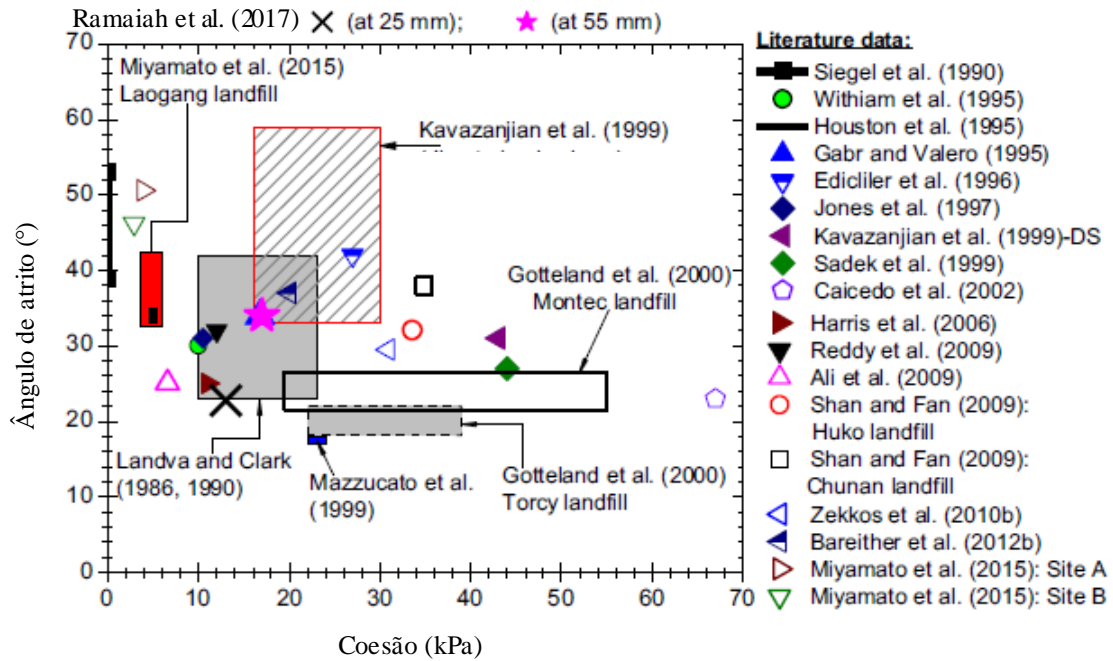


Figura 5.3 – Recomendações da literatura para parâmetros de resistência dos RSU. Fonte: Adaptado de Ramaiah et al. (2017).

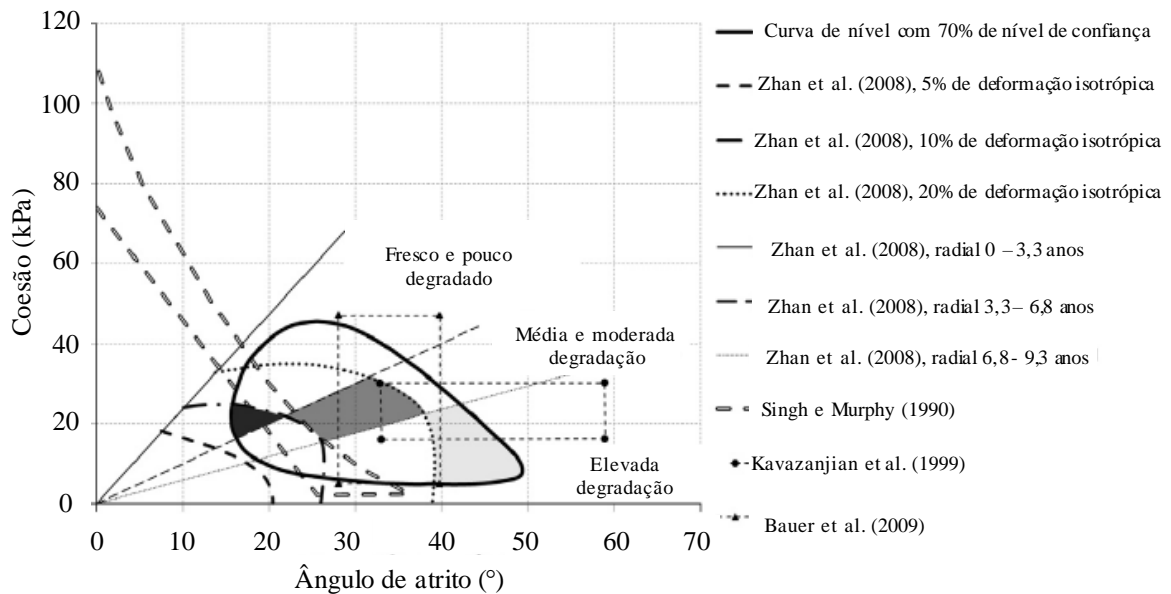


Figura 5.4 – Recomendações de valores por Petrovic et al. (2016). Fonte: Adaptado de Petrovic et al. (2016).

Jahanfar et al. (2017b) classificaram os resíduos segundo sua composição principal e compacidade, utilizando a proposta de Duncan (2000) para uma avaliação simplificada do desvio padrão

das variáveis em cada classe, e obtiveram as regiões apresentadas na Figura 5.5. Contudo, os autores utilizaram um número menor de dados disponíveis na literatura (43 pares de ângulo de atrito e coesão).

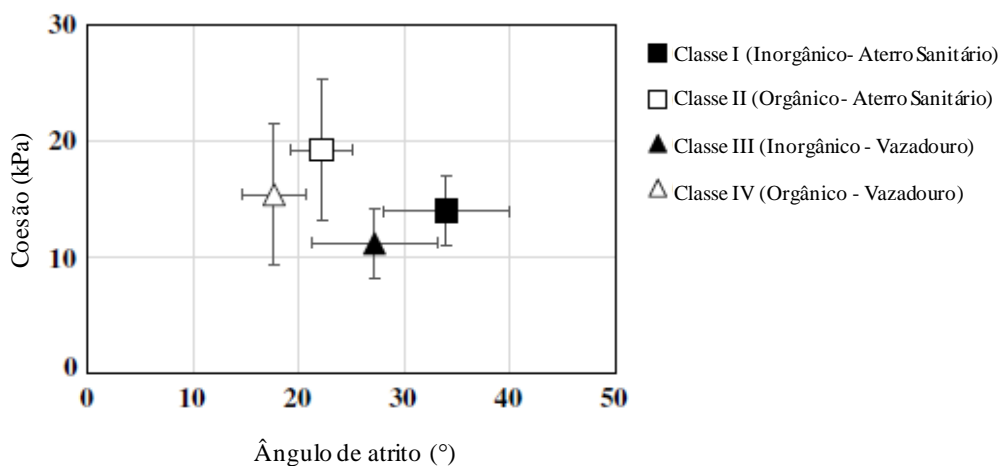


Figura 5.5 – Variações dos dados existentes em cada classe proposta por Jahanfar et al. (2017b). Fonte: Adaptado de Jahanfar et al. (2017b).

5.3. MÉTODO

Para esta pesquisa, procurou-se compreender o comportamento estatístico dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU através do levantamento de trabalhos científicos com resultados de ensaios de cisalhamento direto e cisalhamento simples, observando as características das amostras, o tipo de ensaio e os resultados apresentados. Em cada trabalho, foram coletadas informações acerca da identificação dos dados, composição, característica das amostras, método de ensaio e resultados obtidos para os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU. A partir destas informações, os dados foram agrupados segundo a metodologia de classificação apresentada no Capítulo 4, que considera o comportamento mecânico-morfológico utilizando o grupo de fatores “composição”, apresentado no Quadro 5.1. Também no Quadro 5.1, o grupo de fatores “análise” foi utilizado para a compreensão e análise do comportamento de cada parâmetro de resistência (grupo “resposta”) para cada classe (A, B, C) segundo as condicionantes identificadas.

Quadro 5.1 – Identificação das variáveis de interesse.

| Grupo | Variável | Tipo | Natureza | Níveis | Comentário |
|--------------|------------------|-------------|-----------------|---------------|---|
| Composição | %Compressível | Numérica | Contínua | --- | Orgânicos, Papel, Outros |
| | %Incompressível | Numérica | Contínua | --- | Minerais, Madeira, Metais |
| | %Reforço | Numérica | Contínua | --- | Sintéticos (Plásticos, Têxteis, Borracha) |
| Análise | Velocidade | Numérica | Contínua | --- | Diversos |
| | Tensão Mín | Numérica | Contínua | --- | Diversos |
| | Tensão Máx | Numérica | Contínua | --- | Diversos |
| | Deformação | Numérica | Binária | 2 | Baixa (até 10%), Típica (de 10% a 20%) |
| Resposta | Ângulo de Atrito | Numérica | Contínua | --- | Diversos |
| | Coesão | Numérica | Contínua | --- | Diversos |

Foram analisados 32 trabalhos da literatura, totalizando 296 resultados de pares de ângulo de atrito e coesão, cujos dados são oriundos de 15 países. O número de pares ângulo de atrito-coesão de cada referência é apresentado na Tabela 5.1, onde também se observa a quantidade de pares em cada classe mecânica-morfológica, além dos níveis de deformação a eles associados. Foram coletados os valores de ângulo de atrito e coesão a partir de envoltórias de resistência de Mohr-Coulomb (lineares), conforme metodologia apresentada no Capítulo 4. Os resultados foram interpretados considerando-se os valores de tensões confinantes mínimos e máximos, bem como os níveis de deformação.

As análises por níveis de deformação (no cisalhamento) se concentraram nos parâmetros obtidos para os níveis de deformação de até 10% (baixos) e de 10 a 20% (típicos), em virtude de sua utilização em projetos, conforme observado por Machado et al. (2002), Stark et al. (2009) e Shariatmadari et al. (2014).

Para cada parâmetro, foram analisados os respectivos comportamentos individuais, em termos de estatísticas descritivas, frequências e distribuições univariadas. Análises conjuntas foram realizadas a fim de se verificar a correlação e comportamento conjunto das observações dos dados, sobretudo em termos de distribuição. A Figura 5.6 exibe uma visão geral do método e análises estatísticas realizadas.

Tabela 5.1 – Informações gerais sobre o banco de dados de observações (N) em cada referência.

| Referência | Número de Observações | Classe A | | Classe B | | Classe C | |
|-------------------------------|-----------------------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 0-10% | 10-20% | 0-10% | 10-20% | 0-10% | 10-20% |
| Abreu e Vilar (2017) | 18 | 0 | 0 | 10 | 5 | 2 | 1 |
| Awad-Allah (2019) | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 |
| Bareither et al. (2012) | 9 | 0 | 3 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| Borgatto et al. (2014) | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Caicedo et al. (2002) | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Cardim (2008) | 6 | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Cho et al. (2011) | 32 | 8 | 8 | 0 | 0 | 8 | 8 |
| Correa et al. (2015) | 40 | 0 | 0 | 20 | 20 | 0 | 0 |
| Feng et al. (2017) | 12 | 8 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gabr e Valero (1995) | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| Jie et al. (2013) | 8 | 0 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Karimpour-Fard et al. (2014) | 8 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Keramati et al. (2018) | 18 | 12 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kölsch (1995) | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Lamare Neto (2004) | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 |
| Martins (2006) | 12 | 6 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Ojuri e Adegoke (2015) | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pandey e Tiwari (2015) | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pulat e Yukselen-Aksoy (2017) | 13 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| Pulat e Yukselen-Aksoy (2019) | 6 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Ramaiah et al. (2017) | 22 | 0 | 0 | 11 | 11 | 0 | 0 |
| Reddy et al. (2009a) | 4 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Reddy et al. (2009b) | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| Reddy et al. (2011) | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 7 |
| Reddy et al. (2015) | 6 | 0 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Shariatmadari et al. (2011) | 4 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Shariatmadari et al. (2017) | 12 | 6 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Singh et al. (2009) | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Sivakumar Babu et al. (2012) | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Zekkos e Fei (2017) | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Zekkos et al. (2010b) | 3 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Zhao et al. (2014) | 20 | 0 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total: 32 Pesquisas | 296 | 50 | 105 | 43 | 42 | 25 | 31 |

Notas: AC/AE/AS–Aterro Controlado/Experimental/Sanitário; COL–Coleta; MBT–RSU tratado; REA–Reator; SIN –Sintético; V–Vazadouro.

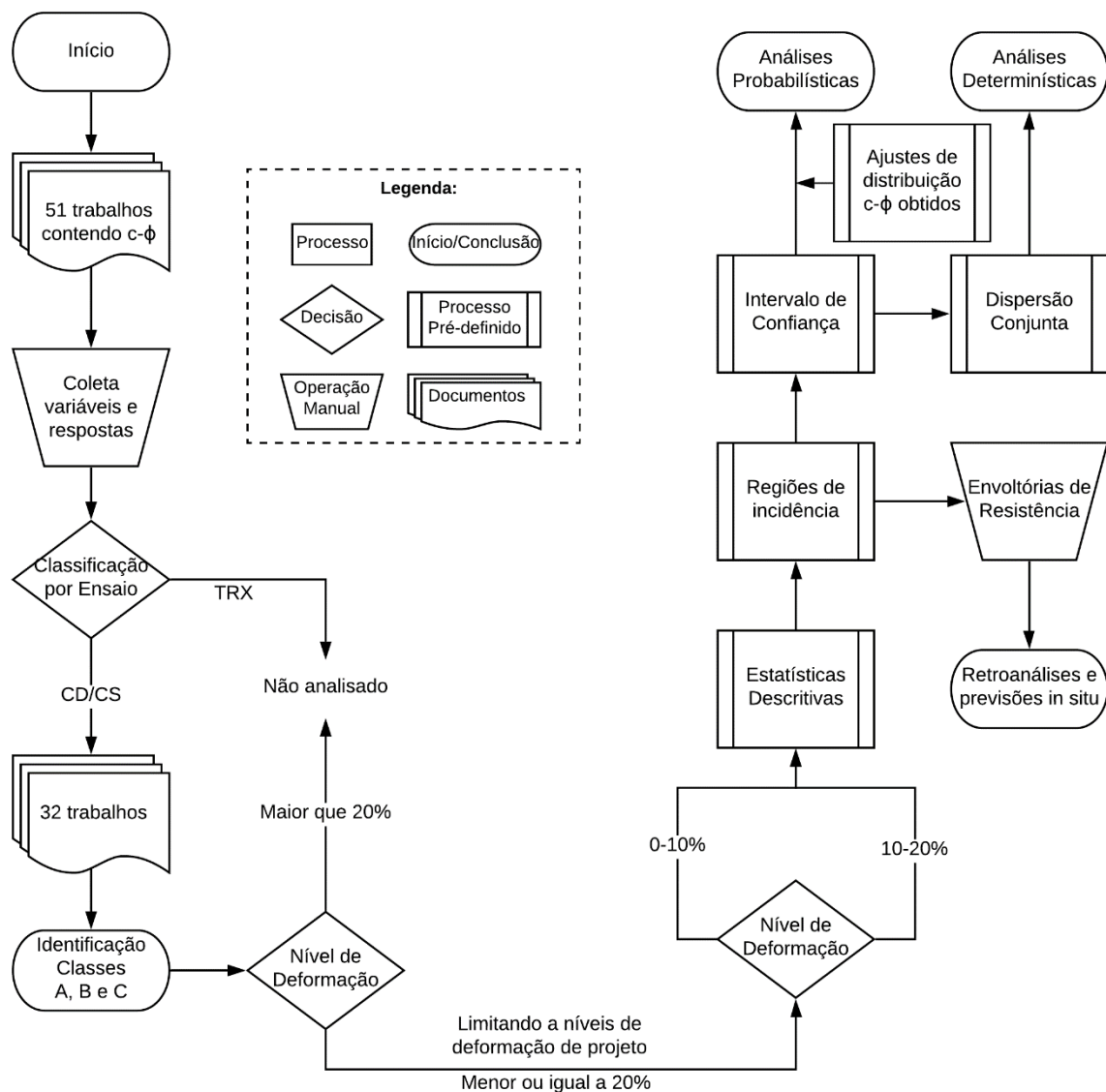


Figura 5.6 – Fluxograma do método definitivo para proposição de recomendações de parâmetros para análises e retroanálises de estabilidade de aterros sanitários.

5.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.4.1. ANÁLISES UNIVARIADAS

A partir do levantamento dos dados obtidos em cada pesquisa, foram realizadas análises de estatísticas descritivas das amostras, considerando os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU como variáveis independentes, para os níveis de deformação de até 10% e de 10 a 20%. Os resultados dessas análises são apresentados nas Tabela 5.2 a 5.4.

O número amostral de 155 pares para a classe A (Tabela 5.2), 85 para a classe B (Tabela 5.3) e 56 para a classe C (Tabela 5.4) permitiu uma adequada análise estatística, observada pelo baixo erro padrão e pela proximidade da média aparada aos valores médios dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU. Considerando os elevados coeficientes de variação obtidos, sobretudo para a coesão dos RSU, evidencia-se a variabilidade intrínseca da resistência ao cisalhamento dos RSU. Por outro lado, a classificação dos dados auxiliou na redução dessa dispersão, diminuindo o desvio padrão em relação aos resultados do Capítulo 3. Da mesma forma, o agrupamento por níveis de deformação baixos (0-10%) e altos (10-20%) caracterizou melhor estes materiais, apresentando parâmetros de dispersão menores do que os encontrados por Petrovic et al. (2016), sobretudo para o ângulo de atrito.

Tabela 5.2 – Estatísticas descritivas dos parâmetros de resistência dos RSU da classe A.

| Estatísticas Descritivas | Ângulo de atrito em diferentes níveis de deformação [ϕ (°)] | | | Coesão em diferentes níveis de deformação [c (kPa)] | | |
|--|---|-------|--------|---|-------|--------|
| | Geral | 0-10% | 10-20% | Geral | 0-10% | 10-20% |
| Classe A | | | | | | |
| Tamanho Amostral (N) | 155 | 50 | 105 | 155 | 50 | 105 |
| Média (\bar{x}) | 26,7 | 23,7 | 28,1 | 19,0 | 11,8 | 22,4 |
| Desvio Padrão (s) | 9,6 | 9,7 | 9,3 | 15,7 | 10,0 | 16,7 |
| Coeficiente de Variação (COV) | 36% | 41% | 33% | 83% | 85% | 75% |
| Erro Padrão (SE) | 0,8 | 1,4 | 0,9 | 1,3 | 1,4 | 1,6 |
| Média Aparada ⁽¹⁾ (\bar{x}') | 26,9 | 23,7 | 28,4 | 17,9 | 11,0 | 21,5 |
| Mínimo | 2,7 | 2,7 | 3,4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 15° Percentil (P15) | 15,3 | 12,0 | 19,4 | 2,9 | 0,0 | 3,6 |
| Mediana (P50) | 27,8 | 25,1 | 28,8 | 15,0 | 9,9 | 20,2 |
| 85° Percentil (P85) | 36,4 | 32,8 | 38,1 | 36,8 | 22,2 | 40,5 |
| Máximo | 48,5 | 48,5 | 47,0 | 65,0 | 37,1 | 65,0 |
| Amplitude | 45,8 | 45,8 | 43,6 | 65,0 | 37,1 | 65,0 |
| Intervalo de Confiança Inferior ⁽²⁾ | 24,7 | 20,1 | 25,7 | 15,7 | 8,1 | 18,2 |
| Intervalo de Confiança Superior ⁽²⁾ | 28,7 | 27,2 | 30,4 | 22,2 | 15,4 | 26,6 |

Notas: ⁽¹⁾ Média desconsiderando *outliers*. ⁽²⁾ Correspondentes ao nível de significância de 5%.

Tabela 5.3 – Estatísticas descritivas dos parâmetros de resistência dos RSU da classe B.

| Estatísticas Descritivas | Ângulo de atrito em diferentes níveis de deformação [ϕ (°)] | | | Coesão em diferentes níveis de deformação [c (kPa)] | | |
|--|---|-------|--------|---|-------|--------|
| | Geral | 0-10% | 10-20% | Geral | 0-10% | 10-20% |
| Classe B | | | | | | |
| Tamanho Amostral (N) | 85 | 43 | 42 | 85 | 43 | 42 |
| Média (\bar{x}) | 27,8 | 23,2 | 32,4 | 18,4 | 16,8 | 20,1 |
| Desvio Padrão (s) | 10,2 | 7,6 | 10,5 | 12,5 | 13,3 | 11,5 |
| Coefficiente de Variação (COV) | 37% | 33% | 32% | 68% | 79% | 57% |
| Erro Padrão (SE) | 1,1 | 1,2 | 1,6 | 1,4 | 2,0 | 1,8 |
| Média Aparada ⁽¹⁾ (\bar{x}') | 28,1 | 23,5 | 33,2 | 18,3 | 16,4 | 20,2 |
| Mínimo | 4,7 | 4,7 | 6,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 15° Percentil (P15) | 16,6 | 15,5 | 17,2 | 1,0 | 0,3 | 3,9 |
| Mediana (P50) | 30,0 | 23,0 | 37,2 | 20,0 | 18,3 | 22,0 |
| 85° Percentil (P85) | 39,5 | 32,5 | 40,5 | 32,0 | 31,9 | 33,9 |
| Máximo | 43,9 | 34,8 | 43,9 | 46,0 | 46,0 | 42,2 |
| Amplitude | 39,2 | 30,1 | 37,1 | 46,0 | 46,0 | 42,2 |
| Intervalo de Confiança Inferior ⁽²⁾ | 24,9 | 20,2 | 28,2 | 15,0 | 11,6 | 15,6 |
| Intervalo de Confiança Superior ⁽²⁾ | 30,6 | 26,2 | 36,6 | 21,9 | 22,0 | 24,7 |

Notas: ⁽¹⁾ Média desconsiderando *outliers*. ⁽²⁾ Correspondentes ao nível de significância de 5%.

