

Uso da técnica de melhoramento de solos moles com drenos verticais com vácuo em uma obra de infraestrutura rodoviária na América do Sul.

Mario Rolando Bonilla Correa

Geoprojetos Engenharia Ltda., Rio de Janeiro, Brasil, mario.bonilla@geoprojetos.com.br

Jose Roberto Thedim Brandt

Geoprojetos Engenharia Ltda., Rio de Janeiro, Brasil, jroberto@geoprojetos.com.br

Geraldo Guedes de Andrade

Acrux Consultoria e Engenharia, São Paulo, Brasil, geraldo.andrade@acruxconsultoria.com.br

Diego Gazolli Yanez

Poli-USP, São Paulo, Brasil, gazolli@usp.br

RESUMO: Na realização de obras de infraestrutura rodoviária se apresentam uma série de desafios em diferentes áreas do conhecimento. Devido à extensão deste tipo de obras, a diversidade de condições climáticas, geológicas e geomorfológicas pode ser bastante ampla, podendo apresentar, em alguns trechos, condições complexas do terreno de fundação (solos de baixa resistência, de alta deformabilidade, de resistência variável, etc.), as quais geram maiores dificuldades, não somente durante as obras, como também na fase de manutenção. A presença de solos moles, por exemplo, figura entre um dos problemas comumente encontrados neste contexto, exigindo do projetista da rodovia a aplicação de técnicas de melhoramento do terreno que minimizem os problemas de recalques e de estabilidade que são típicos deste tipo de solo. Existem diferentes técnicas de solução para este tipo de solos, uma delas é o uso de drenos verticais com aplicação de vácuo. Esta técnica cada vez é mais utilizada, ela permite que o processo de adensamento seja acelerado sem o uso de sobrecargas físicas (com peso de aterro), minimizando, assim, os riscos inerentes a estabilidade dos aterros e permitindo menores prazos de execução. Neste trabalho estão apresentadas algumas experiências na utilização desta técnica, mediante o sistema dreno a dreno, em um projeto de infraestrutura rodoviária desenvolvido na América do Sul. São apresentadas como recomendações técnicas, algumas considerações práticas para os pontos a seguir: (1) Campanha de ensaios; (2) Projeto executivo; (3) Procedimento construtivo; (4) Instrumentação geotécnica e (5) Supervisão em campo. É apresentado um caso de obra de um depósito, que foi tratado com drenos verticais com aplicação de vácuo e sobre o qual de forma simultânea foi construído um aterro rodoviário. Deste caso se apresentam resultados dos instrumentos geotécnicos, analisados parcialmente. São apresentadas também outras experiências em outros dois depósitos desta obra tratados com a mesma técnica.

PALAVRAS-CHAVE: Melhoramento de solos moles, adensamento com vácuo, instrumentação geotécnica.

1. INTRODUÇÃO

Uma técnica frequentemente utilizada para o melhoramento de solos moles é acelerar o processo de adensamento com o uso de drenos verticais junto com aterros adicionais e

provisórios, atuando como sobrecarga. Os trabalhos de Chu et al. (2000), Tang e Shang (2000), Chai et al. (2006), Indraratna et al. (2011), e outros mais, são experiências de campo que mostraram que o vácuo funciona de forma similar às sobrecargas físicas, com aterro.

Esta aplicação do vácuo também já foi estudada em laboratório em vários trabalhos, como Trung et al. (2012), Chai et al. (2007), entre outros. O trabalho de Bonilla e Sandroni (2014) é uma experiência, na América do Sul, de estudo desta técnica em laboratório.

A aplicação da pressão de vácuo pode ser realizada pelo sistema com membrana ou pelo sistema dreno a dreno, Sandroni et al. (2012).

O objetivo deste trabalho é apresentar algumas das experiências obtidas com o uso desta técnica utilizando o sistema de dreno a dreno em uma obra rodoviária, localizada na América do Sul.

Se apresentam, também, algumas considerações práticas sobre as campanhas de ensaios, o projeto executivo, o procedimento construtivo, a instrumentação geotécnica e a supervisão em campo.

2. ALGUMAS CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS

A seguir se apresentam, como recomendações técnicas, algumas considerações práticas para o uso desta técnica. A maioria delas se aplicam para qualquer projeto de melhoramento de solos moles por adensamento:

2.1. Campanha de ensaios.

Planejar três campanhas de ensaios permite obter informações muito importantes para a realização do projeto executivo e para o acompanhamento dos resultados da instrumentação geotécnica.

2.1.1. Primeira campanha:

De sondagens SPT para identificar a presença de depósitos de solos moles.

