

Tratamento Geotécnico de Solos Moles com a Técnica Consolidação Profunda Radial (CPR) em Obra de Ampliação Portuária

Fábio Krueger da Silva

Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, fabio.krueger@ifsc.edu.br

Leonardo Pandini Mazzuco

Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, Brasil, leonardomazzuco@gmail.com

Leonardo Fiorentin Moreira

Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, Brasil, leoflorentin2@gmail.com

Eduardo Macedo

Engegraut Engenharia Ltda, Rio de Janeiro, Brasil, eduardo@engegraut.com.br

Cesar Schmidt Godoi

Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, Brasil, cesar.godoi@unisul.br

Franciely da Silva Espindola

Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, Brasil, franciely.unisul@outlook.br

RESUMO: A obra de ampliação do terminal portuário do município de Navegantes demandou por técnicas refinadas de melhoramento de solos. Devido ao subsolo apresentar presença de camadas moles e estrutura com cargas elevadas a solução geotécnica exigida pela contratante buscava garantia nas condições de estabilidade, minimização de recalques e, principalmente, rapidez de execução. Como solução de tratamento desta camada de solos moles, foi adotada a inovadora técnica denominada Consolidação Profunda Radial (CPR). Para monitoramento das deformações são feitas as análises dos resultados de placas de recalques e de piezômetros instalados no terreno. Através dos ensaios pressiométricos realizados antes e após o tratamento do solo foi possível avaliar o ganho de resistência não drenada da argila. A escolha do CPR para este empreendimento se mostrou como a melhor solução geotécnica. O CPR se mostrou uma técnica rápida e eficiente para estabilização do solo e, principalmente na minimização dos recalques.

PALAVRAS-CHAVE: Solos moles, Reforço de solos, Consolidação Profunda Radial.

1 INTRODUÇÃO

A construção de estruturas sobre solos compressíveis é um desafio que se apresenta com muita frequência a engenharia brasileira, devido a isso, durante muito tempo técnicas foram desenvolvidas para proporcionar reduções significativas no impacto ambiental, no recalque final e no tempo de execução, minimizando o

custo e maximizando a qualidade final da obra. Construções executadas sobre solos de baixa capacidade de suporte – comumente conhecidos como “Solos Moles” – devem ter duas condições respeitadas: garantir a estabilidade evitando rupturas totais ou parciais das fundações e manutenção das suas deformações verticais e horizontais.

Dentre as alternativas mais comuns para este problema e que respeitam as condições citadas anteriormente é execução de drenos verticais, esses são inseridos dentro da camada de solo mole com o propósito de promover a redução de recalques após a construção, acelerar o ganho de resistência ao cisalhamento e da capacidade de carga devido ao adensamento ao diminuir o caminho máximo de drenagem dentro da camada de solo que está sofrendo a expulsão do excesso de água verticalmente (Almeida, 1996).

Nesta mesma linha a Consolidação Profunda Radial (CPR) consiste na cravação de drenos verticais pré-fabricados seguidos da formação de colunas de argamassa (*geogROUT*) no interior da massa de solo mole.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Identificação do local e da obra

No município de Navegantes, localizado no estado de Santa Catarina encontra-se o Terminal Portuário de maior movimentação de cargas em contêineres do Estado, responsável por 45% da participação de mercado. Desta maneira, a empresa responsável pela administração do terminal portuário (PortoNave) buscou ampliar ainda mais sua capacidade. A região tratada está localizada na retroárea da Avenida Portuária Vicente Coelho S/N - Centro Navegantes-SC, que pode ser acessada pela BR-101 entrando pelo acesso da BR-470 com direção a Navegantes. A localização geográfica da terminal portuário e da região onde foram realizados os serviços de tratamento de solos moles podem ser vistas, respectivamente, nas Figuras 1 e 2.