Tabela 5.4 – Estatísticas descritivas dos parâmetros de resistência dos RSU da classe C.

| Estatísticas Descritivas | Ângulo de atrito em diferentes níveis de deformação [ϕ (°)] | | | Coesão em diferentes níveis de deformação [c (kPa)] | | |
|--|---|-------|--------|---|-------|--------|
| | Geral | 0-10% | 10-20% | Geral | 0-10% | 10-20% |
| Classe C | | | | | | |
| Tamanho Amostral (N) | 56 | 25 | 31 | 56 | 25 | 31 |
| Média (\bar{x}) | 30,0 | 30,6 | 29,4 | 17,1 | 10,3 | 22,5 |
| Desvio Padrão (s) | 8,8 | 9,2 | 8,5 | 17,3 | 15,8 | 16,8 |
| Coefficiente de Variação (COV) | 29% | 30% | 29% | 102% | 152% | 75% |
| Erro Padrão (SE) | 1,2 | 1,8 | 1,5 | 2,3 | 3,2 | 3,0 |
| Média Aparada ⁽¹⁾ (\bar{x}') | 30,2 | 30,5 | 30,4 | 15,2 | 7,8 | 21,4 |
| Mínimo | 7,0 | 14,0 | 7,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 15° Percentil (P15) | 21,6 | 20,8 | 21,8 | 1,6 | 0,0 | 2,0 |
| Mediana (P50) | 30,5 | 30,0 | 31,0 | 11,5 | 6,0 | 18,0 |
| 85° Percentil (P85) | 38,0 | 42,4 | 38,0 | 34,0 | 21,3 | 40,4 |
| Máximo | 50,6 | 50,6 | 40,0 | 78,0 | 78,0 | 63,0 |
| Amplitude | 43,6 | 36,6 | 33,0 | 78,0 | 78,0 | 63,0 |
| Intervalo de Confiança Inferior ⁽²⁾ | 26,9 | 25,9 | 25,5 | 11,1 | 2,2 | 14,7 |
| Intervalo de Confiança Superior ⁽²⁾ | 33,0 | 35,4 | 33,4 | 23,0 | 18,5 | 30,3 |

Notas: ⁽¹⁾ Média desconsiderando *outliers*. ⁽²⁾ Correspondentes ao nível de significância de 5%.

A partir de dados de literatura, Sivakumar Babu et al. (2014) encontraram desvios-padrão da ordem de 3,8 – 24 kPa para a coesão e 6,1 – 9,7° para o ângulo de atrito, com respectivos COV de 57 – 80% (coesão) e 22 – 26% (ângulo de atrito). Para Datta e Sivakumar Babu (2016), o COV da coesão apresentou magnitude de 100%, enquanto para o ângulo de atrito foi da ordem de 20%. Esses valores se mostram compatíveis com os dados obtidos nesta pesquisa após a classificação proposta, sobretudo

considerando a maior abordagem amostral realizada. Comparativamente, as propriedades de compressibilidade do RSU os valores estimados são da ordem de 32% para o índice de compressão e 122% para o índice de compressão secundária (Basha et al., 2016), enquanto para o módulo volumétrico e cisalhante atinge ordem de 95% (Datta e Sivakumar Babu, 2016).

Apesar dos esforços para reduzir a dispersão de resultados, a classe C ainda apresentou alta dispersão (Tabela 5.4), sobretudo pela mobilização heterogênea das fibras presentes nos resíduos, evidente para as deformações de 10-20%. Ademais, o modelo de Mohr-Coulomb tradicional utilizado não considera o comportamento das fibras, que é relevante para a resistência ao cisalhamento dos RSU (Lamare Neto, 2004; Borgatto, 2006; Mahler e Lamare Neto, 2006).

5.4.2. DISPERSÃO CONJUNTA

Os dados desta pesquisa, em cada classe proposta, foram comparados a recomendações existentes na literatura, conforme a Figura 5.7. Na Figura 5.7a são apresentadas as recomendações de diferentes trabalhos da literatura, abrangendo o período de 1990 a 2016, cuja sobreposição evidencia a divergência entre as propostas. A sobreposição dos dados de cada classe, obtidos nesta pesquisa, às faixas recomendadas na literatura (Figura 5.7b-5.6d) indica que, de forma geral, os pontos amostrais situam-se em regiões inferiores às delimitadas pela literatura, ou seja, as recomendações da literatura podem estar superestimando os parâmetros de resistência dos RSU.

Com relação aos resíduos da classe A, com composição principal compressível e orgânica, a Figura 5.7b revela elevada divergência de dados desta pesquisa frente às recomendações de alguns autores da literatura. Na Figura 5.7c, os dados da classe B apresentaram boa aderência à proposta de Petrovic et al. (2016), que reuniram, majoritariamente, parâmetros de resíduos Norte americanos e europeus, cujas características principais estão associadas à parcela inorgânica e incompressível dos RSU. A classe C apresentou os maiores valores dos parâmetros de resistência, uma vez que a composição mista dos resíduos possibilitou uma melhor mobilização da parcela de atrito e coesão desses materiais (Figura 5.7d). A possibilidade dos resíduos da classe A (compressíveis) migrarem de comportamento para classes B ou C precisa ainda ser verificada, com resultados de estágios de degradação e variação de propriedades com o tempo. Contudo, a divergência de comportamentos é acentuada, de forma que os projetos com resíduos enquadrados na classe A podem considerar seus respectivos valores em análises de curto prazo e novas seções de alteamento. Em projetos de aterro sanitário, é comum e recomendável a análise das seções geotécnicas em diferentes períodos de alteamento, cujos materiais apresentem diferentes possibilidades de parâmetros geotécnicos nestes cenários. Este fato justifica a necessidade e existência de diferentes classes de propriedades de RSU.

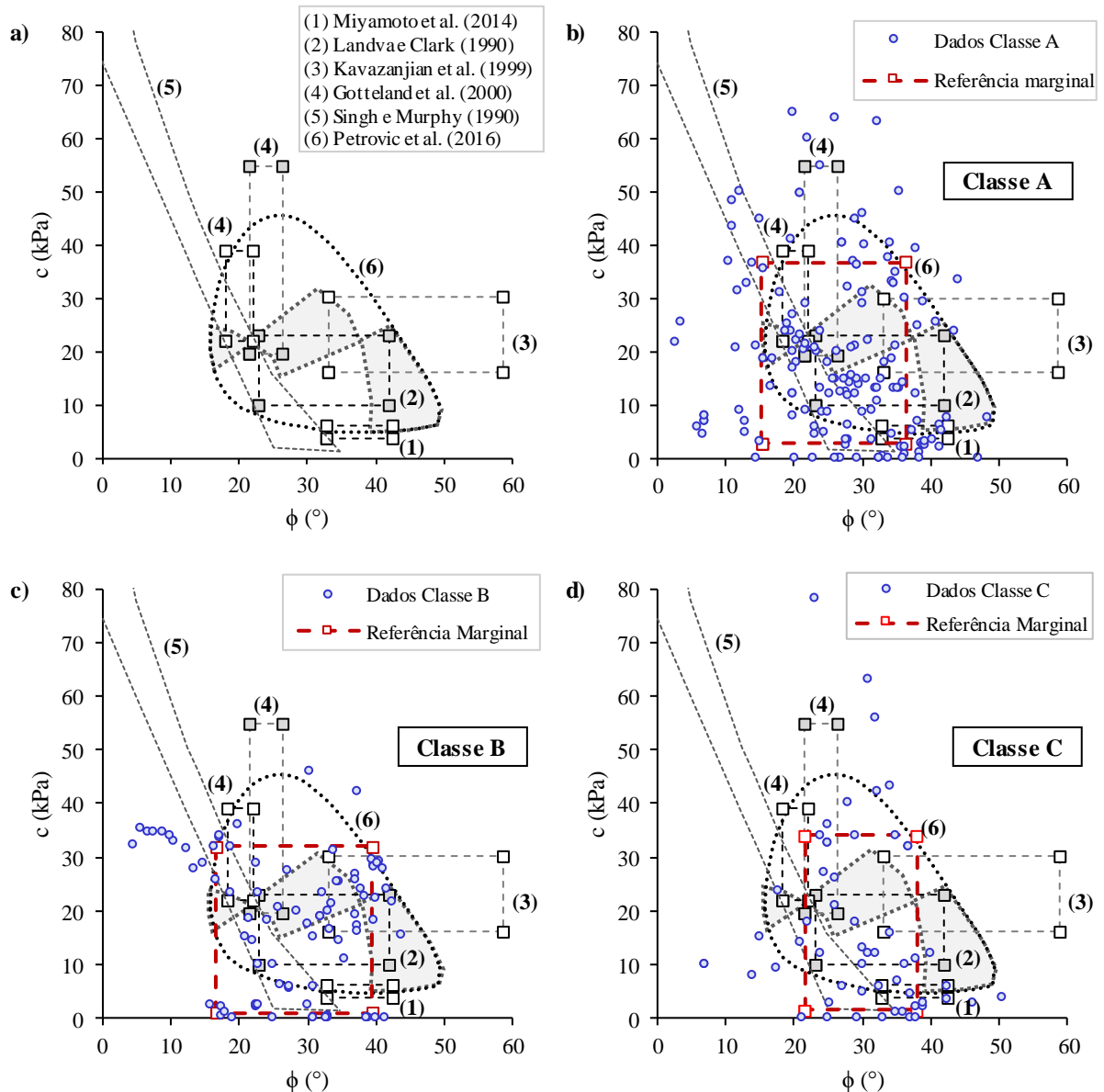


Figura 5.7 – Comparação das recomendações da literatura com dados desta pesquisa: (a) recomendações gerais; (b) classe A; (c) classe B; (d) classe C.

Considerando as referências de distribuições marginais de 70% dos valores de cada parâmetro, existe uma convergência de incidência de valores no intervalo de 20 a 35° de atrito e 5 a 30 kPa de coesão. Essa incidência coincide com as recomendações de Petrovic et al. (2016) para RSU frescos e moderadamente degradados e as de Landva e Clark (1990b). Já as recomendações de Miyamoto et al. (2014), Singh et al. (2009), e Gotteland et al. (2000) coincidem parcialmente com esta região. As distribuições marginais podem ser utilizadas para delimitação de distribuições de frequência em análises probabilísticas e análises de sensibilidade nas análises determinísticas.

Considerando o nível de deformações associado aos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU, a Figura 5.8 destaca a dispersão amostral de cada classe dos RSU frente às estimativas dos trabalhos de Zhan et al. (2008) e Gao et al. (2015). A partir do enrijecimento decorrente do efeito fibra

nos RSU, as orientações de Zhan et al. (2008) e Gao et al. (2015) adequaram-se melhor aos dados resultantes da classe A (Figura 5.8a) e C (Figura 5.8c), que apresentam maior ganho de atrito e coesão com a deformação, decorrente da composição predominante orgânica e fibrosa desses materiais. A classe B (Figura 5.8b) caracterizou-se por uma maior mobilização do atrito, com valores maiores mesmo para pequenas deformações devido à composição inorgânica. Observando-se o contexto geral dos dados na Figura 5.8d, a delimitação de 10% de deformação de Zhan et al. (2008) apresentou um bom delineamento dos dados de pequenas e grandes deformações.

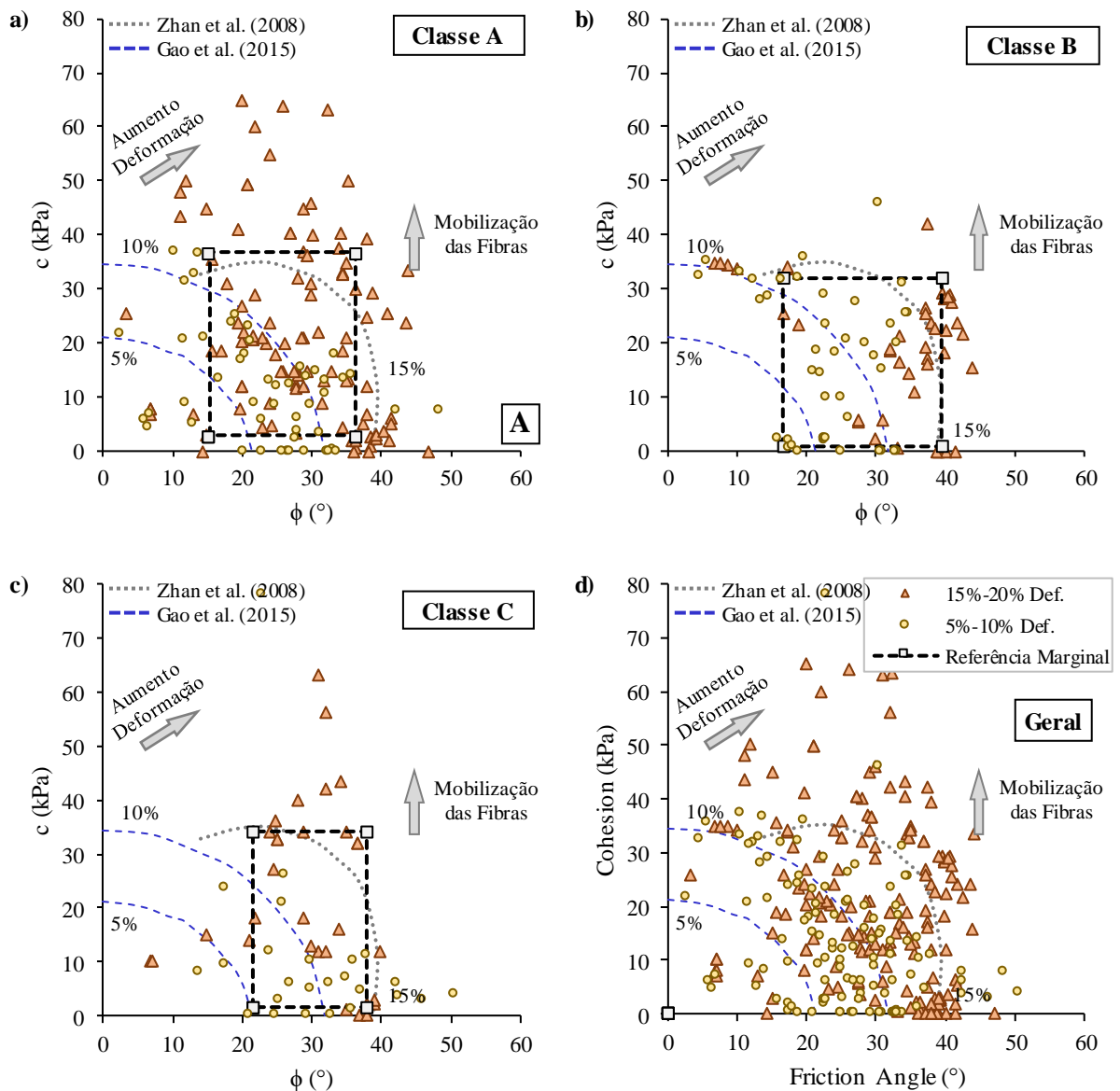


Figura 5.8 – Influência do nível de deformação dos ensaios nos valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU: (a) classe A; (b) classe B; (c) classe C; (d) dados gerais.

Na Figura 5.9 são apresentadas as comparações das recomendações da literatura com os intervalos de confiança das médias das distribuições dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos

RSU avaliados nesta pesquisa para os diferentes níveis de deformação (ao nível de 95% de confiança). Destaca-se que os intervalos de confiança podem ser utilizados para previsão de médias de distribuição para análises probabilísticas ou referências iniciais para análises determinísticas.

Como observado na Figura 5.9, os intervalos obtidos se enquadraram nas recomendações já existentes na literatura. No entanto, para a classe A (Figura 5.9b), este intervalo foi significativamente menor que para a classe C (Figura 5.9d), o que é decorrente da divergência no número amostral e no comportamento dos dados. Os resíduos da classe B (Figura 5.9c) tenderam a desenvolver maior resistência por atrito, resultando no maior deslocamento dos intervalos de confiança para a média do ângulo de atrito, comportamento este esperado decorrente da menor presença de matéria orgânica compressível, como destacado por Petrovic et al. (2016).

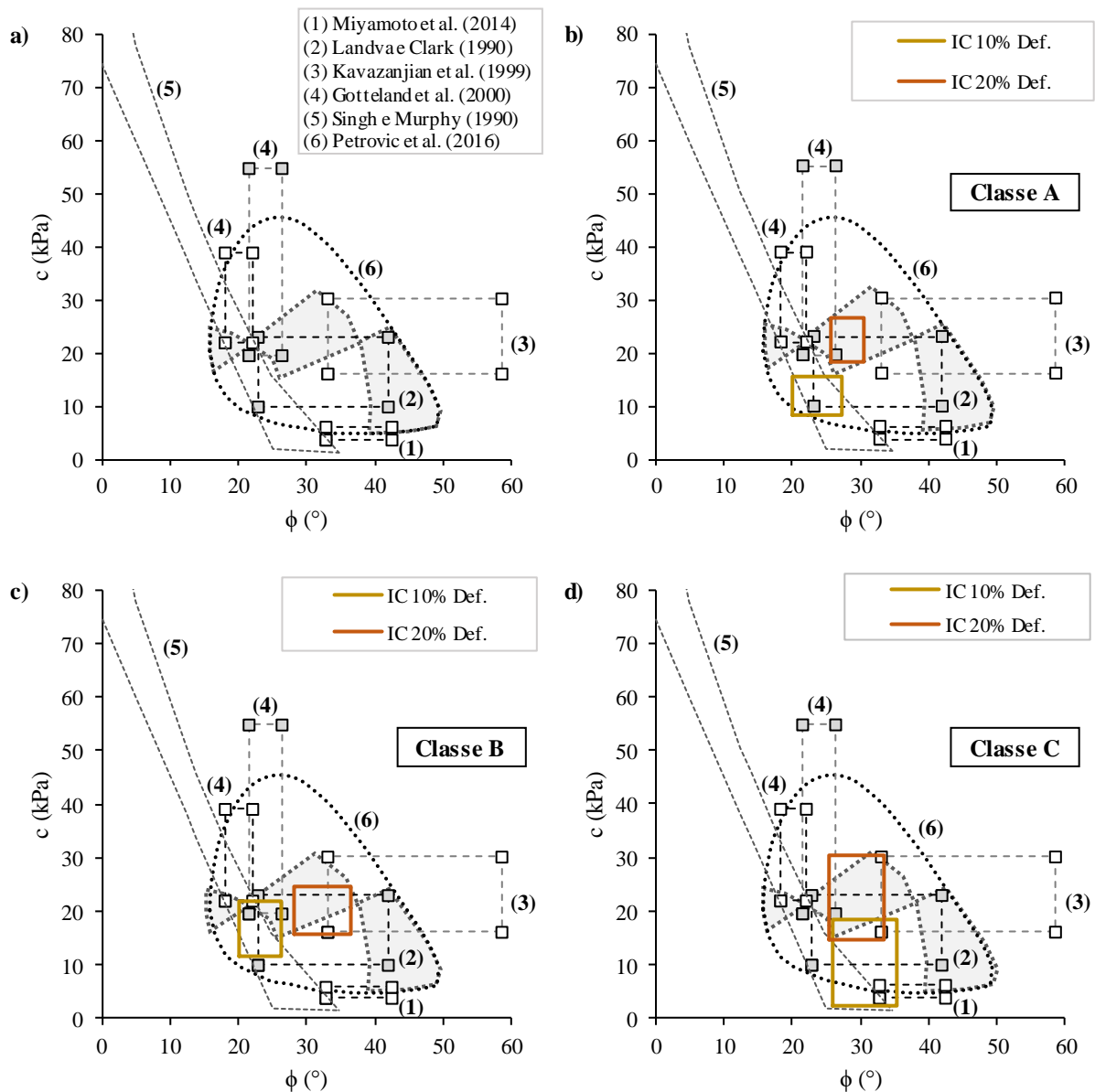


Figura 5.9 – Comparação das recomendações da literatura com os intervalos de confiança desta pesquisa: (a) recomendações gerais; (b) classe A; (c) classe B; (d) classe C.

Considerando os intervalos de confiança, existe uma convergência para a recomendação de RSU medianamente degradado, segundo a proposta de Petrovic et al. (2016), referente aos parâmetros de resistência associados ao nível de 20% de deformação nos ensaios de cisalhamento direto. Este fato não ocorreu para o nível de 10%, uma vez que o nível de deformação impactou significativamente a região de confiança para incidência das médias dos parâmetros. Valores elevados de resistência apresentados nas recomendações de Kavazanjian et al. (1995), Gotteland et al. (2000) e Petrovic et al. (2016) parecem não ser adequados para consideração de médias de distribuição considerando o cenário geral destes dados.

5.4.3. ENVOLTÓRIAS DE RESISTÊNCIA

As envoltórias de resistência dos RSU podem ser associadas a níveis de tensões ou deformações. A Figura 5.10 foi construída com envoltórias de resistência calculadas com parâmetros de cada ensaio utilizado nesta pesquisa determinados para tensão normal até 400 kPa, uma vez que os trabalhos da literatura se restringem, majoritariamente, a esse valor, que corresponde a tensões usualmente observadas em aterros sanitários reais. A região hachurada na Figura 5.9 indica 70% dos valores de envoltórias obtidos. As curvas delimitadoras de 70% das envoltórias apresentaram ajuste linear com R^2 superior a 0,95 para todos os casos analisados. Essas informações podem ser utilizadas para retroanálises, comparação com ensaios *in situ* e previsão inicial de resistência ao cisalhamento dos RSU.

Ramaiah et al (2017) reuniram 288 pontos oriundos de resultados de ensaios de cisalhamento direto e retroanálises de aterros reais, estáveis e rompidos, incluindo contribuições prévias de Stark et al. (2009). Regressão linear (com $r^2 = 0,93$) ajustada a esses valores resultou em parâmetros médios de 32° para o ângulo de atrito e 17 kPa para a coesão. Ramaiah et al. (2017) constataram consideráveis dispersões amostrais, principalmente para baixas tensões confinantes. Machado et al. (2014) e Singh et al. (2009) também verificaram diferentes comportamentos em virtude do valor de tensão normal confinante.

