



# Soft Soil Brazilian Review

**18 Fundações**  
Atrito negativo em estacas  
cravadas em solos moles

**26 O poder orgânico do solo**  
Conheça os solos  
orgânicos e turfas II

**36 Solos moles**  
Dimensionando o  
melhoramento do solo mole  
com Geoenrijecimento I

## A PRÁTICA DO MELHORAMENTO DE SOLOS MOLES COM GEOENRIJECIMENTO PARA RODOVIAS

Conheça as “regras” para construção de rodovias sobre solos moles utilizando a principal técnica de melhoramento de solos moles.



## INFORMAÇÕES SOBRE MELHORAMENO DE SOLOS MOLES?

SOFT SOIL GROUP

### O SOFT SOIL GROUP ajuda você a tocar sucessos

Melhorar solos moles exige conhecimentos geotécnicos práticos e teorias sofisticadas. Cada obra é um caso específico que exige solução diferenciada. Assista nossos Webinars para adquirir estas informações.



SOFTSOIL BRAZILIAN REVIEW • Novembro / Dezembro 2018

[www.softsoilgroup.com.br](http://www.softsoilgroup.com.br)



### OBRA

## A prática do melhoramento de solos moles 04 com Geoenrijecimento para rodovias

Por Joaquim Rodrigues

### FUNDAÇÕES

## O problema do atrito negativo nas estacas cravadas em solos moles 18

Por Alessandro Cirone

### O PODER ORGÂNICO DO SOLO

## Conheça os solos orgânicos e turfás II 26

Por Thomas Kim

### DIMENSIONAMENTO

## Dimensionando o melhoramento do solo mole 36 com Geoenrijecimento I

Por Patrícia Tinoco

## EDITORIAL

Sempre que chega a hora de escrever de carta para você, amigo, procuro refletir sobre toda a pesquisa e esforço, os acertos e erros que tivemos ao longo dos dois meses que dispomos, para apresentar o mais atual e, por que não dizer, inspirador conteúdo de informações sobre solos moles, seja de obras, dimensionamento, fundações, certificação, etc. É necessário muita conversa, consulta e investigação, exatamente o que gostamos.

Agora imagine que, além da revista digital bimestral, desafiamo-nos ainda mais para apresentar, diariamente, no site [www.softsoilgroup.com.br](http://www.softsoilgroup.com.br) as principais notícias sobre solos moles. Por sinal, você conhece nosso site? Espero que sim. Caso não esteja entre os quase 750 leitores que acessam o Soft Soil Group por mês, aí vai uma dica: entre no site pelo computador ou celular e aceite receber nossas notificações. Praticamente todos os dias você encontrará sugestões práticas, para obras de solos moles, sejam particularidades executivas ou de dimensionamento, além de como resolver problemas de obras e casos práticos. Tudo elaborado por profissionais especializados na geotecnia do solo mole.

Tenho a imensa felicidade de contar que a Soft Soil Brazilian Review é a única revista mundial que aborda aspectos específicos, com destaque e, por que não dizer, com a notabilidade de serem solos brasileiros.

Entendemos solos moles como aquela condição inevitável, que todo empreendedor, construtor e geotécnico cada vez mais depara, defronta e descobre, sempre com sabor de desafio.

Com relação a esta edição, dê uma olhada na importância do conteúdo da matéria "A prática do melhoramento de solos moles com Geoenrijecimento para rodovias", onde analisa-se profundamente procedimentos para seleção estratégica para melhoramento do solo, pré-analisando-se o futuro comportamento do pavimento rodoviário, à luz de um importante caso de obra na rodovia Anhanguera. No artigo "Opinião", apresenta um problema sério de má concepção executiva para melhoramento de solos argilosos moles com "injeção", que algumas empresas ainda empregam. No artigo "O problema do atrito negativo nas estacas cravadas em solos moles" evidencia-se o efeito colateral ou reação adversa da utilização de estacas em solos moles: a opção do melhoramento do solo com Geoenrijecimento será, sempre, melhor. "Conheça os solos orgânicos e turfás II" expõe a necessidade de informar que pouco se sabe neste contexto e que, efetivamente contribui para a condição do solo mole. E, finalmente, a desejável matéria que informa como dimensionar o melhoramento do solo com Geoenrijecimento. Obrigado.