No local, onde está sendo ampliado o porto, a geologia apresenta uma espessa camada de solo mole, com alta compressibilidade. No estudo básico preliminar, feito com a PortoNave, constatou-se a necessidade de melhorar as características geotécnicas do depósito mole, através de técnicas de melhoramento de solos, visando evitar problemas futuros de instabilidade do aterro que está sendo lançado, além de consequentes

recalques por adensamento do depósito de solo mole.



Figura 1. Localização geográfica do terminal portuário.



Figura 2. Retroárea onde foi realizado o CPR.

No local, onde está sendo ampliado o porto, a geologia apresenta uma espessa camada de solo mole, com alta compressibilidade. No estudo básico preliminar, feito com a PortoNave, constatou-se a necessidade de melhorar as características geotécnicas do depósito mole, através de técnicas de melhoramento de solos, visando evitar problemas futuros de instabilidade do aterro que está sendo lançado, além de consequentes recalques por adensamento do depósito de solo mole.

Por se tratar de uma área de armazenamento de contêineres, com contínua movimentação de máquinas e equipamentos, os recalques diferenciais não são tolerados. Assim, para realização do projeto desta ampliação optou-se pela técnica CPR (Consolidação Profunda Radial) para reforço do solo de fundação do local da obra. Os serviços foram realizados

numa área de 25.000m² e concluídos antes do prazo previsto.

2.1.1 Investigação de Subsolo

O reconhecimento do solo de fundação nas regiões das contenções foi realizado com base em sondagens à percussão (SPT) com base na ABNT - NBR 6484(2001). Segundo os estudos geológicos realizados para o projeto da expansão do porto, na região onde foram projetadas as melhorias da capacidade do solo com a solução CPR, ocorrem sedimentos quaternários marinhos, os quais são caracterizados pela presença de materiais argilosos, arenosos finos e mal graduados.

Na Figura 3 apresenta-se o perfil geológico geotécnico com características do subsolo de fundação com ocorrência de depósitos de solo mole e presença de estratos de areia. Sobre o perfil natural do terreno existe um aterro com altura variando de 3m a 5m construído com material dragado do fundo do rio. Cabe salientar que este material será retirado para implantação do futuro terminal de contêineres.

O perfil natural é composto de camadas intercaladas de areia e argila mole. Os valores típicos de resistência nas camadas de areia variam entre $3 < NSPT < 7$ e, nas camadas de argilas entre $2 < NSPT < 6$. Estas características geotécnicas ocorrem até a profundidade de 35 metros, onde existe um estrato de areia mais resistente sobreposto a uma camada de argila mole. O impenetrável foi encontrado na cota aproximada de 46 metros.

Para dirimir sobre propriedades de resistência e deformabilidade foram realizados ensaios de pressiómetro (PMT) conforme ASTM D4719(1987). Os ensaios foram feitos antes e após a execução do CPR com objetivo de verificar as variações do módulo de rigidez (E) e resistência não drenada da argila (S_u) e, assim, comprovar a eficiência da técnica pelo melhoramento das propriedades do material. Na Figura 4 pode-se observar a locação dos furos SPT e PMT.



Figura 3. Perfil do subsolo do local.

2.1.2 Consolidação Profunda Radial

O método conhecido como consolidação profunda radial (CPR) apresenta-se como uma nova técnica de tratamento de solos moles. Desenvolvida pela empresa Engegraut, apresenta depósito de patente datado de 21/08/2009. Dentre as técnicas de tratamento de solos moles, a Consolidação Profunda Radial (CPR), é a que oferece melhor prazo executivo aliado ao baixo custo relativo, além da desejada

segurança neste tipo de serviço, considerando que todo o seu processo construtivo, baseia-se na redução/eliminação da compressibilidade do solo mole com adequado monitoramento geotécnico, sem qualquer inconveniente de geração de resíduos ou bota fora. Sua metodologia atende totalmente aos parâmetros de sustentabilidade ambiental.