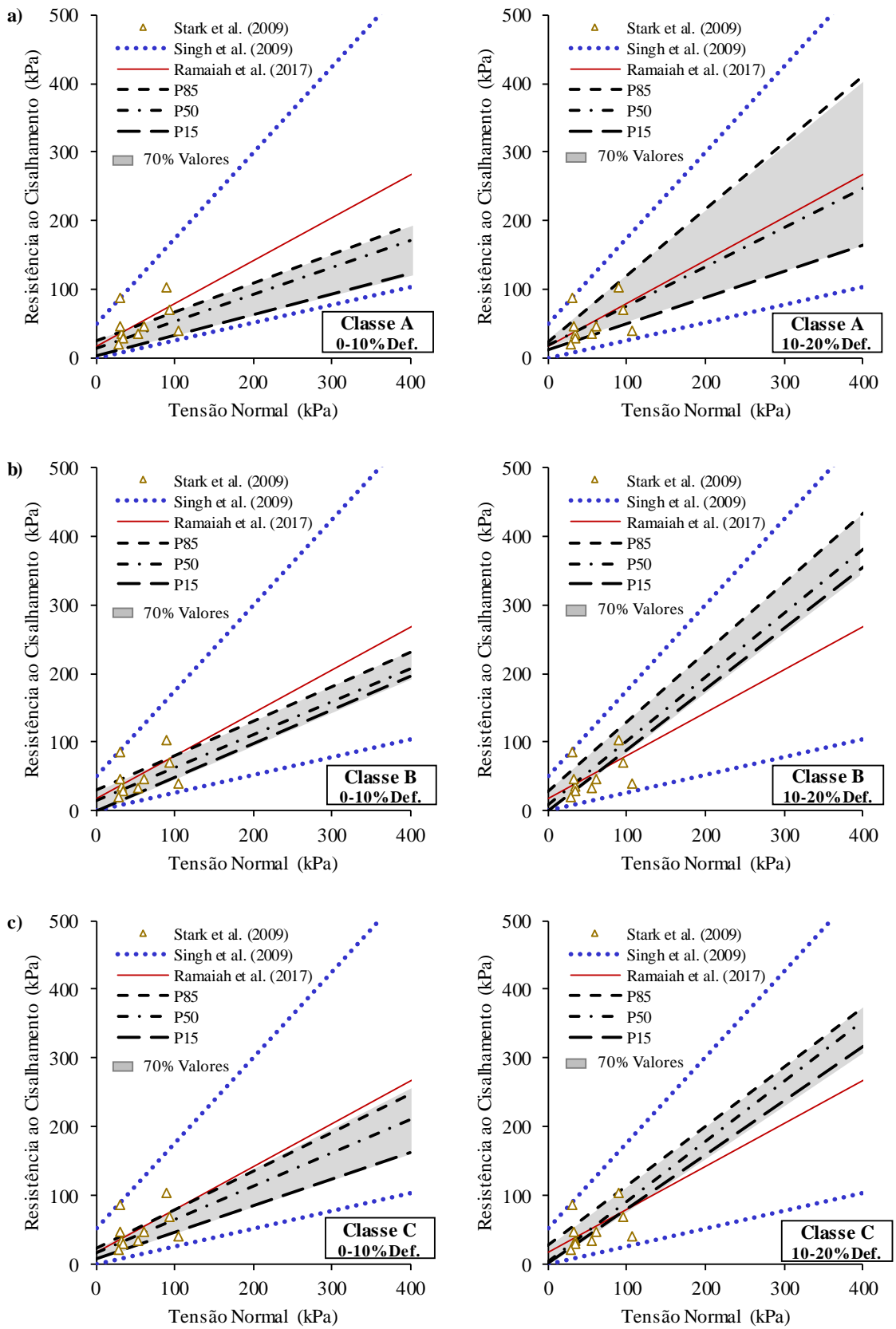


Figura 5.10 – Regiões de incidência de 70% dos dados das envoltórias de resistência para pequenas e grandes deformações: (a) classe A; (b) classe B; (c) classe C.

Observa-se na Figura 5.10 que, para pequenas deformações (10%), a região hachurada (70% dos dados) indica menor dispersão de valores do que as recomendações da literatura para todas as classes propostas nesta pesquisa, mesmo para a classe A (Figura 5.10a), onde a predominância de matéria compressível aumenta a dispersão de observações. Observa-se também que a área hachurada contempla as recomendações da literatura (Singh et al., 2009; Stark et al., 2009; Ramaiah et al., 2017). A regressão de Ramaiah et al. (2017) descreve melhor o comportamento da Classe A à 20% de deformação, mas, para as classes B (Figura 5.10b) e C (Figura 5.10c), subestima as envoltórias a 20% de deformação e as superestima para 10% de deformação.

Considerando os trechos iniciais de tensão normal confinante (até 100 kPa), existem pequenas diferenças nos valores de resistência dos RSU, de forma que a classificação não demonstra efetiva influência nesta estimativa (apenas no cenário de baixas tensões confinantes). A partir do valor de 100 kPa, a resistência ao cisalhamento apresenta magnitudes diferentes de acordo com a classe dos RSU, onde os efeitos operacionais (alçamento, compactação) que se revertem em tensões confinantes, influenciam significativamente no desempenho mecânico da estrutura do aterro. Um comportamento semelhante foi observado por Asadi et al. (2017) em ensaios de compressão triaxial. Ramaiah et al. (2017) e Singh et al. (2009) sugerem a correção das envoltórias para baixos níveis de tensões.

5.5. LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES

Considerando a variabilidade intrínseca dos materiais e os métodos de coleta e meta-análise dos dados apresentados nesta pesquisa, algumas observações devem ser realizadas:

(1) Foram coletados dados e observações de ensaios de cisalhamento direto e cisalhamento simples, por apresentarem mobilizações de resistência semelhantes decorrente da imposição de planos preferenciais de ruptura;

(2) Os parâmetros de resistência dos RSU obtidos se adequam melhor a análises de equilíbrio limite (determinísticas ou probabilísticas), apesar de seu emprego poder ser utilizado em análises de tensão-deformação. Estudos aprofundados devem ser realizados para a compreensão do comportamento mecânico (modelos constitutivos) da avaliação de seus respectivos parâmetros;

(3) A variabilidade dos parâmetros de resistência dos RSU pode ser reduzida com informações locais e dos ensaios dos RSU, para otimização das análises;

(4) As atuais recomendações da literatura mostraram-se inadequadas para descrever o cenário geral dos dados de RSU (uma vez que as distintas características mecânicas-morfológicas dos RSU não foram abordadas nestes trabalhos);

(5) Os níveis de deformações analisados são referentes aos critérios de ruptura dos ensaios de cisalhamento e não às características de compressibilidade e adensamento dos RSU.

A partir da classificação mecânica-morfológica de resultados de ensaios de cisalhamento direto e cisalhamento simples de 32 trabalhos da literatura, num total de 296 observações de métodos de ensaios, foram correlacionados os comportamentos de resistência ao cisalhamento, observando-se que:

- A classificação dos RSU proposta nesta pesquisa reduziu a dispersão de resultados, quando comparada ao cenário geral observado no Capítulo 3;
- O comportamento de enrijecimento dos RSU relatado na literatura foi verificado nestas classificações, uma vez que o nível de deformações associado aos parâmetros de resistência afetou substancialmente os valores de ângulo de atrito e coesão;
- No cenário geral de RSU apresentado nesta pesquisa, constata-se que as recomendações da literatura não devem ser generalizadas a todos os RSU;
- Nas análises determinísticas de estabilidade de taludes de aterros, podem ser utilizadas as estatísticas de posição (referências marginais) e intervalos de confiança propostos nesta pesquisa para estimativas iniciais de projeto;
- Nas análises probabilísticas de estabilidade de taludes de aterros, as estatísticas descritivas, intervalos de confiança para a média e funções de distribuições obtidas nesta pesquisa podem ser utilizadas;
- As envoltórias de resistência ao cisalhamento dos RUS apresentadas nesta pesquisa podem ser utilizadas em retroanálises e previsões de resistência de RSU.

6. ANÁLISES PROBABILÍSTICAS DE ESTABILIDADE DE TALUDES DO ATERRO SANITÁRIO SÍTIO SÃO JOÃO

6.1. INTRODUÇÃO

No âmbito da geotecnia, os parâmetros dos materiais analisados (propriedades mecânicas, hidráulicas, físicas) dependem de uma série de fatores, como mineralogia, relações físicas entre as fases do material, estado de compactação e consistência, temperatura, forma e estrutura dos materiais constituintes, dentre outros. No campo dos RSU, os fatores de estado de degradação e presença de componentes heterogêneos amplificam esta variabilidade quanto aos parâmetros, tal como observado nos capítulos anteriores desta pesquisa. Além disso, a concepção de um projeto de aterro sanitário permeia diferentes áreas do conhecimento.

Do ponto de vista geotécnico, são realizadas análises de estabilidade dos taludes, fundação e controle das deformações do aterro sanitários, entre outras. Contudo, os dados de resistência ao cisalhamento dos RSU apresentados na literatura apresentam grande variação se, por exemplo, comparados aos solos. Ademais, há incerteza em relação às pressões neutras existentes no maciço de resíduos, tanto devido a gases como lixiviados gerados no processo de degradação, além da infiltração de água pela cobertura. É comum a formação de bolsões lixiviado ou biogás, gerando elevadas pressões neutras (Benvenuto e Cipriano, 2010; Colomer-Mendoza, 2013). Esta heterogeneidade de propriedades e estado dos RSU nos maciços sanitários gera incertezas quanto à estabilidade dos maciços (Jahanfar et al., 2017b).

Apesar disso, poucos trabalhos utilizam dados estatísticos obtidos com amostragens significativas como base para análises probabilísticas de estabilidade (Petrovic et al., 2016). No caso de análise de taludes de aterros sanitários, há ainda dificuldade na determinação de parâmetros mecânicos, bem como da distribuição de pressões neutras (Colomer-Mendoza, 2013; Petrovic et al., 2016; Reddy et al., 2018; Kamiji e Oliveira, 2019).

A confiabilidade estrutural é definida por Beck (2019) como “*uma medida do grau de confiança em que uma estrutura ou sistema estrutural atenda aos requisitos técnicos do projeto (função, resistência, equilíbrio), dentro de uma vida útil de projeto especificada, respeitadas as condições de operação e de projeto (...)*”. Hachich (1972) ressalta que a confiabilidade e segurança das estruturas geotécnicas pode ser verificada por diferentes métodos, sendo geralmente agrupados em determinísticos (tensões admissíveis e estados-limite) e probabilísticos (condicionado, semi-probabilístico e puro). Metodologias de análises probabilísticas de estabilidade surgem como alternativas aos métodos tradicionais de análises determinísticos de estabilidade de aterros sanitários (Dixon et al., 2006), devido à possibilidade de considerar o comportamento estatístico das variáveis envolvidas, aliado ao fato de que o fator de segurança determinístico pode indicar estabilidade num cenário de alta probabilidade de falha.

A Figura 6.1 ilustra exemplos de funções densidade de probabilidades para fatores de segurança. Apesar do fator de segurança de média 1,5 apresentar estabilidade segundo o método determinístico, a distribuição indicada pela linha cheia, com média igual a 1,5, indica maior probabilidade de falha ($FS < 1$) do que a distribuição representada pela linha pontilhada, de média 1,2. Entende-se como probabilidade de falha a propensão da estrutura deixar de atender os requisitos técnicos de projeto, no período e condições projetadas, compreendendo-a como grau de (des)confiança (Hachich, 1972; Duncan, 2000; Beck, 2019). No caso de estabilidade de taludes, pode ser compreendida como a ruptura local ou ruína da estrutura, por exemplo.

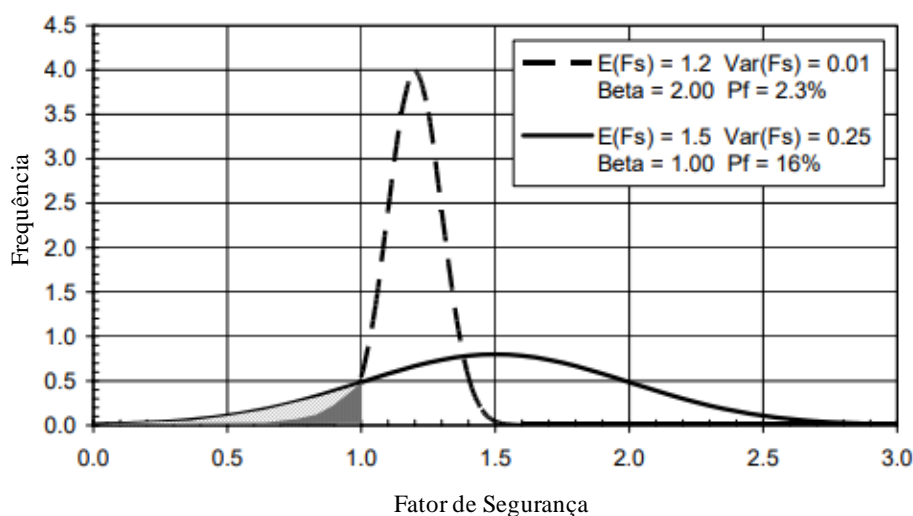


Figura 6.1 – Exemplo de FDP para fatores de segurança. Fonte: Adaptado de Gitirana Jr. (2005).

Na análise de confiabilidade estrutural, as análises de estabilidade de sistemas (como a estabilidade global de aterro sanitário) consideram a flutuação e comportamento estatístico de variáveis de resistência e solicitação. Estas análises podem ser resumidas e interpretadas, de forma geral, como o problema fundamental da confiabilidade: determinar a probabilidade onde uma demanda (solicitação) seja maior que a capacidade (resistência), cuja resolução depende das funções de densidade conjuntas das variáveis. Muitas vezes, estas se mostram ou são consideradas estatisticamente independentes, de forma que as distribuições podem ser simplificadas pelas funções de distribuição marginal (Beck, 2019).

Considerando a análise de estabilidade de taludes, a relação entre solicitação e resistência pode ser modelada de forma simplificada a partir dos métodos de equilíbrio limite, onde dada uma geometria e mecanismo de ruptura, podem ser determinados os componentes de resistência e solicitação da seção analisada. Nestes métodos, diferentes variáveis integram a análise, como condições geométricas, solicitações externas e internas, condições de contorno e propriedades dos materiais, das quais são utilizadas frequentemente o ângulo de atrito, coesão (como parâmetros de critério de ruptura) e peso específico (Hachich, 1972; Duncan, 2000; Colomer-Mendoza, 2013). A etapa de definição do comportamento das variáveis é fundamental para uma maior precisão e confiabilidade das análises,

contudo, grandes esforços são empregados para esta identificação. Decorrente de complexidade de modelagem e tempo computacional são frequentes as adoções de simplificação na literatura (Duncan, 2000; Munwar Basha e Sivakumar Babu, 2010; Sia e Dixon, 2012; Sivakumar Babu et al., 2014; Petrovic et al., 2016; Jahanfar et al., 2017b; Reddy et al., 2018; Jo et al., 2019).

Dentre as metodologias utilizadas nas análises de confiabilidade, destacam-se a FORM e o método de Monte Carlo, por possibilitarem baixa complexidade de interface computacional e serem muito utilizados em softwares de análise de estabilidade geotécnica, especialmente em recentes trabalhos da literatura (Sia e Dixon, 2012; Petrovic et al., 2016; Jahanfar et al., 2017a, 2017b; Reddy et al., 2018). Essas metodologias permitem a obtenção do índice de confiabilidade (β), o qual se relaciona com a probabilidade de falha de uma estrutura, possibilitando sua comparação a níveis de referência aceitáveis no projeto (Vardanega e Bolton, 2016; Beck, 2019).

Aliada a determinação da probabilidade de falha, deve ser realizada uma análise das consequências da falha (efeitos negativos), englobando custos financeiros, sociais e ambientais. Esta análise é denominada como “risco”, definido como o produto da probabilidade/frequência da falha pelas consequências avaliadas. A mensuração das consequências é uma atividade complexa e deve ser realizada através de estudos e análises específicas. A partir da definição dos riscos, é possível determinar funções objetivo para a otimização e definição das probabilidades de falha aceitáveis (Hachich, 1972; Duncan, 2000; Beck, 2019).

Apesar da definição das funções objetivos de risco serem as referências mais adequadas para se avaliar o desempenho de uma estrutura e o processo de tomada de decisão, no âmbito da engenharia, muitas vezes são avaliadas inicialmente apenas a probabilidade de falha de uma estrutura/sistema, buscando-se níveis de indicadores de falha usuais. Estes indicadores de referência (confiabilidades-alvo) geralmente estão associados a níveis de risco e probabilidade de ocorrências anuais aceitáveis socialmente (Whitman, 1984; Geotechnical Engineering Office, 1998; Duncan, 2000; Aoki, 2005; Fell et al., 2005; Beck, 2019). A Tabela 6.1, Tabela 6.2 e Tabela 6.3 apresentam alguns valores de confiabilidade-alvo de referência. O estudo de estabilidade de aterros sanitários apresenta um ambiente favorável à aplicação de conceitos de confiabilidade estrutural, devido à variabilidade das propriedades de resistência dos RSU e das solicitações ocasionadas aos taludes. Neste capítulo, buscou-se a avaliação de rupturas de um aterro sanitário real, aplicando-se conceitos de análises probabilísticas e verificando a aplicabilidade das classes (A, B e C) de propriedades de resistência dos RSU que foram propostas nesta pesquisa.

Tabela 6.1 – Níveis de performance em termos de probabilidade de falha (Pf) e correspondente índices de confiabilidade (β)

| Nível de Performance Esperado | Índice de Confiabilidade (β) | Probabilidade de Falha (Pf) |
|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| Alto | 5,0 | 0,0000003 |
| Bom | 4,0 | 0,00003 |
| Acima da média | 3,0 | 0,001 |
| Abaixo da média | 2,5 | 0,006 |
| Pobre | 2,0 | 0,023 |
| Insatisfatório | 1,5 | 0,07 |
| Perigoso | 1,0 | 0,16 |

Fonte: Adaptado de USACE (1997).

Tabela 6.2 – Escala subjetiva de risco e tempo de recorrência considerando a recomendação da norma MIL – STD – 882 (Clemens, 1983) posteriormente ampliada

| β | Ocorrência | Tempo de recorrência | Frequência | Nível | Nível de probabilidade | Pf |
|---------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-------|------------------------|------------------------|
| -7,94 | Certeza | 1 dia | Todo dia | | 1 | 1 |
| 0 | 50% probabilidade | 2 dias | A cada 2 dias | | 2×10^0 | 0,5 |
| 0,52 | Frequente | 1 semana | Toda semana | A | 3×10^{-1} | 0,3 |
| 1,88 | Provável | 1 mês | Todo mês | B | 3×10^{-2} | 0,03 |
| 2,75 | Ocasional | 1 ano | Todo ano | C | 3×10^{-3} | 0,003 |
| 3,43 | Remota | 10 anos | A cada década | D | 3×10^{-4} | 0,0003 |
| 4,01 | Extremamente remota | 100 anos | A cada século | E | 3×10^{-5} | 0,00003 |
| 4,53 | Impossível na prática | 1000 anos | A cada milênio | | 3×10^{-6} | 0,000003 |
| 7,27 | Nunca | $5,28 \times 10^{12}$ | Idade do universo | | 0 | $1,83 \times 10^{-13}$ |

Fonte: Silva Neto e Oliveira (2018).

Tabela 6.3 – Classes de confiabilidade e confiabilidades-alvo com base no Eurocode EN 1990

| Classes de Confiabilidade | Descrição | Edificações e Obras Civis | β mínimo para o período de referência | |
|---------------------------|---|---|---|---------|
| | | | 1 Ano | 50 Anos |
| RC1 | Alta consequência em termos de perda de vidas humanas e consequência muito grande em termos econômico, social ou ambiental. | Estádios, edifícios públicos onde as consequências da ruína são altas (por exemplo, sala de concertos) | 5,2 | 4,3 |
| RC2 | Média consequência em termos de perda de vidas humanas e consequência considerável em termos econômico, social ou ambiental. | Edifício residencial e edifício de escritórios, edifícios públicos onde as consequências da ruína são médias (por exemplo, edifício de escritórios) | 4,7 | 3,8 |
| RC3 | Baixa consequência em termos de perda de vidas humanas e consequência pequena ou negligenciável em termos econômico, social ou ambiental. | Edificações agrícolas onde normalmente não entram pessoas (por exemplo, edifício de estocagem), estufas. | 4,2 | 3,3 |

Fonte: Adaptado de Eurocode EN 1990 (2002).

6.2. MÉTODO

Os resultados obtidos nos capítulos anteriores foram aplicados na análise da ruptura de um aterro sanitário real. O aterro sanitário escolhido como base para as retroanálises foi o aterro sanitário Sítio São João, localizado na região metropolitana de São Paulo, Brasil. O aterro Sítio São João operou de 1991 a 2009, recebendo cerca de 6.600 toneladas/dia. Os taludes têm declividade predominante de 3(H):1(V) e as bermas, 5 m de largura (Oliveira et al., 2015). Em 13 de agosto de 2007, uma ruptura rotacional se desenvolveu no maciço sanitário (Figura 6.2), provocando deslizamento de cerca de 220.000 m³ de materiais, constituindo um dos grandes deslizamentos de aterros sanitários ocorridos no Brasil (Batista, 2010; Benvenuto et al., 2016).

Um agravante para a estabilidade que pode ter contribuído para a ruptura do aterro foi a elevação dos níveis de pressões neutras e sua distribuição não homogênea no corpo do aterro, com parâmetro R_u superior a 0,60 (Oliveira et al., 2015; Kamiiji e Oliveira, 2019). O parâmetro R_u é um indicador da razão entre a pressão neutra e a tensão vertical (geostática) em um determinado ponto da estrutura. Este parâmetro, muito utilizado para estimativa de pressões neutras na análise de estabilidade de obras de terra na fase de anteprojeto, também é usado no projeto de aterros sanitários devido à dificuldade de estimar a distribuição de pressões neutras em um maciço sanitário (Benvenuto e Cipriano, 2010; Jahanfar et al., 2017b; Reddy et al., 2018). No caso de obras de terra, as pressões neutras estão associadas à água dos poros. Nos aterros sanitários, a contribuição do biogás gerado nas pressões neutras é muito importante, podendo também ter contribuído para a ruptura do Aterro Sítio São João. O deslizamento do aterro Sítio São João propicia um cenário favorável para as análises probabilísticas de estabilidade de taludes desta pesquisa em termos de parâmetros dos RSU e avaliação da pressão neutra.

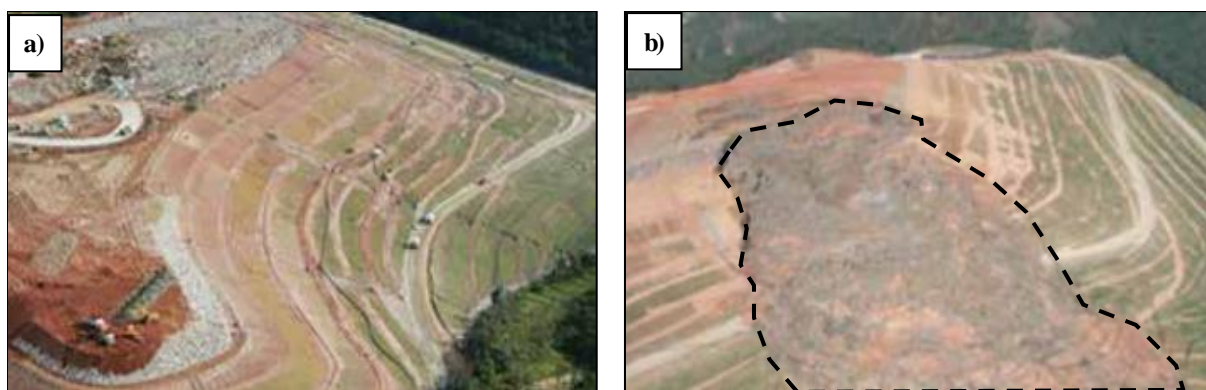


Figura 6.2 - Aterro Sanitário Sítio São João: (a) Antes da Ruptura de 2007; (b) Depois da Ruptura de 2007. Fonte: Benvenuto et al. (2016).