Joaquim Rodrigues

# A PRÁTICA DO MELHORAMENTO DE EM SOLOS MOLES COM GEOENRIJECIMENTO EM RODOVIAS

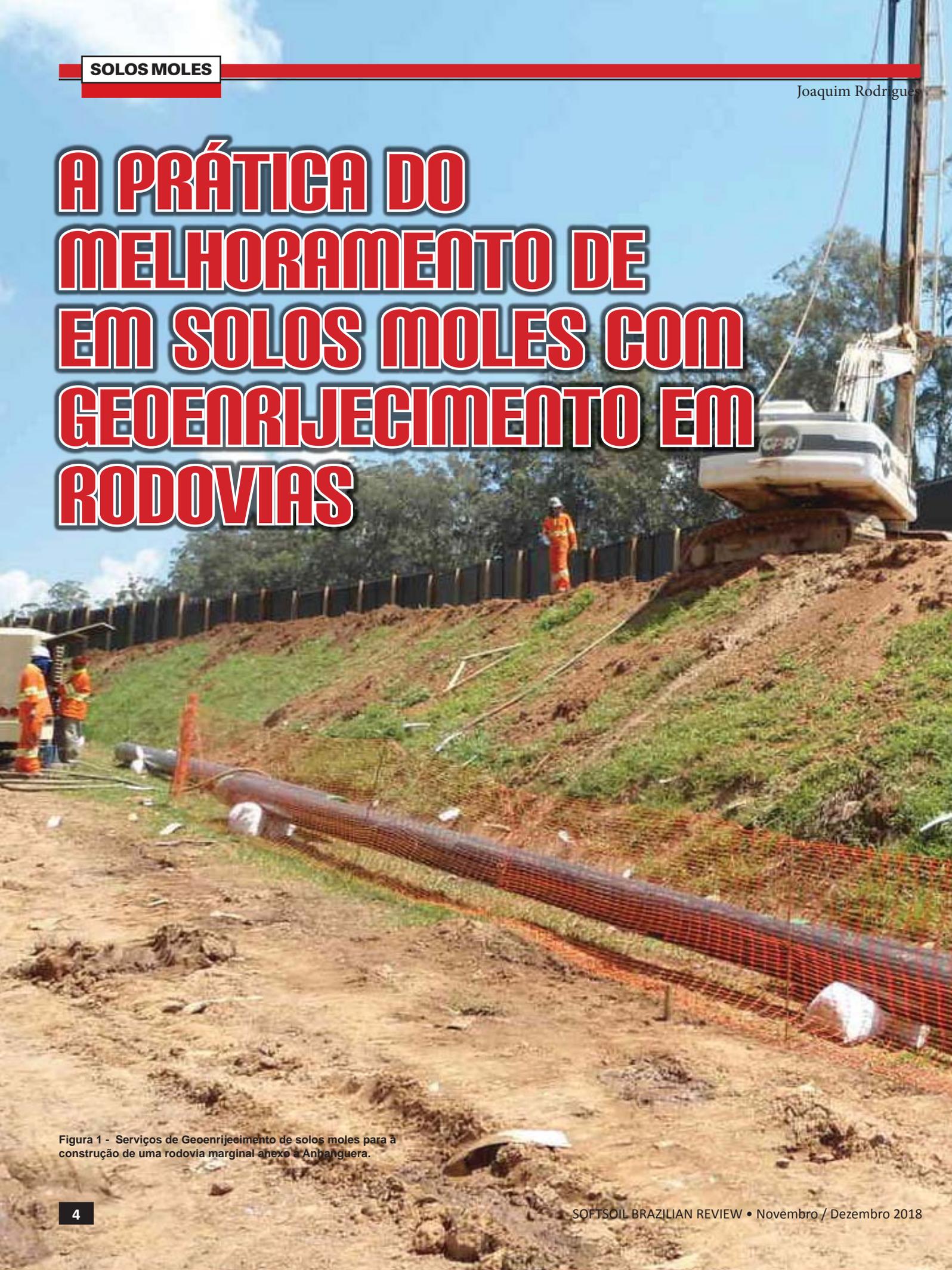


Figura 1 - Serviços de Geoenrijecimento de solos moles para a construção de uma rodovia marginal anexo a Anhanguera.

