

Análises geofísicas avaliam serviços de reforço do solo mole de fundação, na construção da ampliação da Rodovia Anhanguera SP-330, km 88, próximo à Campinas, SP

Eng. M.Sc. Joaquim Correia Rodrigues
Engegraut, Rio de Janeiro, Brasil, joaquim@engegraut.com.br

Geólogo Marcelo de Queiros Jorge
Engegraut, Rio de Janeiro, Brasil, marceloqj@gmail.com

Engegraut Geotecnia e Engenharia Ltda, Rio de Janeiro, Brasil, joaquim@engegraut.com.br

RESUMO: Entre os municípios de Campinas e Valinhos, houve a necessidade de construção de três rodovias marginais, pela concessionária, anexo à Anhanguera, SP 330. Uma destas marginais, que exigiu um aterro de 10m de altura, contido por muro em terramesh, tinha como solo de fundação espesso depósito de solo mole. A técnica de tratamento foi o CPR, Consolidação Profunda Radial. Como agravante, no limite do terreno, junto ao pé do muro de contenção corria um gasoduto, de 800mm de diâmetro, também assente no solo mole, enterrado cerca de 1,5m de profundidade. A experiência da eficiência do tratamento, em quase 100%, ou seja, intolerância a recalques futuros devido a presença do gasoduto e as cargas dinâmicas inerentes a futura rodovia exigiram, além dos testes rotineiros de certificação, à base de análises piezométricas e pressiométricas, análise geofísica de superfície, com o desenvolvimento de um software específico para a análise volumétrica dos dados sísmicos pertinentes ao volume tratado, assegurando a certificação dentro do pouco conhecido limite das pequenas deformações geotécnicas.

PALAVRAS-CHAVE: Geofísica de superfície, pequenas deformações, rigidez, solo compósito.

1 INTRODUÇÃO

Melhoramento ou reforço de solos moles são serviços que visam modificar as características geotécnicas do solo de fundação como um todo, de forma volumétrica, de modo a atender a performances específicas desejadas. A tecnologia CPR de tratamento de solos moles, baseia-se na teoria da consolidação de solos, induzindo-o a perder água e volume de modo a modificar dramaticamente sua resistência via expansão de cavidades e, adicionalmente, aumentando sua rigidez. A tecnologia CPR de tratamento de solos moles é certificada, de forma específica, por ensaios pressiométricos e piezométricos, considerando-se a natureza do sistema, que baseia-se na consolidação do solo com base na teoria da expansão de cavidades. Neste contexto, desenvolveu-se um

software específico para o método geofísico de superfície para avaliar volumetricamente o solo, pós tratamento CPR, com base nos dados sísmicos do solo mole antes e após o reforço do solo. Este rápido e não invasivo método de investigação, foi utilizado com sucesso na certificação do reforço do solo mole tratado antes da construção de uma das rodovias marginais à Anhanguera, que levaria 10m de aterro, contido lateralmente por muro terramesh, devido a limitação do domínio do terreno vizinho. Ao longo da cerca do terreno vizinho corria um gasoduto de 800mm, enterrado a 1,5m de profundidade.

Todo este contexto, tendo depósitos de material mole como solo de fundação, deveria sustentar o aterro, o muro terramesh e impedir que deformações chegassem ao gasoduto enterrado no pé do muro, exigindo um módulo cisalhante pressiométrico, pós-CPR, bem

superior aos normalmente exigidos, devido a exigência da inexistência de níveis de deformações. Esta necessidade imperiosa de ausência de recalques, associado às cargas dinâmicas inerentes, objetivou a necessidade de sondagem sísmica de certificação, relacionada à velocidade de onda cisalhante, V_s , e o módulo cisalhante, G , parâmetros que trabalham dentro do campo das diminutas deformações inferiores a $10^{-3}\%$.

Este documento apresenta os dados da geologia do terreno onde seria construído esta rodovia marginal, do projeto CPR, da complexidade dos depósitos de solo mole presentes, da campanha de ensaios padrão de certificação e da campanha de análise geofísica para a obtenção da velocidade de ondas cisalhantes representando o mais importante parâmetro geotécnico do solo, quando se trata de certificação do melhoramento de solos argilosos, com vistas a construção de estradas que sofrem efeito de cargas dinâmicas dos veículos leves a pesados, com a necessidade imperiosa da obtenção de altos módulos de cisalhamento devido a exigência de ínfimo nível de deformações.