Para possibilitar as análises de estabilidade, foram obtidas junto à empresa FRAL Consultoria¹, informações acerca das seções, alteamento e configuração do aterro sanitário de São João, além de informações adicionais obtidos na literatura (Batista, 2010; Oliveira et al., 2015; Benvenuto et al., 2016; Kamiji e Oliveira, 2019). A partir desta coleta, pode-se estimar a configuração da seção crítica do aterro em diferentes fases de alteamento, conforme ilustrado na Figura 6.3.

Foram identificadas duas fases de alteamento antes da ruptura (1998 e 2003), a configuração de alteamento do ano de 2007 pré e pós ruptura, o retaludamento realizado em 2008 (onde ocorreu o encerramento da seção) e a configuração de 2013, a qual é resultante do processo de maturação e deformação dos resíduos nesse período.

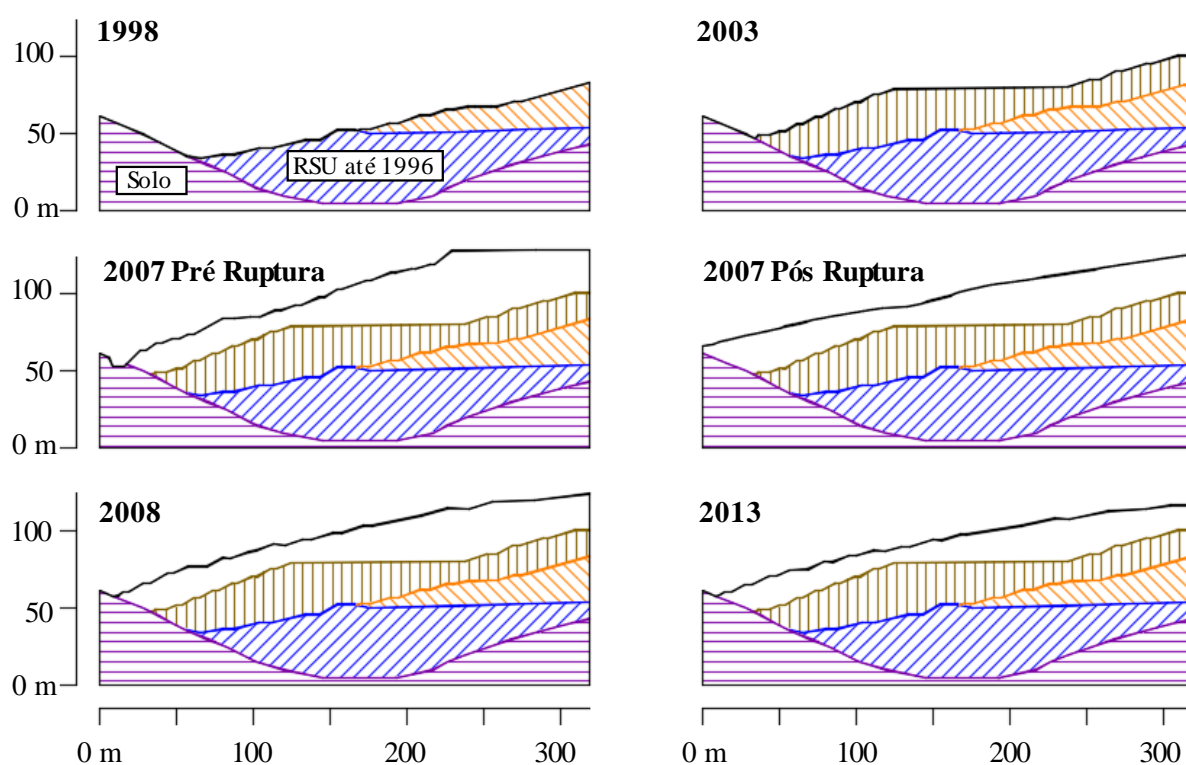


Figura 6.3 – Seções típicas esquemática do alteamento referente ao aterro de São João em diferentes anos (cores e hachuras indicam camadas alteadas em diferentes períodos).

Oliveira et al. (2015) relatam que a leitura nos piezômetros apresentava valores predominantes de R_u no intervalo de 0,2 e 0,6 no período da instabilidade (pré e pós), de magnitude considerável para essas estruturas (Figura 6.4), porém não há indicação da localização destes piezômetros em relação à superfície de ruptura. Segundo Kamiji e Oliveira (2019), condicionantes operacionais (compactação inadequada, formação de trincas superficiais, manutenção do sistema de drenagem insuficiente) aliadas

¹ FRAL CONSULTORIA. **Monitoramento do alteamento do aterro sanitário de São João**. São Paulo: [s. n.], [2015?]. 6 pranchas (Desenho técnico).

às intensas precipitações ocorridas em 2007, convergiram para a instabilidade e consequente ruptura de parte do maciço.

Assim, a partir destas informações circunstanciais e das leituras dos piezômetros foram identificados dois cenários para a interpretação dos valores de R_u : “médio” e “elevado”. No cenário médio, foram consideradas leituras médias da ordem de 0,2 para todas as camadas de RSU, com intervalo de variação entre 0 (sem desenvolvimento de pressões neutras) e 0,4 a partir de uma distribuição normal de probabilidades com desvio padrão de 10% (Tabela 6.4). Estas estatísticas descritivas do parâmetro R_u foram baseadas em informações da literatura (Jahanfar et al., 2017b; Reddy et al., 2018).

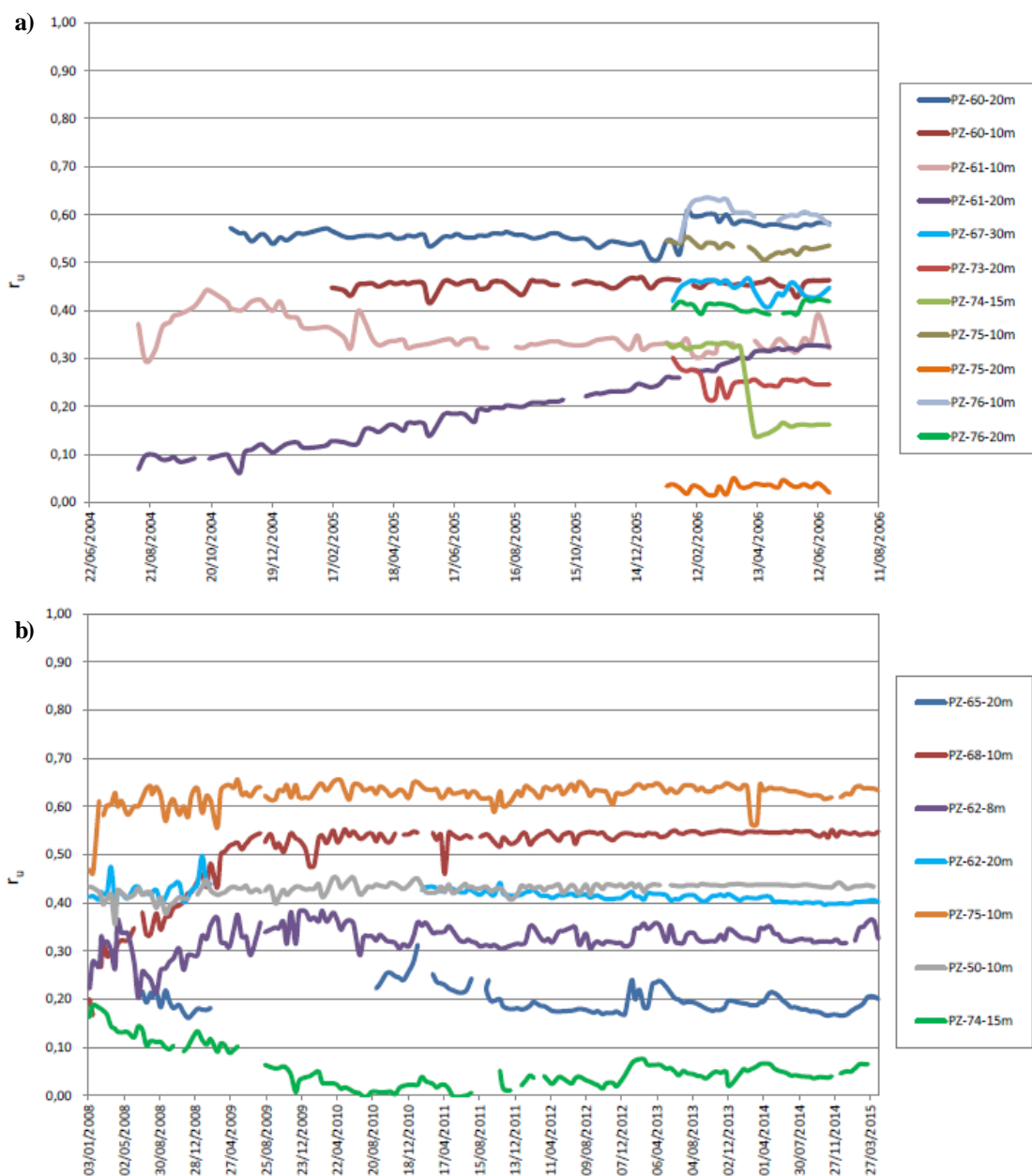


Figura 6.4 – Leituras de piezômetros do aterro Sítio São João: (a) 2004-2006; (b) 2008-2015. Fonte: Oliveira et al. (2015).

No cenário de pressões neutras elevadas, foram computados valores médios de R_u da ordem de 0,3 para camadas inferiores e 0,4 para a camada superior, ambas com desvio padrão de 20% e distribuição normal. Conforme apresentado na Tabela 6.5, as camadas inferiores tiveram seus valores de R_u entre 0 e 0,5, enquanto a superior variou no intervalo de 0,2 a 0,6, apresentando condições mais severas decorrentes do aumento de pressão neutra causado por infiltração no aterro. Nesta pesquisa, o parâmetro R_u foi considerado homogêneo em toda a camada de respectiva atuação.

Neste trabalho, os parâmetros mecânicos dos resíduos foram adotados considerando como “camada superior”, a camada mais jovem de RSU correspondente à etapa de alteamento, e as “camadas inferiores”, correspondentes às demais camadas de resíduos do aterro, com maior tempo de disposição e sob maiores tensões verticais. A partir da composição dos RSU disponibilizada no trabalho de Oliveira et al. (2015), pode-se classificá-los como pertencentes à Classe A, cujas propriedades foram discutidas no Capítulo 5. Para o solo de fundação, foram utilizados valores disponibilizados em relatórios e estudos acerca da ruptura deste aterro para o solo de fundação², consultados junto a FRAL Consultoria. Segundo estes documentos, o solo de fundação é caracterizado por um solo residual local, com elevada resistência. Também foi considerado nestes documentos o valor de 0,1 para o parâmetro de R_u . Nesta pesquisa optou-se por manter estes dados, uma vez que a ruptura do aterro se deu somente nos resíduos, cuja superfície potencial localizou-se superficialmente, longe do solo de fundação (Figura 6.2b). Os parâmetros considerados para cada material são apresentados nas Tabela 6.4 e Tabela 6.5.

Tabela 6.4 – Parâmetros de R_u utilizados nas análises (R_u Médio).

| Material | Propriedade | Distribuição | Valor Médio | Mínimo P15 ⁽¹⁾ | Máxima P85 ⁽¹⁾ | Desvio Padrão |
|--------------------------|-------------------------------|--------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------|
| RSU Camada Superior | c (kPa) | LogNormal | 15.8 | 2.9 | 36.8 | 15.7 |
| | ϕ (°) | Normal | 22.2 | 15.3 | 36.4 | 9.6 |
| | R_u | Normal | 0.2 | 0.0 | 0.4 | 0.1 |
| | γ (kN/m ³) | Uniforme | 9.0 | --- | --- | --- |
| RSU Camadas Inferiores | c (kPa) | LogNormal | 19.0 | 2.9 | 36.8 | 15.7 |
| | ϕ (°) | Normal | 26.7 | 15.3 | 36.4 | 9.6 |
| | R_u | Normal | 0.2 | 0.0 | 0.4 | 0.1 |
| | γ (kN/m ³) | Uniforme | 11.0 | --- | --- | --- |
| Solo Residual (Fundação) | c (kPa) | Uniforme | 200.0 | --- | --- | --- |
| | ϕ (°) | Uniforme | 36.0 | --- | --- | --- |
| | R_u | Uniforme | 0.1 | --- | --- | --- |
| | γ (kN/m ³) | Uniforme | 18.0 | --- | --- | --- |

² SCS ENGINEERS (USA). *Landfill Slope Stability analysis: São João sanitary landfill, São Paulo, Brazil*. Reston, Virginia: [s. n.], 2007. 61 p.

Tabela 6.5 – Parâmetros de Ru utilizados nas análises (Ru Elevado).

| Material | Propriedade | Distribuição | Valor Médio | Mínimo P15 ⁽¹⁾ | Máxima P85 ⁽¹⁾ | Desvio Padrão |
|--------------------------|-------------------------------|--------------|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------|
| RSU Camada Superior | c (kPa) | LogNormal | 15.8 | 2.9 | 36.8 | 15.7 |
| | ϕ (°) | Normal | 22.2 | 15.3 | 36.4 | 9.6 |
| | Ru | Normal | 0.4 | 0.2 | 0.6 | 0.2 |
| | γ (kN/m ³) | Uniforme | 9.0 | --- | --- | --- |
| RSU Camadas Inferiores | c (kPa) | LogNormal | 19.0 | 2.9 | 36.8 | 15.7 |
| | ϕ (°) | Normal | 26.7 | 15.3 | 36.4 | 9.6 |
| | Ru | Normal | 0.3 | 0.0 | 0.5 | 0.2 |
| | γ (kN/m ³) | Uniforme | 11.0 | --- | --- | --- |
| Solo Residual (Fundação) | c (kPa) | Uniforme | 200.0 | --- | --- | --- |
| | ϕ (°) | Uniforme | 36.0 | --- | --- | --- |
| | Ru | Uniforme | 0.1 | --- | --- | --- |
| | γ (kN/m ³) | Uniforme | 18.0 | --- | --- | --- |

O peso específico dos RSU foi considerado como 11 kN/m³ para camadas inferiores e 9 kN/m³ para superficiais, considerando observações de compactação típicas de Zekkos et al. (2006), para distinguir RSU com maior sobrecarga de camadas dos recém lançados, respectivamente. Além disto, também foram valores representativos do banco de dados de peso específico coletados nos Capítulo 3. Optou-se por deixar esta variável determinística (sem ajustes de distribuição), decorrente da ausência de dados de ajuste sobre esta variável coletados em campo.

Através de informações de composições gravimétricas típicas do aterro (Oliveira et al., 2015), constatou-se que os resíduos se enquadram, nesta pesquisa, na classe mecânica-morfológica A, decorrente da maior concentração de componentes compressíveis (e orgânicos). Foram então utilizados os valores obtidos no Capítulo 5, correspondentes à classe A (Tabela 5.2.) para a camada superior em todas as simulações. Especificamente, foram utilizados os modelos de distribuição obtidos no Capítulo 3 (Normal e Lognormal), ajustados segundo os parâmetros de valor médio e desvio padrão referentes à classe A, cujos valores limitaram-se no intervalo correspondente à 70% dos dados (referência marginal), previamente apresentados na Tabela 5.2. Estas informações estão organizadas nas Tabela 6.4 e Tabela 6.5.

Jahanfar et al. (2017b) sugerem que os parâmetros de resistência ao cisalhamento dependem principalmente das condições de composição e compacidade dos RSU. Para resíduos com baixa compacidade (tipicamente de vazadouros) os parâmetros de resistência são reduzidos na ordem de 20% dos parâmetros de RSU com compacidade mais elevada (através de processos operacionais de aterros sanitários). Extrapolando esta sugestão, os resíduos mais antigos (camadas inferiores) foram considerados com parâmetros de resistência ao cisalhamento 20% maiores do que os resíduos mais jovens (camada superior), em cada seção alteada (Tabela 6.5). Estas considerações também basearam-se no fato dos RSU alterarem sua resistência ao longo do tempo, embasado pelo estudo de Petrovic et al. (2016). A interação física entre os parâmetros de resistência foi desconsiderada neste estudo

decorrente do baixo coeficiente de correlação obtido no capítulo 3 para o ângulo de atrito e coesão. Para o peso específico, optou-se pela não adoção de correlação para diminuição da complexidade das simulações.

Para as análises de estabilidade foi utilizado o *software* Slide da Rocscience®, por possibilitar análises probabilísticas e ser uma ferramenta amplamente utilizada no meio técnico e científico da geotecnia (Wang et al., 2011; Jahanfar et al., 2017a). Foram usados os métodos de Morgenstern e Price (1968) e GLE (Rahardjo e Fredlund, 1984), por considerarem a interação entre lamelas, apresentando mais fidedignidade ao comportamento do maciço. Para as análises probabilísticas, foi utilizada a metodologia de Monte Carlo (Metropolis e Ulam, 1949) para a avaliação do índice de confiabilidade e probabilidade de falha associada.

Para as avaliações probabilísticas, o *software* Slide permite analisar a estabilidade segundo dois métodos. O primeiro é um método convencional que realiza uma análise determinística na seção (com os valores médios das distribuições); a partir da identificação da superfície potencial de ruptura (de menor fator de segurança), são realizadas simulações aleatórias dos parâmetros dos materiais e determinações dos respectivos fatores de segurança, avaliando-se o número de rupturas correspondentes ao total das análises e obtendo-se os resultados probabilísticos correspondentes. Apesar de apresentar boas estimativas da probabilidade de falha, este método tem a deficiência de fixar a superfície de ruptura calculada para os valores médios, quando na realidade, esta pode não ser a superfície mínima global no cenário estatístico de geração de valores para os parâmetros (Rocscience, 2018).

O segundo método (*overall slope*) visa a identificação da superfície mínima global, a partir da geração de um vetor inicial de valores (não necessariamente valores médios), a determinação da superfície de fator de segurança mínimo, a iteração nesta superfície e o cômputo dos parâmetros probabilísticos. Em sequência, é gerado um novo vetor aleatório, onde uma nova superfície de fator de segurança mínimo é determinada, ocorrendo a iteração nesta superfície e novos cômputos de parâmetros. Esse processo é iterativo, e ao final resulta a probabilidade de falha estimada globalmente para a seção (Rocscience, 2018), sendo este o método adotado nas análises desta pesquisa. O número de iterações estipulado para o método de Monte Carlo foi de 2000, decorrente do tempo computacional e da convergência de resultados (a partir da realização de testes com 500, 1000, 1500, 5000 e 10000 iterações). Para a complexidade do problema, este número se mostrou adequado, de acordo com trabalhos semelhantes da literatura (Sia e Dixon, 2012; Apaza e Barros, 2014; Reddy et al., 2018).

A partir da seção típica do aterro sanitário Sítio São João, foram realizadas análises de estabilidade de taludes decorrente de alterações de alteamento e gerações de pressões neutras no interior do maciço. Em cada simulação (Ru médio ou Ru elevado), foram computados o fator de segurança correspondente à respectiva análise determinística (que utiliza os valores médios das distribuições), bem como o índice de confiabilidade (Normal e Lognormal) e a probabilidade de falha associada tanto à superfície determinística, quanto a toda a seção. No Apêndice B são apresentados os resultados das análises realizados para cada configuração de geração de pressão neutra e fase de alteamento.

6.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 6.5 são apresentados os resultados referentes às análises de estabilidade conduzidas na seção pré-ruptura do aterro sanitário Sítio São João utilizando-se dados de resistência ao cisalhamento dos RSU pertencentes à Classe A proposta nesta pesquisa e distribuições para os parâmetros de resistência dos RSU: Normal para o ângulo de atrito e Lognormal para a coesão.

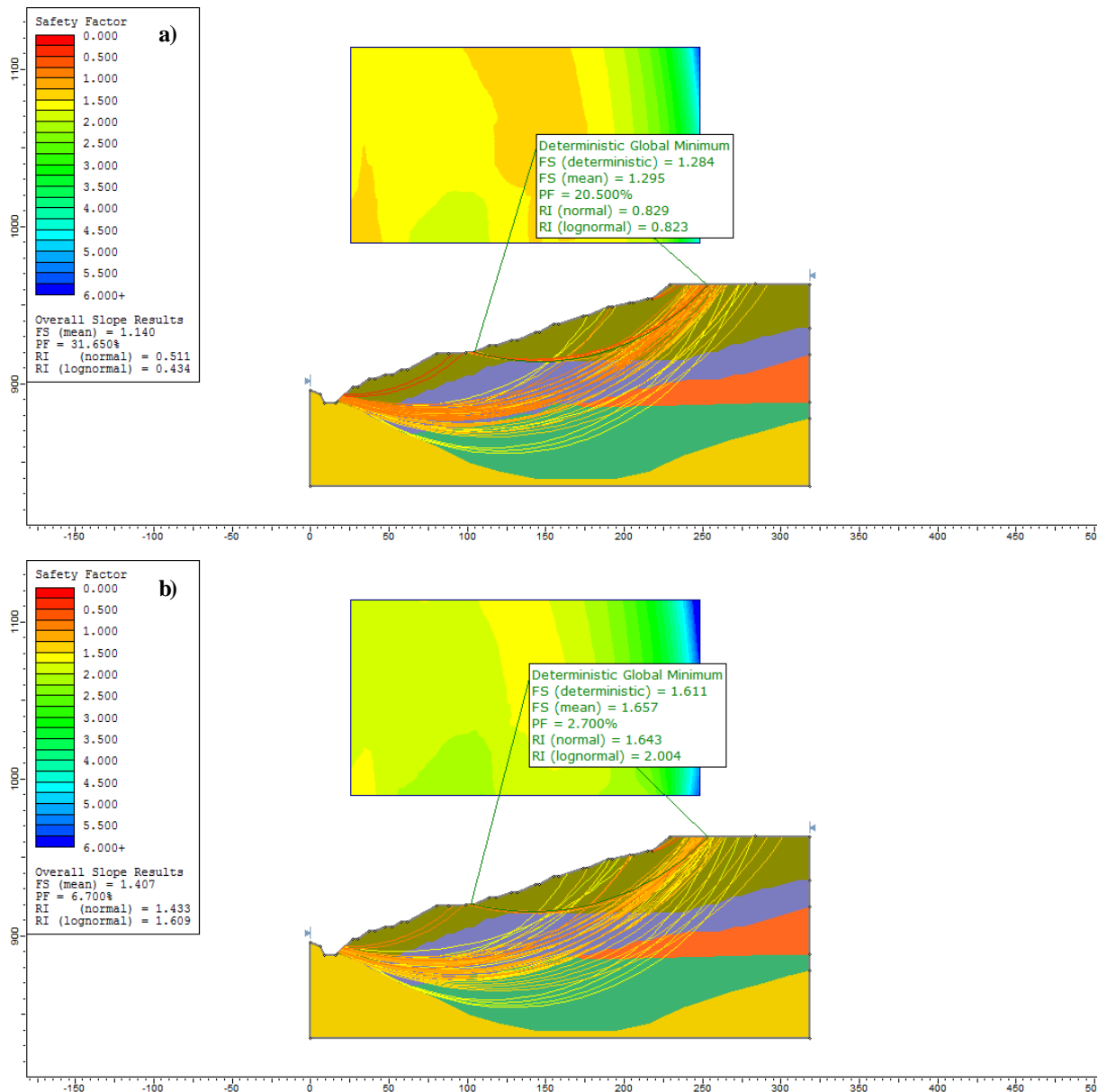


Figura 6.5 - Resultados das análises de estabilidade conduzidas na seção pré-ruptura do aterro Sítio São João em 2007: (a) Ru elevado; (b) Ru médio.