**A** construção de estruturas rodoviárias devem seguir “regras” pertinentes ao terreno nas quais serão construídas, de modo a garantir o sucesso do empreendimento. A presença de camadas de depósitos de solos argilosos moles, sejam orgânicos ou mesmo turfosos é uma constante nos dias de hoje, para a construção destes empreendimentos, considerando-se a escassez de terrenos adequados.

### **Melhoramento de solos moles objetivando a construção de rodovias**

Segundo o manual de implantação básica de rodovia do DNIT, 2010, aterro é definido como “segmento de rodovia cuja implantação requer depósito de materiais provenientes de cortes e/ou de empréstimos, no interior dos limites das seções de projeto (off-sets) que definem o corpo estradal”.

Quando o terreno apresenta solos moles, o melhor é, primeiramente, saber a extensão do problema, antes de iniciar qualquer trabalho. Isto pode ser feito com um bom plano de sondagens, que tem a finalidade de mostrar a profundidade da camada de baixa resistência e sua natureza.

As principais considerações geotécnicas para projeto e construção de aterros são a estabilidade e o recalque do solo de fundação, o impacto destes dois fatores, nas necessidades do desenvolvimento e no tempo da sua construção, além do embate com instalações existentes e estruturas vizinhas. A investigação deve-se estender, pelo menos, de 2 a 3 vezes a largura do aterro, para ambos os lados e para a parte superior ou inferior dos taludes adjacentes do aterro. Esta correta avaliação determinará a uniformidade do aterro, com relação à estabilidade necessária e performance duradoura.

### **A execução dos aterros rodoviários em condições difíceis**

Os procedimentos para a seleção da estratégia de melhoramento do solo de fundação de rodovias consistem de:

- 1 - obtenção de todos os dados pertinentes.
- 2 - avaliação das condições do pavimento.
- 3 - análise das sondagens.
- 4 - seleção do método de melhoramento de solo.
- 5 - estratégia de trabalho.

O comportamento do pavimento de uma estrada depende da concepção e do adequado funcionamento de todos os componentes que compõem o seu sistema, e incluem:

- 1 - Superfície adequadamente plana, com suficiente resistência ao atrito, e que seja estanque e permita drenagem da água de modo a evitar a aquaplanagem;
- 2 - Camadas estruturais bem definidas, seja de asfalto ou concreto, que tenham capacidade de carga suficientes;

- 3 - Camadas de base e subbase independentes, que forneçam resistência adicional – particularmente em pavimentos flexíveis – e que sejam resistentes à deterioração induzida pela umidade e outros tipos de deterioração.
- 4 - Um subleito que promova uma fundação suficientemente resistente, rígida e estável para as camadas superiores;
- 5 - Processo de drenagem que remova a água suficientemente rápido do sistema do pavimento, antes que degrade as propriedades de suas camadas inferiores.
- 6 - Medidas corretivas, como melhoramento do solo inferior com geoenrijecimento, para aumentar sua resistência, rigidez, etc.

Pavimentos rodoviários são sistemas formados por camadas projetadas para atender aos seguintes objetivos:

- ser estruturalmente forte para suportar cargas de tráfego impostas (capacidade estrutural);
- fornecer superfície suficientemente plana, resistente ao desgaste e as derrapagens;

Suas camadas interdependentes são partes integrantes do sistema final, que responde pela capacidade de carga de todo o conjunto estrutural, especialmente pavimentos flexíveis. Isto pode ser verificado na figura abaixo, onde tensões induzidas nos sistema do pavimento, pelas cargas do tráfego, são maiores nas camadas superiores, diminuindo com a profundidade.

