

7 Conclusões e Sugestões

Os objetivos propostos nesta pesquisa foram alcançados primeiramente com o desenvolvimento de duas sondas pressiométricas de cravação direta, com célula única e instrumentação eletrônica por meio de sensores do tipo Hall em até quatro pontos ortogonais ao longo do comprimento da zona expansível de membrana, e posteriormente pela aplicação prática das sondas em um aterro de disposição de resíduos sólidos para determinação de parâmetros de deformabilidade.

A análise final do estudo desenvolvido nesta pesquisa será dividida conforme três aspectos básicos relacionados aos objetivos propostos: (i) desenvolvimento do equipamento; (ii) aplicação prática e (iii) interpretação de parâmetros. Em seguida serão apresentadas algumas sugestões de continuidade da pesquisa.

7.1. Desenvolvimento do Equipamento

(i) Ranhuras Externas da Sonda

As ranhuras externas transversais ao corpo da sonda, projetadas para distribuir melhor o gás pressurizado, dificultaram bastante a colocação das membranas, seja pela quantidade ou pela profundidade destas.

(ii) Sistema de Medição de Deslocamentos: Braços Móveis

O sistema com braços móveis projetados para acompanhar, via contato físico, a expansão ou contração da membrana durante o ensaio pressiométrico teve êxito no seu propósito que foi possibilitar a instrumentação de deformações da cavidade até níveis superiores do que o convencional em equipamentos do gênero comercialmente disponíveis na atualidade.

O projeto do sistema de fixação da membrana fez com que os braços localizados mais próximos das extremidades da zona teste (topo e base) tivessem a sua abertura máxima influenciada pelas restrições de fixação

(iii) Sistema de Medição de Deslocamentos: Sensores de Efeito Hall

A construção do sistema de medição de deslocamentos radiais empregando sensores do tipo Hall foi uma solução de baixo custo e eficiente ao emprego de transdutores de deslocamentos comercialmente existentes. O arranjo geométrico projetado para os imãs e o chip eletrônico mostrou, em calibrações, que a saída de sinais proporcionais ao movimento de rotação dos braços pôde ser bem ajustada através de um polinômio de segundo grau. Além disto, os resultados obtidos com estas calibrações mostraram pouca histerese e boa repetibilidade.

Por outro lado, a saída de sinal do sensor já com o devido condicionamento eletrônico mostrou dificuldade de estabilização para uma condição estática do braço de medição, por exemplo, ao início de um ensaio, demandando ajustes nos potenciômetros da caixa eletrônica de condicionamento e perda de tempo. Acredita-se que isto se deva a necessidade de estabilização térmica do próprio chip, independente do ambiente que a sonda esteja inserida.

A escolha do uso de pequenas peças de acrílico nas quais os sensores Hall foram colados não foi satisfatória, pois estas peças algumas vezes sofriam trincas causadas pelo aperto do parafuso de fixação, danificando-as. Além disto, na abertura total dos braços de fixação estes tocavam as placas de acrílico com suas partes posteriores que, dependendo da velocidade de abertura, causavam quebra do acrílico, demandando um espaçador de proteção.

(iv) Membranas: colocação e desempenho

A colocação das membranas nas sondas pressiométricas foi realizada várias vezes ao longo desta pesquisa e algumas metodologias foram testadas, porém todas implicaram em perda demasiada de tempo e energia, além de terem sido realizadas somente em laboratório.

O uso de estopa para a limpeza interna das membranas não é indicado, pois deixa resíduos de fios aumentando o atrito na colocação, nem tampouco se deve

empregar óleo mineral ou sintético para este fim. A prática mostrou que se deve utilizar apenas vaselina em pasta com auxílio de esponja.

As membranas com duas camadas de reforço de fibras de nylon e reforço externo com tecido apresentaram rigidez longitudinal extremamente elevada, impossibilitando a expansão destas em função das restrições de movimento impostas nas extremidades de fixação. Não sendo indicado o emprego destas com o equipamento desenvolvido.