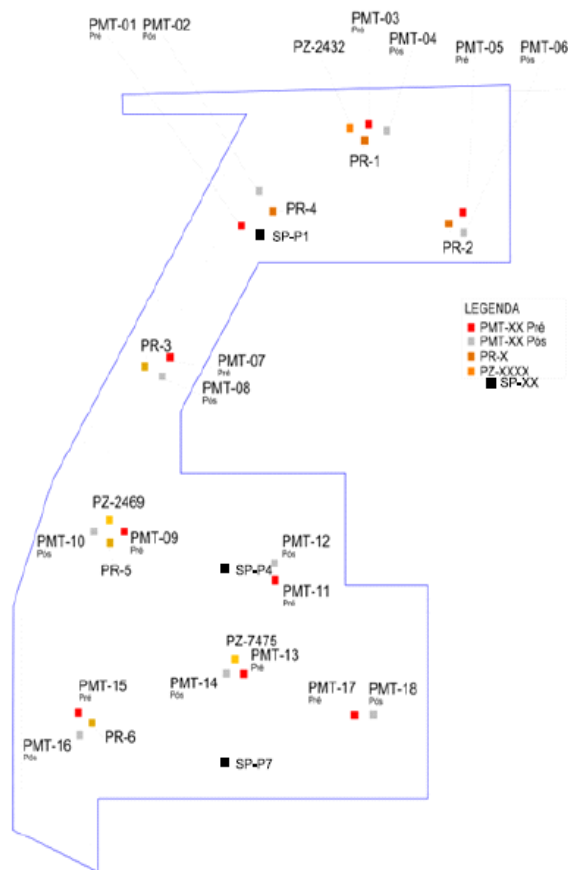


Figura 4. Localização dos ensaios de campo.

Inicialmente, crava-se uma malha de geodrenos, intercalada posteriormente, numa malha de tubos por onde se formarão os bulbos de compressão. A injeção é feita de baixo para cima, escalonadamente, a partir do solo resistente para cada metro de profundidade, assim, volumes de geogROUT, especialmente ajustado para o solo mole em questão, promovem o melhoramento das propriedades geotécnicas. A composição do traço do geogROUT leva em conta a presença de areias, siltes e aglomerantes da própria região, além de aditivos e, as pressões envolvidas nas formações dos bulbos são formuladas por análise numérica com base na granulometria do material, de modo a não fraturar o solo mole. Assim,

formando-se bulbos/"colunas", ao mesmo tempo em que mede-se, através de curvas pressiométricas (feitas antes e após a injeção de geogROUT), a conseqüente pressão de cada bulbo de compressão e o natural deslocamento provocado no solo a partir da ponta do tubo, induzindo os recalques imediato e primário.

A neutralização dos recalques imediato e primário é assegurada com o acompanhamento do máximo excesso da poropressão e sua dissipação. A confirmação do recalque secundário é comprovada através das tensões de fluência na curva pressiométrica de acompanhamento do serviço. A formação de bulbos de compressão via expansão de cavidades, confirma a ordem de deformações (recalques) impostas. Uma vez alcançada a resistência necessária, previamente programada, interrompe-se o tratamento naquela cota, suspendendo-se o tubo do geogROUT, repetindo-se o tratamento até chegar-se à superfície do solo mole.

Toda a mecânica executiva é acompanhada com monitoramento do excesso e dissipação da poropressão causada que, com as curvas pressiométricas pressão-volume, indica o grau de consolidação imposto. O resultado é o aumento substancial da resistência efetiva do solo mole, ao longo de toda a sua profundidade, de maneira proporcional à quantidade de dissipação da poropressão. Na Figura 5, pode-se ver a cravação do geodrenos e na seqüência a formação dos bulbos de compressão com geogROUT.

