

Avaliação da eficiência da técnica de consolidação profunda radial CPR *Grouting* no tratamento de solos compressíveis

Amanda Ottolini Chavão

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: amandaottolini@gmail.com

Ana Cristina Castro Fontenla Sieira

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: sieira@eng.uerj.br

André Pereira Lima

Universidade Veiga de Almeida, Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: andre.pereira@uva.com.br

RESUMO: A técnica de Consolidação Profunda Radial (CPR *Grouting*) consiste no bombeamento de argamassa no interior da camada de solo mole sob elevadas pressões, intercaladas com geodrenos. O tratamento resulta na diminuição do índice de vazios da camada compressível e no aumento da resistência, conduzindo a uma redução significativa dos recalques. O presente trabalho tem como objetivo comparar o comportamento de dois aterros experimentais, executados sobre solo mole, a partir de dados de instrumentação. Em um dos aterros, foi adotada a técnica CPR *Grouting* para tratamento do solo. O segundo aterro foi executado apenas com geodrenos. Os aterros foram implementados em uma área no Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro, que apresenta espessuras de solo mole da ordem de 8,0 m. Os resultados permitiram avaliar a eficiência da técnica. Observou-se uma redução significativa dos recalques sobre o solo tratado, uma diminuição dos deslocamentos horizontais, e uma aceleração expressiva dos recalques.

PALAVRAS-CHAVE: Consolidação Profunda Radial, Aterros Sobre Solos Moles, Adensamento

1 INTRODUÇÃO

A falta de espaço para construção de novos empreendimentos nos grandes centros, associada ao crescimento do setor da construção civil, incentivaram a prospecção de novas áreas para a construção. O avanço tecnológico, com as técnicas de tratamento de solo, permitiu a execução de obras em solos moles que anteriormente seriam economicamente ou tecnicamente inviáveis.

Os solos moles, em geral, apresentam grande complexidade, sob o ponto de vista da Geotecnia, pois são solos de baixa resistência, alta compressibilidade e baixa permeabilidade. A escolha de soluções construtivas de aterro sobre solos moles deve ser cautelosa, pois o carregamento gerado pode causar rupturas

decorrentes da baixa capacidade de suporte, deslocamentos excessivos devido à alta compressibilidade, e recalques pós-construtivos em virtude da baixa permeabilidade do solo.

A Consolidação Profunda Radial (CPR *Grouting*) é uma técnica de tratamento de solos moles, que consiste no bombeamento de argamassa no interior da camada de solo mole sob elevadas pressões. As fases consecutivas da execução do CPR *Grouting* consistem na instalação de geodrenos, na preparação de argamassa e no bombeamento de argamassa no interior do solo mole (Figura 1).

A injeção de argamassa sob alta pressão faz com que se formem bulbos de pressão, que comprimem o solo lateralmente, causando elevados deslocamentos no entorno do bulbo. Os bulbos de compressão são formados de

baixo para cima através de um alinhamento vertical do equipamento, e são locados entrepostos aos drenos já instalados. O volume do bulbo é, geralmente, de 800 a 1.000 litros e as pressões de injeção variam de 100 kPa a 1.000 kPa, reduzindo à medida que se aproxima da superfície do terreno (Almeida e Riccio, 2012).

No processo de execução do bulbo de compressão, inicialmente há um aumento da poropressão. A partir do processo de adensamento, ocorre a percolação da água em direção aos drenos instalados. À medida que a água vai sendo expulsa pelos drenos, há um processo gradual de transferência de carga para o arcabouço sólido, aumentando assim, a tensão efetiva do solo.

Com o acréscimo de tensão no solo gerado pelas colunas de compressão de argamassa, ocorre uma diminuição do índice de vazios da camada compressível e um aumento da resistência. Esta melhoria do solo resulta em uma significativa diminuição da magnitude dos recalques.