2 CONDIÇÕES SUBSUPERFICIAIS DO LOCAL

Ensaio penetrométrico SPT, CPT e CPTU e Vane Test, métodos geotécnicos de certificação, traduziram médias pontuais, o que rotineiramente não reflete as características do perfil de todo o volume tratado. Segundo Robertson et. al. (1983), pesquisando métodos de certificação de reforço de solos, a presença maciça de material argiloso/siltoso afeta a investigação do nível de reforço obtido, particularmente com relação à resistência de ponta do CPT, que é relativamente insensível como medidor de incrementos de resistência e rigidez.

A Anhanguera (SP-330) é uma rodovia estadual de São Paulo, sob concessão da CCR Autoban. Entre os municípios de Campinas e Valinhos, houve a necessidade da construção de diversas marginais à rodovia, e assentados sobre solos moles. No km 89 desta rodovia (figura 1), localizada próximo à Campinas, houve a

necessidade da construção de uma das marginais, denominada trecho N3.

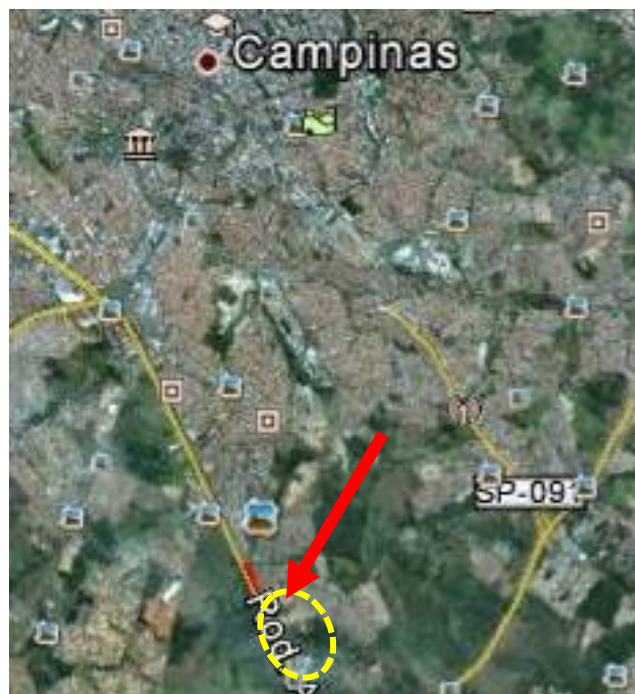


Figura 1. O destaque na imagem mostra a localização da rodovia Anhanguera e o trecho da construção da rodovia marginal em questão.

Sondagens de caracterização SPT e análises geológicas do local caracterizava um vale, próximo a um curso d'água e, com o passar do tempo, houve deposição de material coluvionar jovem não consolidado. Configurou-se a presença de um depósito de solo mole. Foram necessárias, no entanto, várias sondagens SPT e rotativas para identificar um segundo depósito, mais abaixo, sob uma formação de pedregulhos situados entre 8m e 12m de profundidade. A caracterização típica do solo de fundação encontra-se na sondagem abaixo (figura 2).

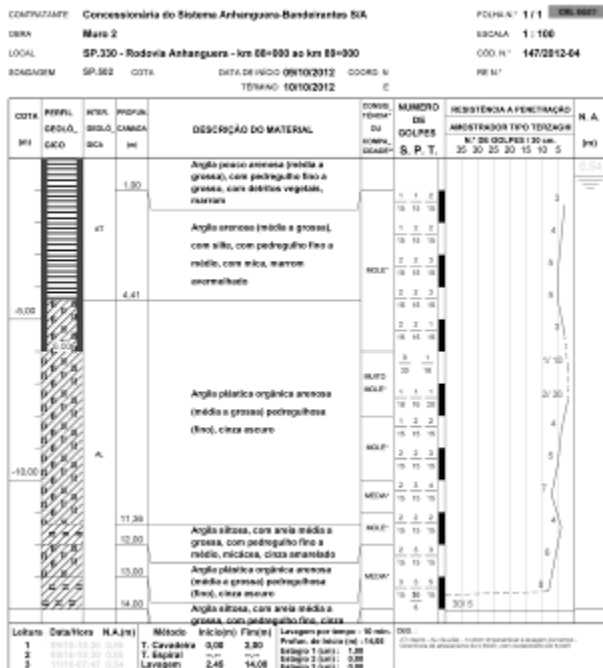


Figura 2 – Sondagem SP 502: boletim de sondagem típico do trecho N3.