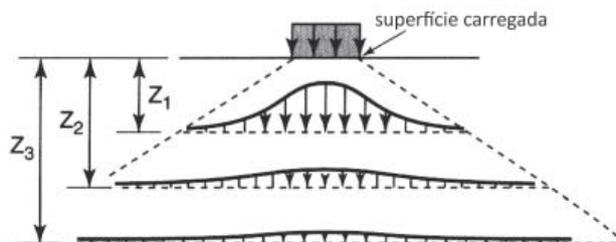


Figura 2 - Atenuação das tensões, induzidas pelas cargas sobre o pavimento, com a profundidade.

A performance à longo prazo, das camadas mais inferiores do pavimento, como o subleito e o solo de fundação, dependerão de uma excelente manutenção do sistema superior, de modo a evitar o seu comprometimento, que importa em custos bem mais elevados.

Como em todos as estruturas geotécnicas, o sistema do pavimento rodoviário é fortemente influenciado por fatores ambientais e pela umidade. A água migra para dentro da estrutura do pavimento através de combinações de infiltração superficial (por exemplo, trincas na camada superficial), fluxos laterais e pelo nível freático do solo (por exemplo, a condição de capilaridade em solos argilosos). De um modo geral e do ponto de vista geotécnico, as propriedades dos materiais



de interesse, no projeto de um pavimento, podem ser originadas nas seguintes categorias:

- físicas (por exemplo, classificação do solo, densidade, teor de umidade);
- termo-hidráulicas (por exemplo, coeficientes de drenagem, permeabilidade, coeficiente de expansão térmica);
- relacionadas ao comportamento (por exemplo, características deformativas pertinentes à cargas repetidas).

A camada mais significativa para a performance do pavimento é a superficial, no entanto, as inferiores estão intimamente interligadas. Por exemplo, a resistência e a rigidez do solo do subleito é um dado de entrada para a maioria dos projetos de estradas, e seu impacto no desempenho estrutural pode, portanto, ser avaliado quantitativamente. Para ficar bem entendido, subleito é a camada superior do terreno sobre o qual a estrutura do pavimento e os acostamentos serão construídos. O propósito do subleito é servir de plataforma para a construção do pavimento, além de suportá-lo sem que haja deflexão excessiva que possa impactar seu comportamento. Para pavimentos construídos em cortes, o subleito é o próprio solo natural do local cortado, que deverá ser compactado de modo a aumentar sua resistência e rigidez. Para pavimentos construídos sobre aterros, o subleito é o próprio material do aterro, supondo-se que o solo de fundação é estável. A real espessura do subleito poderá, sempre, ser questionada. Sua espessura dependerá do tipo de projeto a ser elaborado. A rigidez do conjunto inferior do sistema do pavimento, certificado com o conhecimento do seu módulo resiliente, passa a ser sua propriedade mais importante, quando da elaboração do projeto estradal, conforme determinação da AASHTO\* Pavement Design Guide.

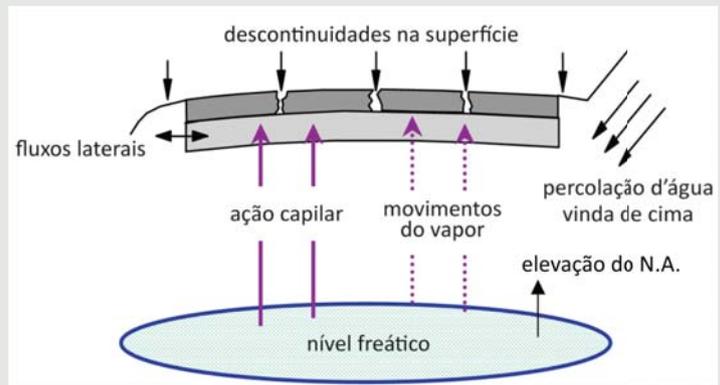


Figura 4 - Fontes de umidade no sistema do pavimento (NHI 13126)..

Frequentemente, encontram-se condições especiais de solos, além dos caracterizados como moles, ao longo da execução de uma rodovia, incluindo solos expansivos e colapsíveis. No caso de solos expansivos, o poder de inchamento em um pavimento refere-se a mudanças de volume localizadas em subleitos estradals, na medida em que absorvem água. No caso de solos colapsíveis, apresentam estrutura metaestável e exibem grande diminuição de volume quando saturados. Subleitos nativos, com solos colapsíveis, precisam ser geoenrijecidos com compaction grouting, antes do processo construtivo estradal, de modo a estruturá-lo, particularmente quando for receber grandes aterros.