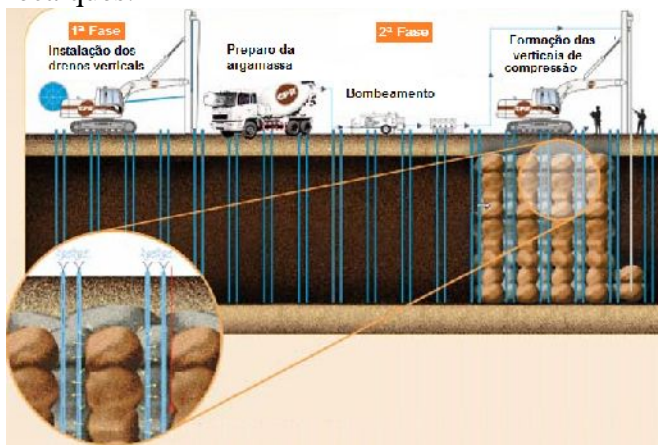


Figura 1. Fases de Execução da Consolidação Profunda Radial CPR Grouting (Engeraut, 2015).

No Parque do Cantagalo, na Lagoa Rodrigo de Freitas, Rio de Janeiro, o tratamento de solo mole com CPR Grouting foi executado com a finalidade de estabilizar definitivamente os recalques que ocorrem há décadas na região. O CPR Grouting foi aplicado no tratamento de espessa camada de argila mole, a qual atinge até 30 m de espessura. A execução dos bulbos para a formação das colunas começava, em geral, entre 9 m e 10 m de profundidade e terminava entre 2 m e 4 m abaixo do nível do terreno. Os

geodrenos foram cravados até a profundidade de 15 m. A configuração básica da malha consistiu em uma distribuição triangular de geodrenos e colunas de compressão de CPR Grouting. O espaçamento entre os geodrenos foi de 1,80 m e as colunas foram dispostas nos vértices de um triângulo de lado igual a 6 m.

Para avaliar o comportamento mecânico da técnica de tratamento, foi implantada uma instrumentação geotécnica, composta por placas de recalque, inclinômetros e perfilômetros. Os resultados da instrumentação permitiram concluir que, nas camadas sob influência direta do tratamento, houve uma aceleração no processo de adensamento primário, com a ocorrência de recalque máximo da ordem de 30 cm em um período de 330 dias, o que corresponde a 22% dos recalques primários remanescentes (gerados pelas ocupações e pelos aterros construídos desde a década de 1970). Foram realizados também, ensaios mecânicos em laboratório para a caracterização das colunas de argamassa, onde se verificou que o material das colunas apresenta elevada rigidez, com módulo de elasticidade igual 6,6 GPa, quando comparado com a rigidez da argila mole do Parque do Cantagalo, cujo módulo de elasticidade é de 2,7 MPa (Mello, 2013).

Na construção do trecho sul do Rodoanel, em São Paulo, a técnica de CPR Grouting foi utilizada para estabilizar a fundação dos aterros compactados, construídos na região da represa de Billings, onde foi constatada a existência de três bolsões de solos moles. O tratamento foi aplicado em uma área de 3.700m². Para verificação da eficiência da solução, foram executados ensaios de Palheta, antes e após o tratamento com CPR Grouting. Os resultados apontaram que a resistência não drenada (S_u) passou de 6,35 kPa para 16 kPa, ou seja, houve um ganho de 150% na resistência não drenada. Quanto à deformabilidade do solo, verificou-se que o CPR Grouting reduziu, em média, 40% dos recalques esperados na camada tratada. De acordo com Nogueira (2010), estima-se que este valor seja um resultado combinado entre os efeitos produzidos pelo amolgamento do solo, decorrente da formação violenta dos bulbos das colunas de compressão do CPR Grouting, do enrijecimento da camada mole devido ao

acréscimo das colunas com um material menos compressível e da redução do índice de vazios dos solos moles remanescentes.