3 ESTUDOS PARA REFORÇO DO SOLO

A simples presença de depósitos de solos moles no local já exigiria serviços especializados de reforço do solo, como pode ser visto nas análises de estabilidade apresentadas nas figuras 3 (antes do tratamento) e 4 (depois do tratamento).

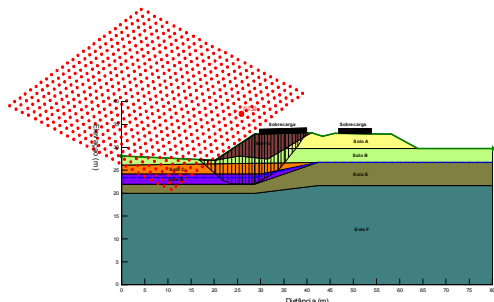


Figura 3. Superfície crítica de ruptura (FS_{mínimo}) para a seção transversal da estaca 2594+000, caso nenhum tratamento fosse feito.

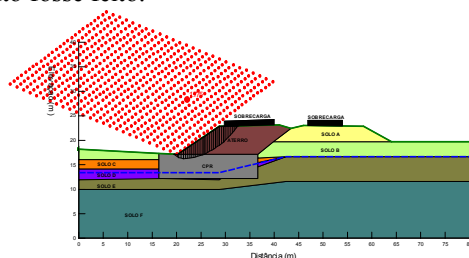


Figura 4. Superfície crítica de ruptura (FS_{mínimo}) para a seção transversal da estaca 2594+000, com a solução CPR.

No entanto, a presença de um gasoduto com 800mm de diâmetro enterrado no local, assente sobre este depósito complicava ainda mais o estudo, considerando-se a necessidade do maior nível de estabilidade para o aterro de 10m a ser construído e a mínima tolerância a deformações após concluído o projeto. Uma difícil situação, ilustrada na figura 5, adiada até então.



Figura 5. O canteiro de obras do CPR, observando a linha pontilhada, onde passa o gasoduto. A direita o rio que também teve tratamento CPR.

Diversas modalidades de reforço de solos foram analisados. A eficiência de cada uma foi analisada baseada, primeiramente, na estabilidade. Em segundo, a mínima surgência de recalques, considerando-se a presença do instável gasoduto situado no pé do futuro muro de contenção. Em terceiro, à logística do local, considerando-se as dificuldades construtivas de cada metodologia frente a proximidade do instável gasoduto e da própria Anhanguera, além da travessia do rio, cujo solo de fundação também precisava de reforço. Obrigatoriamente, haveria a necessidade premente de instrumentação geotécnica, particularmente inclinômetros para analisar o nível de deformações, causado no reforço do solo, e que poderiam chegar a desestabilizar o gasoduto e também o próprio talude da Anhanguera. Técnicas de reforço, que apresentam contraste de rigidez entre o material das colunas e o solo vizinho, como atraem cargas adicionais, devido ao arqueamento do solo, foram desconsideradas. Estas técnicas acumulam tensões a partir do arqueamento do solo, fazendo com que as colunas deformem ou, simplesmente, ocorriam deformações intermediárias às colunas. Na figura 6, está apresentado o projeto, em corte da rodovia.