Em ambos os cenários de geração de pressão neutra (médio e elevado), a superfície potencial de ruptura apresentou similaridade em sua localização. A localização dessas superfícies é similar à região de ruptura observada na Figura 6.2b, onde se identifica uma superfície circular que engloba

aproximadamente metade da seção crítica. Além disto, em ambos cenários é possível destacar que a ruptura que se deu principalmente pelo resíduo recentemente lançado na época, devido à sua espessura de camada e acúmulo de pressão neutra.

Na Figura 6.6, é possível quantificar os fatores de segurança e probabilidades de rupturas em cada fase de alteamento, inclusive na etapa de ruptura real. Estes parâmetros são essenciais para tomada de decisão acerca da estabilidade da seção durante as fases de alteamento. Considerando análises determinísticas (Figura 6.6a), na situação de Ru médio, constata-se estabilidade do aterro segundo o critério da ABNT NBR 11682 (2009), inclusive no alteamento de ruptura (Figura 6.5a) onde foi obtido um fator de segurança mínimo acima de 1,5, enquanto na condição de Ru elevado, a análise apresentou instabilidade nas fases de alteamento de 2003 e 2007 com relação aos critérios da norma.

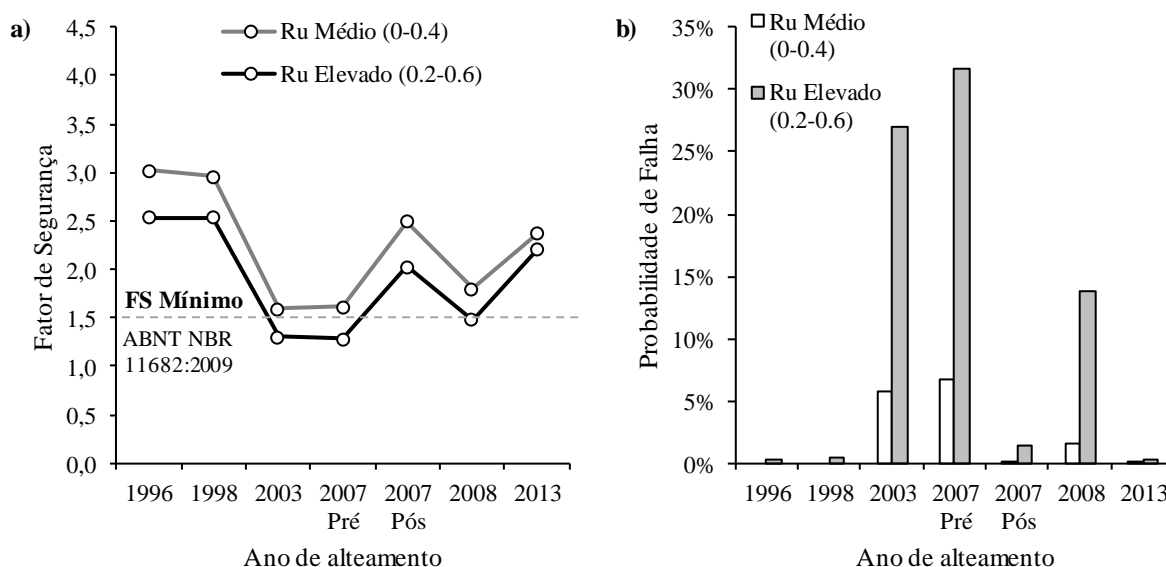


Figura 6.6 – Avaliação da estabilidade da seção crítica de ruptura do aterro Sitio São João com base nos parâmetros geotécnicos obtidos nesta pesquisa: (a) análise determinística; (b) análise probabilística.

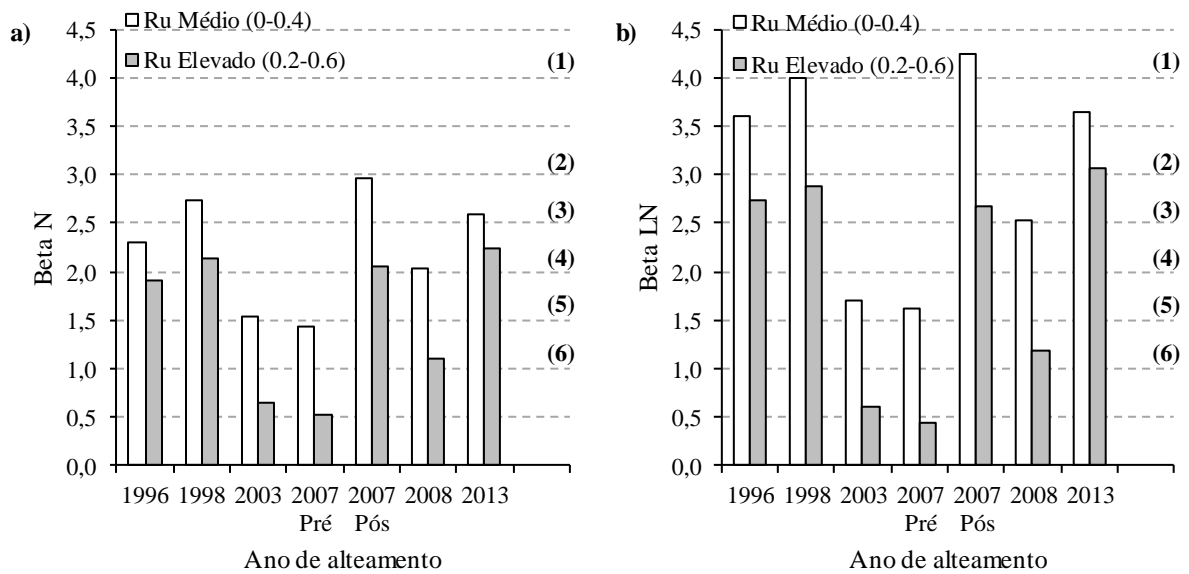
O comportamento do fator de segurança, ilustrado na Figura 6.6, apresentou um aumento da magnitude de 0,5 decorrente da alteração dos valores determinísticos de Ru de 0,2 para 0,3 e 0,4. Este resultado indica que a oscilação dos níveis de pressão neutra já acusaria instabilidade do maciço mesmo para as análises tradicionais. Conceitualmente, um fator de segurança maior que 1.0 não apresenta ruptura do aterro, mas indica insegurança e aumento do risco de ruptura. A margem de segurança (0,5) entre este ponto e o fator de segurança mínimo (1,5) recomendada pela ABNT NBR 11682 (2009) não garante estabilidade do maciço, pois a heterogeneidade dos RSU e das solicitações provocam variações nos valores médios destes parâmetros na seção. Destaca-se nestas análises que esta margem de segurança foi praticamente superada apenas com a elevação do parâmetro Ru.

Nas análises de probabilidade de falha (Figura 6.6b), notam-se elevados valores de probabilidade de falha para todas as fases de alteamento, em ambos os cenários de geração de pressão

neutra. Para a condição de pressão neutra elevada, a geometria da seção, aliada às pressões neutras geradas e os parâmetros estimados para o RSU, propiciaram um cenário crítico de estabilidade. Mesmo o cenário de Ru médio apresentou risco elevado no alteamento da fase de 2007, prevendo possibilidade elevada de ruptura deste aterro. Estas análises mostram a importância das considerações probabilísticas dos RSU em análises de estabilidade de aterros sanitários, uma vez que diferentes cenários de geração de pressão neutra mostraram elevado risco de ruptura do aterro. Mesmo no cenário de Ru médio (Figura 6.6b), probabilidades de ruptura da ordem de 5% são elevadas para grandes estruturas permanentes, como o aterro sanitário Sítio São João (conforme Tabela 6.1, Tabela 6.2 e Tabela 6.3).

Para Jahanfar et al. (2017b), que estudaram aterros sanitários e vazadouros, a geração de pressão neutra também apresentou influência significativa no fator de segurança. Nas análises de confiabilidade conduzidas por Reddy et al. (2018), a alteração do peso específico devido à degradação e compactação dos RSU acarretou na alteração do parâmetro Ru de 0,3 para 0,47 ao final do processo de compressão e adensamento do aterro sanitário, indicando que valores elevados de pressão neutra podem ocorrer pelo processo natural de degradação dos RSU e que devem ser considerados na fase de projeto para sua adequada remediação.

A Figura 6.7 apresenta a determinação dos índices de confiabilidade obtidos nas análises probabilísticas de estabilidade do aterro para o modelo Normal (Beta N) e Lognormal (Beta LN). Uma comparação com índices de referência de confiabilidade do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (USACE, 1997) também foi realizada de modo a verificar níveis de confiabilidade entre bom (1) e perigoso (6). Analisando-se o índice de confiabilidade Normal da Figura 6.7a, o aterro apresentava um desempenho aceitável em boa parte de suas fases de alteamento, exceto no período próximo à ruptura (fases de 2003 e 2007). Após a ruptura, a estrutura apresenta relativa estabilidade na configuração obtida, a qual diminuiu com o retaludamento realizado, mantendo níveis baixos, mas aceitáveis de estabilidade. Já a elevação da geração de pressões neutras impactou significativamente no índice de confiabilidade, que apresentou valores baixos durante as fases de alteamento, culminando em valores perigosos na fase de ruptura do aterro (Figura 6.7a).



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

Figura 6.7 – Índice de confiabilidade obtido: (a) modelo Normal; (b) modelo LogNormal.

A consideração de uma distribuição Lognormal (Figura 6.7b) apresentou comportamento similar a distribuição Normal, atestando níveis aceitáveis para as fases iniciais e finais do aterro, que foram também diminuídos pela geração de pressão neutra, sobretudo na fase de ruptura (diminuindo de quase 3 em 1998 para quase 0,5 em 2007). Comportamento semelhante foi observado por Reddy et al. (2018), cujo aumento de pressão neutra (parâmetro Ru) acarretou em drástica queda no índice de confiabilidade, variando de 3 (Ru = 0,3) para 0 (Ru = 0,37).

No caso do aterro Sítio São Joao, verifica-se que o processo de alteamento (fases), atrelado às configurações geométricas dos RSU, culminou na diminuição do índice de confiabilidade. O processo de alteamento acarreta diferentes consequências na estrutura do maciço sanitário. De imediato, gera incremento de tensões e solicitações no maciço, alterando de forma não homogênea a distribuição de tensões em seu interior, uma vez que o alteamento não é uniforme na estrutura. Além disto, existe uma alteração das pressões neutras, sobretudo em carregamentos rápidos, não permitindo sua dissipação imediata. As pressões neutras também ocorrem de forma não homogênea e não sistemática, cuja medição e cômputo são complexas. Do ponto de vista de heterogeneidade dos materiais, no alteamento são acrescentados materiais de comportamento, degradação e propriedades distintas das demais camadas, afetando a distribuição e ocorrência dos parâmetros dos RSU. Apesar do alteamento apresentar muitas complicações do ponto de vista de estabilidade geotécnica, também deve ser verificada a possibilidade de aumento dos parâmetros mecânicos em virtude da redução da compactidade e variação espacial destes parâmetros, que devem ser melhor estudados para sua consideração na estabilidade (Zekkos et al., 2006; Sia e Dixon, 2012; Reddy et al., 2018). Esta discussão fomenta a complexidade associada às análises de estabilidade destas estruturas, sobretudo, pela necessidade de aprofundamento desta temática. Os resultados apresentados nesta pesquisa ressaltam a importância de análises

probabilísticas como ferramenta de análise de estabilidade de aterros sanitários, de gerenciamento de riscos de aterro e tomadas de decisão para projetos.

6.4. LIMITAÇÕES E CONSIDERAÇÕES

Os resultados de análises numéricas de estabilidade de taludes de aterros ficam condicionadas às configurações e aos métodos utilizados nas análises, sendo necessário ressaltar que:

(1) As diferentes metodologias de cômputo do fator de segurança (Morgenstern-Price e GLE) não apresentaram variação significativa nos resultados nas condições avaliadas desta pesquisa;

(2) Considerações acerca da variabilidade espacial e temporal das propriedades resistentes dos RSU e dos esforços solicitantes não foram utilizadas nesta pesquisa;

(3) A variabilidade dos parâmetros dos RSU (sobretudo o desvio padrão) pode ser reduzida utilizando-se dados de RSU locais ou com características mais próximas dos materiais do aterro em estudo. Contudo, é provável que, mesmo com adequações dos parâmetros dos RSU, a probabilidade de falha permanecesse significativa, devido às pressões neutras elevadas;

(4) Análises complementares de tensão-deformação devem ser implementadas, uma vez que as condições de serviço e deformação do aterro também são norteadoras da estabilidade destas estruturas. Para tanto, sugere-se o uso de dados de ensaios de compressão triaxial com trajetória de tensões correspondentes às situações de análise do aterro;

(5) Destaca-se que os resultados obtidos nesta análise estão associados aos parâmetros de resistência e classes de RSU, bem como cenários sugeridos nesta pesquisa e, não necessariamente, refletem a realidade do ocorrido neste aterro. Necessitam-se ainda avaliações mais completas com mais informações de campo e análises de risco detalhadas.

A partir das análises de equilíbrio limite realizadas na seção de ruptura do aterro sanitário Sítio São João, com o emprego dos resultados obtidos nesta pesquisa e utilizando métodos probabilísticos, constata-se que:

- Os parâmetros adotados para os RSU apresentaram respostas coerentes com a ruptura real do aterro, validando a proposta das análises por classes e modelos de distribuição;
- O cômputo da geração de pressões neutras no aterro apresentou significativa influência na ruptura da seção do aterro sanitário estudado. Este fato evidencia a necessidade de dimensionamento e manutenção adequada dos sistemas de captação e drenagem de fluidos do aterro sanitário, além do monitoramento das pressões internas no maciço;

- Análises de estabilidade determinísticas atestaram estabilidade do aterro, mas em cenários de elevada probabilidade de falha. A filosofia de projeto e a normatização devem ser repensadas para aterros sanitários, incorporando as análises probabilísticas;
- Análises de estabilidade probabilísticas podem ser utilizadas no processo de tomada de decisão de projeto de aterros sanitários, uma vez que abordam condições mais realistas para as análises. No caso do aterro Sítio São João, o conhecimento da probabilidade de falha elevada poderia ter norteado adequações ao projeto e gerenciamento do aterro em fases anteriores à ruptura.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inúmeros casos de rupturas ou falhas em taludes de aterros sanitários têm sido observados ao redor do mundo nos últimos anos. Algumas falhas podem representar riscos significativos à vida de pessoas, ao meio ambiente e à economia do município. Esta pesquisa objetivou contribuir com orientações e recomendações de parâmetros de projeto para análises de estabilidade de taludes de aterros sanitários, sobretudo usando métodos probabilísticos, que são mais adequados para o cenário de materiais com propriedades variáveis, como os RSU, e de incertezas nas solicitações, como é o caso das pressões neutras dentro do maciço sanitário.

A partir da realização de meta-análise de 51 trabalhos da literatura (nacional e internacional) e aplicação dessas análises em um caso real (aterro sanitário Sítio São João), conclui-se que:

- As distribuições estatísticas tradicionais (Normal, Lognormal, Weibull e Gama) apresentaram ajustes adequados aos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU, sendo coerentes com intervalos de valores recomendados por outros pesquisadores. Esses parâmetros apresentaram baixa correlação, o que pode ser investigado mais profundamente;
- Os dados da literatura a respeito da resistência ao cisalhamento dos RSU apresentam elevada dispersão de valores, sobretudo pela diversidade de métodos de amostragem e procedimentos experimentais para determinação dos parâmetros de resistência. Esta dispersão de resultados deve ser considerada no projeto e em pesquisas com esses materiais. A coesão apresentou maior variação do que o ângulo de atrito, decorrente principalmente da variabilidade de composição dos RSU e do enrijecimento decorrente da mobilização das fibras durante o cisalhamento destes materiais;
- As atuais normatizações e recomendações de parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU disponibilizadas na literatura estão restritas a um escopo particular de aplicação, sobretudo de resíduos de países em desenvolvimento. Neste trabalho, com um número amostral maior e mais abrangente do que pesquisas anteriores, observa-se que os intervalos de valores sugeridos na literatura podem superestimar os parâmetros de resistência, tornando as análises de estabilidade pouco confiáveis;
- Através da meta-análise dos parâmetros da literatura foi possível constatar divergências entre os métodos abordados nas pesquisas, a fim de embasar métodos de classificação e normatização de ensaios. Foram identificados os fatores que mais contribuem para a dispersão dos resultados dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, os quais se relacionam principalmente à composição mecânica-morfológica dos materiais componentes dos RSU (compressíveis, incompressíveis e reforço);

- A classificação mecânica-morfológica realizada nesta pesquisa resultou em três classes de comportamento, referente à predominância de comportamento compressível (classe A), incompressível (classe B) ou misto (classe C) dos componentes dos resíduos. A classificação auxiliou na redução das dispersões e na organização dos dados da literatura;
- Cada classe proposta apresentou comportamento mecânico distinto, sendo comum a constatação do enrijecimento dos RSU com o avanço da deformação nos critérios de ruptura dos ensaios de cisalhamento, principalmente nas classes A e C, devido aos componentes orgânicos. Para cada classe (e nível de deformação), foram determinadas estatísticas descritivas e de posição, bem como intervalos de confiança para a média, referências marginais de distribuição e envoltórias de resistência. Estas informações podem ser utilizadas para fomentar parâmetros para análises determinísticas e probabilísticas com RSU;
- Através da aplicação dos dados obtidos em análises de estabilidade na ruptura do aterro Sítio São João, constatou-se que as análises probabilísticas são importantes ferramentas para o processo de tomada de decisão e avaliação de riscos nestas estruturas. As análises deste estudo de caso indicaram aumento na probabilidade de falha decorrente do alteamento do aterro e da elevação das pressões neutras geradas em seu interior, em fases anteriores à ruptura. Estes fatores evidenciam a necessidade de estudos probabilísticos, além de dimensionamento, manutenção e monitoramento dos sistemas do aterro sanitário.

Os resultados obtidos nesta pesquisa apresentam indicadores de dispersão e estimativas dos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos RSU. Embora existam propostas na literatura para os valores das propriedades dos RSU, ensaios *in situ*, conhecimento das características e uso de parâmetros locais dos resíduos são recomendados em análises de estabilidade e de projeto de aterros de resíduos. Os comportamentos estatísticos obtidos nesta pesquisa podem ser adequados em futuras análises com informações de materiais disponíveis *a priori*.

SUGESTÕES DE PESQUISA

As experiências e constatações desta pesquisa abrem caminhos para novas pesquisas. Com relação às recomendações de projeto e análises de resistência ao cisalhamento, podem ser realizados estudos dos resíduos de acordo com países, regiões e localidades para refinamento da variabilidade e caracterização específica das propriedades desses materiais. Os dados de ensaios de compressão triaxial podem ser incorporados às análises de influência dos parâmetros operacionais, envelhecimento e composição, para ajuste dos valores médios e análises dos parâmetros de resistência. Da abordagem numérica, podem ser realizadas análises paramétricas para identificar principais alterações na probabilidade de falha dos aterros sanitários. Certamente, o campo de análise de confiabilidade e caracterização de materiais heterogêneos apresenta cenários oportunos de estudo e avanço científico, associados às necessidades eminentes da sociedade e do meio-ambiente.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, A. E. S. et al. Characterizing a Brazilian sanitary landfill using geophysical seismic techniques. **Waste Management**, v. 53, p. 116–127, 2016.
- ABREU, A. E. S.; VILAR, O. M. Accessing the biological stability of municipal solid waste of different landfilling ages. **Journal of Solid Waste Technology and Management**, v. 42, n. 3, p. 236–244, 2016.
- ABREU, A. E. S.; VILAR, O. M. Influence of composition and degradation on the shear strength of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 68, p. 263–274, 1 out. 2017.
- ALVES, C. F. DE C.; BERTOLO, R. A. Geoquímica de águas subterrâneas impactadas por aterros de resíduos sólidos. **Águas Subterrâneas**, v. 26, n. 1, 25 jul. 2012.
- ANDERSLAND, O. et al. Effect of Organic Material on Soil Shear Strength. **Laboratory Shear Strength of Soil**, p. 226-226–17, 1981.
- ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. A Test of Goodness of Fit. **Journal of the American Statistical Association**, v. 49, n. 268, p. 765, dez. 1954.
- AOKI, N. **Segurança e confiabilidade de fundações profundas**. Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. **Anais...**2005
- APAZA, M.; BARROS, J. **Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes pelo Método de Monte Carlo** **Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes pelo Método de Monte Carlo**. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - Cobramseg. **Anais...**2014
- ASADI, M. et al. Validation of Hyperbolic Model by the Results of Triaxial and Direct Shear Tests of Municipal Solid Waste. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 35, n. 5, p. 2003–2015, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682: Estabilidade de Encostas**. Rio de Janeiro, 2009.
- AWAD-ALLAH, M. Shear strength characteristics of fibrous solid waste materials in landfill sites. **Journal of Al-Azhar University Engineering Sector**, v. 14, n. 50, p. 47–56, 1 jan. 2019.
- BAREITHER, C. A. et al. Effects of Waste Composition and Decomposition on the Shear Strength of Municipal Solid Waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 138, n. 10, p. 1161–1174, out. 2012.
- BASHA, B. M. et al. Experimental and statistical evaluation of compressibility of fresh and landfilled municipal solid waste under elevated moisture contents. **International Journal of Geotechnical Engineering**, v. 10, n. 1, p. 86–98, 2016.
- BATISTA, H. P. **Desenvolvimento de Diretrizes para Monitoramento Geotécnico e Plano de Contingência/Emergência em Aterros Sanitários**. 160f.: Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- BAYARD, R. et al. Characterization of selected municipal solid waste components to estimate their biodegradability. **Journal of Environmental Management**, v. 216, p. 4–12, 2018.