Por outro lado, as membranas com uma camada de fibras permitiram a expansão radial, porém os limites de ruptura observados estiveram muito aquém do desejado e da capacidade máxima do sistema de medição de deslocamentos projetado. A rigidez para expansão inicial deste tipo de membrana foi baixa e a rigidez na expansão apresentou claramente dois trechos de inclinações diferenciadas: o primeiro referente à rigidez da borracha, e o segundo oriundo do reforço de fibras. Contudo, obteve-se um bom ajuste com polinômio de terceiro grau para ajustar as curvas de calibração na expansão e na contração, independentemente. Em todos os casos notou-se ocorrência de pequena histerese.

Estas membranas não apresentaram desempenho satisfatório nas investigações de campo em função do reduzido limite de expansão e, principalmente, devido ao fato de seu reforço externo não ser suficiente para resistir aos esforços de cravação e expansão no ambiente do aterro de resíduos. Ficou evidente nas observações de campo que o reforço externo da membrana dos pressiômetros deve ser mais robusto do que o utilizado nesta pesquisa, em investigações com RSU. Acredita-se que um sistema similar ao das lanternas chinesas, com lâminas metálicas flexíveis, possa ser empregado para este fim.

(v) Demais Elementos de Instrumentação da Sonda

Os estudos a respeito do desempenho do transdutor de pressão localizado na caixa de controle em superfície mostraram que há necessidade de alguns segundos para equalização da diferença nos valores de pressões aplicadas na caixa e lidas no pressiômetro. O estudo demonstrou que a localização ideal para o transdutor de pressão é dentro da sonda pressiométrica, pois mede a pressão efetivamente aplicada.

O sensor de temperatura com circuito integrado adaptado nas sondas serviu apenas para avaliar a temperatura interna nas mesmas e para averiguar o efeito no comportamento nos sensores de deslocamento. Os resultados das calibrações mostraram que a resposta do sensor a variação de temperatura não é tão instantânea como a de um termopar, porém foi possível obter ajustes lineares de calibração.

(vi) Caixa e Painel de Controle

A caixa de controle foi construída com material leve para facilitar o transporte, porém não se mostrou robusta suficiente para atividades de campo sendo danificada externamente.

O painel de controle que compõe a caixa se mostrou suficiente para realizar ensaios com pressão controlada empregando a válvula de menor capacidade. Porém para ensaios com deformação controlada (ou de deslocamento controlado) há necessidade de construir uma unidade servo-controlada, via hardware ou computador para monitorar os deslocamentos médios dos sensores (Het) e comparar com uma taxa pré-estabelecida de deslocamentos radiais. No caso, se a taxa durante a expansão for menor do que a requerida então uma válvula do tipo solenóide é aberta permitindo a passagem do gás pressurizado para o pressiômetro. Caso contrário, essa válvula libera gás pressurizado do pressiômetro para atmosfera. Este mesmo sistema pode servir para manter a pressão constante no interior da sonda para a realização de ensaios do tipo “holding” destinados a obter parâmetros de adensamento.

(vii) Caixa Eletrônica de Condicionamento de Sinal

O condicionamento eletrônico de sinais projetado para os sensores de efeito Hall propiciou amplificação de saída compatível com a faixa total de leitura do conversor analógico-digital, aumentando em muito a sensibilidade dos sensores.

A escolha pela redução na taxa de aquisição do conversor, isto é, a sua resolução, parece não ter tido nenhum efeito negativo nos resultados finais das leituras, permitindo aquisição com respostas bem mais rápidas no computador.

O ajuste manual do valor de referência inicial (*offset*) nos potenciômetros do circuito integrado se mostrou um procedimento pouco prático e demorado, porém necessário nesta pesquisa. Em todos casos, antes dos ensaios era indispensável abrir a caixa eletrônica, expondo as partes internas às intempéries, e proceder com o ajuste individualmente por canal varias vezes até que os sinais ficassem estáveis.

7.2. Aplicação do Equipamento

(i) A Campanha de Ensaios no Aterro da Muribeca

Considerando as dificuldades envolvidas na troca de membranas e a facilidade de ruptura destas durante o procedimento de instalação e ensaio, a existência de uma sonda sobressalente calibrada e pronta para uso foi essencial para a continuidade dos ensaios em profundidade.

A utilização de uma equipe com experiência de sondagens em aterros de resíduos sólidos, existência de equipamentos de proteção individual adequados, área coberta de trabalho e apoio da infra-estrutura de operações do aterro foram condições essenciais para a campanha.