Idealmente o espaçamento entre sondagens deveria ser da ordem de 100m. Entretanto esse espaçamento não é realista para a grande maioria das obras. Assim recomenda-se uma inspeção de campo para auxiliar na determinação mais efetiva dos pontos mais adequados para a realização de sondagens SPT correspondentes a esta primeira campanha. Nesta inspeção devem ser identificados possíveis indícios de presença de depósitos de solos moles, tais como:

- Presença de zonas pantanosas;
- Presença de vegetação de folhas grandes;
- Presença de deformações (recalques diferenciais) em obras próximas;

Apesar de informativo, esses indícios estão, por vezes mascarados por fatores externos. Por exemplo, em épocas de seca prolongada uma zona que geralmente apresenta uma superfície pantanosa pode ficar ressecada. De qualquer forma, a vistoria feita por geotécnico experiente sempre auxiliará na determinação dos pontos mais prováveis de ocorrência dos solos moles.

2.1.2. Segunda campanha:

De sondagens SPT dentro de cada depósito, identificado na primeira campanha, para conhecer um pouco mais de sua geometria (extensão e profundidade), e de sua heterogeneidade (variabilidade da umidade, da resistência, etc.).

Recomenda-se realizar várias sondagens fora do eixo da pista, porque se todas as sondagens fossem realizadas no eixo a variabilidade transversal da profundidade do depósito não seria observada. Esta variabilidade pode ser maior perto de construções antigas, nas quais se usava com certa frequência a substituição por expulsão.

2.1.3. Terceira campanha:

Esta campanha envolve a extração de amostras indeformadas (tipo Shelby) para ensaios de laboratório além da realização de ensaios especiais de campo (piezocone, vane test, dissipação de poro pressão, etc.) e deve ser planejada de acordo com os resultados das campanhas anteriores.

2.2. Projeto executivo.

Os cálculos de estabilidade e previsões de recalques primários e secundários estão sujeitos a incertezas em função da variabilidade, tanto geométrica (profundidade variável tanto na direção transversal como na direção longitudinal ao eixo da estrada) como a geotécnica (diferentes umidades, resistências, conteúdo de matéria orgânica, etc.) que estes depósitos podem apresentar. A realização de retro análises com os

resultados da instrumentação se constitui em uma importante ferramenta para minimizar esses riscos.

2.3. Procedimento construtivo.

Preservar as características originais do depósito é muito importante. Se, durante a execução dos trabalhos o depósito for muito “agredido”, formando expulsões ou rupturas e, conseqüentemente amolgamento do material, os parâmetros de resistência e de deformabilidade se alterarão, sendo necessário uma reavaliação do projeto executivo. Por essa razão é fundamental que a empresa responsável pela construção planeje muito bem os recursos (equipamentos leves, frequência no fornecimento de materiais, etc.) e a execução dos trabalhos (pontos apropriados para descarga de material, acessos, etc.) de forma a não “agredir” o terreno de fundação.

Na execução do aterro de conquista (primeiro aterro granular a ser lançado para permitir o tráfego de equipamentos) o descarregamento de material deve ser realizado fora da área do depósito de solos moles, em uma zona estável, tal como apontado por Sandroni (2006), trabalho que descreve os cuidados a serem tomados na execução de aterros de conquista.

A profundidade dos drenos verticais deve ficar entre 0,50m e 1,0m acima da base da camada, caso o material abaixo da argila mole seja um solo de alta permeabilidade (areia ou cascalhos) senão as bombas de vácuo irão drenar a água da camada inferior.

Antes de se iniciar a cravação dos geodrenos, o equipamento cravador poderá executar prospecções bem perto dos pontos onde foram feitas as sondagens de SPT. As prospecções serão feitas utilizando o próprio procedimento de cravação do geodreno, sem entretanto, cravar nenhum geodreno, apenas introduzindo a ferramenta de cravação, denominada mandril. Com este procedimento preliminar, será possível ter conhecimento prévio da variação da espessura do bolsão ajudando assim a que os drenos consigam penetrar toda a camada de solo mole sem atingir camadas de alta permeabilidade.

2.4. Instrumentação geotécnica.

O método dos volumes, apresentado em Sandroni et al. (2004) é uma boa ferramenta para monitorar a estabilidade dos aterros.

O método de Asaoka (1978), permite conhecer o recalque primário final, guardadas as considerações como as apresentadas por Pinto (2001).

O contínuo monitoramento e a interpretação dos resultados com o uso destes métodos, permitirá determinar riscos de estabilidade relacionados à heterogeneidade do depósito, erros no processo construtivo ou situações especiais como sismos e inundações. Tais informações poderão ser aplicadas na realização de retroanálises, balizando ocasionais ajustes no planejamento da obra.