No trecho da Via Parque, adjacente a acesso a *shopping center* na Barra da Tijuca, Rio de Janeiro, também se reporta um exemplo de aplicação da técnica de CPR *Grouting* (Geoinfra, 2010). A região tratada abrangeu uma área de aproximadamente 2.400 m² com extensão de pista de 120 m (Figura 2). A região de implantação da Via Parque apresenta uma camada de aterro com compactação não-controlada e espessuras variáveis, com trechos variando de 0,5 m até aproximadamente 7,0 m. Esta camada está assente sobre espessa camada de argila muito mole saturada (N_{SPT} com 0 e 1 golpes) com trechos com 4,0 m de espessura até trechos com 14,0 m. Estudos com soluções de aterro de sobrecarga, utilização de geogrelhas na base do aterro e colunas drenantes de material granular, apesar de apresentarem aceleração dos recalques no tempo, foram insuficientes para o tempo requerido para o início das obras do aterro em si, uma vez que os recalques prosseguiriam acontecendo em um período da ordem de 4 anos. Pela necessidade de estabilização dos recalques em tempo hábil, lançou-se mão da estabilização do terreno em solo muito mole através da técnica de CPR *Grouting*. A técnica mostrou-se satisfatória, e os prazos da obra foram atendidos.



Figura 2. Área de tratamento de solo mole em trecho da Via de Acesso (Geoinfra, 2010)

O Pontal Oceânico é um sub-bairro nobre planejado, localizado no Recreio dos Bandeirantes (Zona Oeste – Rio de Janeiro), que ocupa uma área de 600.000 m². Para a urbanização do bairro, fez-se necessária a implantação de cerca de 2.600 m de

infraestrutura de via urbana e galerias de drenagem de concreto armado. A área em estudo apresenta espessuras expressivas de solo mole (entre 3,5 m a 11,0 m de espessura), o que determina a necessidade de busca de soluções geotécnicas para execução e implantação de aterro da via urbana a curto e médio prazo. Para os trechos com prazos para estabilização e liberação da obra de até 8 meses, foi considerada a execução da técnica de Consolidação Radial Profunda (CPR *Grouting*) em toda a extensão do trecho (Geoinfra, 2013).

2 DESCRIÇÃO DA OBRA

A necessidade de um estudo comparativo da eficiência das técnicas de tratamento de solos moles gerou a construção de dois aterros experimentais, sendo um sobre solo de fundação tratado com técnica de Consolidação Profunda Radial *Grouting* (CPR *Grouting*), e o outro sobre solo de fundação com geodrenos para aceleração dos recalques. Os aterros experimentais foram implementados na área de construção do Condomínio Palms Recreio Residencial, Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro, conforme apresentado na Figura 3.



Figura 3 – Localização do Condomínio Palms Recreio Residencial

O bairro do Recreio dos Bandeirantes localiza-se na região litorânea do oeste da cidade do Rio de Janeiro, sendo este, um dos bairros que constituem a planície da Baixada de Jacarepaguá, que se situa entre os Maciços da Pedra Branca e da Tijuca, apresentados na Figura 4. De acordo com Cabral (1979), a Baixada de Jacarepaguá caracteriza-se pela presença de solos aluvionares, arenosos e areno-

argilosos, formados essencialmente de granitos e gnaisses, originados da decomposição dos materiais carreados dos maciços circundantes, sendo estes os principais sedimentos que compõem as lagoas da região. Maia (1984) ressaltam que a formação da Baixada de Jacarepaguá se deu em ciclos de erosão e sedimentação, devido a períodos de regressão e transgressão marinha.

As areias marinhas da região possuem a característica de ter compactação crescente com a profundidade e, quase sempre, apresentam nível freático próximo à superfície. Geralmente, as areias marinhas estão assentadas sobre solos argilosos ou solos residuais de embasamento. Outros tipos de sedimentos que constituem a baixada, são os solos argilosos e siltosos que, na localidade, apresentam uma capa de turfa e elevados teores de matéria orgânica. Estes tipos de solos constituem um problema do ponto de vista geotécnico, por apresentarem baixa permeabilidade, baixa resistência, e alta compressibilidade (Cabral, 1979).