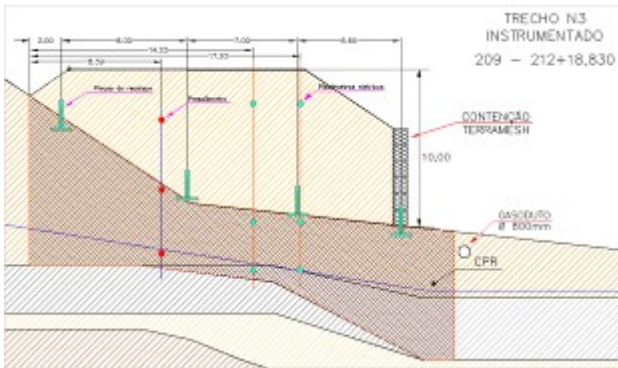


Figura 6. Projeto, em corte, da rodovia marginal, destacando-se o muro da construção, o gasoduto abaixo e o solo de fundação tratado com CPR.

A escolha pelo CPR baseou-se em seu produto final: um solo compósito (figura 7), que responde de maneira igual frente ao carregamento. O CPR baseia-se na teoria geotécnica de consolidação do solo, induzindo-o a perder água em meio artificial drenante e, por isso, volume, modificando drasticamente sua resistência e, conseqüentemente, aumentando sobremaneira sua rigidez.

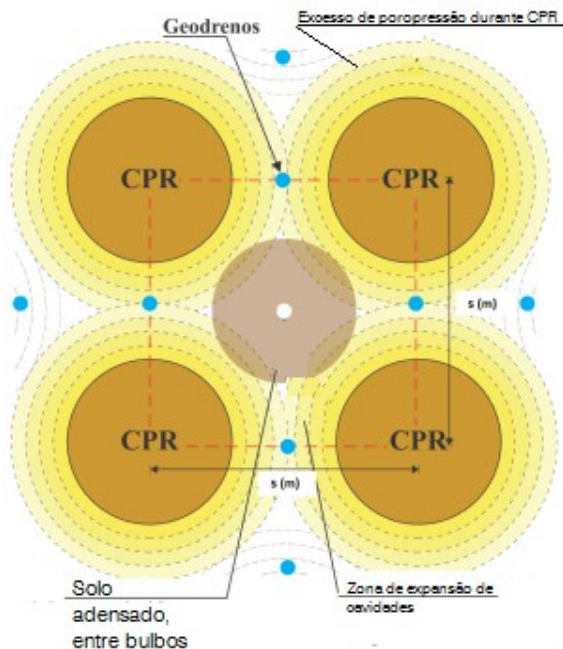


Figura 7 - Célula unitária representativa do CPR (Almeida e Marques, 2010).

Os bulbos formados, de baixo para cima, via expansão de cavidades, comprimem o solo fazendo-o drenar, induzindo recalques controlados a cada metro do depósito mole pela natural neutralização de sua compressibilidade. O material rígido dos bulbos incrementam ainda mais a rigidez do solo compósito.

4 A CERTIFICAÇÃO DO SOLO TRATADO

Como tratamento geotécnico, o CPR necessita de instrumentação geotécnica de acompanhamento no sentido de avaliar a evolução tanto do excesso/dissipação da poropressão, com piezômetros de cordas vibrantes, que garantem o aumento das tensões efetivas, quanto da rigidez do solo resultante com análises pressiométricas que, adicionalmente, também conferem o aumento da resistência do solo. Todos estes ensaios são corriqueiramente realizados durante atividades do CPR. Abaixo, apresenta-se os resultados.

O Módulo pressiométrico equivalente (G_{eq}):

A solução CPR é composta por um mix de bulbos de solo adensados, comprimidos e confinados por bulbos de adensamento com geogROUT. A rigidez do solo compósito resistente é representada pelo módulo equivalente (G_{eq}), conforme área da célula unitária mostrada na figura 7 anterior. Assim, a seguir, apresentamos o módulo pressiométrico médio alcançado, pós CPR, para obtenção do módulo do solo compósito final:

$$G_{eq} = 74,7 \%G_g + 25,3 \%G_s$$

Sendo,

$$G_{s,pós\ CPR} = 8.000\text{ kPa} \text{ e } G_g = 240.000\text{ kPa}$$

Logo,

$G_{eq} = 66.696,0\text{ kPa}$ Este módulo de cisalhamento convergendo a uma formação de argila dura.

O módulo de cisalhamento equivalente (G_{eq}), estabelece uma relação entre os módulos do solo tratado (G_s), na forma de "colunas", e das "colunas" de GeogROUT (G_g). Esta relação é representada por uma média ponderada entre os bulbos de solo adensado e bulbos de adensamento. O módulo pressiométrico equivalente, representa o solo compósito pós-CPR.