2.5. Supervisão em campo.

A instrumentação não cobre a totalidade da obra, mas apenas as seções consideradas mais críticas. Uma heterogeneidade não registrada pelas campanhas de ensaios pode levar a que entre as seções instrumentadas possam ocorrer movimentos importantes que não serão observadas pela instrumentação. A supervisão em campo ajuda a detectar estas situações pela observação de recalques excessivos, aberturas de fissuras, inclinação em postes, entre outras evidências que podem ser indícios importantes em trechos não instrumentados. Adicionalmente, a supervisão deve acompanhar os processos construtivos para garantir a conformidade com o projeto e auxiliar na tomada de decisões, no campo, sobre alterações nos procedimentos preestabelecidos, tais como, locais de descarga, tráfego de equipamentos mais pesados, etc.

3. CASO DE OBRA

A seguir, é apresentado um caso de uso de drenos verticais a vácuo, com o sistema dreno a dreno, em um depósito de solos moles, em uma obra de infraestrutura rodoviária localizada na América do Sul.

Sobre este depósito foi realizada a construção de uma rodovia com duas pistas, uma delas nova e paralela a outra já existente e com 30 anos de operação.

Com a nova pista e a antiga a rodovia ficará trabalhando com uma pista dupla.

Na Figura 1 se apresenta um esquema em planta da obra que foi feita sobre este depósito, com a localização dos ensaios de campo realizados e da instrumentação geotécnica que foi instalada. Na Figura 2 se apresenta a seção transversal do km0+120.

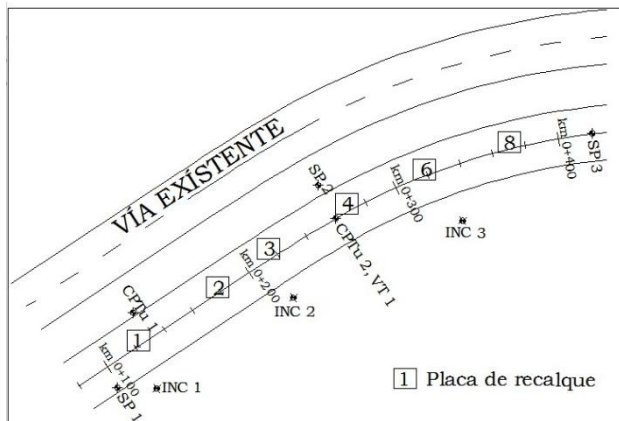


Figura 1 – Esquema em planta.

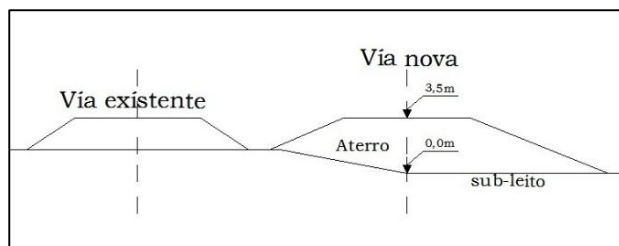


Figura 2 – Esquema da seção do km 0+120.

3.1. Ensaios de campo

A seguir são apresentados os resultados dos ensaios de campo, realizados no depósito.

As investigações nesses tramos incluíram três sondagens a percussão, com determinação da umidade natural em todas as amostras obtidas no amostrador SPT. Os resultados estão apresentados na Figura 3.

Nestas sondagens está registrada a presença de três tipos de materiais compressíveis, os quais são predominantemente siltosos e/ou argilosos, com diferentes tipos de conteúdo de matéria orgânica, apresentando, inclusive, materiais turfosos intercalados.

SP 1			SP 2			SP 3		
1	2	CH 49%	1	3	CH 41%	1	12	CH 34%
2	0	OH 113%	2	1	CH 56%	2	2	PT 273%
3	0	OH 111%	3	0	CH 64%	3	2	PT 178%
4	1	CH 77%	4	0	-	4	0	PT 208%
5	5	MH 47%	5	0	-	5	0	OH 108%
6	16	MH 36%	6	0	-	6	3	OH 202%
7	32	MH 36%	7	4	MH 81%	7	0	OH 78%
			8	5	MH 64%	8	0	OH 71%
			9	6	ML 37%	9	14	OH 46%
			10	4	CL 70%	10	0	OH 70%
			11	5	CL 70%	11	0	OH 75%
			12	3	MH 143%	12	0	OH 80%
			13	2	MH 148%	13	7	OH 51%
			14	3	CH 44%	14	3	OH 67%
			15	2	CH 46%	15	7	OH 75%
			16	5	CH 52%	16	6	OH 87%
			17	7	MH 135%	17	7	PT 145%
			18	5	MH 122%	18	7	PT 126%
			19	10	MH 105%	19	9	OH 61%
						20	20	ML 39%
						21	11	ML 37%

Figura 3 – Resultados das sondagens feitas no depósito.

