

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA TÉCNICA DE CPR *GROUTING* NO ENRIJECIMENTO DE SOLOS COMPRESSÍVEIS

Assessing the efficiency of CPR Grouting for soft soil improvement

Amanda Ottolini Chavão*

Ana Cristina Castro Fontenla Sieira**

André Pereira Lima***

RESUMO – A técnica de CPR *Grouting* consiste no bombeamento de argamassa no interior da camada de solo mole sob elevadas pressões, com geodrenos colocados previamente entre as zonas a injectar. 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 o enrijecimento 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 enrijecido, uma diminuição dos deslocamentos horizontais, e uma aceleração expressiva dos recalques.

SYNOPSIS – The CPR Grouting technique consists in pumping grout inside a soft soil layer under high pressure, with geodrains placed beforehand between the injection points. The treatment results in the decrease of void ratio of the compressible layer and increase in strength. The consequence is a significant reduction in settlements. This paper aims to compare the behavior of two experimental and instrumented embankments. In the first embankment, the CPR Grouting technique was adopted for the treatment of soft soil. The second embankment was executed on a soft soil layer with geodrains. The embankments were implemented in the construction area of Recreio dos Bandeirantes, Rio de Janeiro. In this region, the soft soil thicknesses are of the order of 8 m. The results show a significant reduction in settlements on the treated soil, a decrease of the horizontal displacements and a significant acceleration of settlements with the installation of geodrains.

Palavras Chave – Solo compressível, recalques por adensamento, CPR Grouting.

Keywords – Soft soil, settlements due to densification, CPR Grouting.

* Mestre em Geotecnia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. E-mail: amandaottolini@gmail.com

** Professora Associada, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. E-mail: sieira@eng.uerj.br

*** Professor Titular, Universidade Veiga de Almeida. E-mail: andre.pereira@uva.br

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Generalidades

A falta de espaço para construção de novos empreendimentos nos grandes centros, associada ao crescimento do setor da construção civil, incentivou 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.

O CPR *Grouting* é uma técnica de enrijecimento 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 verticais de bulbos de pressão, que comprimem o solo lateralmente, causando elevados deslocamentos no entorno do bulbo. As verticais de compressão são formadas 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 da vertical 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.

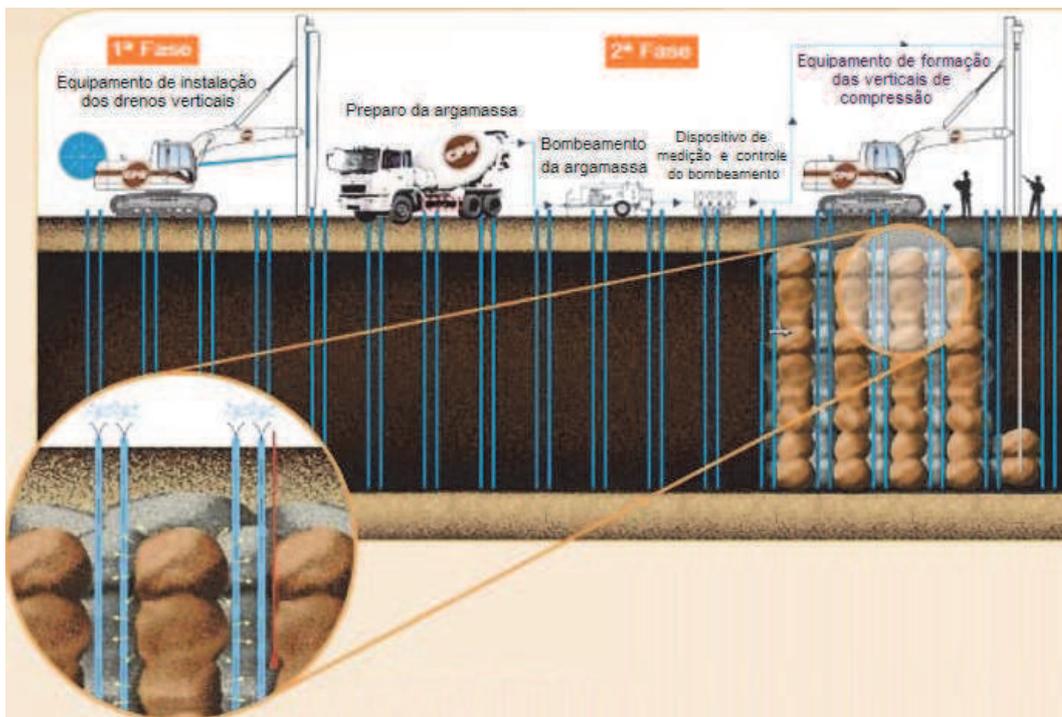


Fig. 1 – Fases de Execução do CPR *Grouting* (Chavão, 2015)

Com o acréscimo de tensão no solo gerado pelas verticais 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.

1.2 – Casos de aplicação da técnica de CPR Grouting

No Parque do Cantagalo, na Lagoa Rodrigo de Freitas, Rio de Janeiro, o enrijecimento 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 enrijecimento de espessa camada de argila mole, a qual atinge até 30 m de espessura. A execução dos bulbos para a formação das verticais começou, em geral, entre 9 m e 10 m de profundidade e terminou entre 2 m e 4 m abaixo do nível do terreno. Os geodrenos foram cravados até à profundidade de 15 m. A configuração básica da malha consistiu em uma distribuição triangular de geodrenos e verticais de compressão de CPR *Grouting*. O espaçamento entre os geodrenos foi de 1,80 m e as verticais foram dispostas nos vértices de um triângulo de lado igual a 6 m.

Para avaliar o comportamento mecânico da técnica, 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 verticais de argamassa, onde se verificou que o material das verticais 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 3.700 m². Para verificação da eficiência da solução, foram executados ensaios de resistência no solo, do tipo SPT (Sondagem a Percussão) e Palheta, antes e após o tratamento com CPR *Grouting*. Os resultados dos ensaios de Palheta 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 verticais 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.

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 3,50 m a 11,00 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 CPR *Grouting* em toda a extensão do trecho (Geoinfra, 2013).

No trecho do Via Parque, 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 (Fig. 2). A região de implantação da Via Parque apresenta uma camada de aterro com compactação não-controlada e espessuras

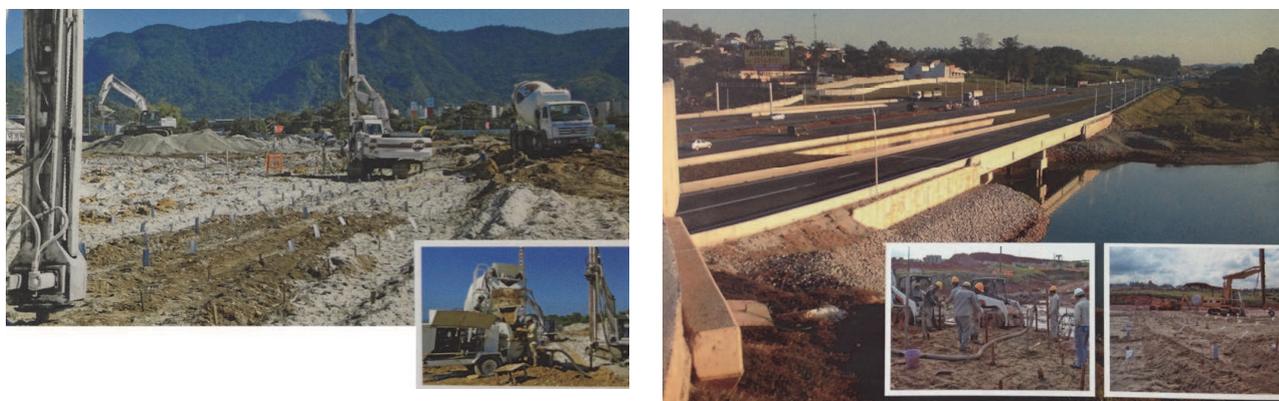
variáveis, com trechos variando de 0,5 m até aproximadamente 7,0 m. Esta camada está assente sobre espessa camada de argila muito mole saturada (N_{SPT} com 0 e 1 golpes) com trechos com 4,0 m de espessura até trechos com 14,0 m. Estudos com soluções de aterro de sobrecarga, utilização de geogrelhas 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.

A Figura 3 apresenta imagens de obras que foram viabilizadas com a referida técnica. Chavão (2015) reúne as principais obras executadas no Brasil com a técnica de CPR *Grouting* (Quadro 1).

O presente trabalho tem o objetivo de comparar o comportamento de dois aterros experimentais executados sobre solo mole. Um dos aterros foi executado sobre uma camada de solo mole enrijecida com a técnica de CPR *Grouting* e o outro foi executado sobre uma camada de solo mole com geodrenos.