De um modo geral, solos naturais são inadequados para utilização na estrutura do pavimento, pois possuem graduação, resistência ou rigidez inadequadas ou promoverão insuficiente estabilidade. Estas deficiências podem ser minimizadas misturando-se dois ou

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials.



Figura 3 - Terraplenagem com a elevação para um total de 12m de altura sobre solo mole melhorado com Geoenrijecimento durante a construção de marginais à rodovia Anhanguera.

## Inclinômetro para a condição horizontal e inclinada?

**E**ste equipamento mede, precisamente, deslocamentos verticais (recalques ou levantamentos) ao longo de uma horizontal sob aterros. Opera com torpedo horizontal. Atua com bluetooth e smart phase.



**E**ste outro inclinômetro é equipado com sensor de inclinação para taludes de até 45°, informando sua inclinação, assim como em paredes de contenção, barragens, etc. Opera com bluetooth e smart phase.



Para maiores informações, acesse: <http://www.softsoilgroup.com>



Figura 5 - Cravação de geodrenos para a execução do geoenrijecimento em uma marginal da Anhanguera.

mais solos ou, simplesmente, promovendo estabilização mecânica ou o geoenrijecimento com técnicas de grouting, como o CPR Grouting para solos moles, ou Compaction Grouting, para solos expansivos e colapsíveis, únicas modalidades geotécnicas de intervenção que distinguem-se por modificar as características dos solos. Neste primeiro exemplo, apresentamos um caso de uma rodovia construída sobre solo mole com presença de um gasoduto.

### Caso de obra

Entre os municípios de Campinas e Valinhos, houve a necessidade da construção de três rodovias marginais à Rodovia Anhanguera, SP 330. Uma destas marginais, que exigia aterro de 10m de altura, contido por muro em terramesh, situava-se sobre profundo depósito de solo mole com cerca de 15m, e, como agravante, no limite do terreno, junto ao pé do futuro muro de

contenção, um gasoduto de 800mm de diâmetro, também assente no solo mole, enterrado a 1,5m de profundidade. A certeza da eficiência do geoenrijecimento, em quase 100%, ou seja, intolerância a recalques presentes e futuros, devido ao gasoduto e as cargas dinâmicas, inerentes a futura rodovia exigiram, além dos testes rotineiros de certificação, à base de análises piezométricas e pressiométricas, também tomografia sísmica por imagem. Para este ensaio, desenvolveu-se software específico para a análise do volume geoenrijecido, assegurando a certificação dentro do conhecido limite das ultrapequenas deformações. Apresenta-se, a seguir, dados da geologia do terreno, onde foi construída a rodovia marginal, do projeto de geoenrijecimento com CPR Grouting, da complexidade dos depósitos de solo mole presentes, da campanha

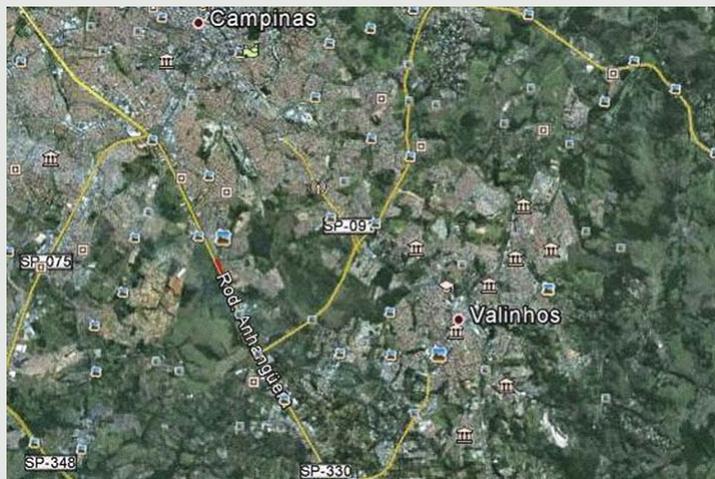


Figura 6 - O destaque na imagem mostra a localização da Rodovia Anhanguera e o trecho da construção de rodovias marginais.

de ensaios de certificação e da campanha com tomografia por imagem 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 à construção de estradas que sofrem efeito de diversas cargas dinâmicas de veículos leves a pesados, com a necessidade imperiosa da obtenção de altos módulos de cisalhamento, devido à exigência de ínfimo nível de deformações.