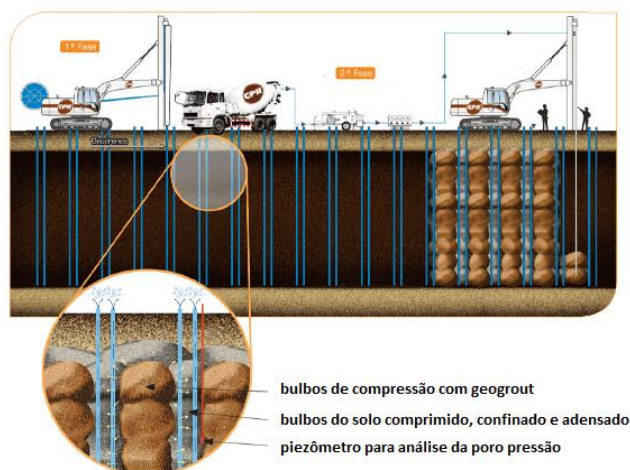


Figura 5. Detalhe do procedimento executivo do CPR (Engegrout, 2016).

Na obra analisada foram cravados mais de 9.200 geodrenos espaçados em 1,5 metros num formato triangular. Foram executados mais de 2.500 bulbos de compressão, espaçados entre si em 3,0 metros e consumindo um total aproximado de 14.000m³ de geogROUT. O tratamento de solo mole foi conduzido até a profundidade de 12,0 metros.

Na figura 6, numa vista em planta, mostra-se a malha de geodrenos e os bulbos de geogROUT e a coluna de solo comprimido pela expansão de cavidades promovida pela injeção do geogROUT. Esta técnica de melhoramento de solo mole explora a alta compressibilidade do material, impondo intensa alteração de tensões/deformações a cada metro de profundidade.

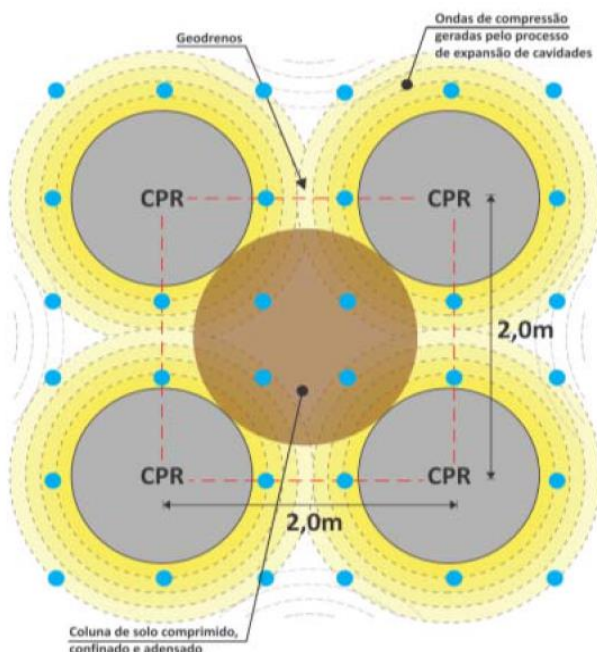


Figura 6. Desenho esquemático da coluna de solo comprimido e adensado no CPR (Engegraut, 2016)

2.1.3 Monitoramento dos recalques

O monitoramento dos recalques foi feito por meio de placas de recalque e piezômetros. O monitoramento com placas de recalque tem como objetivo avaliar o desenvolvimento de recalques, através de curvas recalque x tempo e velocidade x tempo. Foram instaladas seis placas de recalque. Os pontos de monitoramento, estabelecidos durante o tratamento, foram monitorados após o fim da obra. Para fazer

leituras de recalque (controle altimétrico) é utilizado o nível óptico, com precisão centimétrica, sendo estimado o milímetro. O referencial fixo, denominado RN, foi locado em região estável.

Para monitorar a pressão de água nos vazios do solo foram utilizados 3 (três) piezômetros (PZ) do tipo corda vibrante. As leituras dos piezômetros buscam confirmar a diminuição da poropressão ao longo do tempo e assim, garantir a minimização dos recalques do solo. Para instalação, foram executados pré-furos para, em seguida, introduzido o equipamento na camada de solo compressível. Conhecendo-se a poropressão u e a poropressão hidrostática u_0 , através das leituras com piezômetro, é possível monitorar os excessos de poropressão ($\Delta u = u - u_0$), um parâmetro geotécnico importante para análise de estabilidade do solo, conforme os princípios da equação de Mohr Coulomb para a resistência ao cisalhamento.