Figura 4. Baixada de Jacarepaguá e seus Maciços. Fonte: Instituto Pereira Passos, Portal GEO

2.1. Caracterização Geotécnica da Região

Para identificação dos materiais existentes e caracterização da região em estudo, foi realizada uma ampla campanha de sondagens com objetivo de realizar um mapeamento geológico-geotécnico. Além disso, foram realizados ensaios pressiométricos (PMT), e coletadas amostras para realização de ensaios de adensamento oedométricos, em laboratório.

A Figura 5 apresenta as isoespessuras de argila mole em toda extensão do empreendimento, definidas com base nas

sondagens à percussão e a Figura 6 apresenta o perfil geológico geotécnico da área onde os aterros experimentais foram assentados. Pode-se observar a presença de uma camada de argila muito mole com aproximadamente 8,0 m de espessura, e N_{SPT} igual a zero. O nível d'água foi detectado na superfície do terreno.

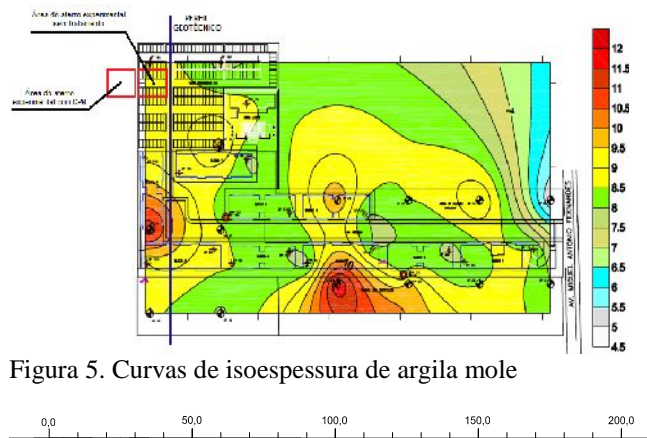


Figura 5. Curvas de isoespessura de argila mole

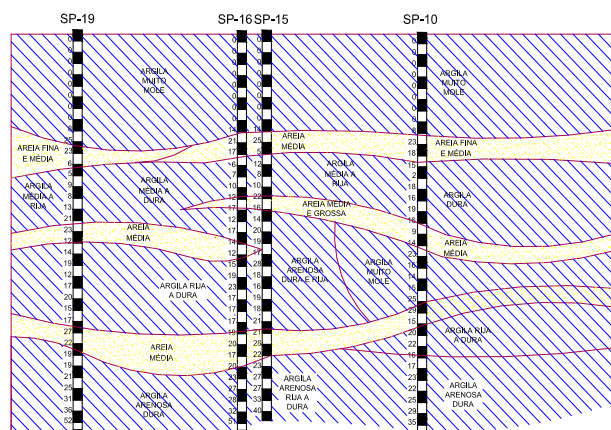


Figura 6. Perfil geológico geotécnico: área dos aterros experimentais

3 ATERROS EXPERIMENTAIS

Os serviços dos aterros testes iniciaram no dia 14 de agosto de 2014, com a marcação das áreas. No dia 18 de agosto de 2014, foi finalizada a cravação dos geodrenos em ambas as áreas dos aterros experimentais. No dia 19 de agosto de 2014, foi removido, tanto o aterro de conquista quanto o geotêxtil colocado sobre o terreno natural na época da conquista, na área do aterro sem tratamento. O aterro de conquista removido possuía 1,30 m de espessura. Após a remoção, foi lançado um pequeno colchão de aterro granular sob o solo natural. No dia 03 de

setembro de 2014, foi realizado o tratamento da área escolhida para o tratamento com CPR *Grouting*, com a execução das verticais de bulbo de compressão do solo, com bombeamento de geogROUT. No dia 20 de agosto de 2014, iniciou-se a instalação dos instrumentos para monitorar o desenvolvimento dos deslocamentos verticais, horizontais e poropressão no aterro sem tratamento. No aterro com CPR *Grouting*, a instalação começou em 03 de setembro de 2014.