O material A foi definido como aquele que possuía um valor de N_{spt} (número de golpes no ensaio SPT) de 0 a 3, com umidades variando de 44% e 148%. O material B foi atribuído à camada com N_{spt} de 0 a 2 e umidades entre 178% e 273%. Ambos os materiais são classificados como “muito moles”. O material C, por sua vez, embora não seja muito mole também é compressível e apresenta um N_{spt} de 4 a 7 golpes e umidades menores do que 145%.

A análise dos boletins de sondagem permite inferir que o depósito em estudo apresenta uma alta variabilidade tanto com a profundidade quanto na distribuição das camadas destes materiais.

Ademais, é válido ressaltar que, em vários pontos foram encontrados pedaços de madeira. Tal fato levanta a suspeita de que os valores de N_{spt} podem, na realidade, ser menores do que os que foram medidos.

Além das sondagens a percussão também foram realizados ensaios CPTu. Os resultados obtidos no CPTu1 são apresentados na Figura 4.

Apesar da distância horizontal entre a sondagem SP 1 e o CPTu 1 ser menor que 35m, foi observada uma diferença significativa no registro da profundidade das camadas de material mole. A sondagem SP 1 indicou uma camada com 5,50m enquanto que o CPTu1 registrou 12,0m. Esta situação mostra a alta heterogeneidade geométrica dos depósitos de solos moles nesta região, que foi comprovada, também, durante a instalação dos drenos verticais.

Na Figura 5 se apresentam os resultados obtidos no ensaio de palheta VT-1.

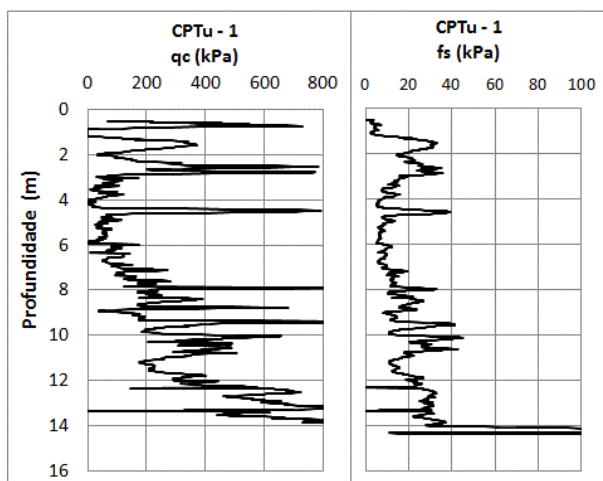


Figura 4 – Resultados CPTu 1.

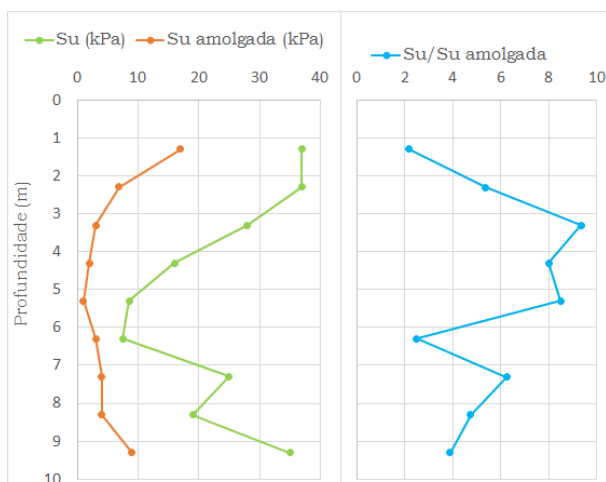


Figura 5 – Resultados palheta depósito.

Nos resultados obtidos nos ensaios de palheta, pode se observar também uma importante variabilidade, com resistências não drenadas que variam de 35kPa a pouco menos de 10kPa. A relação entre a resistência não drenada e a resistência não drenada amolgada também é bastante variável, registrando-se entre 3,0m e 6,0m de profundidade, um valor alto (entre 8 e 10) de acordo com a tabela do trabalho de Skempton e Northey (1952).

3.2. Execução obra

A Figura 6 mostra as mangueiras do sistema de vácuo (tipo dreno a dreno) e a execução da camada de material granular de proteção mecânica das mangueiras do sistema de vácuo. Note-se também que o material utilizado é estocado em uma zona de corte, fora do depósito de solos moles. Este material é espalhado para o interior do depósito com um trator D5. Os tubos brancos são placas de recalque.