3 RESULTADOS OBTIDOS

Após a condução da técnica de melhoramento de solos CPR pode-se avaliar a eficiência da mesma pela interpretação das leituras das placas de recalques e dos piezômetros instalados ao longo do tempo e, principalmente da modificação das propriedades de resistência e deformabilidade através dos resultados dos ensaios PMT. Na Figura 7 podem-se observar os resultados recalque x tempo obtidos nas placas de recalques.

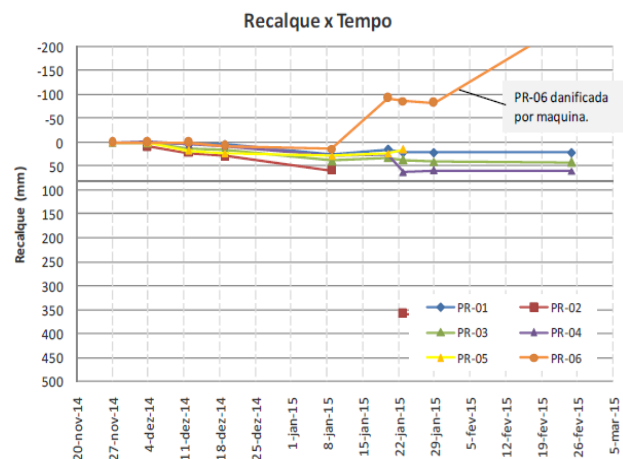


Figura 7. Monitoramento dos recalques através das placas de recalques (Engegraut, 2015).

Percebe-se pelo gráfico recalque x tempo que os níveis de recalque para as placas PR 01 a 06 foram bastante semelhantes, exceto para as placa PR-06 e PR-02 a qual apresentavam comportamentos semelhantes as demais, até a data de 08/01/15. A PR-06 foi danificada por uma máquina e a PR-02 sofreu um problema desconhecido.

O recalque estimado em projeto foi de 60 mm e as placas de recalque mediram:

- PR-01: teve recalque variando de 0 a 25 mm no período de 27/11/14 a 08/01/15. A partir desta data os valores das leituras foram praticamente constantes, podendo-se dizer que os recalques estão estabilizados;

- PR-02: teve recalque variando de 0 a 58 mm no período de 27/11/14 a 08/01/15. A partir desta data os valores das leituras foram praticamente constantes, podendo-se dizer que os recalques estão estabilizados;

- PR-03: teve recalque variando de 0 a 38 mm no período de 27/11/14 a 08/01/15. A partir desta data os valores das leituras foram praticamente constantes, podendo-se dizer que os recalques estão estabilizados;

- PR-04: teve recalque variando de 0 a 27 mm no período de 27/11/14 a 08/01/15. A partir desta data os valores das leituras foram praticamente constantes, podendo-se dizer que os recalques estão estabilizados;

- PR-05: teve recalque variando de 0 a 28 mm no período de 27/11/14 a 08/01/15. A partir desta data os valores das leituras foram praticamente constantes, podendo-se dizer que os recalques estão estabilizados;

- PR-06: teve recalque variando de 0 a 13 mm no período de 27/11/14 a 08/01/15. A partir desta data os valores das leituras foram praticamente constantes, podendo-se dizer que os recalques estão estabilizados.

O recalque monitorado foi de pequena magnitude, cerca de 60 mm, que se encontra estabilizado, conforme leitura de 25-fev-2015, trinta dias após CPR. Essa magnitude não é significativa, comparada à condição sem tratamento. Como mostrado anteriormente no perfil geológico geotécnico, o solo apresentava, antes do tratamento, cerca 7 m de camada compressível, com NSPT < 5.

A Figura 8 mostra velocidade dos recalques (mm/dia) ao longo do tempo de monitoramento.