Como apresentado na Figura 7, na região escolhida para construção dos aterros experimentais, os geodrenos foram instalados com espaçamento 1,5 m x 1,5 m e no aterro com tratamento utilizando a técnica CPR *Grouting*, as colunas de compressão foram instaladas com uma malha quadrada com espaçamento entre as colunas de 3 m x 3 m, sendo o seu diâmetro igual a 1,20m. Para este caso, admite-se que o mecanismo de drenagem ocorra preferencialmente radial até profundidade limite de instalação dos geodrenos.

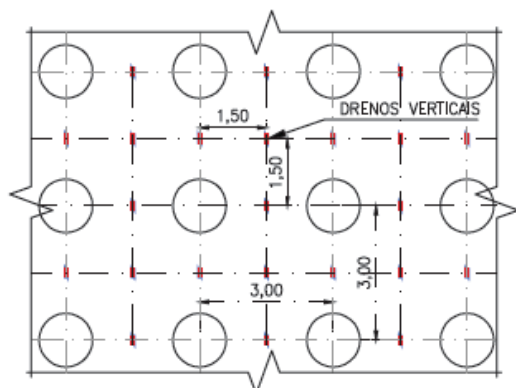


Figura 7. Detalhe da malha de geodrenos e de colunas

4 INSTRUMENTAÇÃO DE CAMPO

A instrumentação de campo tem como objetivo monitorar o comportamento do solo ao longo de tempo, de modo a verificar se as premissas adotadas em projeto são representativas.

Para o monitoramento dos aterros experimentais, foram utilizados os seguintes instrumentos:

- Piezômetros, para monitoramento das poropressões;
- Placas de recalque, aranhas magnéticas e perfilômetros, para monitoramento dos

recalques;

- Inclinômetros, para monitoramento dos deslocamentos horizontais.

Cabe ressaltar que, no presente trabalho, serão discutidos apenas os resultados de deslocamentos verticais (recalques).

As Figuras 8 e 9 apresentam as plantas de locação dos instrumentos do aterro sem tratamento, e do aterro com CPR *Grouting*, respectivamente. Observa-se que, em cada um dos aterros experimentais, foram instalados 1 piezômetro (PZ), 1 inclinômetro, 1 perfilômetro, 3 placas de recalque (PR) e 1 aranha magnética vertical (AMV). Os aterros apresentam 2,0 m de altura, com taludes 1H:1V. A base do talude tem dimensões de 12 m x 12 m e o topo de 10 m x 10 m.

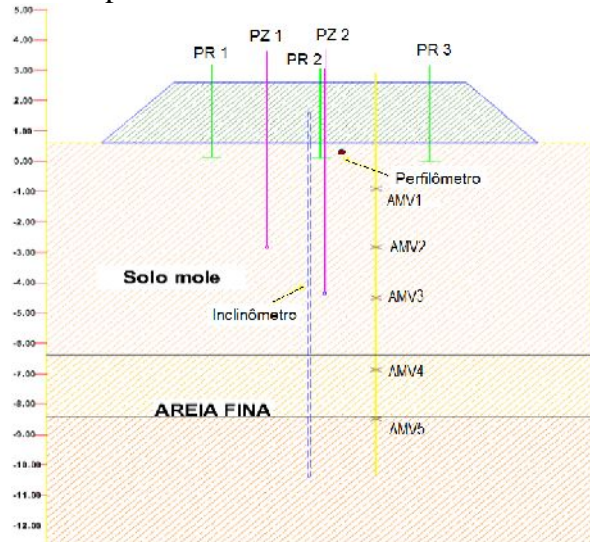


Figura 8. Locação da instrumentação do aterro experimental sem tratamento (Chavão, 2015)