Figura 6 – Execução da camada de proteção das mangueiras do sistema de vácuo.

3.3. Resultados da instrumentação

Nesse trecho da estrada foram instaladas 6 placas de recalque e 3 inclinômetros. Quando o recalque primário atingia cerca de 95% do valor estimado, as placas eram desmontadas, a estrutura do pavimento executada e pinos de recalque eram então instalados aproximadamente na posição das Placas.

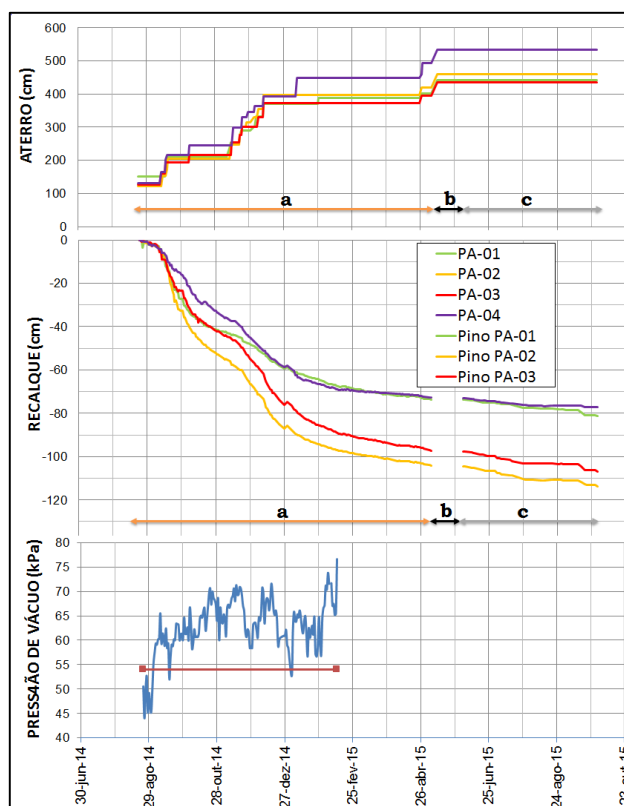


Figura 7 – Resultados placas de recalque.

Os resultados das placas de recalque 1 a 4 e seus correspondentes pinos de recalque estão

apresentados na Figura 7 que também ilustra os gráficos da evolução altura do aterro e as leituras de pressão nas bombas de vácuo versus tempo. Nesta Figura, a letra “a” correspondente ao período registrado com a placa de recalque; a letra “b” à construção da estrutura do pavimento (sub-base, base e camadas de concreto asfáltico) e a letra “c” correspondente ao período no qual as leituras de recalque foram realizadas com pinos instalados no pavimento.

Na Figura 8 são apresentados os resultados das leituras realizadas no inclinômetro 2, onde foram registrados os maiores deslocamentos. Considerando que os deslocamentos no eixo B (longitudinal ao eixo da pista) foram mínimos (como esperado) esses não estão apresentados.

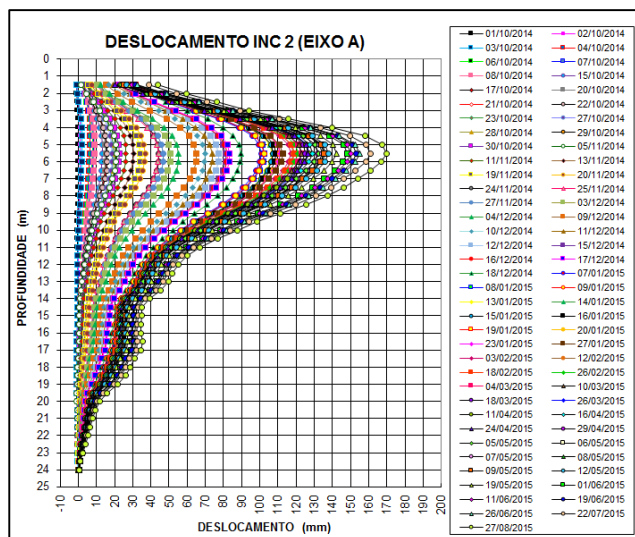


Figura 8 – Resultados inclinômetro 2

3.4 Análises dos resultados

A Figura 9 apresenta a aplicação do método de Asaoka com os resultados da placa 1. O recalque último primário obtido é de 75cm.

Com os resultados do método do Asaoka foi feito um gráfico de recalque vs. tempo que é apresentado na Figura 10.