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



(a) Parque “Rock in Rio”

(b) Rodoanel Sul - Lote 3

Fig. 3 – Obras viabilizadas com a técnica CPR *Grouting*. Fonte: Engegraut (2015)

Quadro 1 – Obras executadas com a técnica de CPR *Grouting* (Chavão, 2015)

Obra	Local	Período de execução		Área Tratada (m ²)	Camada de solo mole (m)
		Início	Término		
Tratamento de solo para receber a ferrovia VLI dentro do Porto de Itaqui/MA	São Luís/MA	Ago/14	Mar/15	45.000	11
Tratamento de solos de fundação para receber a elevatória da ETE Rio das Pedras	Rio de Janeiro/RJ	Jun/14	Out/14	1.524	10
Reforço do solos de fundação para a construção da fábrica da BMW	Araquari/SC	Fev/14	Mai/14	40.504	18
Reforço de solo de fundação na obra Palm, Recreio dos Bandeirantes	Rio de Janeiro	Fev/14	Jul/14	17.593	20
Tratamento do solos para assentamento das bases da adutora de água do sistema ITALUÍS, em Campos de Perizes	Perizes, São Luís/MA	Nov/13	Fez/14	38.845	6
Duplicação da BR-135 sentido Bacabeira	São Luís/MA	Jun/13	Out/13	17.600	9
Reforço do solos para assentamento da cisterna do Barra Shopping	Rio de Janeiro/RJ	Mar/13	Abr/13	1000	8
Reforço do solos de fundação no Estaleiro Renave	Niterói/RJ	Fev/13	Mar/13	180	2
Sistema de Esgotamento Sanitário de São Luís	Vinhais/MA	Jan/13	Jul/13	142.104	-
Reforço do solos de fundação na área portuária de Manaus/AM	Manaus/AM	Nov/11	Até hoje	200.000	20
Tratamento de solos de fundação para instalação de 3 vias junto à Rodovia Anhanguera, SP-330, SP	Campinas/SP	Out/12	Fev/13	6.528	16
Reforço para a implantação da Avenida Via Parque na Barra da Tijuca, junto ao Village Mall	Rio de Janeiro/RJ	Ago/12	Set/12	1.000	14
Reforço de solo de fundação no depósito da Gerdau	Muribeca/PE	Fev/12	Ago/12	14.000	22
Melhoria e monitoramento na Av. Ayrton Senna, 4.701, Barra da Tijuca	Rio de Janeiro/RJ	Jan/12	Jun/12	6.000	-
Melhoria no trecho da calçada da pista existente da Av. Ayrton Senna, para obra da Linha Amarela, Lote V, Trechos I e II	Barra da Tijuca, Rio de Janeiro/RJ	Dez/11	Fev/12	3.000	19
Obra de implantação da Transoeste/Grota Funda – Corredor exclusivo de BRT entre a Barra da Tijuca e Santa Cruz, Lote 03	Guaratiba/RJ	Dez/11	Fev/12	7.000	16
Viabilização de execução do viaduto interno, acesso às docas, envelopamento da rede coletora de esgoto da CEDAE e viaduto da Via Park, localizados nos fundos do Shopping Village Mall	Barra da Tijuca, Rio de Janeiro/RJ	Dez/11	Jan/12	2.510	16
Viabilização da área do Aterro II (Pátio IV) no Complexo Portuário – Porto Chibatão Manaus/AM	Manaus/AM	Nov/11	-	20.640	25

Continuação do Quadro 1 – Obras executadas com a técnica de CPR *Grouting* (Chavão, 2015)

Obra	Local	Período de execução		Área Tratada (m ²)	Camada de solo mole (m)
Estabilização e monitoramento do solo mole orgânico na PE-051, Trecho Porto de Galinhas/Serrambi	Ipojuca/PE	Nov/11	–	13.500	14
Serviços de estabilização de solo de fundação no Parque do Cantagalo	Rio de Janeiro/RJ	Set/11	Jan/12	14.000	13
Tratamento de argila extremamente mole no Parque dos Atletas	Rio de Janeiro/RJ	Mar/11	Mai/11	16.000	8
CPR Grouting no Condomínio Armazenna 2B, no Lote 11 Gleba 2 para uma sobrecarga de utilização de 0,65kg/cm ² no piso de concreto	Pina, Recife/PE	Abr/11	Jun/11	7.500	11
Obras de implantação do Parque Olímpico, Cidade do Rock (Rock in Rio), no Recreio dos Bandeirantes	Rio de Janeiro/RJ	Mar/11	Mai/11	18.000	14
Rodovia BR-101 Sul, Comporta	Jaboatão dos Guararapes/PE	Nov/10	Jan/11	7.500	10
Condomínio Jardins de Monet, Recreio dos Bandeirantes	Rio de Janeiro/RJ	Out/10	Nov/10	650	6
Base do Tanque TQ 631-303	Suape, Ipojuca/PE	Set/10	Nov/10	880	11
Duplicação da BR-101, Lote 02	Goianinha/RN	Abr/10	Jun/10	–	4
Base do Tanque TQ 631-304, Petrobrás Transportes S.A. – TRANSPETRO	Suape, Ipojuca/PE	Mar/10	Mai/10	880	10
Área interna e externa para galpão da GERDAU, Muribeca	Jaboatão dos Guararapes/ PE	Mar/10	Jun/10	1.440	12
Ponte dos Carvalhos	Cabo de Santo Agostinho/PE	Fev/10	Mai/10	5.500	7,5
Estabilização e correção dos segmentos em concreto armado da passagem de gado e águas, além do próprio pavimento da Rodovia Raposo Tavares	Regente Feijó/SP	Jan/10	Fev/10	133	8
ETE Bacanga	São Luís/Maranhão	Jan/10	Mar/10	1.200	9
Estabilização e correção dos segmentos em concreto armado da passagem de gado e águas, além do próprio pavimento da Rodovia Raposo Tavares	Regente Feijó/SP	Jan/10	Fev/10	133	8
Plataforma de descarregamento de minério do britador primário, Jacobina Mineração e Comércio Ltda	Jacobina/BA	Out/09	Dez/09	1.000	11
Serviços de CPR Grouting dentro da unidade industrial, American BANKNOTE S/A	Ipanema das Pedras – Sorocaba/SP	Set/09	Out/09	2.100	8

2 – DESCRIÇÃO DA OBRA

2.1 – Localização e Caracterização Geotécnica da Região

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 enrijecido com técnica de 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, Rio de Janeiro, conforme apresentado na Figura 4.



Fig. 4 – Localização do Condomínio Palms Recreio Residencial (*googlemaps*)

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 5. 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 compactidade 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 siltsos 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).



Fig. 5 – Baixada de Jacarepaguá e seus Maciços. Fonte: Google Earth, 2015

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 6 apresenta as isoespessuras de argila mole em toda extensão do empreendimento, definidas com base nas sondagens à percussão e a Figura 7 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 de água foi detectado na superfície do terreno.

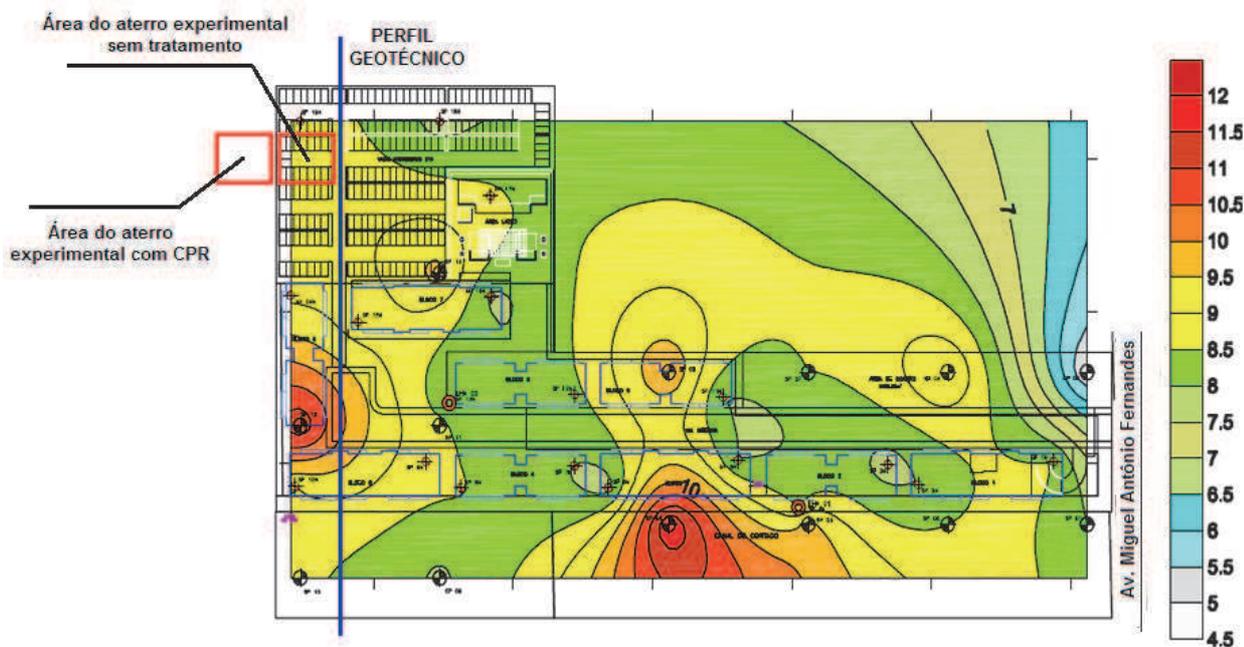


Fig. 6 – Curvas de isoespessura de argila mole

Para a determinação dos parâmetros geotécnicos da argila mole, foram executados ensaios de adensamento e ensaios pressiométricos, como mostra o Quadro 2. Observa-se que os ensaios pressiométricos foram executados para as condições pré e pós enrijecimento com CPR *Grouting*, de forma a avaliar o efeito do tratamento nos parâmetros geotécnicos.