5 A CERTIFICAÇÃO COM ANÁLISE SÍSMICA

Na engenharia geotécnica utiliza-se, extensamente, métodos geofísicos, como nos casos de Imai and Yoshimura (1976), Tathan (1982), Willkens et. al. (1984), Eberhart - Phillips et. al. (1989), Keceli (1990), Jongmaus (1992), Sully and Campanella (1995). Campanella e Stewart (1992) determinaram diversos parâmetros geotécnicos por processamento sísmico, enquanto Butcher e Powell (1995) forneceram técnicas geofísicas para investigar parâmetros geotécnicos relacionados à rigidez do solo. Uma expressão empírica, bastante confiável, é proposta por Abd El-Rahman et. al. (1992), para obter a capacidade de carga do solo, utilizando-se algoritmo com a velocidade de ondas cisalhantes. Massarsch (2004) determinou propriedades de deformação de solos argilosos a partir de testes sísmicos.

Na tabela 1, apresenta-se classificação de solos de acordo com a velocidade de propagação de ondas cisalhantes (V_s) (EN, 1998).

Tabela 1. Classificação do solo da Eurocode 8 (EN-1998-1, 2004) de acordo com o V_s .

Classe de solo	Descrição	Características (m/s)
A	Formações rochosas	$v_s > 800$
B	Areia muito compacta / argila dura	$360 < v_s \leq 800$
C	Areia pouco compacta / argila média	$180 < v_s \leq 360$
D	Solo sem coesão / argila mole	$180 > v_s$

Constata-se, atualmente, que a obtenção em campo da velocidade de ondas cisalhantes, representa a condição geotécnica mais fidedigna e segura do estado do solo, com relação a resistência ao cisalhamento de argilas e o módulo cisalhante.

Para o caso em questão, uma rodovia marginal à Anhanguera, projetada para ser construída sobre solo mole e receber um aterro de 10m de altura, contido por muro em terramesh, em cuja base passa um gasoduto exigiu, além dos testes geotécnicos rotineiros de certificação piezométricos, pressiométricos, testes de carga e placas de recalque, a análise do comportamento das propriedades dinâmicas do solo de fundação,

considerando-se que cargas dinâmicas na rodovia tem impacto significativo em seu desempenho, no aterro base e, conseqüentemente, no solo de fundação.

Testes *in situ*, obrigatórios em todo reforço de solo com CPR, antes e após, tem grande vantagem de visualizar seu estado de tensões, as verdadeiras tensões efetivas atuantes com a drenagem. No entanto, as propriedades mecânicas do solo, relacionadas ao carregamento dinâmico, estão associadas à velocidade de onda cisalhante (v_s) e ao módulo cisalhante (G). Estas duas características do solo também são utilizadas corriqueiramente em problemas não dinâmicos. O quase nulo nível de deformações, exigido no solo mole, pós reforço CPR, portanto, exigia um tipo de teste associado a propriedades tipicamente de baixa deformação, somente alcançado com a propagação de ondas.

Nesta obra, foram analisadas várias fontes de excitação do solo, no sentido de induzir ondas sísmicas de amplitudes relativas e mensuráveis com baixíssimo nível de deformação, menor que $10^{-3}\%$. Este baixo nível de deformações permite acessar a teoria de elasticidade, associando as medidas obtidas com as propriedades mecânicas na região linear do seu gráfico. Para um nível de deformações intermediário, em torno de $10^{-2}\%$, a resposta começa a ficar não linear. Para grandes deformações, maiores que $10^{-1}\%$ até 5%, o comportamento dinâmico do solo é totalmente não linear obtendo deformações permanentes ou plásticas, eventualmente alcançando a condição instável.

A análise geofísica realizada induz deformações cisalhantes menores que $10^{-4}\%$, e a velocidade de ondas cisalhantes, v_s , é usada para obter o módulo cisalhante G , através de expressão 1:

$$G = \rho \cdot v_s^2 \quad (1)$$

Onde ρ é a densidade do solo.