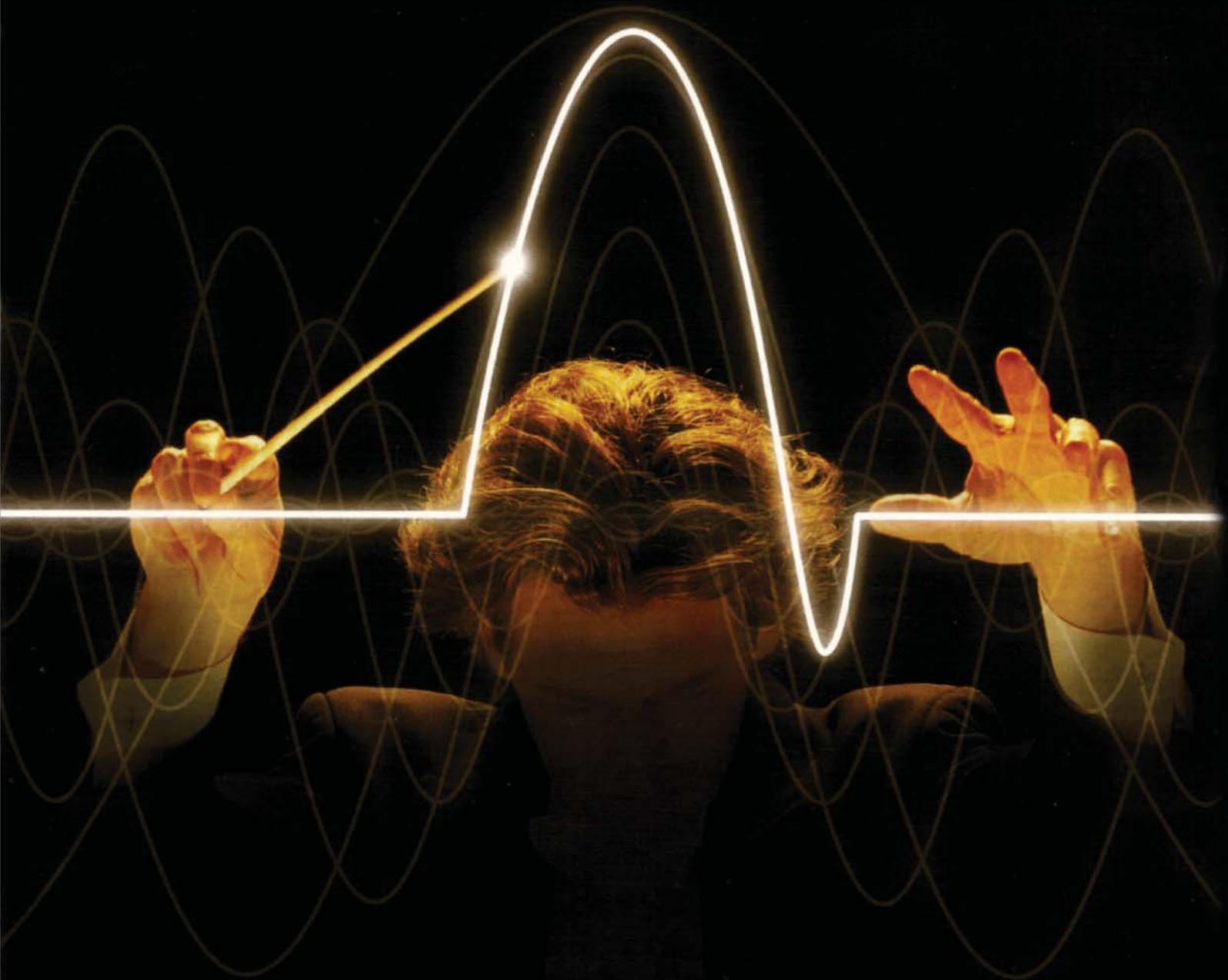
Sondagens de caracterização SPT e análises geológicas do local caracterizavam o local como um vale próximo a um curso d'água e, com o passar do tempo, houve deposição de material coluvionar jovem não consolidado, configurando-se presença de depósitos de solos moles. Foram necessárias, no entanto, várias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