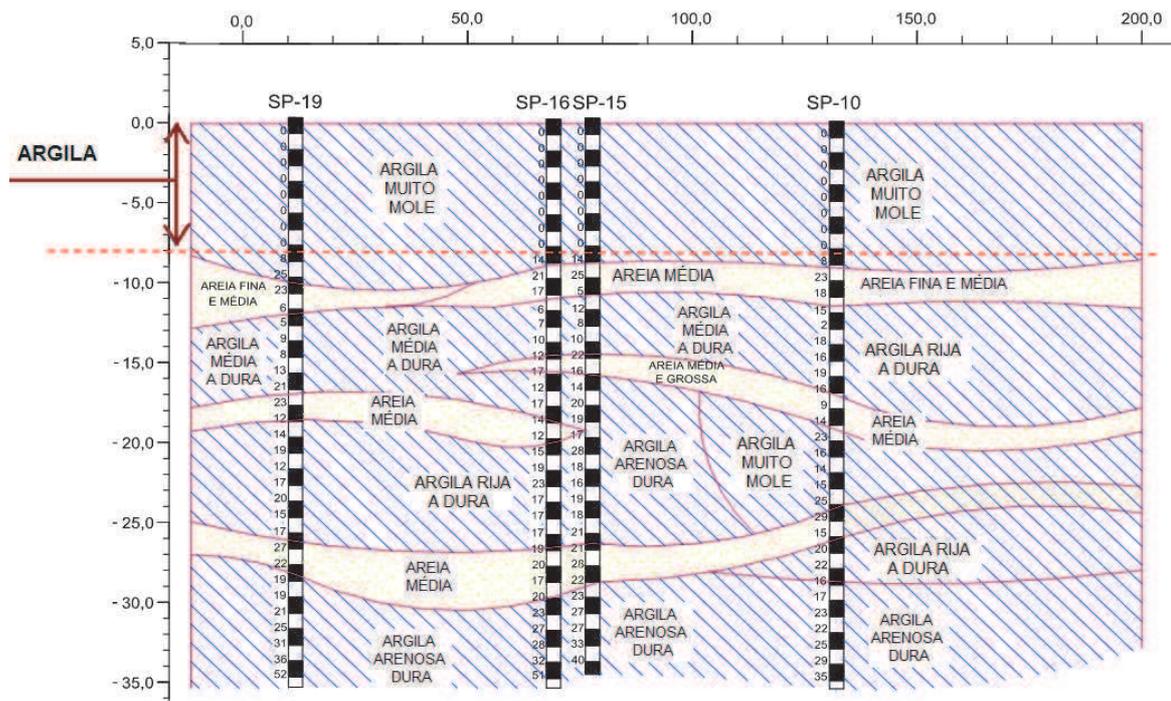


Fig. 7 – Perfil geológico geotécnico: área dos aterros experimentais

Quadro 2 – Características dos ensaios de adensamento e pressiométricos

Tipo de Ensaio	Denominação	Profundidade (m)	Condição
Adensamento	01	1,0 a 1,5	Pré-CPR <i>Grouting</i>
	02	3,0 a 3,5	
	03	5,0 a 5,5	
	04	7,0 a 7,5	
Pressiométrico	PMT-BL1	3,0	Pré-CPR <i>Grouting</i>
		5,0	
		8,0	
	PMT-BL2	5,0	
		8,0	
	PMT-BL3	3,0	
		5,0	
		8,0	
	PMT-BL1	3,0	
5,0			
PMT-BL2	3,0		
	5,0		
PMT-BL3	5,0		
	8,0		

O Quadro 3 apresenta os resultados dos ensaios pressiométricos, nos quais se observa que a argila existente na área, nas profundidades indicadas, apresenta consistência mole, com módulos pressiométricos entre 152 kPa e 1726 kPa. Após o enrijecimento, os ensaios indicaram uma maior homogeneização do solo, e uma consistência média a rija, com módulos pressiométricos entre 2628 kPa e 5799 kPa. Gondariz (2016) simulou o comportamento do aterro experimental sobre

solo enrijecido e definiu numericamente um valor de módulo de deformabilidade igual a 6000 kPa, constante ao longo da profundidade, como representativo do solo mole com CPR *Grouting*.

As Figuras 8 a 11 apresentam os gráficos de índice de vazios (e) vs tensão efetiva (σ'_v), e coeficiente de adensamento (c_v) vs tensão efetiva (σ'_v), obtidos a partir dos ensaios oedométricos. Pode-se observar o elevado valor de índice de vazios inicial da amostra 01 (Figura 8), coletada na profundidade de 1,0 a 1,5 m. Esse resultado inesperado ressaltou a importância de se fazer uma avaliação da qualidade das amostras, de forma a garantir a confiabilidade nos parâmetros obtidos a partir dos ensaios de adensamento.

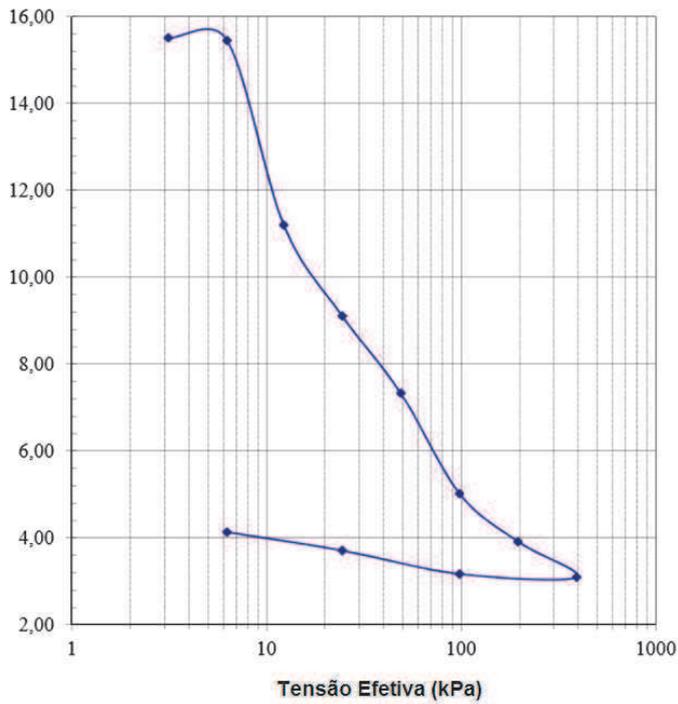
Quadro 3 – Resultados dos ensaios pressiométricos

Ensaio	Prof. (m)	Condição	E_m (kPa)	P_L (kPa)	P_L^* (kPa)	Consistência (Briaud, 1992)
PMT-BL1	3,0	Pré-CPR	152,0	130,0	94,0	mole
	5,0		399,0	72,0	16,0	mole
	8,0		1.633,0	274,0	188,0	mole
PMT-BL2	5,0		529,0	124,0	68,0	mole
	8,0		399,0	87,0	56,0	mole
PMT-BL3	5,0		1.726,0	248,0	162,0	mole
	8,0	2628,0	433,0	397,0	média	
PMT-BL1	3,0	Pós-CPR	3432,0	453,0	397,0	média
	5,0		3308,0	457,0	372,0	média
	8,0		5731,0	645,0	608,0	rija
PMT-BL2	3,0		5799,0	741,0	686,0	rija
	5,0		2939,0	432,0	376,0	média
PMT-BL3	5,0		3496,0	438,0	353,0	média
	8,0					

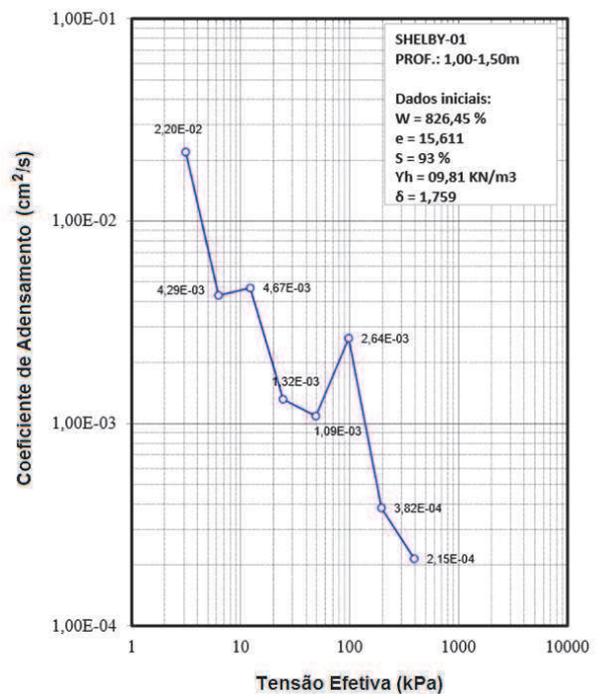
Quadro 4 – Qualidade das amostras coletadas na região dos aterros (Chavão, 2015)