6 PANORAMA DO MÉTODO SÍSMICO EMPREGADO

Ensaio geotécnicos de campo ou *in situ* são, sobretudo, preferidos quando se trata de investigar solos argilosos moles. O ensaio geofísico "análise do espectro das ondas de superfície", (SASW em inglês) é um ensaio não destrutivo e não invasivo

que faz uso da natureza dissipadora das ondas de superfície, que tem a propriedade de se propagar em perfis de solos com multicamadas dando, como resultado, um perfil das velocidades de ondas cisalhantes. O fenômeno da dispersão surge a partir das mudanças das propriedades de rigidez do solo, decorrentes da natureza de suas camadas e, conseqüentemente, impondo diferentes velocidades de ondas e uma diversificação de frequências e comprimentos de ondas. Por exemplo, uma onda de superfície com baixa frequência, e que tem grande comprimento de onda, consegue tensionar o solo a grandes profundidades.

A análise do espectro é utilizada para separar as ondas em frequências e comprimentos de ondas, com o objetivo de determinar a curva de dispersão do local analisado. A partir daí, utiliza-se um procedimento analítico para combinar a curva de dispersão encontrada, com um determinado sistema de solo multicamadas, em que se apresentam espessuras e rigidez, gerando um perfil das velocidades de ondas de cisalhamento do solo do local e, conseqüentemente, seus módulos de cisalhamento.

A certificação do reforço do solo, é feita pela avaliação da condição da rigidez de suas camadas, representada tanto pelas velocidades de onda de cisalhamento quanto pelos seus módulos cisalhantes. Estes dois parâmetros refletem, de maneira precisa e sem qualquer perturbação física, o real estado de tensões efetivas das camadas do solo mole, independentemente da condição da poropressão.

7 O SISTEMA GEOFÍSICO EMPREGADO

Considerando-se as particularidades do local da obra, junto a Rodovia Anhanguera e a logística do avanço dos serviços CPR no local, projetou-se uma linha de pesquisa sísmica (linha 1), para a avaliação das condições originais da rigidez do solo, fora da área tratada, exatamente 5m distante da cerca e dentro do terreno vizinho, que encontrava-se na condição primitiva, sem qualquer indício de construção. Projetou-se uma segunda linha de pesquisa (linha 2), paralela a da condição original do solo, longitudinalmente e no meio da área tratada. A figura 8 ilustra o posicionamento das linhas de análises sísmicas.

Todos os pontos de análise, pertinentes a cada linha de pesquisa, totalizaram 15m de comprimento cada, perfazendo-se em seguimentos consecutivos de 1m de comprimento para determinar o perfil 1D da velocidade de onda cisalhante, para profundidades de 10 e 20m. Posteriormente, todos estes perfis encontrados foram combinados para determinar o perfil final das velocidades de ondas cisalhantes 2D.



Figura 8. O posicionamento das duas linhas de análises sísmicas, uma no eixo da futura estrada e a outra fora do domínio da concessionária, dentro do terreno vizinho.

As figuras 9 e 10 mostram janelas do programa WinSASW com as aquisições de dados da geofísica do local.

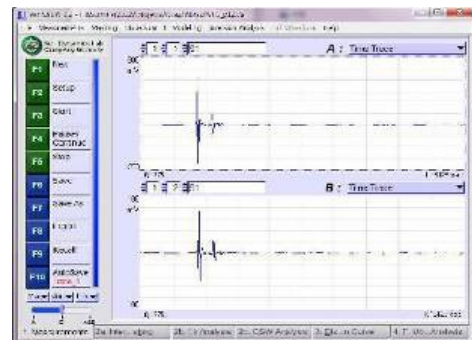


Figura 9. Ondas receptivas dos geofones 1 e 2 para a condição da fonte de energia com marreta.

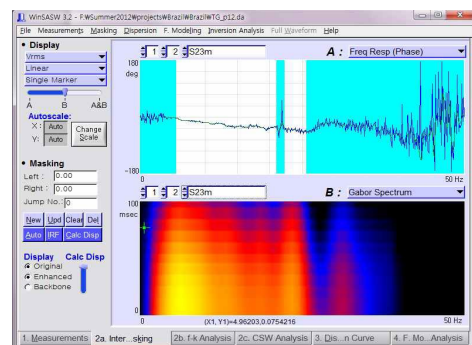


Figura 10. Ondas receptivas dos geofones 1 e 2 para a condição de fonte de energia com equipamento sobre esteira.