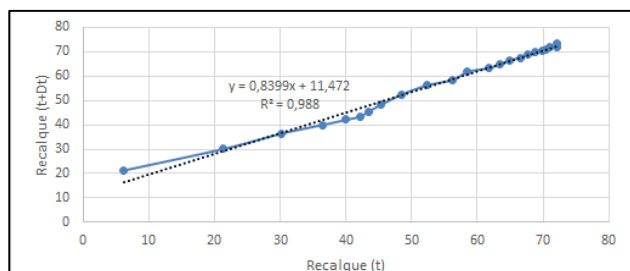


Figura 9 – Uso do método de Asaoka com os resultados da placa 1.

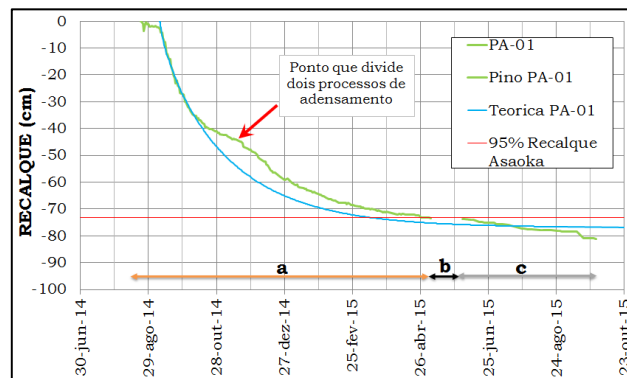


Figura 10 – Retro análise feito com resultados da placa 1.

Comparando a curva real, correspondente aos resultados da placa de recalque, com a curva teórica, feita com os resultados do método de Asaoka e usando as formulas de Olson 1977, pode-se observar que, na prática, o recalque máximo primário foi obtido em um maior tempo, devido ao fato do aterro ter sido executado de forma lenta, inclusive se observam dois processos de adensamento (ver seta vermelha da Figura 10) de forma que o primeiro processo consegue desenvolver o 93% do adensamento antes do começo do segundo processo.

Na Figura 11 se apresenta um gráfico dos resultados do cálculo V_v/V_h (volume vertical/volume horizontal), de acordo com os procedimentos detalhados em Sandroni et al. (2004). Estes cálculos foram realizados com os resultados do inclinômetro 2 e a placa de recalque 3. Esta relação sempre se manteve acima de 6 o que corresponde a uma situação estável.

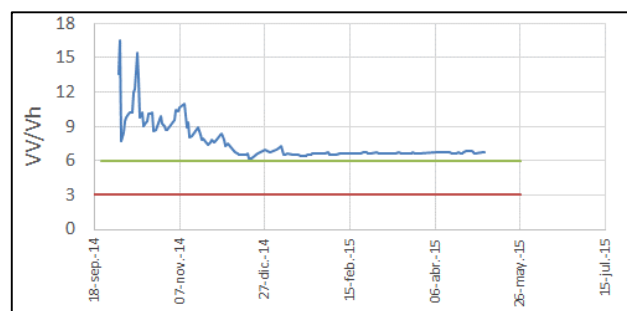


Figura 11 – Gráfico de V_v/V_h com os resultados do inclinômetro 2.

4. OUTRAS EXPERIÊNCIAS

Outros resultados obtidos em outros depósitos desta mesma obra se apresentam a seguir:

4.1. Altos recalques gerados principalmente por uso de vácuo

Em um dos depósitos estabilizados foram registrados recalques elevados, somente com o uso de vácuo e pouco aterro colocado, correspondente unicamente ao aterro de conquista ($e = 0,80\text{m}$) e camada de proteção das mangueiras ($e = 0,40\text{m}$).

O referido depósito era formado por um material turfoso, onde foi possível observar a presença fibras vegetais e madeira, com uma profundidade variável entre 8,0m e 19,0m. O número de golpes no ensaio SPT foi da ordem de 0, umidade predominante de 430% e máxima de 695%.

