

1 Introdução

1.1. Generalidades

A associação do volume crescente de resíduos provenientes de atividades antrópicas com a diminuição de locais adequados para disposição, seja pela “megalopolização” dos centros urbanos ou por questões de cunho ambiental, constitui um dos principais elementos de agravamento ao problema da disposição ou disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Além disto, a escolha adequada de locais para este fim e a posterior operação correta do aterro de RSU são condições que devem ser seguidas pela administração das cidades. Entretanto, sabe-se que historicamente grande parte das cidades brasileiras acaba inicialmente lançando seus resíduos em áreas escolhidas de modo pouco criterioso ou de maneira desordenada, constituindo os chamados lixões, bota-foras ou vazadouros. Conseqüentemente, em um momento posterior, tem-se que realizar diagnósticos ambientais para avaliar a extensão dos danos e produzir projetos de remediação e controle. Contudo, devido ao acelerado crescimento metropolitano, zonas destinadas para este fim que outrora eram consideradas propícias para tal, vêm-se dentro de um contexto urbano ativo, coexistindo com zonas residenciais, comerciais ou industriais, potencializando o problema com um todo.

A solução para o destino final dos RSU está longe da trivialidade, pois passa pelo engajamento de diversos segmentos da sociedade. Todavia, o que se espera dos órgãos públicos e privados competentes é que desenvolvam sistemas de gerenciamento integrado que compreendam conjuntos de ações de ordem normativas, operacionais, financeiras, de planejamento estratégico e de educação ambiental para que se possa, dentro dos preceitos da legislação ambiental vigente no país, dar destino final aos RSU com o mínimo de impacto ao meio ambiente, ao mais baixo custo e empregando o máximo de tecnologia disponível. Contudo, Jucá (2003) leva a crer que ainda existe um longo caminho a traçar neste contexto, pois as normas técnicas sobre Aterros de Disposição de RSU (ADRSU), apesar de

terem cerca de duas décadas, ainda não incorporam conceitos mais atuais da geotecnia ambiental ou mesmo da biotecnologia.

Do ponto de vista particular da engenharia geotécnica, dos vários desafios enfrentados relacionados à disposição final dos RSU, a concepção de projetos de ADRSU dentro dos preceitos ambientais vigentes pode ser destacado como um dos elementos essenciais para a solução do problema. Além disto, é de igual importância a sua adequada instalação, operação e manutenção ao longo da sua vida útil e que envolve a execução de inúmeras obras geotécnicas como, por exemplo, dispositivos de revestimentos de fundo para impermeabilizações eficientes, sistemas de coleta de líquidos e gases, sistemas de coberturas finais das células, dispositivos de drenagens superficiais; além de análises de estabilidade das células, programas de monitoramento de lixiviados e estimativas de recalques das células, onde se destacam principalmente os processos de biodegradação. Com isto, diversos questionamentos surgem naturalmente. Qual a capacidade efetiva operacional? Qual a vida útil das células do aterro? Elas sofrerão variações volumétricas expressivas? Qual taxa, intensidade e magnitude destas deformações? Qual a metodologia mais eficiente para estimar os recalques durante e após a operação do aterro? Qual o modelo matemático mais adequado? Como obter parâmetros representativos para previsões? O recalque final pode comprometer o projeto de cobertura das células? Pode-se construir sobre o aterro após seu fechamento sem prejuízo estrutural por recalques diferenciais? Enfim, a obtenção das respostas para estas perguntas passa, no mínimo, pelo conhecimento mais aprofundado das características do meio estudado e dos fenômenos que lá ocorrem, principalmente os processos de decomposição dos resíduos no interior das células, pois são estes que determinam o comportamento do aterro. Informações preciosas podem ser obtidas através de campanhas de investigações *in situ* e *ex situ* desde que, neste caso, reproduzam os fenômenos naturais associados aos processos de decomposição nas células dos ADRSU. Todavia, a simples correlação entre a teoria conceitual associada aos RSU e as teorias desenvolvidas ao longo da história da Engenharia Geotécnica não é direta, principalmente por conta do comportamento extremamente peculiar e variado do resíduo, próprio de sua constituição heterogênea. Por conta disto, o comportamento tensão-deformação-resistência do resíduo ainda é alvo de estudos mais aprofundados com vistas à obtenção de parâmetros cada vez mais reais e

confiáveis. Além disto, as características de algumas reações de ordem química e biológica que ocorrem dentro dos ADRSU têm importância direta nos mecanismos de recalques das células de RSU e, por conseguinte, têm sido estudadas cada vez mais profundamente. Desta forma, todos estes aspectos têm induzido ao avanço da chamada Mecânica do Resíduo como ciência destinada ao estudo das propriedades de engenharia dos RSU.

A tentativa de melhor compreender o comportamento tensão-deformação-resistência tem ocorrido tanto em laboratório, quanto em campo, tendo como base as técnicas, equipamentos e metodologias usualmente empregados na geotecnia. Entretanto, se por um lado os ensaios de laboratório constituem um ambiente controlado, estes têm como certa limitação o emprego de amostras deformadas ou remoldadas de resíduo, dificuldades de incorporar os efeitos da degradação biológica que ocorrem na massa de lixo devido à escala de tempo e o efeito da escala física da amostra em relação ao aterro. Sob estes aspectos, a investigação *in situ* é mais indicada, pois agrega as condições físicas, químicas, biológicas e mecânicas naturais de campo, fornecendo resultados certamente mais reais, porém traz também as dificuldades inerentes às campanhas de investigações com RSU. Além disto, Jucá (2003) ressalta, através de uma análise crítica detalhada a respeito de investigações geotécnicas em ADRSU com SPT e CPT, que a correlação entre as informações obtidas com estas técnicas e as características do resíduo como idade e decomposição é tarefa complexa.