- BECK, A. T. **Confiabilidade e Segurança das Estruturas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019.
- BENVENUTO, C.; CIPRIANO, M. A. Modelo reológico de comportamento de resíduos e aterros sanitários, segundo critérios de projeto e operação atuais no Brasil. **Limpeza Pública**, v. 74, p. 42–47, 2010.
- BENVENUTO, C. et al. Fluxo de resíduos sólidos domiciliares em aterros sanitários no Brasil. **Limpeza Pública**, v. 93, p. 15–22, 2016.
- BERTO NETO, J. **Medidas da emissão de gases em oito aterros de resíduos sólidos urbanos do estado de São Paulo - Brasil**. 2009. 526f.: Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- BORGATTO, A. V. A. **Estudo do efeito fibra e da morfologia na estabilidade de aterros de resíduos sólidos urbanos**. 174f.: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- BORGATTO, A. V. A. et al. Influence of the fibre component of soft plastic on shear strength parameters of pre-treated municipal solid waste. **Soils and Rocks**, v. 37, n. 2, p. 151–157, 2014.
- BOSCOV, M. E. G. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- BRAY, J. D. et al. Shear Strength of Municipal Solid Waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 135, n. 6, p. 709–722, 2009.
- BROWN, M. B.; FORSYTHE, A. B. Robust Tests for the Equality of Variances. **Journal of the American Statistical Association**, v. 69, n. 346, p. 364–367, jun. 1974.
- CAICEDO, B. et al. **Geomechanical properties of municipal solid waste in Doña Juana sanitary landfill**. Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics. Rio de Janeiro. **Anais...2002**
- CAMPI, T. O.; BOSCOV, M. E. G. **Determination of Shear Strength Parameters of Municipal Solid Waste (MSW) by Means of Static Plate Load Tests**. Geo-Frontiers 2011. **Anais...Reston, VA: American Society of Civil Engineers**, 11 mar. 2011
- CARDIM, R. D. **Estudo da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões**. 2008. 107f.: Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- CARVALHO, M. DE F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 1999. 330f.: Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.
- CHEN, Y. M. et al. Aging and compressibility of municipal solid wastes. **Waste Management**, v. 29, n. 1, p. 86–95, 2009.
- CHO, Y. M. et al. Food waste impact on municipal solid waste angle of internal friction. **Waste Management**, v. 31, n. 1, p. 26–32, 2011.
- CHOUKSEY, S. K.; BABU, G. L. S. Constitutive Model for Strength Characteristics of Municipal Solid Waste. **International Journal of Geomechanics**, v. 15, n. 2, p. 04014040, abr. 2015.
- COLOMER-MENDOZA, F. J. Influence of the Design on Slope Stability in Solid Waste Landfills. **Earth Sciences**, v. 2, n. 2, p. 31, 2013.

- CORREA, C. et al. Análise da influência do plástico mole na resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 20, n. 3, p. 427–436, set. 2015.
- COX, J. T. et al. Implications of variable waste placement conditions for MSW landfills. **Waste Management**, v. 46, p. 338–351, 2015.
- DAHLÉN, L.; LAGERKVIST, A. Methods for household waste composition studies. **Waste Management**, v. 28, n. 7, p. 1100–1112, 2008.
- DATTA, S.; SIVAKUMAR BABU, G. L. **Prediction of the Slope Stability of Municipal Solid Waste Landfills Using the Reliability Analysis**. Geo-Chicago 2016. **Anais...**Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 8 ago. 2016
- DERBAL, K. et al. Study of biodegradability of organic fraction of municipal solids waste. **Energy Procedia**, v. 19, p. 239–248, 2012.
- DIAMBRA, A.; IBRAIM, E. Fibre-reinforced sand: Interaction at the fibre and grain scale. **Geotechnique**, v. 65, n. 4, p. 296–308, 2015.
- DÍAZ-BELTRÁN, J. J. et al. Shear Strength of Municipal Solid Waste (MSW): Beyond the Raw Values of “Cohesion” and Friction Angles. **Geo-Chicago 2016**, v. 2016-Janua, n. April, p. 264–274, 8 ago. 2016.
- DISASTER CHARTER. **Landslide in Guatemala Charter activations**. Disponível em: <<https://disasterscharter.org/web/guest/activations/-/article/landslide-in-guatemala>>. Acesso em: 17 abr. 2019.
- DIXON, N.; JONES, D. R. V. Engineering properties of municipal solid waste. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 23, n. 3, p. 205–233, jun. 2005.
- DIXON, N. et al. Interface shear strength variability and its use in reliability-based landfill stability analysis. **Geosynthetics International**, v. 13, n. 1, p. 1–14, fev. 2006.
- DIXON, N.; LANGER, U. Development of a MSW classification system for the evaluation of mechanical properties. **Waste Management**, v. 26, n. 3, p. 220–232, 2006.
- DIXON, N. et al. Classification and Mechanical Behavior Relationships for Municipal Solid Waste: Study Using Synthetic Wastes. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 134, n. 1, p. 79–90, jan. 2008.
- DUNCAN, J. M. Factors of Safety and Reliability in Geotechnical Engineering. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 126, n. 4, p. 307–316, 1 abr. 2000.
- EDJABOU, M. E. et al. Municipal solid waste composition: Sampling methodology, statistical analyses, and case study evaluation. **Waste Management**, v. 36, p. 12–23, 2015.
- EID, B. H. T. et al. Municipal solid waste slope failure. I: waste and foundation soil properties. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 126, n. MAY, p. 397–407, 2000.
- EUROCODE EN 1990. EN 1990 (2002) (English): Eurocode - Basis of structural design. . 2002, p. 87–88.
- EXAME. **Deslizamento de aterro sanitário no Sri Lanka mata 24 pessoas**. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/mundo/deslizamento-de-aterro-sanitario-no-sri-lanka-mata-24-pessoas/>>. Acesso em: 17 abr. 2019.

- FANNIN, C. A.; ROBERTS, R. D. Mature landfill waste geochemical characteristics and implications for long-term secondary substance release. **Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis**, v. 6, n. 4, p. 369–378, nov. 2006.
- FARQUHAR, G. J.; ROVERS, F. A. Gas production during refuse decomposition. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 2, n. 4, p. 483–495, dez. 1973.
- FASSET, J. B. et al. **Geotechnical properties of municipal solid wastes and their use in landfill design**. Waste Technical Conference – WasteTech '94. **Anais...**Charleston: 1994
- FELL, R. et al. **State of the Art Paper 1 A framework for landslide risk assessment and management**. International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, Canada. **Anais...**2005
- FENG, S.-J. J. et al. Geotechnical properties of municipal solid waste at Laogang Landfill, China. **Waste Management**, v. 63, p. 354–365, maio 2017.
- FOYE, K. C. et al. **Probabilistic Modeling of Reinforced Landfill Final Covers for Sustainable Drainage**. Geo-Congress 2014 Technical Papers. **Anais...**Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 24 fev. 2014
- FRICKE, K. et al. Biological pre-treatment of waste for landfills: stabilisation of residual waste by mechanical and biological pre-treatment and effects on landfilling. **German Federal Ministry of Education and Research (BMBF)**, n. 1480945, 1999.
- GABR, M. A. et al. Shear Strength Parameters of Municipal Solid Waste with Leachate Recirculation. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 133, n. 4, p. 478–484, abr. 2007.
- GABR, M. A.; VALERO, S. M. Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste. **Geotechnical Testing Journal**, v. 18, n. Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste, p. 241–251, 1995.
- GAO, W. et al. Engineering properties for high kitchen waste content municipal solid waste. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 7, n. 6, p. 646–658, dez. 2015.
- GAO, W. et al. An equivalent-time-lines model for municipal solid waste based on its compression characteristics. **Waste Management**, v. 68, p. 292–306, 2017.
- GAO, Y. et al. Post-failure behavior analysis of the Shenzhen “12.20” CDW landfill landslide. **Waste Management**, v. 83, p. 171–183, 2019.
- GEO TECHNICAL ENGINEERING OFFICE. **Landslides and Boulder Falls from Natural Terrain: Interim Risk Guidelines**. **GEO Report No.75**. Hong Kong: [s.n.].
- GITIRANA JR., G. D. F. N. **Weather-related geo-hazard assessment model for railway embankment stability**. 2005. 439f.: Ph. D. Thesis. Department of Civil and Geological Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 2005.
- GLASS, G. V. Primary, Secondary, and Meta-Analysis of Research. **Educational Researcher**, v. 5, n. 10, p. 3–8, 1976.
- GOMES, C. et al. Municipal solid waste shear strength parameters defined through laboratorial and in situ tests. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 63, n. 11, p. 1352–1368, 24 nov. 2013.
- GOTTELAND, P. et al. **On site determination of geomechanical characteristics of waste**. Proc.

- International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, GeoEng 2000. **Anais...**Melbourne, Australia: 2000
- GRISOLIA, M.; NAPOLEONI, Q. **Geotechnical characterization of municipal solid waste: choice of design parameters**. Proceedings of the Second International Congress on Environmental Geotechnics. **Anais...**Osaka (Japan): 1996
- GRISOLIA, M. et al. **Contribution to a technical classification of MSW**. Proc. 5th ILS Sardinia 1995. **Anais...**1995
- HACHICH, W. **Sobre a segurança nos projetos de geotecnia**. 1972. 107f.: Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1972.
- HAMMAH, R. et al. **The Influence of Correlation and Distribution Truncation on Slope Stability Analysis Results**. In: **Proceedings of the 57th CSG Annual Conference, 5th Joint IAH-CNC and CGS Conferences**. Proceedings of the 57th CSG Annual Conference, 5th Joint IAH-CNC and CGS Conferences. **Anais...**2004
- HANSON, J. L. et al. Compaction Characteristics of Municipal Solid Waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 136, n. 8, p. 1095–1102, 2010.
- HARRIS, M. et al. Shear Strength of Degraded Reconstituted Municipal Solid Waste. **Geotechnical Testing Journal**, v. 29, n. 2, p. 14089, 2006.
- HOSSAIN, M. S. et al. The effect of shredding and test apparatus size on compressibility and strength parameters of degraded municipal solid waste. **Waste Management**, v. 29, n. 9, p. 2417–2424, set. 2009.
- HOSSAIN, M. S. et al. Relationship of compressibility parameters to municipal solid waste decomposition. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 12, p. 1151–1158, 2003.
- HOSSAIN, M. S.; HAQUE, M. A. The effects of daily cover soils on shear strength of municipal solid waste in bioreactor landfills. **Waste Management**, v. 29, n. 5, p. 1568–1576, maio 2009.
- JAHANFAR, A. et al. A novel risk assessment method for landfill slope failure: Case study application for Bhalswa Dumpsite, India. **Waste Management & Research**, v. 35, n. 3, p. 220–227, 2 mar. 2017a.
- JAHANFAR, A. et al. Municipal Solid Waste Slope Stability Modeling: A Probabilistic Approach. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 143, n. 8, p. 04017035, ago. 2017b.
- JAVANKHOSHDEL, S.; BATHURST, R. J. Simplified probabilistic slope stability design charts for cohesive and cohesive-frictional ($c - \phi$) soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 51, n. 9, p. 1033–1045, set. 2014.
- JIE, Y. et al. Laboratory testing of a densified municipal solid waste in Beijing. **Journal of Central South University**, v. 20, n. 7, p. 1953–1963, 10 jul. 2013.
- JO, Y. S. et al. Reliability Assessment of Geotechnical Structures on Soils improved by Deep Mixing Method II: Reliability Analyses and Estimation of Target Reliability Index. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 23, n. 1, p. 74–82, 2019.
- KAMIJI, T.; OLIVEIRA, F. **Reflexões a Respeito de Rupturas em Aterros Sanitários Brasileiros**. IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental e VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos.

Anais...São Carlos: 2019

- KARIMPOUR-FARD, M. et al. A laboratory study on the MSW mechanical behavior in triaxial apparatus. **Waste Management**, v. 31, n. 8, p. 1807–1819, ago. 2011.
- KARIMPOUR FARD, M. et al. An experimental investigation on the mechanical behavior of MSW. **International Journal of Civil Engineering**, v. 12, n. 4, 2014.
- KAVAZANJIAN, E. et al. **Evaluation of MSW properties for seismic analysis**. Geotechnical Special Publication. **Anais...**1995
- KAVAZANJIAN, E. et al. **Large-diameter static and cyclic laboratory testing of municipal solid waste**. Sardinia '99. 7th Int'l Landfill Symp. CISA. **Anais...**1999
- KERAMATI, M. et al. Evaluating the stress–strain behavior of MSW with landfill aging. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, n. 11, p. 6885–6894, 11 nov. 2018.
- KÖLSCH, F. **Material values for some mechanical properties of domestic waste**. Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium. **Anais...**Cagliari, Italy: 1995
- LAKSHMIKANTHAN, P. et al. Studies on Characterization of Mechanically Biologically Treated Waste from Bangalore City. **Indian Geotechnical Journal**, v. 48, n. 2, p. 293–304, 16 jun. 2018.
- LAMARE NETO, A. **Resistência ao cisalhamento de resíduos sólidos urbanos e de materiais granulares com fibras**. 2004. 214f.: Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- LANDVA, A.; CLARK, J. **Geotechnics of waste fills, theory and practice**. Ann Arbor: ASTM, 1990a.
- LANDVA, A. O.; CLARK, J. I. Geotechnics of Waste Fill. In: **Geotechnics of Waste Fills - Theory and Practice, ASTM STP 1070**. West Conshohocken: ASTM International, 1990b. p. 86–103.
- LI, X.; SHI, J. Stress–strain responses and yielding characteristics of a municipal solid waste (MSW) considering the effect of the stress path. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 7, p. 3901–3912, 2014.
- LÜ, X. et al. A shear hardening plasticity model with nonlinear shear strength criterion for municipal solid waste. **Computers and Geotechnics**, v. 104, n. May, p. 207–215, 2018.
- LÜ, X. et al. Characterization of the constitutive behavior of municipal solid waste considering particle compressibility. **Waste Management**, v. 69, p. 3–12, 2017.
- MACHADO, S. L. et al. Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results. **Waste Management**, v. 29, n. 1, p. 153–161, 2009.
- MACHADO, S. L. et al. MSW characteristics and landfill performances in tropical regions. **International Journal of Civil Engineering**, v. 08, n. 12, p. 238–250, 2014.
- MACHADO, S. L. et al. A constitutive framework to model the undrained loading of municipal solid waste. **Computers and Geotechnics**, v. 85, p. 207–219, maio 2017.
- MACHADO, S. L. et al. Constitutive Model for Municipal Solid Waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 128, n. 11, p. 940–951, 2002.

- MACHADO, S. L. et al. Constitutive model for long term municipal solid waste mechanical behavior. **Computers and Geotechnics**, v. 35, n. 5, p. 775–790, 2008.
- MAHLER, C. F.; LAMARE NETO, A. Effect of fibre on shear strength of residue from mechanical-biological pretreatment of waste. **International Journal of Environment and Waste Management**, v. 1, n. 1, p. 85–93, 2006.
- MANASSERO, M. et al. **Waste disposal and containment**. Proceedings of the 2nd International Congress on Environmental Geotechnics,. **Anais...Osaka**, Japan: 1996
- MARQUES, A. C. M. et al. Composite Compressibility Model for Municipal Solid Waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 129, n. 4, p. 372–378, 2003.
- MARTINS, H. L. **Avaliação da resistência de resíduos sólidos urbanos por meio de ensaios de cisalhamento direto em equipamento de grandes dimensões**. 2006. 131f.: Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- METROPOLIS, N.; ULAM, S. The Monte Carlo Method. **Journal of the American Statistical Association**, v. 44, n. 247, p. 335–341, set. 1949.
- MIYAMOTO, S. et al. In-situ shearing response and shear strength of various solid waste ground focused on fibrous materials composition. In: **Geomechanics from Micro to Macro**. [s.l.] CRC Press, 2014. p. 1357–1362.
- MUNWAR BASHA, B.; SIVAKUMAR BABU, G. L. Reliability assessment of internal stability of reinforced soil structures: A pseudo-dynamic approach. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 30, n. 5, p. 336–353, maio 2010.
- NASCIMENTO, J. C. F. DO. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. 2007. 160f.: Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- NG, K. T. W.; LO, I. M. C. **Engineering Properties of Msw Landfill Daily Covers Using Waste Tire Chips and Paper Sludge**. Proceedings Sardinia 2007, Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium. **Anais...Cagliari**, Italy: 2007
- NORBERTO, A. DE S. **Avaliação da adição de fibras na resistência ao cisalhamento na matriz fina de resíduos sólidos**. 2019. 138f.: Dissertação (Mestre em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2019.
- OJURI, O. O.; ADEGOKE, P. K. Geotechnical characteristics of synthetic municipal solid waste for effective landfill design. **International Journal of GEOMATE**, v. 9, n. 1, p. 1418–1427, 2015.
- OKONTA, F.; TCHANE, F. **Shear strength of municipal solid waste**. Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017. **Anais...Seoul**, South Korea: 2017
- OLIVEIRA, F. J. P. et al. **Slope stability back-calculation for the landslide in São João sanitary landfill, in Brazil**. Proceedings Sardinia 2015, Fifteenth International Waste Management and Landfill Symposium. **Anais...Cagliari** (Italy): 2015
- PANDEY, R. K. et al. Investigation of Shear Strength Properties of. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)**, v. 5, n. 9, 2017.

- PANDEY, R. K.; TIWARI, R. P. Physical Characterization and Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)**, v. 12, n. 1, p. 15–21, 2015.
- PETROVIC, I. Mini-review of the geotechnical parameters of municipal solid waste: Mechanical and biological pre-treated versus raw untreated waste. **Waste Management & Research**, v. 34, n. 9, p. 840–850, 11 set. 2016.
- PETROVIC, I. et al. Application of continuous normal–lognormal bivariate density functions in a sensitivity analysis of municipal solid waste landfill. **Waste Management**, v. 55, p. 141–153, 2016.
- POHLAND, F. G.; HARPER, S. R. **Critical review and summary of leachate and gas production from landfills**. Cincinnati, USA: United States Environmental Protection Agency, 1987.
- PORTAL G1. **Duas pessoas morrem vítimas de soterramento no aterro sanitário de Indiana**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/presidente-prudente-riao/noticia/2019/01/14/soterramento-em-indiana.ghtml>>. Acesso em: 17 abr. 2019a.
- PORTAL G1. **Área de deslizamento em Niterói era antigo lixão, diz governo**. Disponível em: <g1.globo.com/Noticias/Rio/0,,MUL1561509-5606,00-AREA+DE+DESLIZAMENTO+EM+NITEROI+ERA+ANTIGO+LIXAO+DIZ+GOVERNO.html>. Acesso em: 17 abr. 2019b.
- PORTAL G1. **Deslizamento em aterro sanitário mata 4 e deixa 15 feridos na Guatemala**. Disponível em: <g1.globo.com/mundo/noticia/2016/04/deslizamento-em-aterro-sanitario-mata-4-e-deixa-15-feridos-na-guatemala.html>. Acesso em: 17 abr. 2019c.
- PORTAL G1. **Deslocamento em aterro sanitário de Guarulhos deixa cidade em estado de emergência**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2018/12/31/deslocamento-de-aterro-sanitario-em-guarulhos-deixa-cidade-em-estado-de-emergencia.ghtml>>. Acesso em: 17 abr. 2019d.
- PRICE, V. E.; MORGENSTERN, N. R. The Analysis of The Stability of General Slip Surfaces. **Geotechnique**, v. 18, n. 3, p. 393–394, set. 1968.
- PULAT, H. F.; YUKSELEN-AKSOY, Y. Factors affecting the shear strength behavior of municipal solid wastes. **Waste Management**, v. 69, p. 215–224, nov. 2017.
- PULAT, H. F.; YUKSELEN-AKSOY, Y. Compressibility and shear strength behaviour of fresh and aged municipal solid wastes. **Environmental Geotechnics**, p. 1–9, 9 maio 2019.
- RAHARDJO, H.; FREDLUND, D. G. General limit equilibrium method for lateral earth force. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 21, n. 1, p. 166–175, fev. 1984.
- RAKIC, D. et al. Contribution to the geotechnical classification of municipal waste landfills in Serbia. **Environmental Geotechnics**, n. November, p. 1–11, 2018.
- RAMAIAH, B. J. et al. Mechanical characterization of municipal solid waste from two waste dumps at Delhi, India. **Waste Management**, v. 68, p. 275–291, out. 2017.
- RAMAIAH, B. J.; RAMANA, G. V. Study of stress-strain and volume change behavior of emplaced municipal solid waste using large-scale triaxial testing. **Waste Management**, v. 63, p. 366–379, 2017.
- REDDY, K. R. et al. Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill,