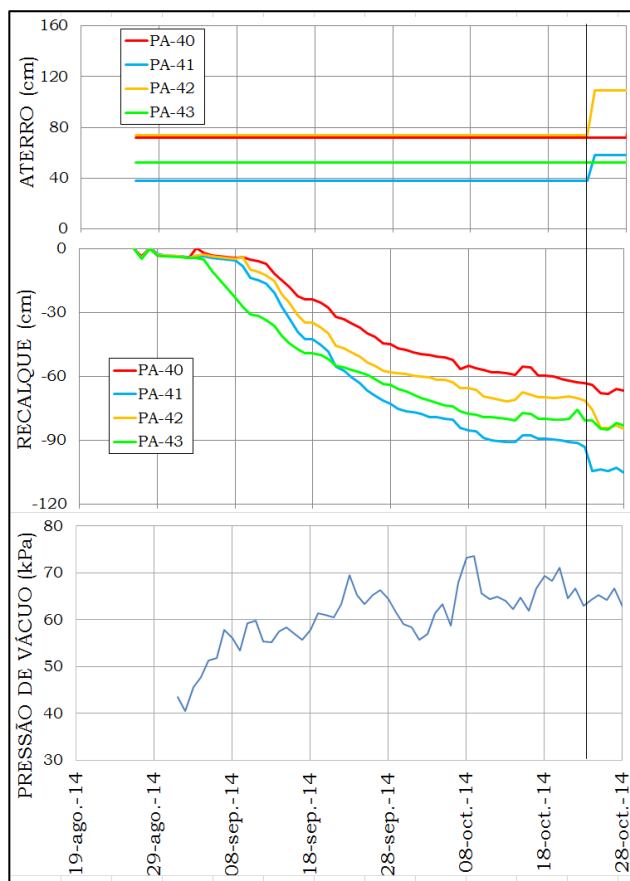


Figura 12 – Resultados placas de recalque que registraram altos recalques principalmente pela ação do vácuo.

Na Figura 12 se apresentam os resultados obtidos em 4 placas de recalque, instaladas em este depósito. Se registraram recalques de até 0,90m com uma pressão de vácuo de 60kPa em média.

4.2. Movimentos horizontais negativos

Normalmente quando um aterro é construído os inclinômetros registram movimentos horizontais positivos na direção transversal ao eixo da pista, quer dizer, em direção para fora do aterro.

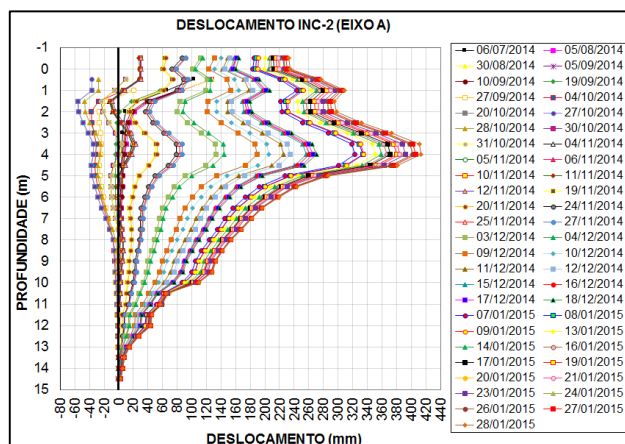


Figura 13 – Resultados inclinômetro com deslocamento negativo.

Em um depósito desta obra, se registrou um movimento horizontal negativo, quer dizer para dentro do aterro, com a ação do vácuo, conforme observado na Figura 13, quando somente estava executado o aterro de conquista e a camada de proteção das mangueiras (cerca de 1,20m de aterro).

O referido depósito era formado por um material turfoso, onde foi possível observar a presença fibras vegetais e madeira, com uma profundidade entre 6,0m e 9,0m. O número de golpes no ensaio SPT foi da ordem de 0, umidade predominante de 150% e máxima de 274%.

A Figura 14(a) apresenta os deslocamentos registrados neste inclinômetro a uma profundidade de 4m vs. tempo. A Figura 14(b) apresenta a pressão de vácuo vs. tempo e a Figura 14(c) a altura do aterro vs. tempo. Em todas as Figuras o período no qual o vácuo esteve ligado, sem colocar mais aterro, encontra-se marcado por duas linhas verticais pretas. Neste período, na Figura 14(a), observa-se o movimento horizontal negativo. Este fenômeno foi descrito por Stapelfeldt (2006).

Na Figura 15 se apresentam os resultados obtidos em uma placa de recalque instalada a uma distância horizontal de 15m deste inclinômetro, se observa o registro de um recalque de 0,30m neste mesmo período.

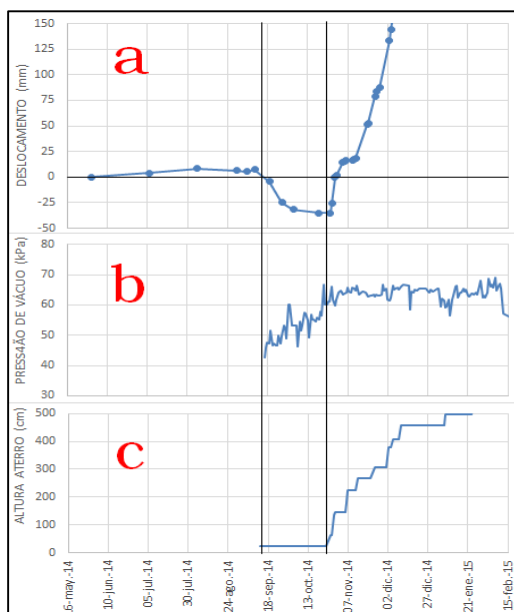


Figura 14 (a): Deslocamento a 4,0m de profundidade vs. tempo; (b): Pressão de vácuo vs. tempo; (c): Altura de aterro vs. tempo.