Em cada linha de pesquisa, três segmentos adjacentes foram medidos simultaneamente, utilizando-se 4 geofones para captar a propagação de ondas. A frequência ressonante de cada geofone é de 2Hz e seu posicionamento no solo foi feito com todo o cuidado, de modo a ter o melhor contato possível.

Utilizou-se duas fontes de geração de energia de ondas de superfície, para frequências preestabelecidas, tendo em vista a particularidade receptiva do solo argiloso mole. Utilizou-se, primeiramente, uma marreta e uma base metálica para produzir energia com alta frequência. Posteriormente, utilizou-se um equipamento pesado sobre esteiras, como fonte de energia de baixa frequência necessária a aprofundar a geração de ondas no solo.

As vibrações introduzidas no solo, e captadas pelos geofones, foram enviadas para um sistema de processamento de dados, composto pelo sistema receptor, software de interpretação e laptop específico (figura 11).



Figura 11. Laptop e sistema sísmico de interpretação de dados.

8 CERTIFICANDO O REFORÇO DO SOLO PELA ANÁLISE SÍSMICA

Ao longo das duas linhas de investigação, foram realizados 30 testes, determinadas as velocidades de fase e feitas as análises de inversão para os perfis das velocidades de ondas cisalhantes, em uma e duas dimensões, comparando-se as velocidades e os módulos cisalhantes na condição antes e após o CPR. Na figura 12, pode-se ver a situação após a construção da rodovia marginal.



Figura 12. Situação da marginal totalmente concluída, observando-se a diferença de nível do terreno original situado abaixo da cerca no lado esquerdo da foto.

Inicialmente, procedeu-se a determinação das velocidades de fase, onde os espectros de frequência captados são interpretados adequadamente para eliminar ruídos e perturbações indesejáveis. A curva de dispersão das velocidades de fase, assim determinada, é reduzida a uma curva de dispersão representativa com menor número de dados, a qual é utilizada para a análise da inversão, de modo a determinar o perfil das velocidades de ondas cisalhantes correspondentes. Estas velocidades são facilmente convertidas para módulos cisalhantes através da equação 2:

$$G = \rho \cdot v_s^2 \quad (2)$$

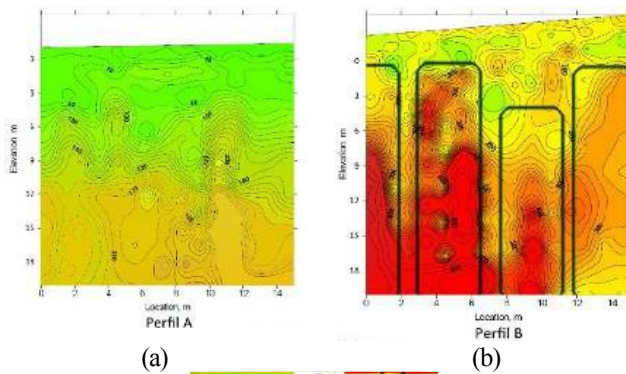
Onde ρ é a densidade do solo, estimado utilizando-se a equação especificada pela Universidade Chung-Ang (equação 3):

$$\rho \text{ (kg / m}^3\text{)} = 3,333 = \frac{V_s}{1500} + 1,467 \quad (3)$$

Uma vez determinada as séries dos perfis de velocidade cisalhante em 1D, nos segmentos consecutivos, fez-se a combinação para gerar os perfis em 2D, de modo a avaliar a performance do tratamento CPR, comparando-se os perfis da linha 1, do solo original, com a linha 2, tratada com CPR. A interpretação da imagem em 2D, revela a presença de aterro recente, que se estende as duas áreas analisadas, tendo cerca de 2 a 4m de espessura. A identificação do solo compósito, produto final do tratamento CPR fica claro na medida em que aparecem velocidades de ondas cisalhantes que variou em torno de 360m/s, bem diferentes das presentes nas camadas de solos moles existentes, que variavam em torno de 120m/s.