- USA. **Waste Management**, v. 29, n. 2, p. 952–959, 4 fev. 2009a.
- REDDY, K. R. et al. Compressibility and shear strength of municipal solid waste under short-term leachate recirculation operations. **Waste Management & Research**, v. 27, n. 6, p. 578–587, 7 set. 2009b.
- REDDY, K. R. et al. Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation. **Waste Management**, v. 31, n. 11, p. 2275–2286, nov. 2011.
- REDDY, K. R. et al. Effects of Degradation on Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste from Orchard Hills Landfill, USA. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**, v. 1, n. 3, p. 24, 17 set. 2015.
- REDDY, K. R. et al. Reliability assessment of bioreactor landfills using Monte Carlo simulation and coupled hydro-bio-mechanical model. **Waste Management**, v. 72, p. 329–338, 2018.
- REDDY, K. R. et al. Influence of dynamic coupled hydro-bio-mechanical processes on response of municipal solid waste and liner system in bioreactor landfills. **Waste Management**, v. 63, p. 143–160, 2017.
- REES, J. F. The fate of carbon compounds in the landfill disposal of organic matter. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 30, n. 1, p. 161–175, 29 maio 1980.
- ROCSCIENCE. **Tutorial 11: Overall Slope Reliability (Slide 2018 Tutorial Manual)**. Disponível em:
 <https://www.rocscience.com/help/slide2/tutorials/11_Overall_Slope_Reliability_Tutorial.htm>. Acesso em: 28 set. 2019.
- SHARIATMADARI, N. et al. **Fiber Content Impact on the Shear Strength of Msw Materials in Direct Shear Tests**. Sardinia 2011, Thirteenth International Waste Management and Landfill Symposium. **Anais...**2011
- SHARIATMADARI, N. et al. Investigation of fiber effect on the mechanical behavior of municipal solid waste by different shearing test apparatuses. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 14, n. 10, p. 2239–2248, 2017.
- SHARIATMADARI, N. et al. Effects of aging on shear strength behavior of municipal solid waste. **International Journal of Civil Engineering**, v. 12, n. 3, p. 414–425, 2014.
- SIA, A. H. I.; DIXON, N. Numerical modelling of landfill lining system–waste interaction: implications of parameter variability. **Geosynthetics International**, v. 19, n. 5, p. 393–408, out. 2012.
- SIEGEL, R. A. et al. Slope stability investigations at a landill in southern California. **ASTM STP 1070; geotechnics of waste WII – Theory and practice**, v. 259, p. 259–284, 1990.
- SILVA NETO, A. N. DA; OLIVEIRA, J. T. R. DE. Confiabilidade e segurança de fundações em dois empreendimentos no Nordeste do Brasil. **Revista de Engenharia Civil**, n. 55, p. 19–28, 2018.
- SINGH, M. K. et al. Shear strength testing of intact and recompacted samples of municipal solid waste. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 46, n. 10, p. 1133–1145, out. 2009.
- SINGH, S.; MURPHY, B. J. **Evaluation of the Stability of Sanitary Landfills**. West Conshohocken: ASTM International, 1990. v. 240
- SIVAKUMAR BABU, G. L. et al. **Study of Engineering Properties of Municipal Solid Waste of**

Bangalore City. Indian Geotechnical Conference. **Anais...2012**

- SIVAKUMAR BABU, G. L. et al. Constitutive model for municipal solid waste incorporating mechanical creep and biodegradation-induced compression. **Waste Management**, v. 30, n. 1, p. 11–22, 2010.
- SIVAKUMAR BABU, G. L. et al. Influence of spatially variable geotechnical properties of MSW on stability of landfill slopes. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 18, n. 1, p. 27–37, 2014.
- SOUZA, F. T. DE; EBECKEN, N. F. F. A Data Based Model to Predict Landslide Induced by Rainfall in Rio de Janeiro City. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 30, n. 1, p. 85–94, 21 fev. 2012.
- SRIVASTAVA, A.; REDDY, K. R. **Probabilistic Design of Municipal Solid Waste Landfill Slopes.** XII International Symposium on Environmental Geotechnology, Energy and Global Sustainable Development. “Unveiling the Pathways to Global Sustainability.” **Anais...Los Angeles, USA: 2012**
- STARK, T. D. et al. Shear strength of municipal solid waste for stability analyses. **Environmental Geology**, v. 57, n. 8, p. 1911–1923, 2009.
- STOLTZ, G. et al. Characterisation of the physico-mechanical parameters of MSW. **Waste Management**, v. 30, n. 8–9, p. 1439–1449, 2010.
- USACE. **Risk-Based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies, Engineering and Design - Rep. No. 20314–1000.** Washington, USA, 1997.
- VAN IMPE, W. F. **Environmental geotechnics: ITC 5 Activities, state of art.** Proceedings, 3rd international congress on environmental geotechnics. **Anais...Lisbon, Portugal: 1998**
- VARDANEGA, P. J.; BOLTON, M. D. Design of Geostructural Systems. **ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering**, v. 2, n. 1, mar. 2016.
- WANG, Y. et al. Practical reliability analysis of slope stability by advanced Monte Carlo simulations in a spreadsheet. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 48, n. 1, p. 162–172, 2011.
- WHITMAN, R. V. Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering. **Journal of Geotechnical Engineering**, v. 110, n. 2, p. 143–188, fev. 1984.
- XU, Y. Shear strength of granular materials based on fractal fragmentation of particles. **Powder Technology**, v. 333, p. 1–8, 2018.
- YANG, R. et al. A review of characteristics of landfilled municipal solid waste in several countries: Physical composition, unit weight, and permeability coefficient. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 27, n. 6, p. 2425–2435, 2018.
- ZEKKOS, D. et al. Unit Weight of Municipal Solid Waste. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 132, n. 10, p. 1250–1261, 2006.
- ZEKKOS, D. et al. Physical Characterization of Municipal Solid Waste for Geotechnical Purposes. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 136, n. 9, p. 1231–1241, 2010a.
- ZEKKOS, D. et al. Large-scale direct shear testing of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 30, n. 8–9, p. 1544–1555, ago. 2010b.
- ZEKKOS, D. et al. Drained response of municipal solid waste in large-scale triaxial shear testing.

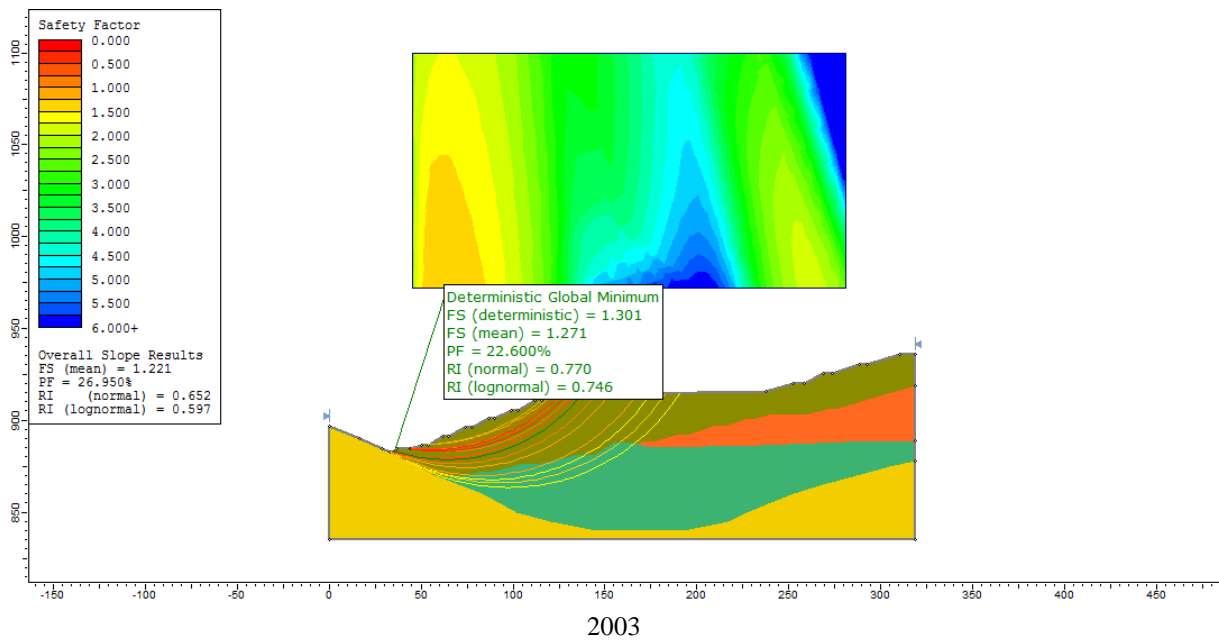
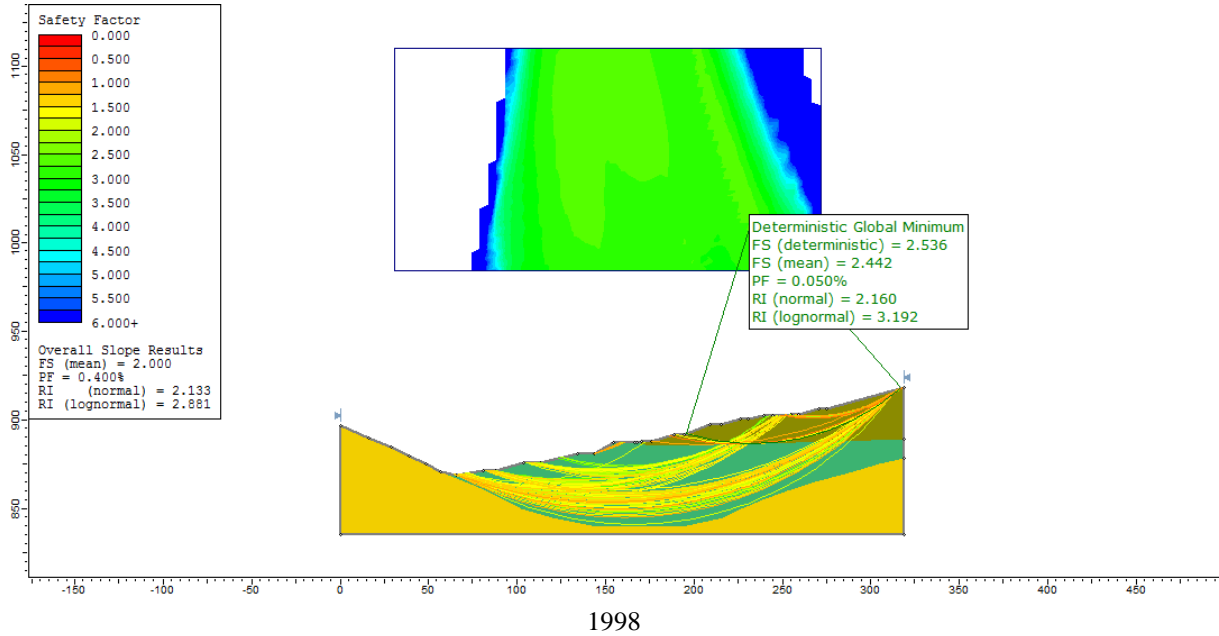
- Waste Management**, v. 32, n. 10, p. 1873–1885, 2012.
- ZEKKOS, D.; FEI, X. Constant load and constant volume response of municipal solid waste in simple shear. **Waste Management**, v. 63, p. 380–392, maio 2017.
- ZEKKOS, D. et al. The 2010 Xerolakka landfill slope instability. **Environmental Geotechnics**, v. 1, n. 1, p. 56–65, 2014.
- ZERAATPISHEH, M. et al. Determining the spatial distribution of soil properties using the environmental covariates and multivariate statistical analysis: a case study in semi-arid regions of Iran. **Journal of Arid Land**, v. 11, n. 4, p. 551–566, 2019.
- ZHAN, L. T. et al. Biochemical, hydrological and mechanical behaviors of high food waste content MSW landfill: Liquid-gas interactions observed from a large-scale experiment. **Waste Management**, v. 68, p. 307–318, 2017.
- ZHAN, T. L. T. et al. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China. **Engineering Geology**, v. 97, n. 3–4, p. 97–111, abr. 2008.
- ZHANG, B. et al. Development and evaluation of a phase relationship for MSW. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management**, v. 163, n. 2, p. 67–75, 2010.
- ZHANG, Z. Y.; WU, D. Z. Study on the Shear Strength Parameters for Municipal Solid Waste with Higher Content of Organic Matter. **Advanced Materials Research**, v. 295–297, p. 454–459, jul. 2011.
- ZHAO, Y. R. et al. A study of shear strength properties of municipal solid waste in Chongqing landfill, China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 21, n. 22, p. 12605–12615, 24 nov. 2014.
- ZHU, X. et al. Geotechnical behavior of the MSW in Tianziling landfill. **Journal of Zhejiang University-SCIENCE A**, v. 4, n. 3, p. 324–330, 1 maio 2003.

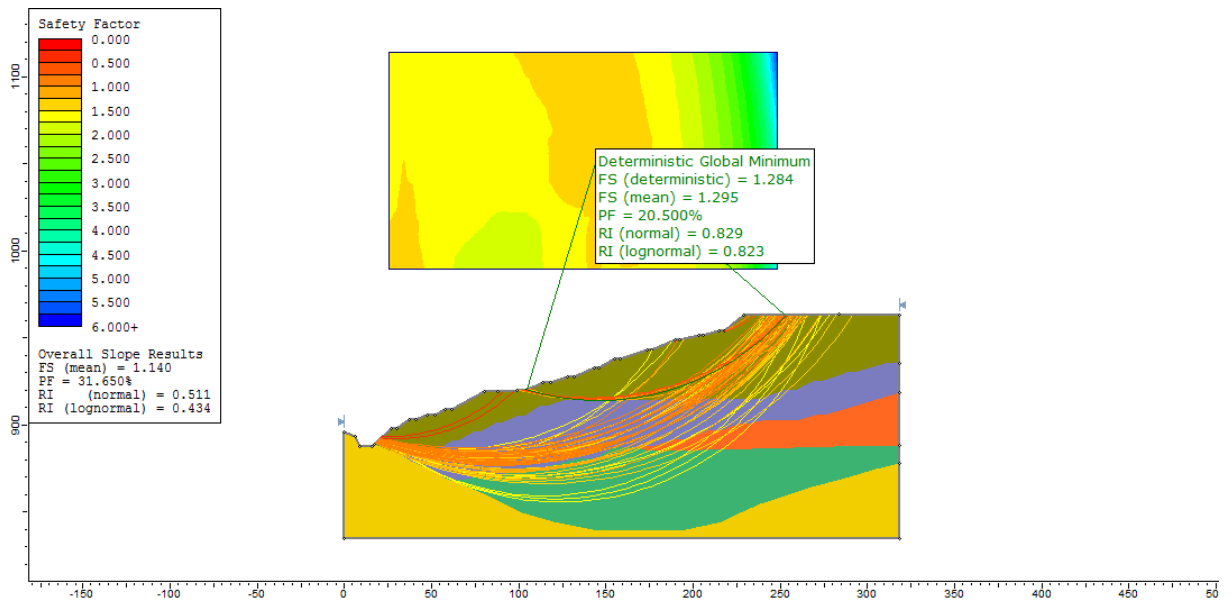
APÊNDICE A – EXTRATO DO BANCO DE DADOS UTILIZADO NA PESQUISA

| #ID | #Trabalho | Referência | Região | País | Tipo de Ensaio | Dimensões da amostra (mm) | Velocidade de ensaio (mm/min) | Estágio de degradação | Disposição | Teor de Umidade | γ (kN/m ³) | Compressível | Incompressível | Reforço | Classe | Parâmetros de tensão | σ_{\min} (kPa) | σ_{\max} (kPa) | Deformação | ϕ (°) | c (kPa) |
|-----|-----------|------------------------------|------------------|--------|----------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------|------------|-----------------|-------------------------------|--------------|----------------|---------|--------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|------------|---------|
| 1 | 1 | Abreu e Vilar (2017) | América do Sul | Brasil | CD | (R) 500 x 500 x 500 | 1,00 | Degradado | AE | 44,3% | 9,10 | 0,0% | 90,0% | 10,0% | B | TT | 50 | 250 | 5,0% | 16,0 | 2,5 |
| 2 | 1 | Abreu e Vilar (2017) | América do Sul | Brasil | CD | (R) 500 x 500 x 500 | 1,00 | Degradado | V | 42,5% | 9,30 | 2,0% | 90,0% | 8,0% | B | TT | 50 | 250 | 5,0% | 19,0 | 0,1 |
| 3 | 1 | Abreu e Vilar (2017) | América do Sul | Brasil | CD | (R) 500 x 500 x 500 | 1,00 | Degradado | AC | 42,2% | 8,70 | 1,0% | 72,0% | 27,0% | B | TT | 50 | 250 | 5,0% | 17,5 | 2,0 |
| 4 | 1 | Abreu e Vilar (2017) | América do Sul | Brasil | CD | (R) 500 x 500 x 500 | 1,00 | Degradado | AC | 43,7% | 10,30 | 1,0% | 63,0% | 36,0% | B | TT | 50 | 250 | 5,0% | 17,5 | 0,5 |
| 5 | 1 | Abreu e Vilar (2017) | América do Sul | Brasil | CD | (R) 500 x 500 x 500 | 1,00 | Degradado | AS | 0,51 | 14,20 | 0,0% | 82,0% | 18,0% | B | TT | 50 | 250 | 5,0% | 18,0 | 1,0 |
| 6 | 1 | Abreu e Vilar (2017) | América do Sul | Brasil | CD | (R) 500 x 500 x 500 | 1,00 | Degradado | AS | 0,51 | 15,10 | 1,0% | 15,0% | 84,0% | C | TT | 50 | 250 | 5,0% | 14,0 | 8,0 |
| 7 | 1 | Abreu e Vilar (2017) | América do Sul | Brasil | CD | (R) 500 x 500 x 500 | 1,00 | Degradado | AE | 0,44 | 9,10 | 0,0% | 90,0% | 10,0% | B | TT | 50 | 250 | 10,0% | 22,5 | 2,5 |
| 8 | 1 | Abreu e Vilar (2017) | América do Sul | Brasil | CD | (R) 500 x 500 x 500 | 1,00 | Degradado | V | 0,43 | 9,30 | 2,0% | 90,0% | 8,0% | B | TT | 50 | 250 | 10,0% | 25,0 | 0,1 |
| 19 | 2 | Karimpour-Fard et al. (2011) | América do Sul | Brasil | TRX CD | (C) 200 x 350 | 0,80 | Jovem | AS | --- | 8,00 | 69,2% | 30,8% | 0,0% | A | TT | 50 | 300 | 5,0% | 11,0 | 4,0 |
| 20 | 2 | Karimpour-Fard et al. (2011) | América do Sul | Brasil | TRX CD | (C) 200 x 350 | 0,80 | Jovem | AS | --- | 8,00 | 69,2% | 30,8% | 0,0% | A | TT | 50 | 300 | 10,0% | 13,0 | 8,0 |
| 21 | 2 | Karimpour-Fard et al. (2011) | América do Sul | Brasil | TRX CD | (C) 200 x 350 | 0,80 | Jovem | AS | --- | 8,00 | 69,2% | 30,8% | 0,0% | A | TT | 50 | 300 | 15,0% | 13,0 | 13,0 |
| 22 | 2 | Karimpour-Fard et al. (2011) | América do Sul | Brasil | TRX CD | (C) 200 x 350 | 0,80 | Jovem | AS | --- | 8,00 | 69,2% | 30,8% | 0,0% | A | TT | 50 | 300 | 20,0% | 14,0 | 18,0 |
| 23 | 2 | Karimpour-Fard et al. (2011) | América do Sul | Brasil | TRX CU | (C) 200 x 350 | 0,80 | Jovem | AS | --- | 8,00 | 69,2% | 30,8% | 0,0% | A | TT | 50 | 300 | 5,0% | 9,0 | 9,0 |
| 35 | 2 | Karimpour-Fard et al. (2011) | América do Sul | Brasil | TRX CD | (C) 200 x 350 | 0,80 | Jovem | AS | --- | 8,00 | 64,9% | 28,8% | 6,3% | A | TT | 50 | 300 | 5,0% | 13,0 | 2,0 |
| 36 | 2 | Karimpour-Fard et al. (2011) | América do Sul | Brasil | TRX CD | (C) 200 x 350 | 0,80 | Jovem | AS | --- | 8,00 | 64,9% | 28,8% | 6,3% | A | TT | 50 | 300 | 10,0% | 16,0 | 4,0 |
| 37 | 2 | Karimpour-Fard et al. (2011) | América do Sul | Brasil | TRX CD | (C) 200 x 350 | 0,80 | Jovem | AS | --- | 8,00 | 64,9% | 28,8% | 6,3% | A | TT | 50 | 300 | 15,0% | 17,0 | 8,0 |
| 454 | 22 | Cho et al. (2011) | Ásia | China | CD | (C) 100 x 50 | 0,76 | Jovem | SIN | 0,04 | 3,50 | 24,0% | 45,0% | 31,0% | C | TE | 48 | 290 | 5,0% | 30,0 | 5,0 |
| 455 | 22 | Cho et al. (2011) | Ásia | China | CD | (C) 100 x 50 | 0,76 | Jovem | SIN | 0,27 | 4,20 | 54,4% | 27,0% | 18,6% | C | TE | 48 | 290 | 5,0% | 27,0 | 6,0 |
| 456 | 22 | Cho et al. (2011) | Ásia | China | CD | (C) 100 x 50 | 0,76 | Jovem | SIN | 0,37 | 4,60 | 67,8% | 19,0% | 13,2% | A | TE | 48 | 290 | 5,0% | 20,0 | 17,0 |
| 457 | 22 | Cho et al. (2011) | Ásia | China | CD | (C) 100 x 50 | 0,76 | Jovem | SIN | 0,50 | 5,00 | 84,8% | 8,9% | 6,3% | A | TE | 48 | 290 | 5,0% | 6,0 | 6,0 |
| 458 | 22 | Cho et al. (2011) | Ásia | China | CD | (R) 860 x 860 x 620 | 0,76 | Jovem | SIN | 0,09 | 4,80 | 24,0% | 45,0% | 31,0% | C | TE | 96 | 287 | 5,0% | 25,0 | 0,1 |
| 459 | 22 | Cho et al. (2011) | Ásia | China | CD | (R) 860 x 860 x 620 | 0,76 | Jovem | SIN | 0,30 | 6,90 | 54,4% | 27,0% | 18,6% | C | TE | 96 | 287 | 5,0% | 24,0 | 12,0 |
| 494 | 23 | Reddy et al. (2011) | América do Norte | EUA | CD | (C) 63 x 34 | 0,04 | Jovem | SIN | 0,50 | 13,70 | 45,1% | 54,9% | 0,0% | C | TT | 32 | 364 | 15,0% | 35,0 | 1,0 |
| 495 | 23 | Reddy et al. (2011) | América do Norte | EUA | CD | (C) 63 x 34 | 0,04 | Degradado | SIN | 0,50 | 13,70 | 45,1% | 54,9% | 0,0% | C | TT | 32 | 364 | 15,0% | 34,0 | 16,0 |
| 496 | 23 | Reddy et al. (2011) | América do Norte | EUA | CD | (C) 63 x 34 | 0,04 | Degradado | SIN | 0,50 | 13,70 | 45,1% | 54,9% | 0,0% | C | TT | 32 | 364 | 15,0% | 29,0 | 18,0 |
| 525 | 23 | Reddy et al. (2011) | América do Norte | EUA | TRX CU | (C) 50 x 100 | 2,10 | Degradado | SIN | 0,50 | 16,60 | 45,1% | 54,9% | 0,0% | C | TE | 69 | 276 | 10,0% | 9,1 | 104,3 |
| 526 | 23 | Reddy et al. (2011) | América do Norte | EUA | TRX CU | (C) 50 x 100 | 2,10 | Degradado | SIN | 0,50 | 16,60 | 45,1% | 54,9% | 0,0% | C | TE | 69 | 276 | 20,0% | 3,6 | 127,2 |