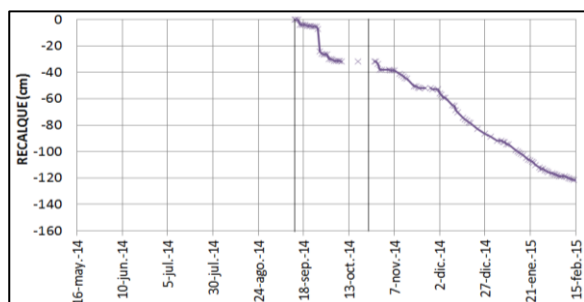


Figura 15 – Resultados placa de recalque localizada a 15m de distância horizontal do inclinômetro.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo se apresentam uma série de experiências, obtidas no uso da técnica de melhoramento de solos moles com drenos verticais com vácuo, mediante o sistema de dreno a dreno, em uma obra de infraestrutura rodoviária em América do Sul. Estas experiências foram comprovadas e registradas através da instrumentação geotécnica, ratificando que o vácuo funciona de forma similar a uma sobrecarga, permitindo assim acelerar os recalques e, consequentemente, acelerar a execução da construção de aterros sobre solos moles, sem os riscos de instabilidade inerentes à execução de sobrecargas físicas em adição ao aterro do corpo estradal.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa CONSOL e ao Eng. Marulio Aguiar por disponibilizar as

informações que permitiram tornar possível este trabalho. À Geoprojetos Engenharia pela ajuda no processamento dos dados da instrumentação. À Tecnogeo pelo apoio nos conceitos técnicos dos processos executivos da aplicação do vácuo.

REFERÊNCIAS

- Asaoka, A. (1978), *Observational procedure of settlement prediction*. Soils and Foundations, Vol 18, No. 4, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dec, 1978.
- Bonilla, M. R. e Sandroni, S. (2014), *Aplicação de vácuo em ensaios unidimensionais e isotrópicos*. XVII COBRAMSEG. ABMS.
- Chai, J. C., Carter, J. P., Hayashi, S. (2006). *Application of the vacuum preloading method in soil improvement projects*, NRC Research Press Web site at <http://cgj.nrc.ca>.
- Chai, J., Sakai, A., Hayashi, S., Hino, T. (2007), *Characteristics of vacuum consolidation comparing with surcharge load induced consolidation*, International Symposium on Geotechnical Engineering, Bangkok, Thailand, p. 111-124.
- Chu, J., Yan, S.W. & Yang, H. (2000). *Soil improvement by the vacuum preloading method for an oil storage station*. Geotechnique, 50(6), p. 625-632.
- Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C. Kelly, R., Buys, H. (2011), *Soft soil foundation improved by vacuum and surcharge loading*, Ice Publishing Pages 87-96 <http://dx.doi.org/10.1680/grim.10.00032>, Paper 1000032.
- Olson, R. E., (1977), *Consolidation under time-dependent loading*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1977, Vol. 103, Issue 1, Pg. 55-60.
- Pinto, Carlos de Souza. (2001), *Considerações Sobre o Método de Asaoka*. Solos e Rochas, São Paulo, 24, p. 95 – 100, Abril, 2001.
- Sandroni, S., Lacerda, W., Brandt, J.R. (2004). *Método dos volumes para controle de campo da estabilidade de aterros sobre argilas moles*. Solos e Rochas. São Paulo. Janeiro – Abril, 2004, p. 25 – 35.
- Sandroni, S.(2006). *Sobre a prática brasileira de projeto geotécnico de aterros rodoviários em terrenos muito moles*. Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e engenharia geotécnica. Curitiba/PR. ABMS.
- Sandroni, S.; Andrade, G.; Odebrecht, E. (2012). *Uso de vácuo como sobrecarga de aterro sobre solo mole: Uma primeira experiência de campo*. COBRAMSEG.
- Skempton, A. W.; Northey, R. D. (1952) The sensitivity of clays. Géotechnique, v. 3, n. 1, p.72-78.
- Stapelfeldt, T. (2006), *Preloading and vertical drains*, Helsínquia: Helsinki University of Technology.
- Tang, M. e Shang, J. (2000). *Vacuum preloading consolidation of Yaoqiang Airport runway*, Géotechnique 50, No. 6, p. 613-623.
- Trung Duong, N.; Teparaksa, W. e Tanaka, H. (2012). *Simulation vacuum preloading method by tri-axial apparatus*, International Journal of Geosciences, 2012, 3, 211-221.