(ii) Sistema de Reação e Cravação

O sistema de reação e cravação empregado, isto é, com avanço manual, foi suficiente para instalar a sonda até a profundidade de oito metros, contudo acredita-se que para maiores profundidades seja necessário um sistema mais robusto.

A instalação das hastes de reação com ponta helicoidal foi um processo demorado e dificultado devido a grande ocorrência de materiais fibrosos na superfície das células investigadas. A solução empregada reutilizando dois trados de reação instalados no ensaio anterior possibilitou um pouco mais de celeridade nos processos executivos.

(iii) Metodologias de Instalação da Sonda

A metodologia de cravação direta não se mostrou apropriada para investigações em aterros de RSU sem que haja proteção mais robusta das membranas, pois estas não suportaram os danos causados pelo esforço de abrasão com objetos rígidos e semi-rígidos, apesar do diâmetro da ponteira ser maior. Além disto, foi observado que a orientação com que a membrana é colocada na sonda pode potencializar a ocorrência dos danos devido a saliências externas das camadas de sobreposição de borracha e lona.

A segunda metodologia testada, isto é, em pré-furo de SPT, foi passível de emprego e propiciou menos perdas das membranas por abrasão. Contudo, não foi possível avaliar de forma precisa o efeito do distúrbio causado durante a passagem do amostrador SPT nos módulos de cisalhamento do resíduo determinados.

(iv) Sistema de Proteção da Membrana

A proteção das membranas com fibras de nylon e tecido externo, associado com ponteira de diâmetro maior que o corpo da sonda, não foi eficiente durante o processo de cravação direta do pressômetro, apresentando inúmeros rasgos durante a instalação no aterro de RSU investigado. Contudo, foi mais eficaz no processo de instalação em pré-furos do SPT, não submetendo as membranas a muitos danos por abrasão. Além disto, houve pouca ocorrência de danos causados por objetos puntiformes.

Acredita-se que os danos podem ter sido potencializados por duas causas distintas durante a instalação: pelo desalinhamento do eixo da composição de hastes, que induziu a um contato maior da membrana para um determinado lado; ou devido ao fato da cavidade formada pela passagem da ponteira não permanecer com este diâmetro à medida que a cravação prossegue. Neste caso, o resíduo é empurrado pelo cone e logo em seguida tende a retornar para a condição inicial ficando em contato com a membrana.

(v) Execução dos Ensaios

O intervalo de tempo empregado entre os acréscimos e decréscimos de pressão parecem ter sido suficiente para permitir que as respectivas deformações ocorressem durante os ensaios com pressão controlada. Contudo, estes ensaios demandaram um tempo razoável para se obter as curvas pressão x deformação até o limite máximo de expansão.

Os níveis de deformações radiais máximos impostos ao resíduo durante os ensaios estiveram muito aquém do desejado e foram limitados pelas características de ruptura da membrana.

Para os níveis atingidos, similar ao que já foi observado em ensaios de ruptura com resíduo em laboratório, não houve escoamento definido. Em alguns casos houve tendência de acréscimo de resistência similar que é observado em materiais com reforço de fibra.

Além disto, a realização de apenas um ciclo de carga e descarga não foi suficiente para avaliar o efeito do endurecimento nos módulos cisalhantes determinados.

7.3. Análise Crítica Sobre a Interpretação das Curvas

(i) Característica das Curvas Pressiométricas

As curvas pressiométricas analisadas individualmente para cada HET demonstraram comportamentos diferenciados, característicos de ensaios cravados, em pré-furo e até autoperfurantes. Isto se deu em função do emprego de dois tipos diferentes de instalação da sonda pressiométrica associados à característica de heterogeneidade do meio investigado.

Praticamente em todas as curvas que representam a média dos transdutores de efeito Hall não foi observado o escoamento do material ensaiado, mesmo para deformações da cavidade elevadas. Observou-se, sim, uma certa tendência de acréscimo de rigidez com a deformação, típico de materiais com reforço com fibras.