A simples presença de depósitos de solos moles no local já exigiria serviços especializados de melhoramento do solo, como pode ser visto nas análises de estabilidade apresentadas nas figuras 8 (antes do melhoramento) e 9 (depois do melhoramento).

PERFIL GEOLO. GÍCO	INTER. GEOLO. GÍCA	PROFUN. CAMADA (m)	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	CONSISTÊNCIA OU COMPACT. CIDADE	NÚMERO DE GOLPES S. P. T.	RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO AMOSTRADOR TIPO TERZAGHI					N. A. (m)									
						N.º DE GOLPES / 30 cm.	35	30	25	15		10	5							
AT		1,00	Argila pouco arenosa (média a grossa), com pedregulho fino a grosso, com detritos vegetais, marrom	MOLE*	1 1 2	3	4	5	6	7	8	0,54								
		15 15 15																		
		1 2 2																		
		15 15 15																		
		2 2 3																		
		15 15 15																		
		2 2 3																		
		15 15 15																		
		2 2 1																		
		15 15 15																		
AL		4,41	Argila arenosa (média a grossa), com silte, com pedregulho fino a médio, com mica, marrom avermelhado	MOLE*	0 1	1/18	2	3	4	5	6	0,54								
		30 18																		
		1 1 1																		
		15 18 20																		
		1 2 2																		
		15 15 15																		
		2 2 3																		
		15 15 15																		
		2 3 4																		
		15 15 15																		
		11,36	Argila plástica orgânica arenosa (média a grossa) pedregulhosa (fino), cinza escuro	MOLE*	1 2 2	2/38	3	4	5	6	7	0,54								
		15 15 15																		
		2 2 2																		
		15 15 15																		
		2 2 3																		
		15 15 15																		
		2 3 3																		
		15 15 15																		
		3 3 5																		
		15 30 15																		
		12,00	Argila siltosa, com areia média a grossa, com pedregulho fino a médio, micácea, cinza amarelado	MOLE*	3 3 5	30/5	4	5	6	7	8	0,54								
		5																		
		3 3 5																		
		15 30 15																		
		5																		
		30/5																		
		11/10-07:47	0,54		Método								Início(m)	Fim(m)	Lavagem por tempo - 10 min.	OBS: *1 - Solo - AL; Alúvion - 14. Observar resistência à lavagem por tempo - 10 min. *2 - Solo - AL; Alúvion - 14. Observar resistência à lavagem por tempo - 10 min. *3 - Solo - AL; Alúvion - 14. Observar resistência à lavagem por tempo - 10 min. *4 - Solo - AL; Alúvion - 14. Observar resistência à lavagem por tempo - 10 min. *5 - Solo - AL; Alúvion - 14. Observar resistência à lavagem por tempo - 10 min. *6 - Solo - AL; Alúvion - 14. Observar resistência à lavagem por tempo - 10 min. *7 - Solo - AL; Alúvion - 14. Observar resistência à lavagem por tempo - 10 min. *8 - Solo - AL; Alúvion - 14. Observar resistência à lavagem por tempo - 10 min. *9 - Solo - AL; Alúvion - 14. Observar resistência à lavagem por tempo - 10 min. *10 - Solo - AL; Alúvion - 14. Observar resistência à lavagem por tempo - 10 min.				

Figura 7 - Boletim de sondagem típico da região onde seria construída a rodovia marginal a Anhanguera.