Amostra	Prof. de coleta (m)	OCR	e_0	$\Delta e/e_0$	Qualidade das Amostras		
					Lunne et al. (1997)	Coutinho et al. (2001)	Oliveira (2002)
1	1 – 1,5	6,00	15,6	-	-	-	-
2	3 – 3,5	2,63	3,64	0,030	Excelente – Muito boa	Excelente – Muito boa	Excelente – Muito boa
3	5 – 5,5	1,43	3,26	0,014	Excelente – Muito boa	Excelente – Muito boa	Excelente – Muito boa
4	7 – 7,5	1,15	2,76	0,057	Regular - Pobre	Regular	Boa - Regular

Chavão (2015) classificou a qualidade das amostras utilizadas nos ensaios de adensamento, a partir das propostas de Lunne et al. (1997), Coutinho et al. (2001) e Oliveira (2002), conforme o Quadro 4. Segundo a autora, a qualidade da amostra 1 não pôde ser definida pois não foi possível obter o valor do índice de vazios correspondente à tensão efetiva de campo. O gráfico índice de vazios (e) vs tensão efetiva (σ'_v) obtido pelo ensaio de adensamento inicia-se com uma tensão efetiva maior do que a tensão efetiva de campo. A qualidade das amostras 2 e 3 foram classificadas como excelente a muito boa, e a amostra 4 foi classificada como regular.