(ii) Característica de Heterogeneidade e Anisotropia

Características de heterogeneidade e anisotropia do meio investigado, no que se refere a sua rigidez, puderam ser identificadas por meio dos resultados apresentados pelos HETs para uma mesma profundidade. Diferenças expressivas de magnitudes e comportamentos foram facilmente notadas nos ensaios em uma mesma profundidade, levando à determinação de módulos de rigidez bem diferentes entre si, mostrando a ocorrência de diversos tipos de materiais. Esta variação foi balizada por meio de resultados de CPT e SPT próximos que também demonstraram picos erráticos de resistência de ponta e à penetração nas mesmas profundidades.

(iii) Determinação de G

A determinação do módulo cisalhante por meio do ajuste de todos os pontos dos ciclos de descarga e recarga juntamente com a determinação do módulo secante no recarregamento foi empregada com sucesso para o nível de descarregamento dos ensaios.

Contudo, o emprego de apenas um ciclo não foi insuficiente para avaliar o efeito de reforço observado nas curvas pressiométricas no módulo cisalhante em níveis de tensões e deformações da cavidade maiores.

A determinação do módulo de cisalhamento nos ensaios com o pressiômetro instalado por cravação direta evidenciou claramente a ocorrência de materiais rígidos em contato com a sonda. Por outro lado, este comportamento não foi observado nos ensaios com pré-furo de SPT, onde os módulos tiveram pouca variação pontual.

(iv) Variação de G com Profundidade

Os módulos cisalhantes obtidos na célula C5 mostraram uma certa tendência de aumento em profundidade, possivelmente causado pelo estado de tensões em profundidade. O efeito do nível de tensões no valor de G da célula C5 foi estudado, mostrando que há aumento de rigidez com a tensão. Isto é consistente

com que normalmente é observado em materiais granulares e endossa qualitativamente o efeito do reforço de fibras notado.

Por outro lado, não houve acréscimo nos valores do módulo em profundidade obtidos na célula C4. Acredita-se que neste caso isto se deva ao fato do resíduo investigado ser novo e, portanto, ainda não ter sido submetido a processos de decomposição e recalques. Os valores de módulos determinados nesta célula foram bem inferiores aos da célula C5, onde os teores de sólidos voláteis já indicavam decomposição avançada.

(v) Variação de G com Deformação

A partir de uma comparação entre os módulos G_{ur} , G_r e $G_{r0,1\%}$ mostrou-se que o módulo cisalhante para resíduos sólidos é dependente do nível de deformações, similar ao que ocorre para solos. Além disto, por meio de uma adaptação com correlações obtidas para solos, foi possível produzir uma correlação direta entre o módulo cisalhante do ciclo do ensaio pressiométrico e o módulo máximo ou dinâmico G_0 normalmente obtido em ensaios do tipo *cross-hole*. Entretanto, há necessidade de mais estudos para aferir as correlações propostas.

(vi) Variação de G com idade do resíduo

A estimativa da época de lançamento dos resíduos nas camadas investigadas mostrou que há uma correlação entre os valores de G determinados e a idade destes. Mostrou-se que o módulo cisalhante tem seu valor acrescido à medida que o resíduo envelhece em profundidade, possivelmente devido ao efeito da decomposição e diminuição de vazios nas células.

Por meio da determinação dos módulos de cisalhamento do resíduo investigado, levando em conta a correlação com a idade deste em associação com dados da literatura sobre módulos cisalhantes máximos no aterro Bandeirantes, em São Paulo, foi possível propor uma correlação exponencial com excelente ajuste entre o módulo pressiométrico obtido em ciclos de descarga e recarga, o módulo máximo obtido em ensaios sísmicos e a idade do resíduo.

Desta maneira foi possível comparar resultados disponíveis na literatura com os módulos determinados nesta pesquisa, mostrando boa concordância.

(vii) Tensão Horizontal

A estimativa na tensão horizontal em profundidade nas células do aterro investigado foi realizada meramente como um exercício teórico de interpretação de dados, pois foram empregadas metodologias gráficas de interpretação que consideram o trecho inicial das curvas pressiométricas, o qual foi bastante perturbado durante os processo de instalação da sonda.

Apesar disto, a metodologia iterativa de interpretação usada produziu resultados coerentes com o que ocorre em análises com solo, onde a tensão horizontal é obtida em um trecho bem característico da curva pressiométrica. Em contrapartida, houve dificuldade de aplicação de tal metodologia dada a dificuldade de determinação da pressão correspondente ao início do regime plástico no ensaio.