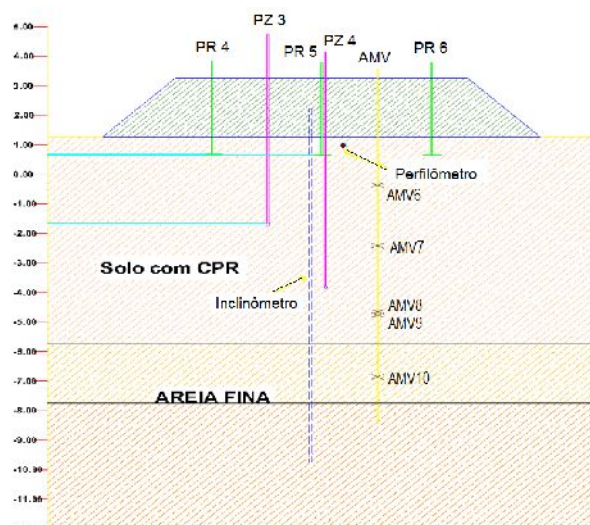


Figura 9. Locação da instrumentação do aterro experimental com CPR *Grouting* (Chavão, 2015)

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os deslocamentos verticais foram monitorados por três instrumentos de medição diferentes: placas de recalque, perfilômetros e aranhas magnéticas verticais.

O monitoramento das placas de recalques do aterro sem tratamento iniciou em 20 de agosto e finalizou em 15 de janeiro de 2015. Na última leitura realizada, com 148 dias de monitoramento, o deslocamento máximo registrado pela PR1 foi de 49,3 cm, pela PR2 foi de 49,7 cm e pela PR3 foi de 48,5 cm. A diferença entre os resultados registrados pelas placas foi de, no máximo, 1,2 cm, apresentando uma uniformidade das informações.

A elevação ou construção do aterro foi iniciada no dia 13 de setembro, 24 dias após o início do monitoramento e finalizada no dia 15 de setembro. Conforme apresentado na Figura 10, após a finalização da construção do aterro, as curvas de recalque vs tempo mudaram de comportamento, onde pode ser observado uma aceleração dos recalques com aumento na magnitude dos recalques em função do tempo.

Os resultados também mostram que as três curvas de recalque apresentam tendência à estabilização. Essa tendência foi comprovada pelo método de Asaoka, que estima os recalques finais a partir dos dados da instrumentação de campo. Pelo método de Asaoka, o recalque final previsto para as placas PR1, PR2 e PR3 foi de 51,2 cm, 52,2 cm e 50,3 cm, respectivamente. Os recalques finais mostraram-se próximos, com valor médio igual a 51,2 cm.

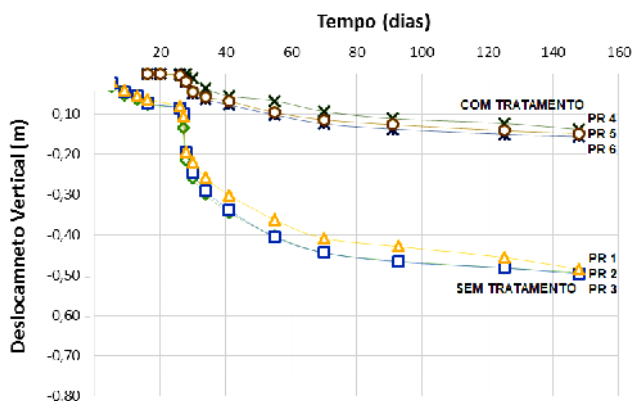


Figura 10. Resultados fornecidos pelas placas de recalque (Chavão, 2015)

No aterro com CPR *Grouting*, o monitoramento das placas de recalques iniciou em 05 de setembro e finalizou no dia 15 de janeiro de 2015, totalizando 132 dias de monitoramento. Na última leitura realizada, o deslocamento vertical máximo registrado pela PR4 foi de 14,6 cm, pela PR5 foi de 15,7 cm e pela PR6 foi de 14,9 cm. A maior diferença entre os resultados foi de 1,1 cm, indicando, mais uma vez, uniformidade nos resultados obtidos pelas placas. As curvas do aterro com CPR *Grouting* mostram que os recalques estão praticamente estabilizados, o que foi comprovado pelo método de Asaoka.

A Tabela 1 apresenta os recalques estimados pelo Método de Asaoka. Pode-se observar uma redução expressiva dos recalques no solo tratado com CPR *Grouting*.