Algumas informações oriundas de campanhas de investigação de campo em RSU, na maioria parâmetros mecânicos, têm subsidiado inúmeros modelos matemáticos empregados na previsão do comportamento do material. Contudo, aproximações mais refinadas aos problemas envolveriam o uso de modelos tensão-deformação-resistência mais complexos que incluam, além das parcelas mecânicas, as provenientes da degradação biológica. Este último aspecto tem sido tratado de forma teórica para representar o comportamento mecânico do resíduo (e.g. Simões & de Campos, 2002), independentemente do modelo tensão-deformação adotado. Por outro lado, o uso destes modelos sofre ainda pela falta de uma metodologia de investigação direta, simples, com procedimentos interpretativos padronizados e que possa fornecer parâmetros quantitativos confiáveis de resistência e deformação ao longo do perfil do ADRSU.

Na medida em que se aumentam os conhecimentos sobre os processos de degradação que ocorrem nas células de RSU, pode-se tentar associar os resultados corriqueiros de investigações *in situ* com estes mecanismos condicionantes, de tal forma que se tenham parâmetros mecânicos que já trazem intrinsecamente as parcelas de degradação e, portanto, prontos para emprego direto em modelos mais refinados de comportamento.

Acredita-se que uma técnica que possa servir ao propósito seja a investigação com pressiômetros dada a sua grande versatilidade e aplicabilidade no contexto da geotecnia (e.g. Wroth, 19884; Robertson, 1986; Clarke, 1995) e simplicidade de interpretação (cavidade cilíndrica). Com este tipo de equipamento poder-se-ia obter o perfil de módulo de deformabilidade com profundidade e degradação, desde que se investiguem resíduos com diferentes percentuais de sólidos voláteis, por exemplo. Até o presente momento, a aplicação de pressiômetros em investigações com RSU no Brasil não foi realizada.

1.2. Objetivos da Pesquisa

São os seguintes os objetivos gerais desta pesquisa:

- Projetar e montar um pressiômetro de cravação do tipo *Full Displacement*;
- Realizar campanha de investigação em ADRSU com o equipamento desenvolvido em conjunto com outras técnicas *in situ*;
- Determinar propriedades mecânicas de RSU sob a luz das teorias clássicas.

Para alcançar os objetivos gerais têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Conceber um sistema de instrumentação da membrana expansível que tenha baixo custo e possua capacidade de medição maior do que as sondas disponíveis comercialmente;
- Projetar a instrumentação de tal forma que seja capaz de contabilizar o efeito da anisotropia e heterogeneidade do meio investigado.
- Projetar um sistema de controle para ensaios com pressão controlada em material de diferentes características de rigidez;

- Projetar todo o sistema de condicionamento eletrônico de sinais e aquisição automática de dados;
- Avaliar tipos de membranas expansíveis que possam melhor se adaptar ao contexto de investigações com RSU;
- Experimentar e avaliar metodologias de instalação da sonda pressiométrica em células de ADRSU, bem como, procedimentos de ensaios;
- Determinar prioritariamente o módulo de deformabilidade (G) e sua variação dentro das células correlacionando-o com outros fatores como idade, decomposição, nível de tensões, etc., realizando análises comparativas, inclusive;
- Secundariamente e quando possível, avaliar demais parâmetros mecânicos geotécnicos;
- Ao final, propor sugestões de melhorias em termos do equipamento, da técnica de instalação, do procedimento de execução e das metodologias de interpretação.

O desenvolvimento de um Pressiômetro de Cravação e sua aplicação em RSU é uma proposta nova no país e que se integra plenamente nos preceitos do grupo de Geotecnologia Ambiental da PUC-Rio, tendo sido financiado pelo PRONEX/CNPq. Para este fim, foram estabelecidas parcerias com a universidade de *Newcastle Upon Tyne*, na Inglaterra, onde há um centro especializado no desenvolvimento e aplicação de pressiômetros, e com a UFPE que tem realizado extensas campanhas de investigações em ADRSU no país.

1.3. Organização do Trabalho

O Capítulo 2 faz parte da revisão bibliográfica e aborda a temática dos pressiômetros de uma forma geral, apresentando algumas definições e informações detalhadas sobre os diversos tipos de sondas disponíveis atualmente.

A revisão bibliográfica continua no Capítulo 3, que traz considerações acerca das teorias clássicas empregadas na determinação de parâmetros de resistência e deformação em aterros de RSU.

As fases do desenvolvimento do pressiómetro e suas características fundamentais fundamentam o Capítulo 4, onde se encontram as atividades desenvolvidas na Inglaterra, durante o programa de Doutorado Sanduíche, bem como etapas posteriores realizadas no Brasil, envolvendo montagem, testes e calibrações.

O Capítulo 5 enfoca a aplicação prática do equipamento em uma de investigação realizada no aterro da Muribeca em Pernambuco, apresentando resultados brutos de campo.

Em seqüência, no Capítulo 6 são realizadas as interpretações dos dados de campo e análises comparativas com resultados da literatura.

Finalmente no Capítulo 7 constam as análises críticas conclusivas, bem como os comentários sobre sugestões de continuidade desta pesquisa.

Em seqüência estão as Referências Bibliográficas e o Apêndice com os projetos das sondas, tabelas de avaliação de eficiência de sensores, laudos de sondagens.