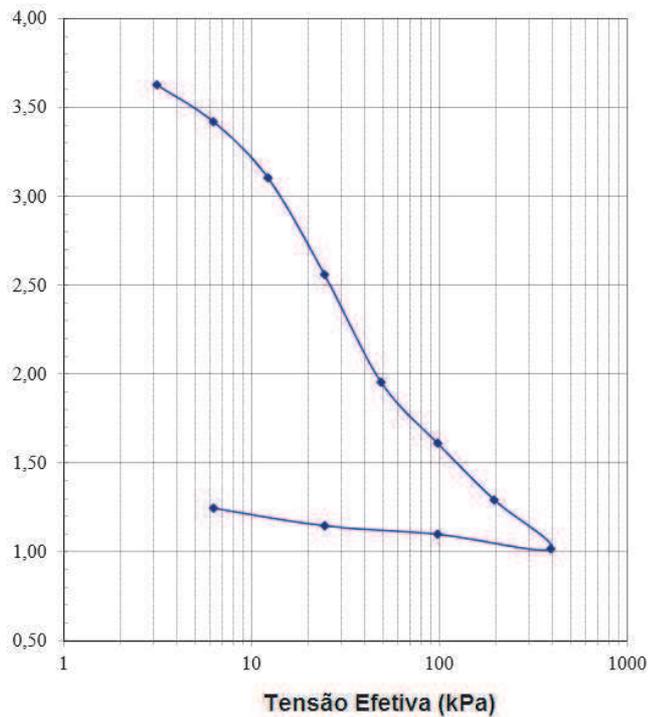


(a) Índice de vazios x tensão efetiva

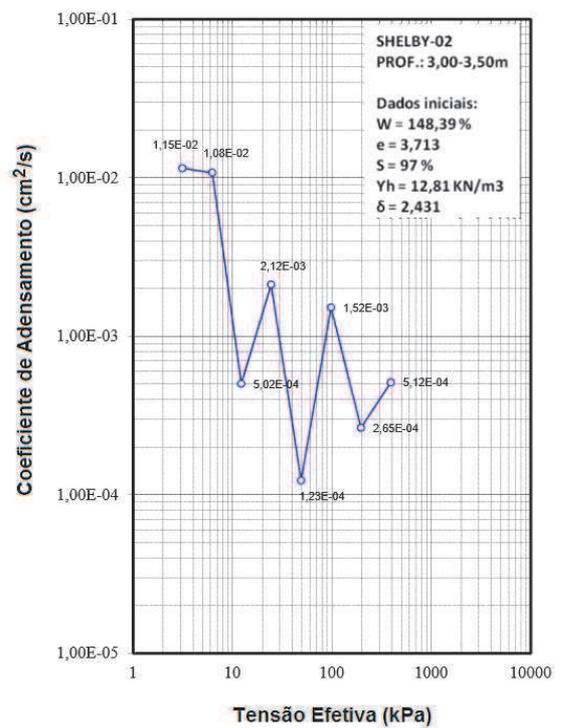


(b) Coeficiente de adensamento vertical x tensão efetiva

Fig. 8. Resultados dos Ensaio de Adensamento: Amostra 01

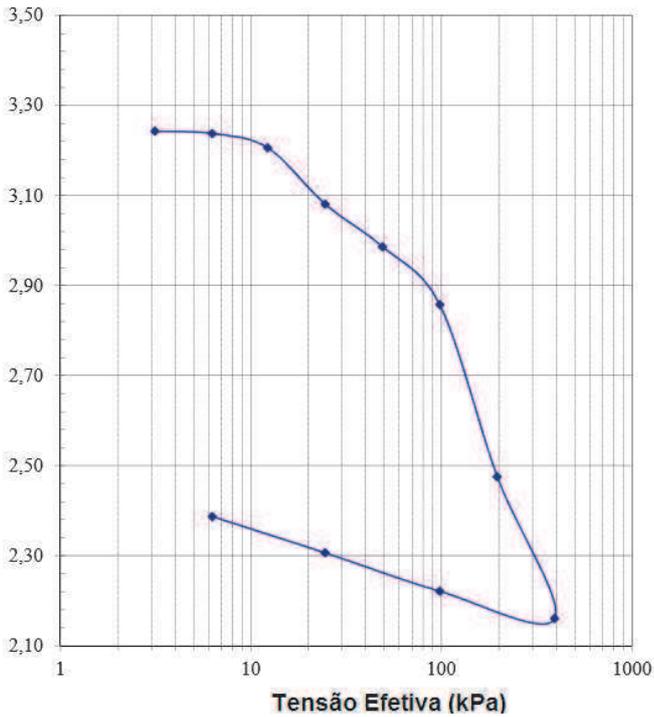


(a) Índice de vazios x tensão efetiva

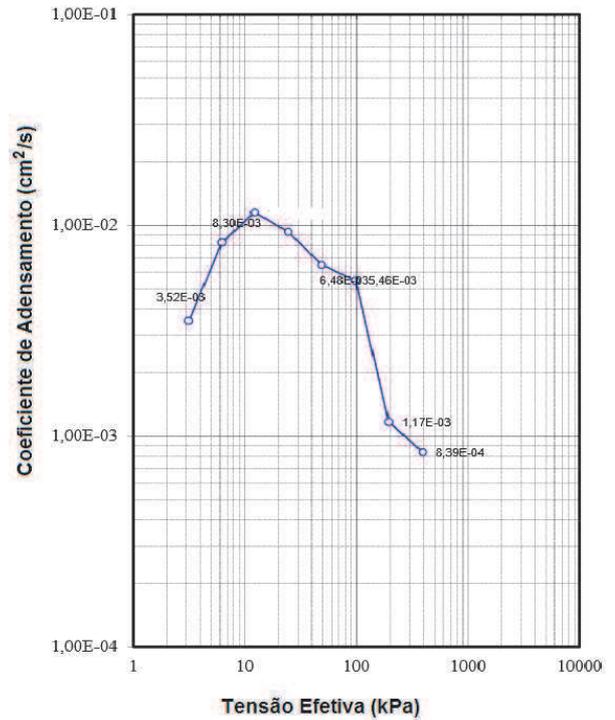


(b) Coeficiente de adensamento vertical x tensão efetiva

Fig. 9. Resultados dos Ensaio de Adensamento: Amostra 02

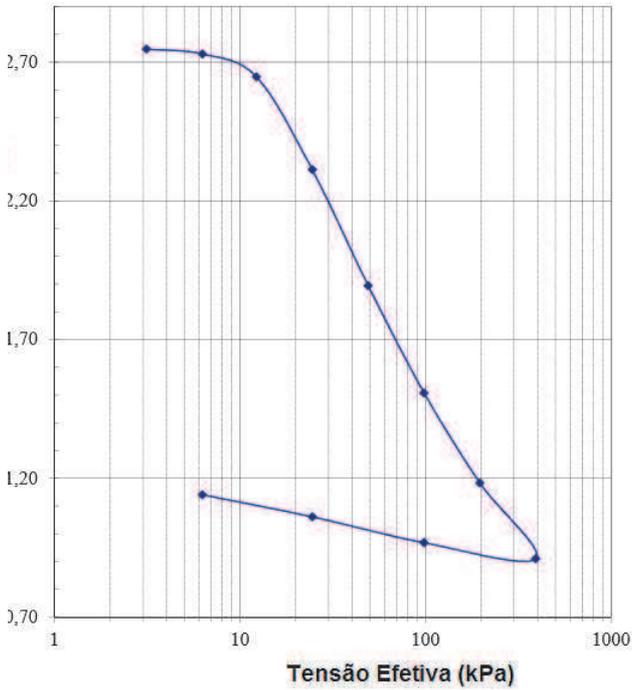


(a) Índice de vazios x tensão efetiva

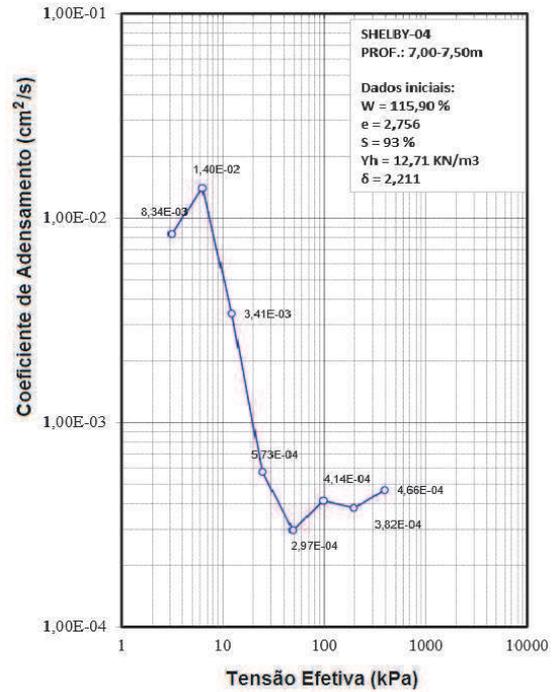


(b) Coeficiente de adensamento vertical x tensão efetiva

Fig. 10. Resultados dos Ensaios de Adensamento: Amostra 03



(a) Índice de vazios x tensão efetiva



(b) Coeficiente de adensamento vertical x tensão efetiva

Fig. 11. Resultados dos Ensaios de Adensamento: Amostra 04

2.2 – Execução dos 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 sobre o solo natural. No dia 3 de setembro de 2014, foi realizado o tratamento da área escolhida 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 poropressões no aterro sem tratamento. No aterro com CPR *Grouting*, a instalação começou em 3 de setembro de 2014. O Quadro 5 resume o histórico de execução dos aterros experimentais.

Quadro 5 – Histórico de execução dos aterros

Data	Etapa
14/08/2014	Demarcação das áreas
18/08/2014	Finalização da cravação dos drenos
20/08/2014	Instalação dos instrumentos na área sem tratamento
03/09/2014	Enrijecimento do solo com CPR <i>Grouting</i> e instalação dos instrumentos
13/09/2014 a 15/09/2014	Execução do aterro na área sem CPR <i>Grouting</i>
16/09/2014 a 19/09/2014	Execução do aterro na área com CPR <i>Grouting</i>

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 verticais de compressão foram instaladas com uma malha quadrada com espaçamento entre as colunas de 3,0 m x 3,0 m, sendo o seu diâmetro igual a 1,2 m. Para este caso, admite-se que o mecanismo de drenagem ocorra preferencialmente radial até a profundidade limite de instalação dos geodrenos.

3 – 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. Segundo Almeida e Marques (2010), os objetivos da instrumentação geotécnica são: (a) verificar as premissas de projeto; (b) auxiliar o planejamento da obra, principalmente no que concerne à sua segurança nas fases de carregamentos e descarregamentos; e (c) garantir a integridade de obras vizinhas.

O monitoramento com instrumentação de campo pode ser realizado após a construção, ou no decorrer da obra. É importante que este acompanhamento seja feito por um profissional de Geotecnia, para que a segurança da obra seja avaliada, bem como os parâmetros adotados em projeto. Caso haja alguma divergência, as análises das informações obtidas pelos instrumentos possibilitam a adoção de medidas corretivas em tempo hábil.

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

- Piezômetros, para o monitoramento das poropressões;

- Placas de recalque, aranhas magnéticas e perfilômetros, para o acompanhamento dos recalques;
- Inclinômetros, para o monitoramento dos deslocamentos horizontais.

As Figuras 12 e 13 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. A Figura 14 ilustra o aterro teste finalizado, e com os instrumentos instalados.

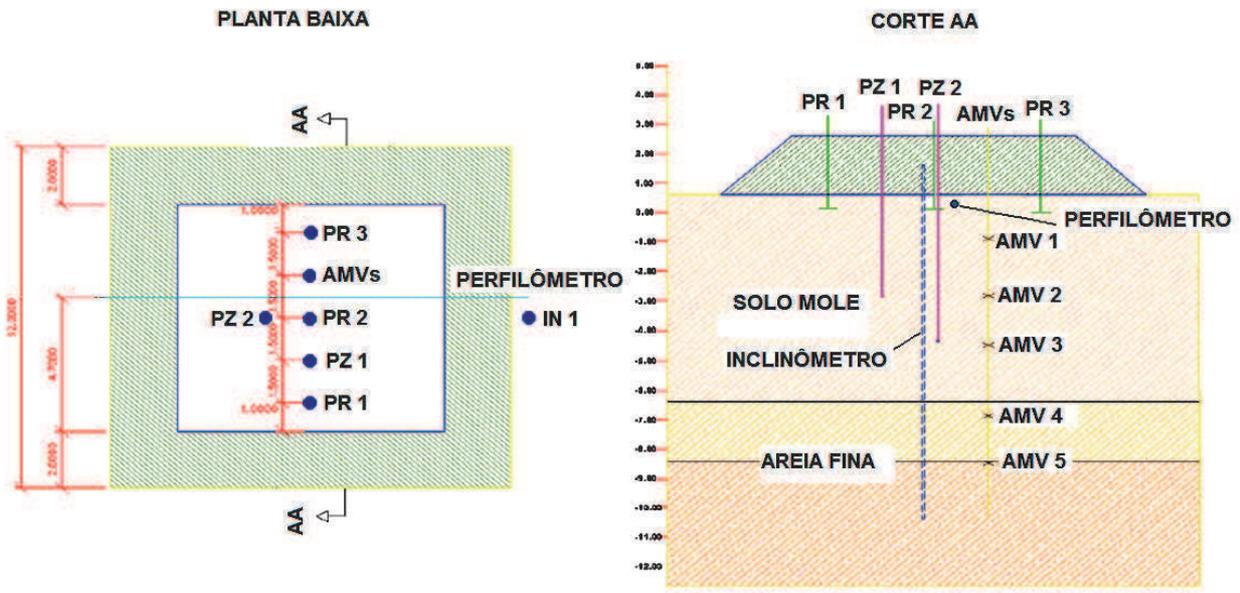


Fig. 12 - Locação da instrumentação do aterro experimental sem CPR *Grouting* (Chavão, 2015)

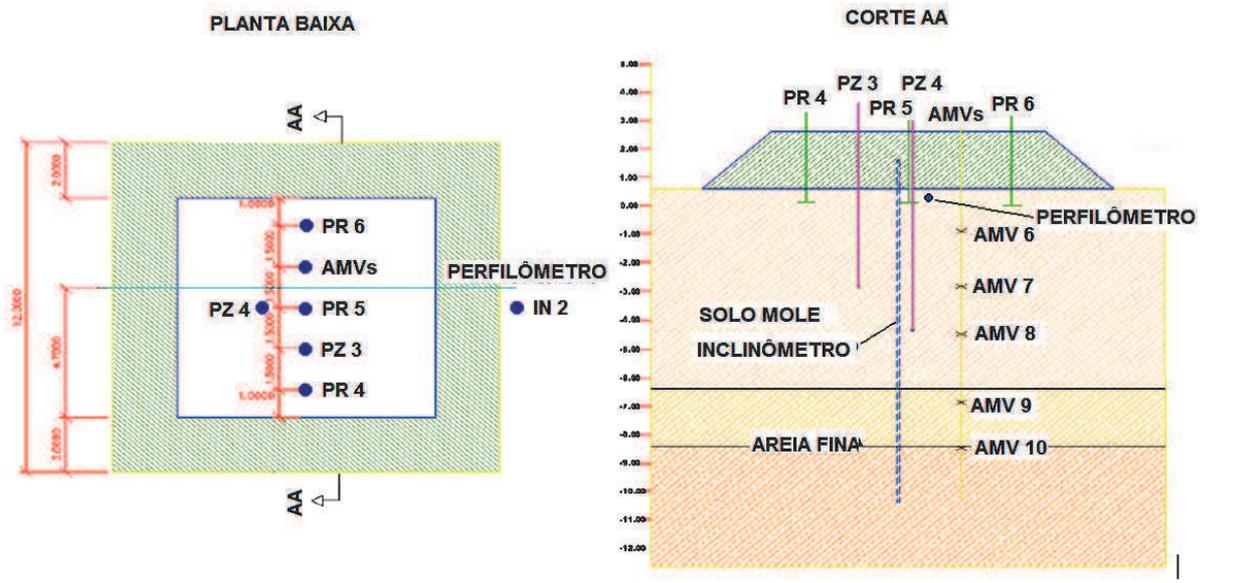


Fig. 13 - Locação da instrumentação do aterro experimental com CPR *Grouting* (Chavão, 2015)



Fig. 14. Aterro teste finalizado, com os instrumentos instalados

4 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 – Deslocamentos Verticais

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

A placa de recalque é um dos instrumentos mais utilizados para o monitoramento de aterros sobre solos moles. É um instrumento versátil, de simples execução e fácil instalação, utilizado para medição dos deslocamentos verticais do solo.