Entretanto, os resultados obtidos mostraram que o valor de σ_h aumenta com a profundidade, mostrando ser importante a sua estimativa para subsidiar projetos de estruturas que serão submetidas esforços laterais. Além disto, os valores de tensão vertical calculados foram maiores dos que os de tensão horizontal obtidos pela análise gráfica.

A determinação de um coeficiente de empuxo lateral mostrou uma variação grande de valores, similar ao observado por outros autores em diferentes aterros de RSU. Além disto, foi possível concluir que o valor de coeficiente de empuxo lateral sofre influência das perdas de massa causadas pela decomposição da matéria orgânica dentro do aterro.

(vii) Ângulo de Atrito

A determinação do ângulo de atrito a partir de metodologia de interpretação de curvas pressiométricas originalmente concebidas para areias, não forneceu resultados confiáveis e, portanto, foi suprimida nesta pesquisa. Acredita-se que isto se deva ao efeito dos distúrbios causados durante a instalação.

Por outro lado, os valores de ângulo de atrito determinados a partir de adaptações interpretativas dos ensaios de cone de SPT forneceram resultados similares aos encontrados na literatura técnica, permanecendo em uma faixa aceitável. Além disto, mostrou-se que o ângulo de atrito em ambas as células não apresentou um aumento crescente com a profundidade, permanecendo praticamente constante com esta. Contudo, notou-se que o ângulo de atrito, obtido em ambas as técnicas, foi menor na célula C4, sugerindo que este parâmetro tem seu valor minorado em resíduos novos.

(ix) Umidade e sólidos voláteis

As análises laboratoriais mostraram que o percentual de umidade na célula C5 estava em na faixa ótima para os processos de decomposição. Isto foi comprovado pela observação dos percentuais de sólidos voláteis bastante baixos e praticamente constantes com a profundidade nesta célula. Este quadro sugere que o processo de recirculação do lixiviado na referida célula possa ter contribuído para manter o teor de umidade em uma faixa ótima, bem como fornecido os nutrientes necessários para que o processo de decomposição ocorresse.

Por sua vez, as análises laboratoriais na célula C4 mostraram que esta ainda possuía um percentual elevado de sólidos voláteis em constituição, portanto ainda susceptível aos processos de perda de massa por decomposição da matéria orgânica contida na camada mais superficial que detinha lixo novo. Contudo, os teores de umidade observados nesta camada foram extremamente elevados, sugerindo que os processos de decomposição estavam sendo inibidos naquele período.

(x) Correlações entre parâmetros

Mostrou-se que há uma correlação exponencial entre os teores de umidade e de sólidos voláteis nas células investigadas. Esta correlação demonstra que realmente o resíduo que está com teor de umidade dentro da faixa ideal para ocorrência de processos anaeróbios de decomposição, tem a sua matéria orgânica disponível já praticamente toda decomposta.

O efeito da decomposição nos módulos cisalhantes determinados, através da obtenção de uma relação entre %SV e G, não foi tão evidente quanto se esperava, pois o espaço amostral empregado empregou pouca variação de %SV. Contudo, o ajuste logarítmico utilizado leva à crer que há uma tendência ganho de rigidez à medida que a matéria orgânica é decomposta.

As correlações entre resistência de ponta no ensaio de CPT, resistência a penetração no ensaio SPT e módulo cisalhante no ensaio PMT, mostraram ajustes lineares entre si.

7.4. Sugestões de Continuidade da Pesquisa

- Acredita-se que uma nova sonda pressiométrica deva ser construída levando-se em consideração o conhecimento adquirido durante a investigação com RSU, bem como as melhorias sugeridas;
- Investigações devem ser realizadas com outros fabricantes de sensores do tipo Hall para avaliar a eficiência de cada um em função do projeto do sistema de medição de deslocamentos. Além disto, é necessário avaliar o efeito do encapsulamento dos sensores para fins de proteção contra umidade e demais tipos de sujeira que possam interferir na resposta do sensor;
- É necessário que se avalie emprego de pequenas chapas de aço inoxidável como suporte dos sensores tipo Hall em detrimento as de acrílico, principalmente com relação ao efeito no fluxo do campo magnético ao redor do Hets;
- Outro circuito de condicionamento eletrônico deve ser projetado com os demais tipos de sensores futuramente avaliados, onde não haja necessidade de abertura da caixa eletrônica para ajuste do *off set* inicial dos sensores do sistema de medição de deslocamentos;
- Outras metodologias para colocação da membrana devem ser desenvolvidas para facilitar a troca destas, inclusive em campo;
- Sugere-se o estudo de outros tipos de membranas que possam oferecer maiores deformações e compatíveis com o contexto do RSU. Indica-se a