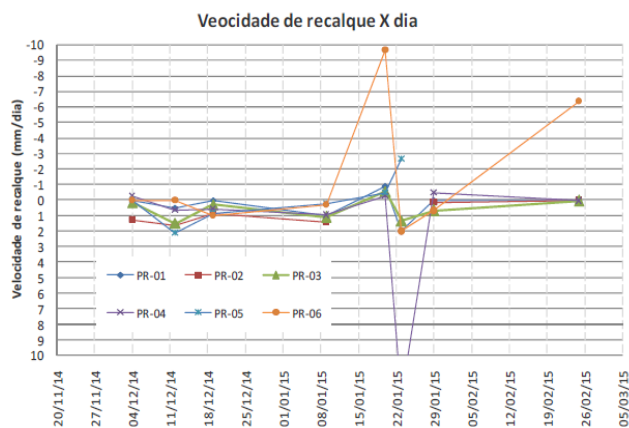


Figura 8. Velocidade do recalque (mm/dia) ao longo do tempo (Enggegraut, 2015).

Considerando-se a proposição de Terzaghi (1943) para estimativa de recalque sem tratamento, tem-se:

$$\Delta_h = \frac{H}{1 + e_o} \left[C_s \log \left(\frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{vo}} \right) + C_c \log \left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vm}} \right) \right] \quad (1)$$

- Solo normalmente adensado: $\sigma'_{vm}/\sigma'_{vo} = 1$

- Espessura de aterro média: 2,0 m ou $\Delta\sigma' = 40$ kPa

- $S_u / \sigma'_{vm} = 0,25$ (Almeida e Marques, 2010)

- Adotando, $S_u = 10$ kPa > $\sigma'_{vm} = 40$ kPa

- Limites para compressão: $0,35 < C_c/(1+e_o) < 0,45$ (Almeida e Marques, 2010)

- Tensão vertical geostática no meio da camada mole: $\sigma'_{vo} = 7 \times 4 = 28$ kPa

- Tensão vertical final no meio da camada mole: $\sigma'_{vf} = \sigma'_{vo} + \Delta\sigma' = 68$ kPa

Logo, o recalque (ρ) estimado sem tratamento CPR seria $564 \text{ mm} < \rho_{sem, trat.} < 726 \text{ mm}$. Desta forma, conclui-se que o a razão de recalque é $8\% < \rho_{CPR} / \rho_{sem, trat.} < 10\%$. Ou seja, a eficiência do tratamento foi 90% a 92%, atendendo às premissas de projeto. Contudo, cabe destacar que os parâmetros adotados para a estimativa de recalques não foram obtidos no local de estudo e sim, a partir de referências bibliográficas.

As Figuras 9, 10 e 11 apresentam as leituras de poropressão dos três piezômetros de corda vibrante ao longo do tempo de monitoramento.

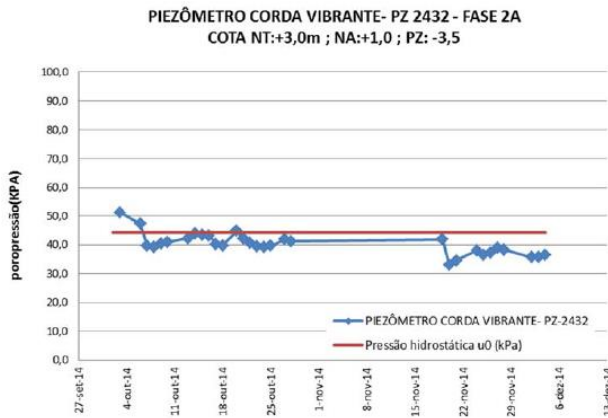


Figura 9. Resultado do piezômetro PZ 2432 (Enggegraut, 2015).

Os resultados do piezômetro PZ-2432 mostram que o excesso de poropressão está diminuindo com o passar do tempo. Os registros feitos antes, durante e após a formação dos bulbos de adensamento, mostram a eficiência dos geodrenos. De acordo com resultados obtidos, o residual do excesso de poropressão está sendo dissipado, reduzindo-o à condição hidrostática.