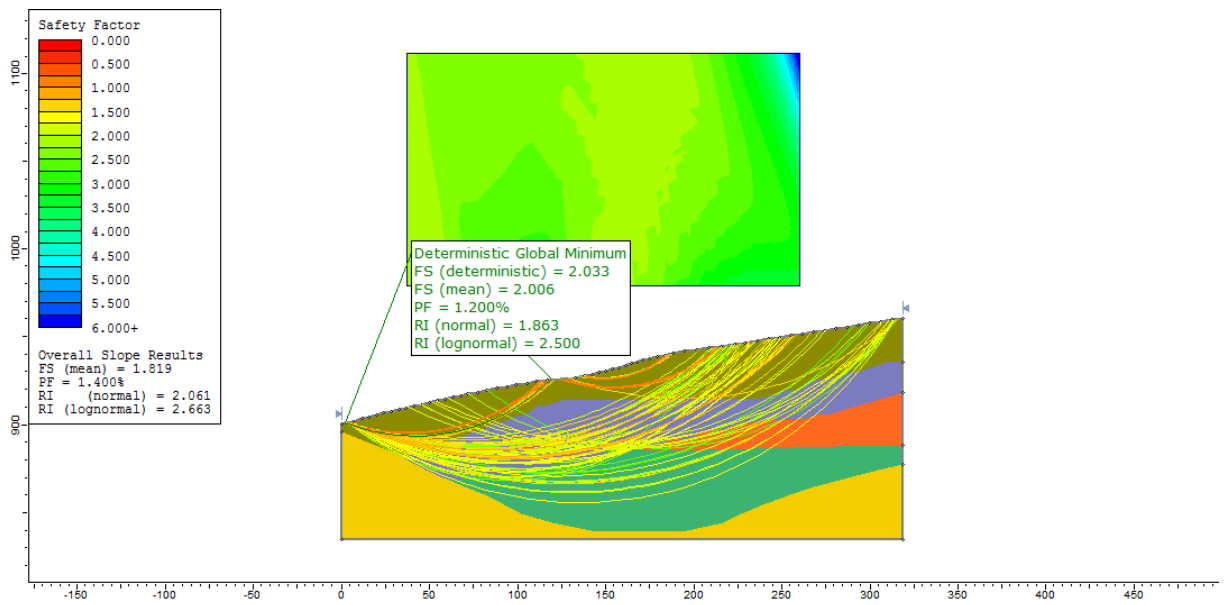
APÊNDICE B – ANÁLISES NUMÉRICAS – ATERRO SÍTIO SÃO JOÃO

APÊNDICE B.1 – RU ELEVADO

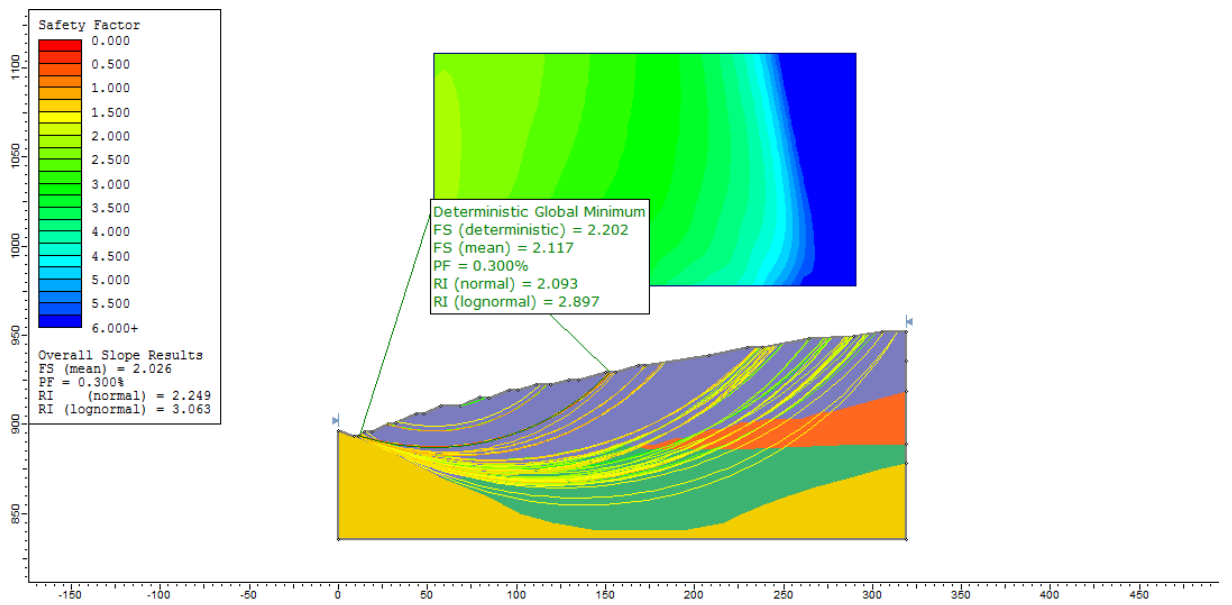
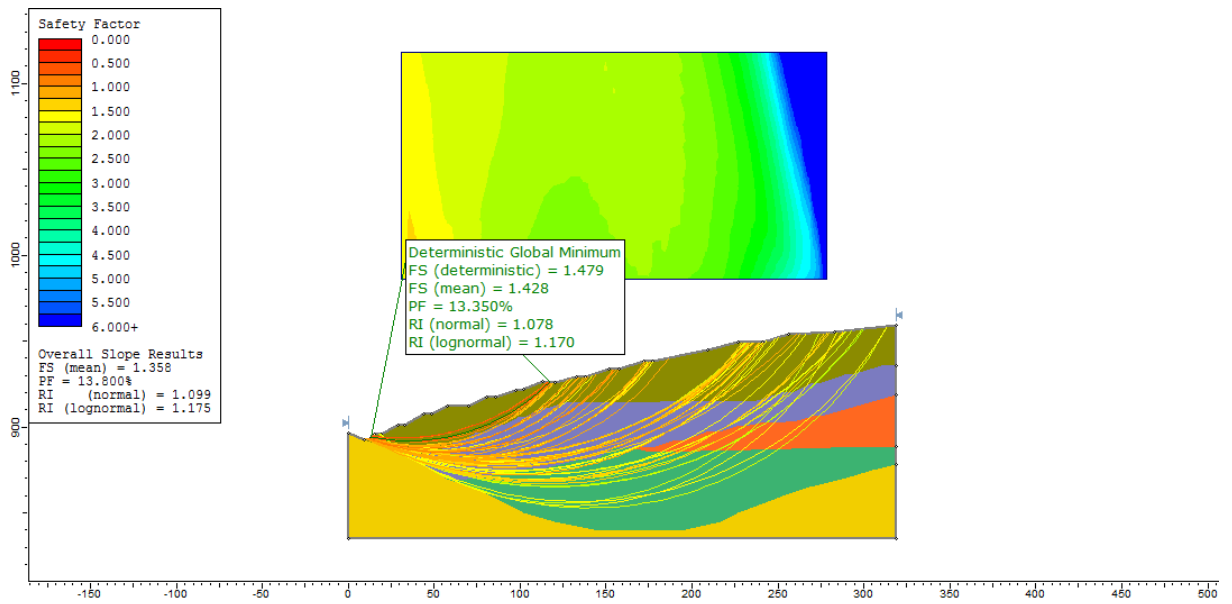




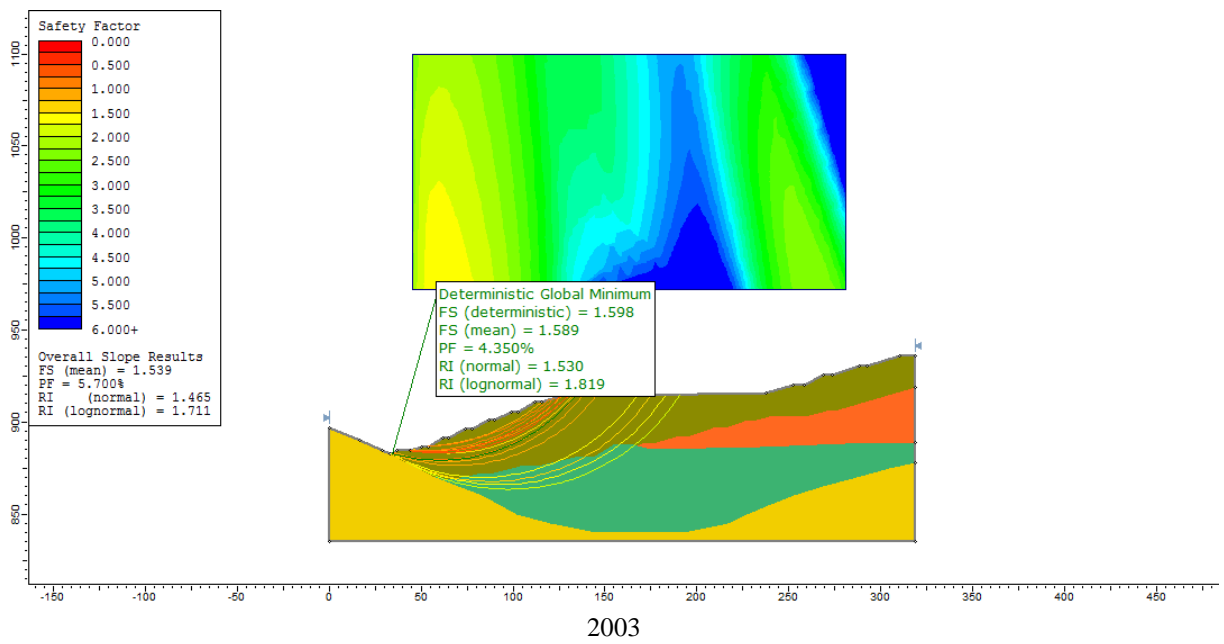
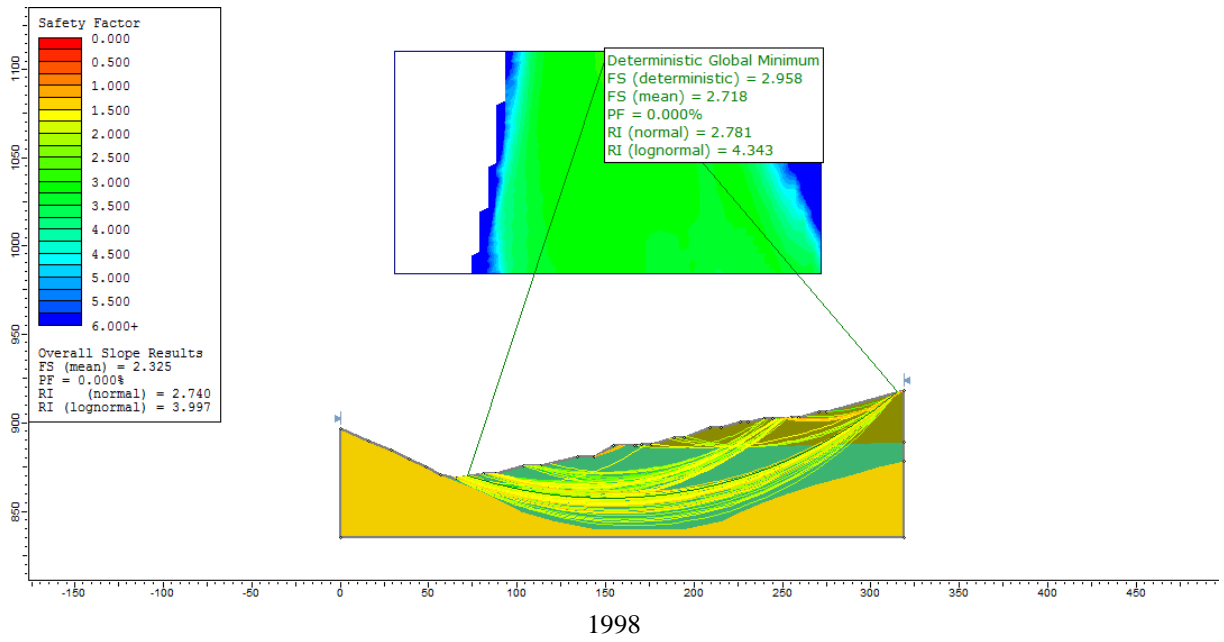
2007 Pré-Ruptura

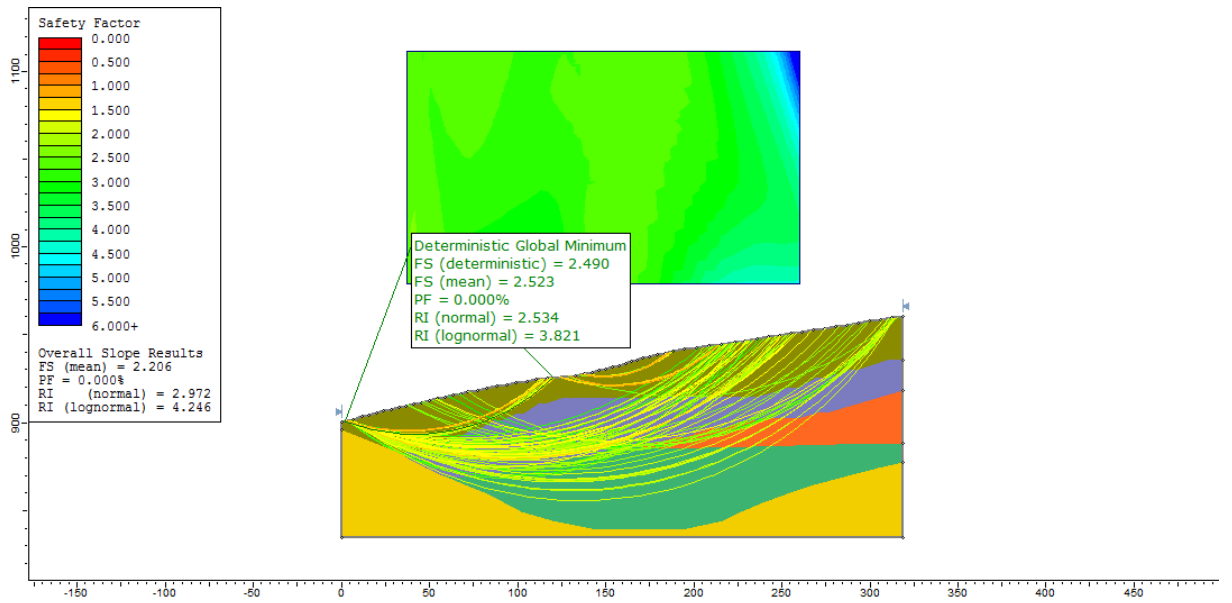
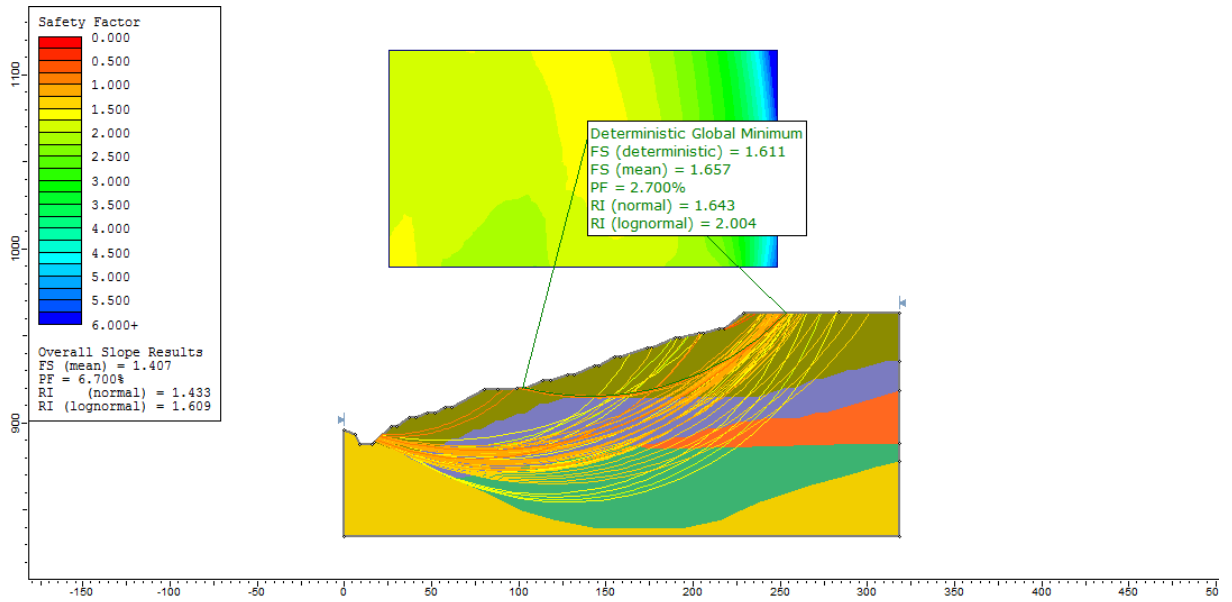


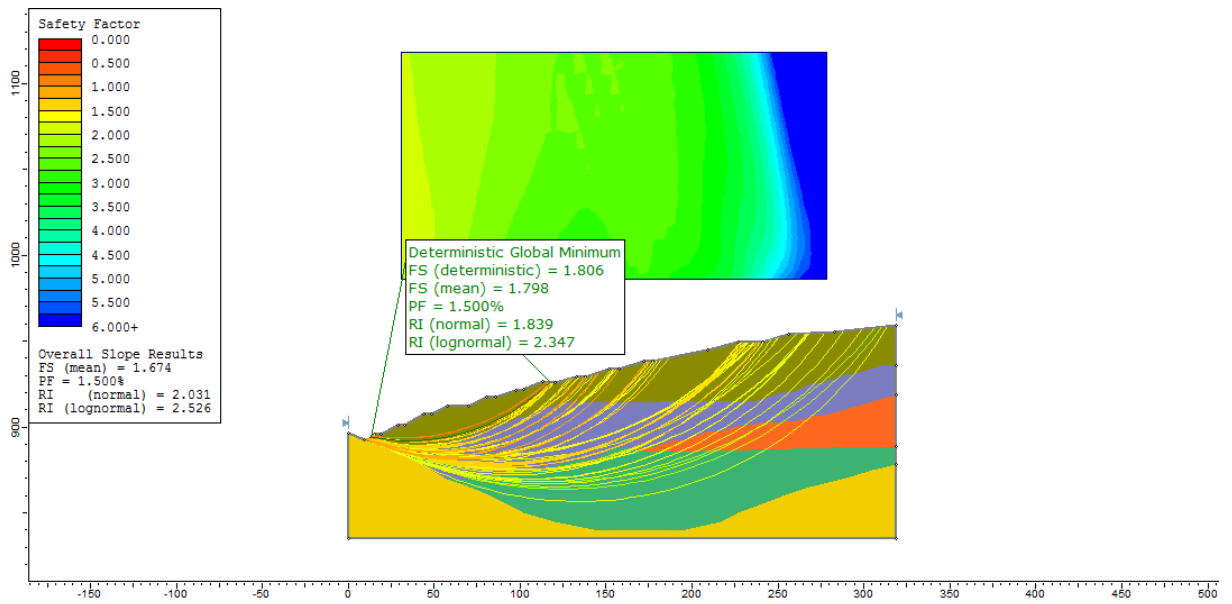
2007 Pós-Ruptura



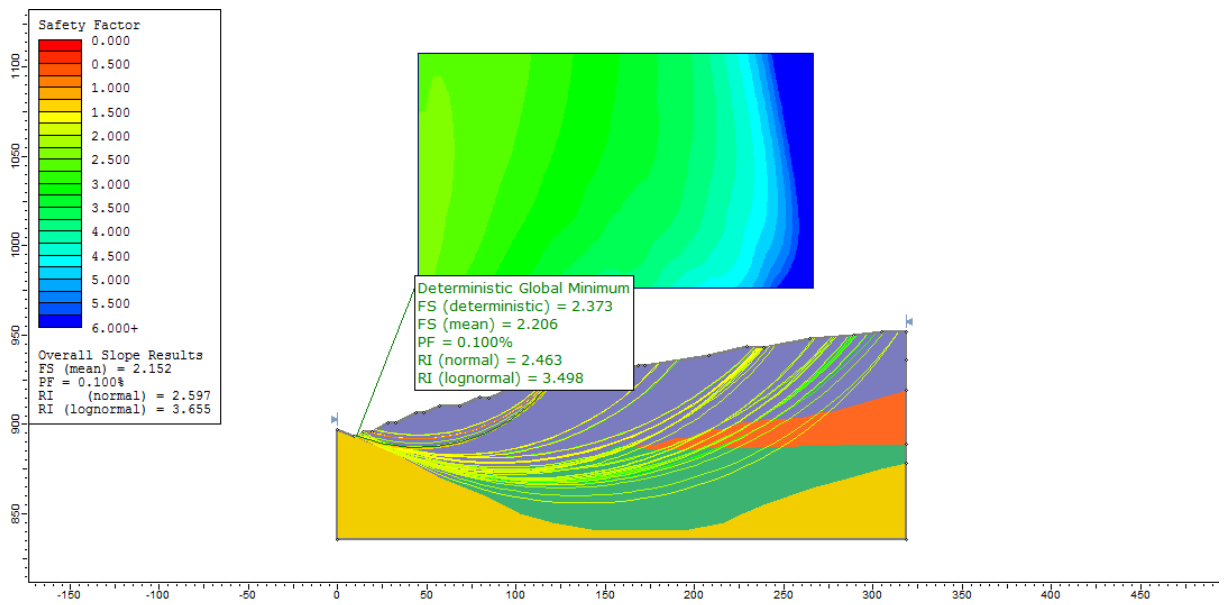
APÊNDICE B.2 – RU MÉDIO







2008



2013