Fica evidente que as tonalidades vermelho alaranjadas verticais, variando de 2m a 12m, representam o solo compósito misto de colunas de

solo adensado, comprimido e confinado por bulbos de geogROUT expandidos.



Figuras 12. (a) perfil A representa a condição original do solo; (b) perfil B representa o solo tratado com CPR.

9 CONCLUSÃO

Constata-se, atualmente, que a obtenção das velocidades de ondas cisalhantes representa a condição geotécnica mais fidedigna e segura do estado do solo, quando se trata de certificação do solo pós reforço por CPR. As condições críticas do solo de fundação, agravadas pela presença de um gasoduto no pé do futuro aterro, com cerca de 10m de altura, contido com muro terramesh, passando sobre uma galeria de um curso d'água, as cargas dinâmicas na rodovia e, principalmente, o baixíssimo nível de deformações exigida para o solo pós CPR exigiram, além dos testes geotécnicos in situ de certificação a base de análises piezométricas, pressiométricas e placas de recalque, a análise do comportamento das propriedades dinâmicas do solo de fundação, tipicamente dentro do pouco conhecido campo das pequenas deformações, com a obtenção das velocidades de ondas cisalhantes, v_s , e o módulo cisalhante, G , com resultados muito interessantes e de grande valor para o setor que envolve o reforço de solos moles.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos colegas de trabalho que contribuíram para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- Abd El-Rahman, M.M., I. Setto, and A. El-Werr (1992), Inferring mechanical properties of the foundation material at the 2nd industrial zone, Sadat city, from geophysical measurements, Egyptian Geophysical Society, Proceedings of 9th Annual Meeting, 206-228
- Almeida, M. S. S. e Marques, M. E. S. (2010). Aterros Sobre Solos Moles – Projeto de Desempenho. Ed. Oficina de Textos
- Butcher, A. P., Powell J. J. (1995), Practical considerations for field geophysical techniques to used assess ground stiffness, Proc. Int. Conf. on Advances in Site Investigation Practice, ICE London, March 1995, Thomas Telford, 701-714
- Campanella, R. G., Stewart, W. P. (1992), Seismic cone analysis using digital signal processing for dynamic site characterization, *Canad. Geotech. J.* 29, 3, 477-486
- Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D., Rice, A. (1986) Seismic Cpt to Measure in Situ Shear Wave Velocity. *Journal of Geotechnical Engineering* 01/1986; 112(8). DOI: 10.1061 / (ASCE) 0733 – 9410 (1986) 112 : 8 (791).
- Eberhart-Phillips, D., D.-H. Han, and M.D. Zoback (1989), Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity, and clay content in sandstone, *Geophysics* 54, 82-89, DOI: 10.1190/1.1442580
- EN-1998-1 - European Standart (2004), Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1 : General rules, seismic actions and rules for buildings
- Imai, T., Yoshimura, M. (1976), The relation of mechanical properties of soils to P- and S-wave velocities for soil ground in Japan, Urana Research Institute, OYO Corporation, Tokyo, Japan (internal publication), <http://www.geophysical.com>, e-mail: prosght@oyonet.oyo.co.jp
- Jongmans, D. (1992), The application of seismic methods for dynamic characterization of soils in earthquake engineering, *Bull. Eng. Geol. Environ.* 46, 63-69, DOI: 10.1007/ BF02595035
- Keçeli, A.D. (1990), Determination of bearing capacity of soils by means of seismic methods *Geophys.J.* 4 83-92 (in turkish)
- Massarsch, K.R. (2004), Deformation properties of fine-grained soils from seismic tests. Keynote lecture, Inter. Conf. on Site Characterization, ISC'2, 19-22 Sept. 2004, Porto, 133-146
- Sully, J.P., and R.G. Campanella (1995), Evaluation of in situ anisotropy from crosshole and downhole shear wave velocities measurements, *Geotechnique* 45, 2, 267-282
- Tatham, R.H. (1982), V_p/V_s and lithology, *Geophysics* 47. 3, 336-344, DOI: 10.1190/ 1.1441339
- Wilkens, R., Simmons, G., Caruso, L. (1984), The ratio V_p/V_s as a discriminant of composition for siliceous limestones, *Geophysics* 49, 11, 1850-1860, DOI:10.1190/1.1441598