Os outros dois piezômetros (PZ-2469 e PZ-7475) mostram-se praticamente constantes, mas em um valor de poropressão 10 kPa maior que o valor da poropressão hidrostática, sendo esse valor não significativo para solos tratados.

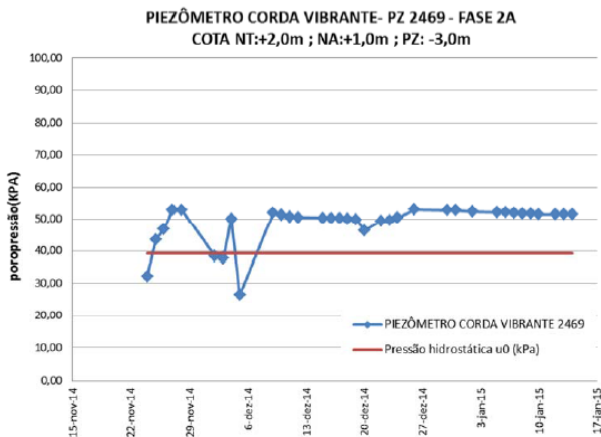


Figura 10. Resultado do piezômetro PZ 2469 (Enggegraut, 2015).

Os valores da poropressão não diminuíram o que indica que ainda existem resíduos de excessos a serem dissipados até atingirem a condição hidrostática. Um excesso de poropressão de 10 kPa, que equivale a uma sobrecarga de 50 cm de aterro e representa, em condições de não tratamento geotécnico, um

recalque de cerca de 20mm. Já para a condição tratada, este recalque corresponderia a 10% desta magnitude, ou seja, 2 mm, o que é insignificante.

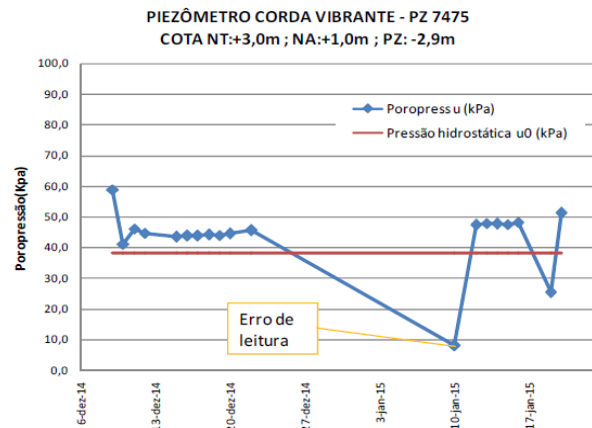


Figura 11. Resultado do piezômetro PZ 7475 (Enggegraut, 2015).

Os ensaios pressiométricos permitiram ampliar o entendimento da relação tensão x deformação no solo tratado. Foram realizados 18 ensaios PMT, sendo 9 antes do CPR e 9 após o CPR. Foram executados ensaios pressiométricos pré-CPR no meio da camada de solo mole, em profundidades que variaram entre 3,0 a 8,0 m. Os ensaios pós-CPR também ocorreram na mesma faixa de profundidade e próximos aos anteriormente conduzidos.

A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios pressiométricos.

Tabela 1. Resultados dos ensaios pressiométricos obtidos na obra

Ensaio	Condição	E_m (kPa)	P_L (kPa)	Classificação da Argila
PMT-01	Pré-CPR	753	121	Mole
PMT-02	Pós-CPR	3.145	246	Média
PMT-03	Pré-CPR	1.463	203	Mole
PMT-04	Pós-CPR	3.785	405	Média
PMT-05	Pré-CPR	428	41	Mole
PMT-06	Pós-CPR	4.412	45	Média
PMT-07	Pré-CPR	1858	196	Mole
PMT-08	Pós-CPR	2.780	493	Média
PMT-09	Pré-CPR	862	142	Mole
PMT-10	Pós-CPR	3.307	422	Média
PMT-11	Pré-CPR	1.541	166	Mole
PMT-12	Pós-CPR	3.346	453	Média
PMT-13	Pré-CPR	1.012	189	Mole
PMT-14	Pós-CPR	4.124	268	Média
PMT-15	Pré-CPR	1.629	238	Mole
PMT-16	Pós-CPR	4.144	439	Média