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 15, após a

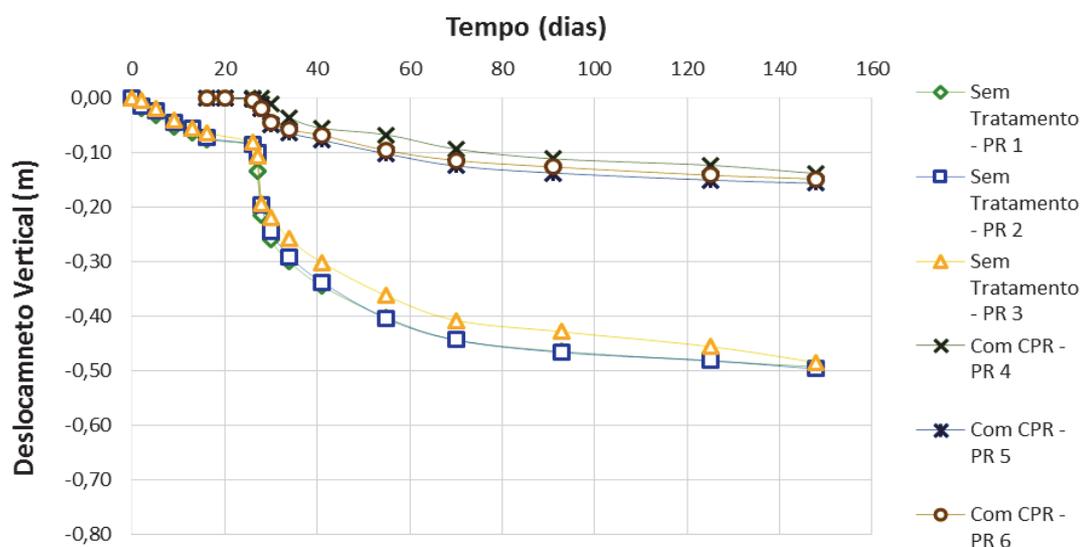


Fig. 15 - Resultados fornecidos pelas placas de recalque (Chavão, 2015)

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.

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 (Quadro 6).

Os perfilômetros são instrumentos de campo utilizados para monitorar os deslocamentos verticais ao longo da base de um aterro. Antes de iniciar o alteamento do aterro, primeiramente instala-se um tubo-guia, geralmente de PVC, onde é introduzindo um torpedo para realizar as medições dos deslocamentos verticais do tubo.

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 16.

Quadro 6 – Recalques previstos pelo método de Asaoka

Aterro	Placa	Recalque final (cm)	Recalque 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	

No aterro com CPR *Grouting*, o monitoramento ocorreu entre 15 de setembro 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 lado direito, como indica a Figura 16. Mais uma vez, observa-se uma redução expressiva (aproximadamente 64%) nos recalques pós-tratamento com CPR *Grouting*.

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.

Os extensômetros magnéticos ou aranhas magnéticas são instrumentos utilizados para medir os deslocamentos verticais ao longo da profundidade. Como são instalados em diversos pontos de uma vertical, possibilitam a obtenção de recalques específicos em diferentes camadas. 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 17 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.

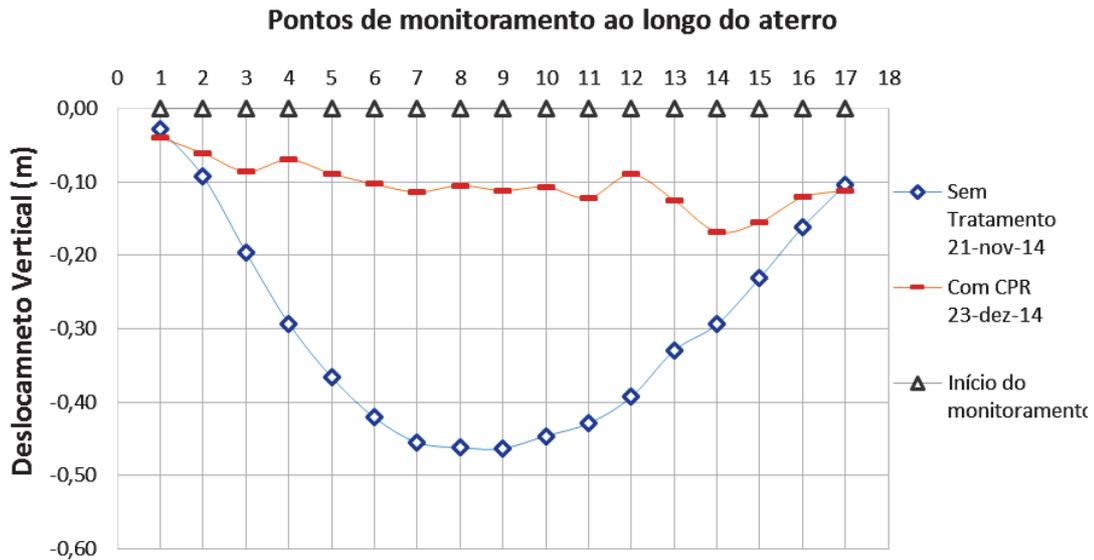


Fig. 16 - Resultados fornecidos pelos perfilômetros (Chavão, 2015)

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 o 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.

O Quadro 7 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.

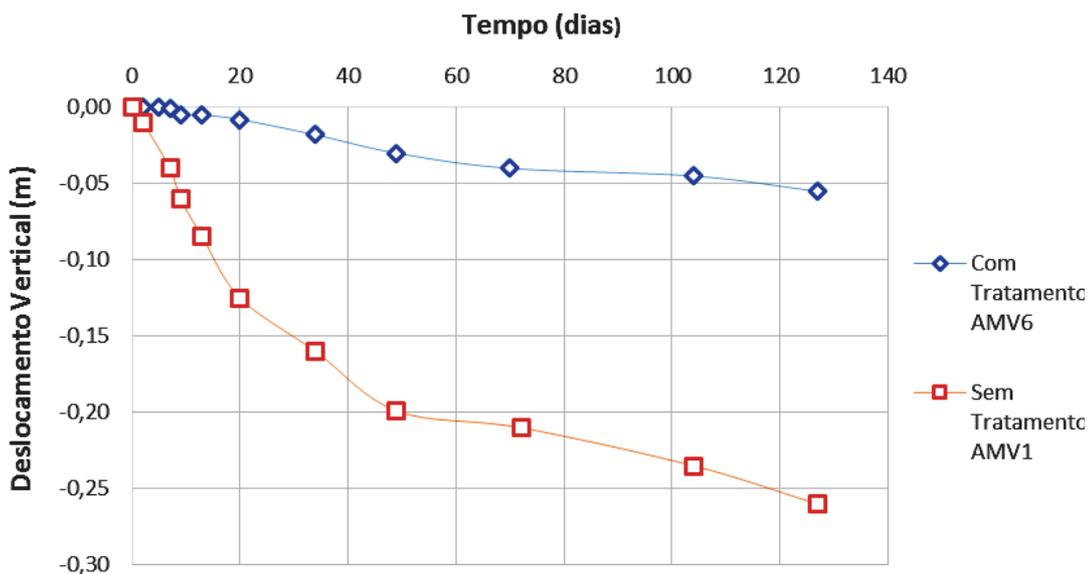


Fig. 17 - Resultados fornecidos pelas Aranhas Magnéticas Verticais (Chavão, 2015)

Quadro 7 – Comparação dos resultados dos instrumentos de medição de recalques (Chavão, 2015)

Aterro	Placa de Recalque (cm)			AMV (cm)	Perf. (cm)
	Sem CPR <i>Grouting</i>	PR 1	PR 2	PR 3	AMV 1
49,3		49,7	48,5	26	46,3
Com CPR <i>Grouting</i>	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

4.2 – Deslocamentos Horizontais

Os inclinômetros são instrumentos utilizados em campo para medir deslocamentos horizontais ao longo de uma vertical. A Figura 18 apresenta os deslocamentos horizontais fornecidos pelos inclinômetros instalados nos aterros sem CPR *Grouting* e com CPR *Grouting*. No aterro sem tratamento, o monitoramento ocorreu no período de 05 de setembro de 2014 a 19 de janeiro de 2015. Para o aterro com CPR *Grouting*, os deslocamentos horizontais foram monitorados de 12 de setembro de 2014 a 23 de dezembro de 2014. Pode-se observar que as curvas plotadas da direção A mostram que o maior deslocamento horizontal do aterro sem tratamento foi registrado no dia 14 de outubro de 2014, a 3,5 m de profundidade, com 12,3 cm de magnitude. A partir de 5,5 m de profundidade, os deslocamentos horizontais tendem a zero. Ressalta-se que a direção A é paralela ao perfilômetro, indicado na Figura 12.