Tabela 1. Recalques previstos pelo método de Asaoka

Aterro	Placa	Recalque final (cm)	Recalque final médio (cm)
Sem tratamento	PR1	51,2	51,2
	PR2	52,2	
	PR3	50,3	
Com tratamento	PR4	14,6	15,1
	PR5	15,7	
	PR6	14,9	

O monitoramento do perfilômetro instalado no aterro sem tratamento ocorreu no período de 22 de agosto de 2014 a 21 de novembro de 2014. Na última leitura realizada, o valor máximo do recalque foi de 46,3 cm no ponto de monitoramento próximo ao centro do aterro, com valores mínimos de recalque próximo aos pontos de monitoramento situados no “pé” do aterro, como mostra a Figura 11.

No aterro com CPR *Grouting*, o monitoramento ocorreu entre 15 de setembro de e 23 de dezembro de 2014. O valor de deslocamento vertical máximo foi de 16,8 cm, na última leitura, próximo ao “pé” ao aterro, do seu lado direito, como indica a Figura 11.

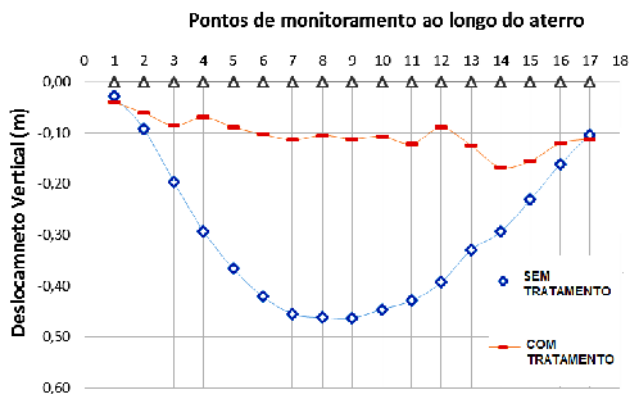


Figura 11. Resultados fornecidos pelos perfilômetros (Chavão, 2015)

É interessante observar que as formas das curvas obtidas nos aterros com tratamento e sem tratamento são distintas. Enquanto o aterro sem tratamento apresenta um recalque máximo no centro e mínimo nos bordos, no aterro com tratamento, os recalques oscilaram ao longo da base do aterro. Mais uma vez, observa-se a eficiência da técnica, com uma redução expressiva dos recalques pós-tratamento.

As aranhas magnéticas foram monitoradas no período de 10 de setembro de 2014 a 15 de janeiro de 2015, para o aterro sem tratamento, e de 12 de setembro de 2014 a 15 de janeiro de 2015, para o aterro com CPR *Grouting*. A Figura 12 apresenta as curvas fornecidas pela AMV1 e pela AMV6, pois foram as únicas que apresentaram deslocamentos verticais significativos. As demais aranhas magnéticas forneceram deslocamentos verticais próximos a zero.

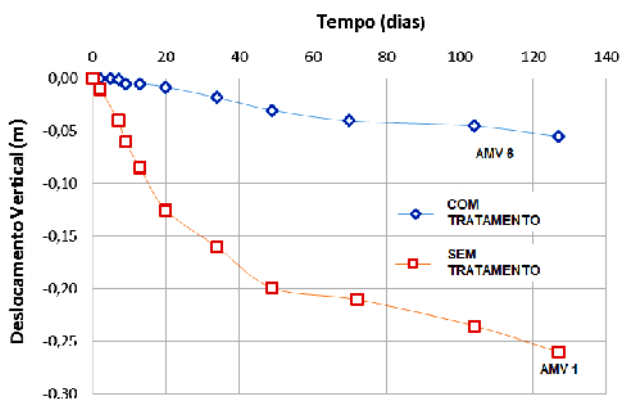


Figura 12 – Resultados fornecidos pelas Aranhas Magnéticas Verticais (Chavão, 2015)

No aterro sem tratamento, a aranha magnética AMV1, instalada na cota -0,9 m,

forneceu um deslocamento vertical de 26 cm. No aterro com CPR *Grouting*, a aranha magnética AMV6, instalada na cota -0,6 m, forneceu 5,5 cm de deslocamento vertical. O aterro sem tratamento foi assentado na cota +0,6 m e no aterro com CPR *Grouting* na cota +1,25 m. As diferenças de espessuras de aterro sobre as aranhas magnéticas impedem a comparação direta dos resultados.