PMT-17	Pré-CPR	1.123	153	Mole
PMT-18	Pós-CPR	4.178	350	Média

Com base no princípio da expansão de cavidades, os ensaios pressiométricos mostraram que houve melhoria geotécnica no solo tratado, aumentando sua resistência, rigidez e, conseqüentemente, sua estabilidade a ação de futuros aterros e a sua capacidade de carga. A consistência que antes era fofa adquiriu, após tratamento, características de areia compacta ou argila média.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos valores médios de módulo de deformabilidade e de resistência não drenada dos ensaios CPR.

Tabela 2. Variação das propriedades de deformabilidade e resistência com a realização do CPR

Ensaio PMT	Módulo de Young – E (kPa)	Resistência não drenada – Su (kPa)	Classificação da Argila
Pré CPR	700 - 1100	12 – 29,2	Mole
Pós CPR	3000 - 4400	30,3 – 63,9	Média
Variação (%) média das propriedades	+ 411%	+ 229%	-

4 CONCLUSÕES

A execução de melhoramento de solos com baixa resistência tem se mostrado uma boa solução geotécnica, tendo em vista uma possível economia com fundações especiais que são caras, muitas vezes demoradas e de difícil acessibilidade. A obra de ampliação portuária da Portonave buscava uma solução geotécnica que tratasse dos problemas de estabilidade e deformação dos solos moles. Havia falta de espaço físico para movimentação e armazenamento de containers, o que provocava impacto na movimentação de cargas do porto, conseqüentemente, resultando em perdas financeiras. Assim, buscava-se uma técnica construtiva que eliminasse os recalques por adensamento num curto espaço de tempo.

A técnica CPR para tratamento dos solos moles da região se mostrou eficiente e rápida. Os bulbos de compressão gerados pela injeção

de geogROUT e, a dissipação da pressão neutra através do geodrenos instalados previamente possibilitou o reforço do solo mole. Este aspecto influenciou diretamente no projeto estrutural do pátio de armazenamento de cargas. Além disso, a aceleração dos recalques provocados pela dissipação do excesso de pressão neutra promoveu a eliminação de eventuais recalques num curto prazo de tempo.

Os resultados dos ensaios pressiométricos realizados antes e após o CPR indicam o melhoramento das propriedades de resistência e deformabilidade do material e as leituras das placas de recalques e dos piezômetros indicaram a estabilização dos recalques. Estas foram as características que fez a equipe de Portonave adotar este modelo de melhoramento de camadas compressíveis. Modelos como o CPR estão à frente de uma nova era da engenharia geotécnica, e estão oferecendo opções para novos estudos e assim incentivando a criação de novas técnicas que prometem revolucionar o mercado da engenharia de infraestrutura.

AGRADECIMENTOS

À empresa Engegraut Engenharia e ao Engenheiro Eduardo Macedo pelo apoio nos trabalhos de campo.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 6484 (2001): Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio, Rio de Janeiro: ABNT.
- ASTM - American Society for Testing and Materials D4719 (1987) - Standard Test Method for Prebored Pressuremeter Testing in Soils.
- Almeida, M. S. S., (1996). Aterros sobre solos moles – da concepção à avaliação do desempenho. Rio de Janeiro: UFRJ.
- Almeida, M. S. S. e Marques, M. E. S. (2010). Aterros sobre solos moles - projeto e desempenho. São Paulo, Oficina de Textos, 254 p..
- Engegraut (2015). *Relatório técnico da execução do CPR na obra PortoNave em Navegantes/SC.*
- Engegraut (2016). *Cases e Catalogos CPR – Engegraut Geotecnica e Engenharia. Disponível em <http://engegraut.com.br>. Acessado em 22/02/2016.*
- Terzaghi, K. *Theoretical soil mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1943. p. 510.