avaliação do emprego somente de borracha natural na fabricação das membranas, pois é muito mais elástica e resistente à abrasão, que deverá ser usada em com um sistema de proteção externo.

- Indica-se o projeto e construção de um sistema de proteção externa das membranas para permitir a cravação do pressiômetro. Este sistema pode ser similar às lanternas chinesas, sendo construído com lâminas de aço inoxidável delgadas, sobrepostas umas sobre as outras e devidamente fixadas em anéis bi-partidos em suas extremidades. Estes anéis devem estar livres para se movimentar longitudinalmente no corpo da sonda em função do aumento radial da membrana quando de sua expansão.
- O projeto do novo pressiômetro deve possibilitar a medição de pressão dentro da sonda em detrimento ao monitoramento na superfície. Para tanto, indica-se o uso de transdutores de pressão miniatura;
- A localização dos sensores de temperatura deve ser modificada para estar em contato direto com o meio investigado e fornecer informações reais deste, considerando que o fluxo de gás pressurizado no interior da sonda tem efeito nas leituras de temperatura do sensor.
- Sugere-se a construção de um painel de controle mais robusto, com manômetro para aferição das pressões aplicadas e com um sistema para execução de ensaios com deformação controlada;
- É necessário construir uma ponteira cônica instrumentada com células de carga para medição de resistência de ponta e atrito lateral, e com possibilidade de medição de parâmetros ambientais e coleta de gás ou líquidos.
- É fundamental que se teste o equipamento sob condições controladas, para que se possa identificar melhor a “assinatura” deste. Para tanto, sugere-se a aplicação do mesmo em uma câmara de calibração, tanto com resíduo natural quanto com resíduo artificial, para determinação de parâmetros de deformabilidade;
- Sugere-se o emprego na câmara de calibração de materiais com diferentes características de rigidez, devidamente dispostos, para avaliar melhor o desempenho dos vários braços móveis na identificação de heterogeneidade e anisotropia do meio;

- Sugere-se a execução de ensaios em RSU, tanto em campo quanto sob condições controladas, com diferentes velocidades de aplicação de pressões, para avaliar o efeito nos módulos cisalhantes;
- Além disto, é importante realizar ensaios com RSU empregando-se diversos ciclos de descarga e recarga, principalmente em patamares de deformação da cavidade maiores, para avaliar o efeito do nível de tensões e deformações nos módulos e principalmente o comportamento de reforço de fibras;
- Indica-se a realização de ensaios do tipo *cross-hole* e pressiométricos em um mesmo perfil de RSU para a comparação dos módulos cisalhantes e aferição da correlação proposta nesta pesquisa;
- Sugere-se, ainda, uma melhor avaliação do módulo pressiométrico do resíduo em função do nível de decomposição deste, a partir do ensaio com RSU com diferentes teores de sólidos voláteis;
- A continuidade da pesquisa deve, ainda, estar ligada ao desenvolvimento de uma metodologia de interpretação específica para RSU, que deve levar em conta o efeito de reforço de fibras e os efeitos de degradação biológica;
- Além disto, propõe-se como continuidade da pesquisa, a realização de uma modelagem numérica do ensaio pressiométrico em RSU e a elaboração de um modelo numérico de previsão de deformações a partir dos parâmetros obtidos nos ensaios reais;
- Finalmente, como continuidade da pesquisa deve-se aplicar o equipamento desenvolvido em materiais geotécnicos cujo comportamento é conhecido ou facilmente obtido em campo ou laboratório, como, por exemplo, depósitos de argila mole, onde a cravação do pressiómetro é facilitada. A comparação de resultados deve ser realizada, principalmente, para melhorar o conhecimento a respeito da assinatura, características e limitações do equipamento, além de possibilitar análises comparativas de campo e laboratório.