No dia 29 de outubro de 2014, houve um grande lançamento de aterro muito próximo ao aterro experimental sem tratamento, com quase 7,0 m de altura (Figura 19). As leituras subsequentes obtidas pelo inclinômetro do aterro sem tratamento foram afetadas e a curva de deslocamento horizontal mudou de comportamento, e sentido, logo após esse lançamento. Na última leitura, em 19 de janeiro de 2015, o deslocamento horizontal parte com deslocamento máximo de -10,73 cm no último ponto de medição, a 1 m da superfície do aterro, regredindo ao longo da profundidade, chegando a aproximadamente zero a 4,0 m de profundidade.

Na direção B, o maior deslocamento horizontal do aterro sem tratamento foi registrado no dia 29 de outubro de 2014, e foi da ordem -6,05 cm. A partir desse ponto, o deslocamento regride chegando a aproximadamente zero a 5,0 m abaixo da cota de superfície do aterro. Devido ao grande lançamento de aterro muito próximo ao aterro experimental sem tratamento, a curva de deslocamento horizontal mudou de sentido, atingindo o valor máximo de 5,77 cm a 3,5 m abaixo da cota de superfície do aterro.

No aterro com CPR *Grouting*, na última leitura realizada em 23 de dezembro de 2014, o deslocamento horizontal máximo foi de 1,84 cm, a 1,0 m de profundidade, na direção A. Na direção B, os deslocamentos horizontais medidos foram nulos.

O Quadro 8 reúne os deslocamentos horizontais medidos pelos inclinômetros, nas diferentes direções. Na data da última leitura, o inclinômetro instalado no aterro sem tratamento forneceu um deslocamento de -10,73 cm, na direção A, devido a um grande acréscimo de tensão provocado por lançamento de aterro muito próximo ao aterro experimental sem tratamento (Figura 19). O aterro com CPR *Grouting* forneceu deslocamento máximo de 1,84 cm.

Na direção B, o último registro foi de 5,77 cm de deslocamento horizontal, no aterro sem tratamento, e de 0,23 cm no aterro tratado com consolidação profunda radial. Os resultados mostram uma redução significativa dos deslocamentos horizontais decorrente do tratamento com CPR *Grouting*.

Quadro 8 – Comparação entre os resultados fornecidos pelos inclinômetros

Aterro	Deslocamento Horizontal (cm)	
	Direção A	Direção B
Aterro sem CPR <i>Grouting</i> - Antes do lançamento do aterro	12,30	-6,05
Aterro sem CPR <i>Grouting</i> - Última leitura	-10,73	5,77
Aterro com CPR <i>Grouting</i>	1,84	0,23

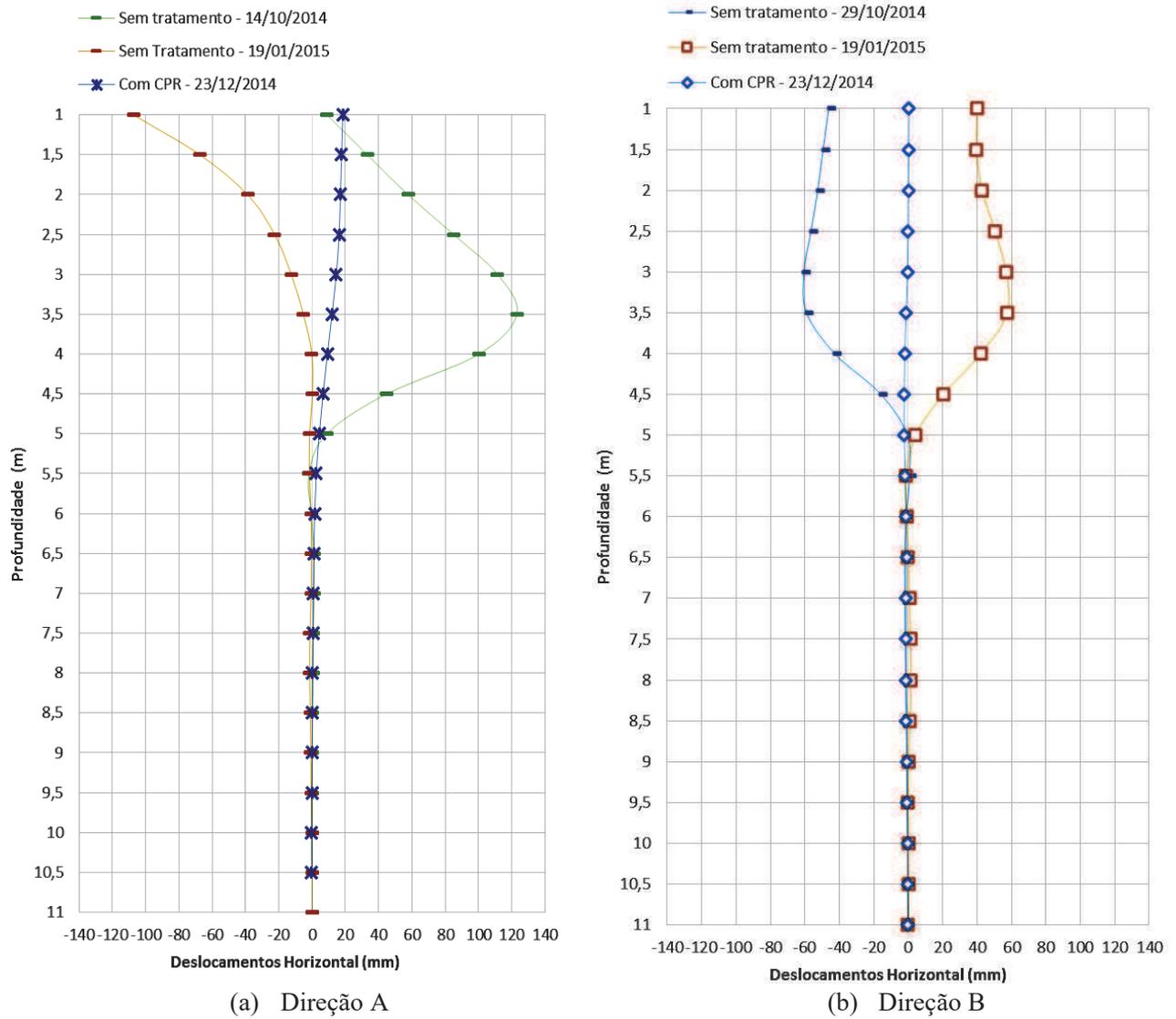


Fig. 18 - Resultados fornecidos pelos inclinômetros



Fig. 19 – Material de descarte depositado próximo ao aterro teste sem tratamento

4.3 – Poropressões

Piezômetros são instrumentos utilizados para a leitura das poropressões, em profundidade, ao longo do perfil do solo. Dentre os mais variados tipos de piezômetros existentes, utilizou-se o piezômetro elétrico de corda vibrante. Foram instalados dois piezômetros em cada um dos aterros experimentais, locados conforme as Figuras 12 e 13. O piezômetro elétrico de corda vibrante apresenta respostas mais rápidas a variações de poropressão, além de permitir medidas de poropressão negativas.

No aterro sem tratamento, os piezômetros foram monitorados no período de 20 de agosto de 2014 a 15 de janeiro de 2015. A elevação ou construção do aterro foi iniciada no dia 13 de setembro e finalizada em 15 de setembro. De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 20 e 21, em 122 dias de monitoramento, o PZ1 obteve a máxima poropressão no período de construção do aterro, no valor de 26,94 kPa, o PZ2, em 148 dias de monitoramento, também obteve a máxima poropressão no período de construção de aterro, com valor de 43,77 kPa. Durante o monitoramento, em ambos piezômetros, a poropressão foi diminuindo ao longo do tempo tendendo a se aproximar da pressão hidrostática, PZ1 com valor de 17 kPa e PZ2 com valor de 34 kPa, porém ao final do monitoramento houve um acréscimo de poropressão, provavelmente proveniente do grande lançamento de aterro nesta mesma data, como apresentado na Figura 19.

No aterro com CPR *Grouting*, o PZ3 foi monitorado no período de 8 de setembro de 2014 a 15 de janeiro de 2015, e o PZ4 foi monitorado no período de 15 de setembro de 2014 a 15 de janeiro de 2015. A elevação ou construção do aterro foi iniciada no dia 16 de setembro e finalizada no dia 19 de setembro. De acordo com a Figura 22, em 129 dias de monitoramento o PZ3 obteve a maior poropressão registrada no período de construção do aterro, no valor de 27,29 kPa. A curva de poropressão foi diminuindo ao longo do monitoramento, ficando ligeiramente abaixo do valor da pressão hidrostática de 18,20 kPa. Os resultados apresentados na Figura 23 mostram que, em 122 dias de monitoramento, o PZ4 obteve a maior poropressão registrada no período de construção do aterro, no valor de 57,32 kPa. Durante o monitoramento a curva de poropressão no PZ4 também foi decrescendo ao longo do tempo, porém ficou acima da pressão hidrostática de 45 kPa.