A Tabela 2 compara os resultados fornecidos pelos diferentes medidores de deslocamentos verticais, na data da última leitura. Observa-se uma compatibilização entre os valores fornecidos pelos perfilômetros e pelas placas de recalque. A discrepância entre as leituras das aranhas magnéticas com os demais instrumentos pode ser atribuída ao fato de terem sido registrados deslocamentos horizontais significativos nas aranhas AMV1 e AMV6, localizadas próximo à cota de assentamento dos aterros.

Tabela 2. Comparação dos resultados dos instrumentos de medição de recalques (Chavão, 2015)

Aterro	Placa de Recalque (cm)			AMV (cm)	Perf. (cm)
Sem tratamento	PR 1	PR 2	PR 3	AMV 1	P9
	49,3	49,7	48,5	26	46,3
Com tratamento	PR 4	PR 5	PR 6	AMV 6	P14
	14,6	15,7	14,9	5,5	16,8

Legenda: PR = placa de recalque; AMV = aranha magnética vertical; Perf = perfilômetro; P9 = posição 9

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho analisou o comportamento de dois aterros experimentais a partir de resultados de instrumentação geotécnica. Os aterros foram implementados em área de construção residencial, localizada no Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro – RJ. Um dos aterros foi executado sobre solo mole com geodrenos, e o outro sobre solo tratado com a técnica de consolidação profunda radial (CPR *Grouting*).

Os resultados da instrumentação de campo mostraram-se consistentes. As placas de recalque indicaram deslocamentos verticais compatíveis com os medidos pelos perfilômetros. As aranhas magnéticas verticais forneceram recalques inferiores.

Os resultados permitiram avaliar a eficiência da técnica de consolidação profunda radial CPR *Grouting* na minimização e na aceleração dos recalques.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a empresa Engegraut, pelo apoio ao projeto de pesquisa, representado pela execução dos aterros experimentais e a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Almeida, M. S. S. e Riccio, M. Ground improvement of extremely soft soils in Rio de Janeiro. *International Conference on Ground Improvement and Ground Control* (ICGI 2012), University of Wollongong, Austrália, 2012.
- Cabral, S. (1979). Mapeamento Geológico-Geotécnico da Baixada de Jacarepaguá e Maciços Circunvizinhos. 1979. 160p. Tese Doutorado em Geologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Chavão, A. O. (2015). Avaliação da eficiência da técnica de consolidação profunda radial CPR *Grouting* no tratamento de solos compressíveis. *Dissertação de Mestrado*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 126p.
- Engegraut. Material publicitário, [obtido em julho de 2015].
- Geoinfra (2010). Aterro da Via Parque sobre solo mole. Projeto Executivo de Tratamento de Solo Mole. Documento interno nº GEO-235-10-001-RT. Geoinfra Engenharia e Consultoria Ltda. Rio de Janeiro.
- Geoinfra (2013). Pontal Oceânico - Implantação de infraestrutura de via pública. Projeto Executivo de Tratamento de Solo Mole. Documento interno nº GEO-510-13-005-RT. Geoinfra Engenharia e Consultoria Ltda. Rio de Janeiro.
- Maia, M. C. A. C. (1984). Evolução Holocênica da Planície Costeira de Jacarepaguá (RJ). In: *Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia*, Rio de Janeiro, p.105-118.
- Mello, M. A. A Consolidação Profunda Radial aplicada em solo compressível na Lagoa Rodrigo de Freitas/RJ. *Dissertação de Mestrado*. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2013
- Nogueira, E. G. (2010). Estudo de algumas soluções de tratamento de solos moles para construção de aterros no trecho sul do rodoanel – SP. *Dissertação de Mestrado*. Universidade de São Paulo.