É interessante notar que os piezômetros PZ2 e PZ4 apresentaram maiores valores de poropressão. Estes piezômetros foram instalados na região central do aterro, junto ao eixo de simetria, enquanto os piezômetros PZ1 e PZ3 foram implantados mais próximos ao bordo do aterro, fato que justifica a diferença nas leituras.

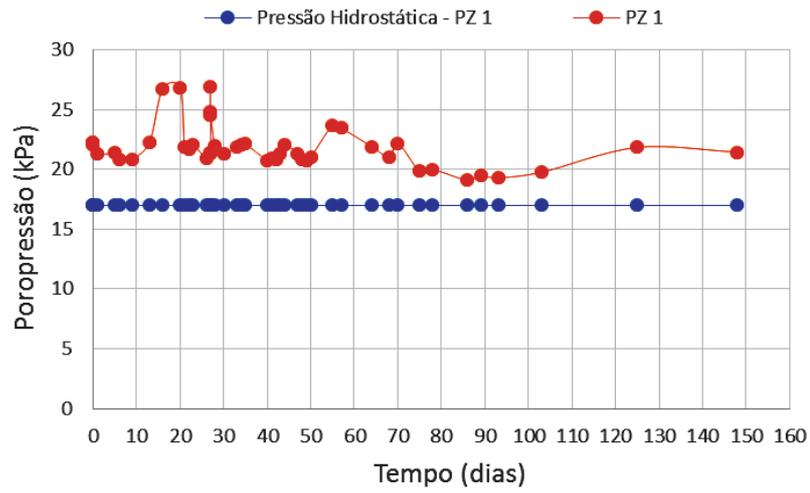


Fig. 20 – Resultados fornecidos pelo Piezômetro PZ1: Aterro sem CPR *Grouting*

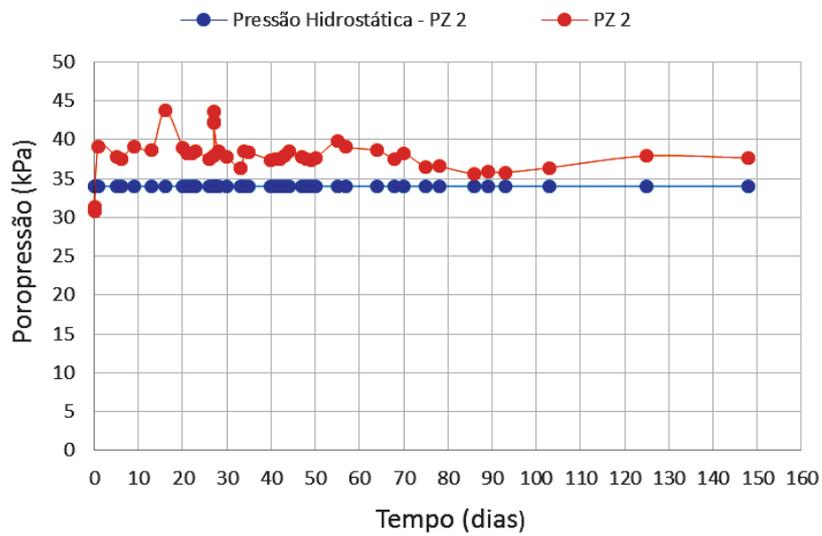


Fig. 21 – Resultados fornecidos pelo Piezômetro PZ2: Aterro sem CPR *Grouting*

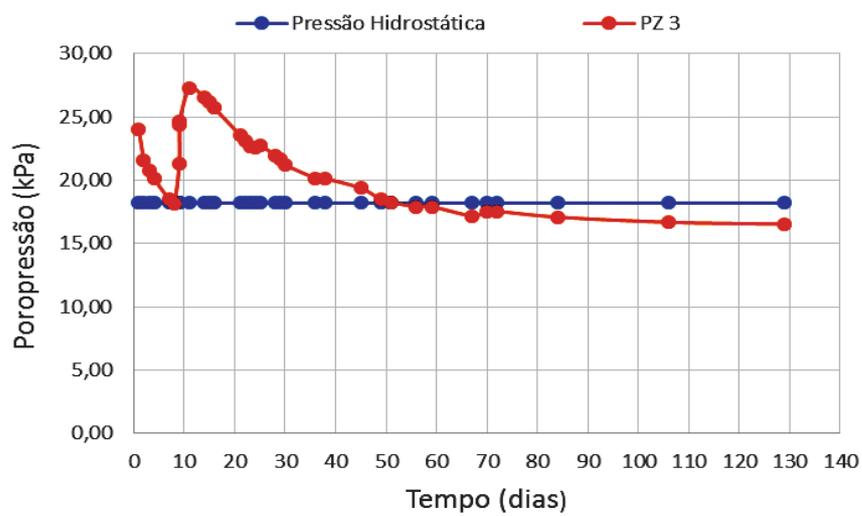


Fig. 22 – Resultados fornecidos pelo Piezômetro PZ3: Aterro com CPR *Grouting*

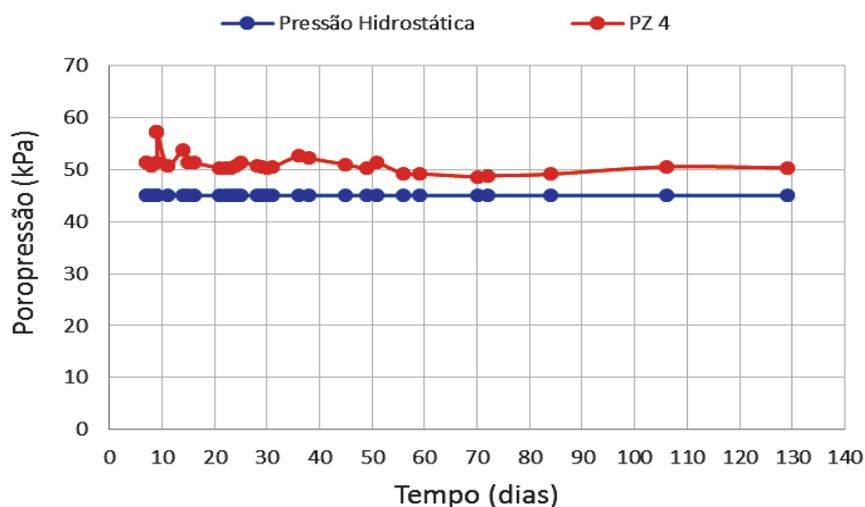


Fig. 23 – Resultados fornecidos pelo Piezômetro PZ 4: Aterro com CPR *Grouting*

5 – 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 enrijecido com a técnica de 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 deslocamentos verticais médios medidos no aterro com tratamento foram de 15,1 cm, enquanto o método de Asaoka previu recalques médios de 51 cm para o aterro CPR *Grouting*, o que representa uma minoração de recalques de cerca de 70 %.

Os inclinômetros indicaram uma redução expressiva nos deslocamentos horizontais pós-tratamento, tanto na direção A, quanto na direção B.

Os resultados permitiram avaliar a eficiência da técnica de CPR *Grouting*. Observou-se uma redução significativa dos recalques e dos deslocamentos horizontais sobre o solo enrijecido.

Ressalta-se a eficácia da técnica que permite, também, uma aceleração expressiva dos recalques, com a instalação de geodrenos.

6 – 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.

7 – REFERÊNCIAS

- Almeida, M. S. S.; Marques, M. E. S. (2010). *Aterros sobre solos moles - projeto e desempenho*. São Paulo, Oficina de Textos, 254 p.
- Almeida, M. S. S.; Riccio, M. (2012). *Ground improvement of extremely soft soils in Rio de Janeiro*. International Conference on Ground Improvement and Ground Control (ICGI 2012), University of Wollongong, Austrália.

- Briaud, J. L. (1992). *The Pressuremeter*, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- Cabral, S. (1979). *Mapeamento Geológico-Geotécnico da Baixada de Jacarepaguá e Maciços Circunvizinhos*. Tese Doutorado em Geologia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 160p.
- 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.
- Coutinho, R. Q.; Oliveira, J. T. R.; Oliveira, A. T. J. (2001). *Características Geotécnicas das Argilas Moles de Recife*. Anais do Encontro Propriedades de Argilas Moles Brasileiras, p. 1-28, ABMS-COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Engegraut (2015). Material publicitário.
- 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.
- Gondariz, L. J. N. C. (2016). *Comportamento de Aterros Sobre Solos Tratados com Consolidação Profunda Radial CPR Grouting*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 120p.
- Lunne, T.; Berre, T.; Strandvik, S. (1997). *Sample Disturbance Effects in Soft Low Plastic Norwegian Clay*. Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics. COOPE/UFRJ, Rio de Janeiro, p. 81-102.
- 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 (2013). *Consolidação Profunda Radial aplicada em solo compressível na Lagoa Rodrigo de Freitas/RJ*. Dissertação de mestrado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro.
- Nogueira, E. G. (2010). *Estudo de algumas soluções de tratamento de solos moles para construção de aterros no trecho sul do rodanel – SP*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.
- Oliveira, J. T. R. (2002). *A Influência da Qualidade da Amostra no Comportamento Tensão-Deformação- Resistência de Argilas Moles*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 264 p.