Soft Soil Group  
Apresenta



# Webinars de solos moles

Para maiores informações, acesse: <http://softsoilgroup.com.br/webinar>  
ou envie um e-mail para: [atendimento@softsoilgroup.com.br](mailto:atendimento@softsoilgroup.com.br)

SOFTSOIL BRAZILIAN REVIEW • Novembro / Dezembro 2011

 Soft Soil  
Group

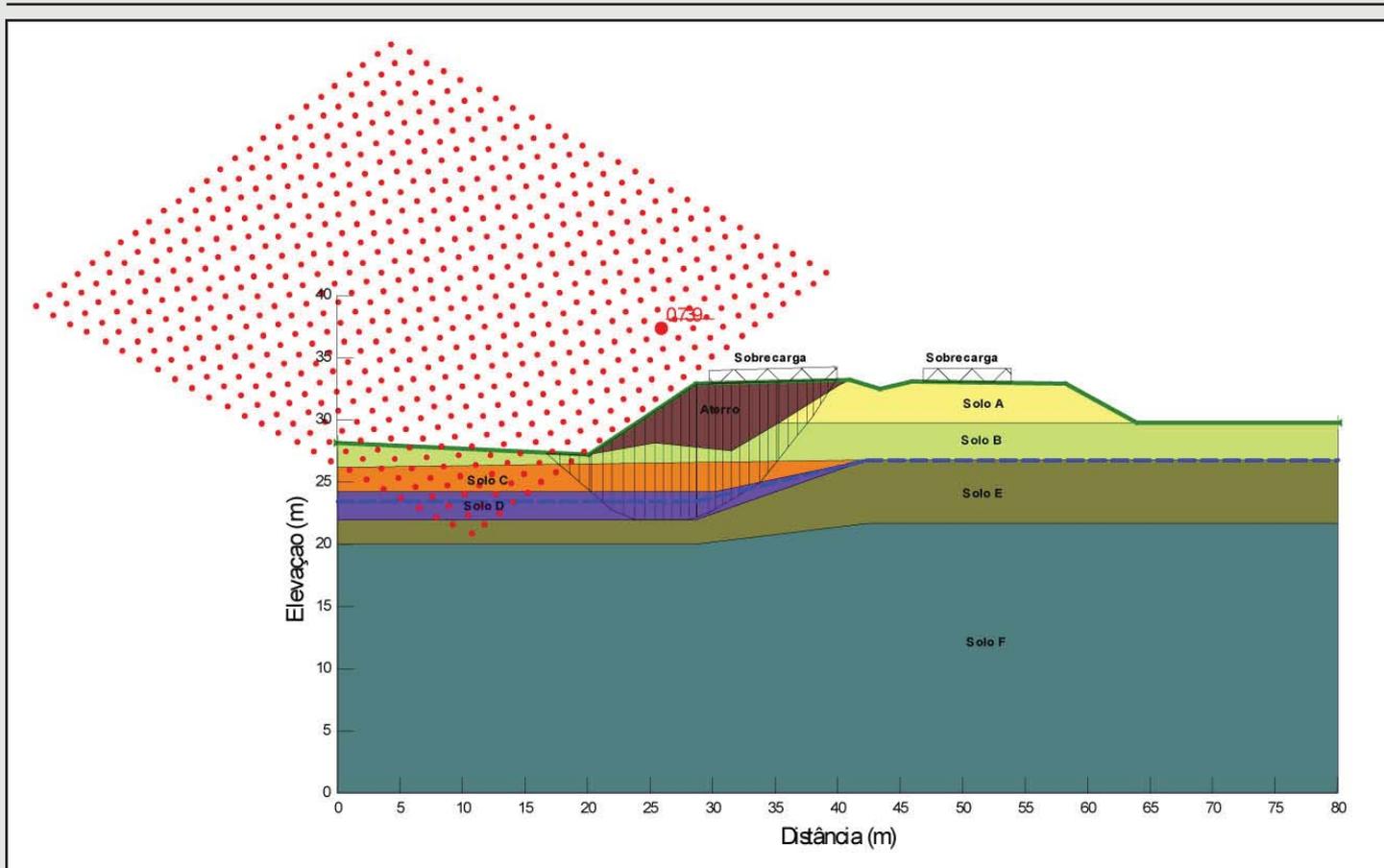


Figura 8 - Superfície crítica de ruptura (FSmínimo) para a seção transversal, caso nenhum melhoramento fosse feito.



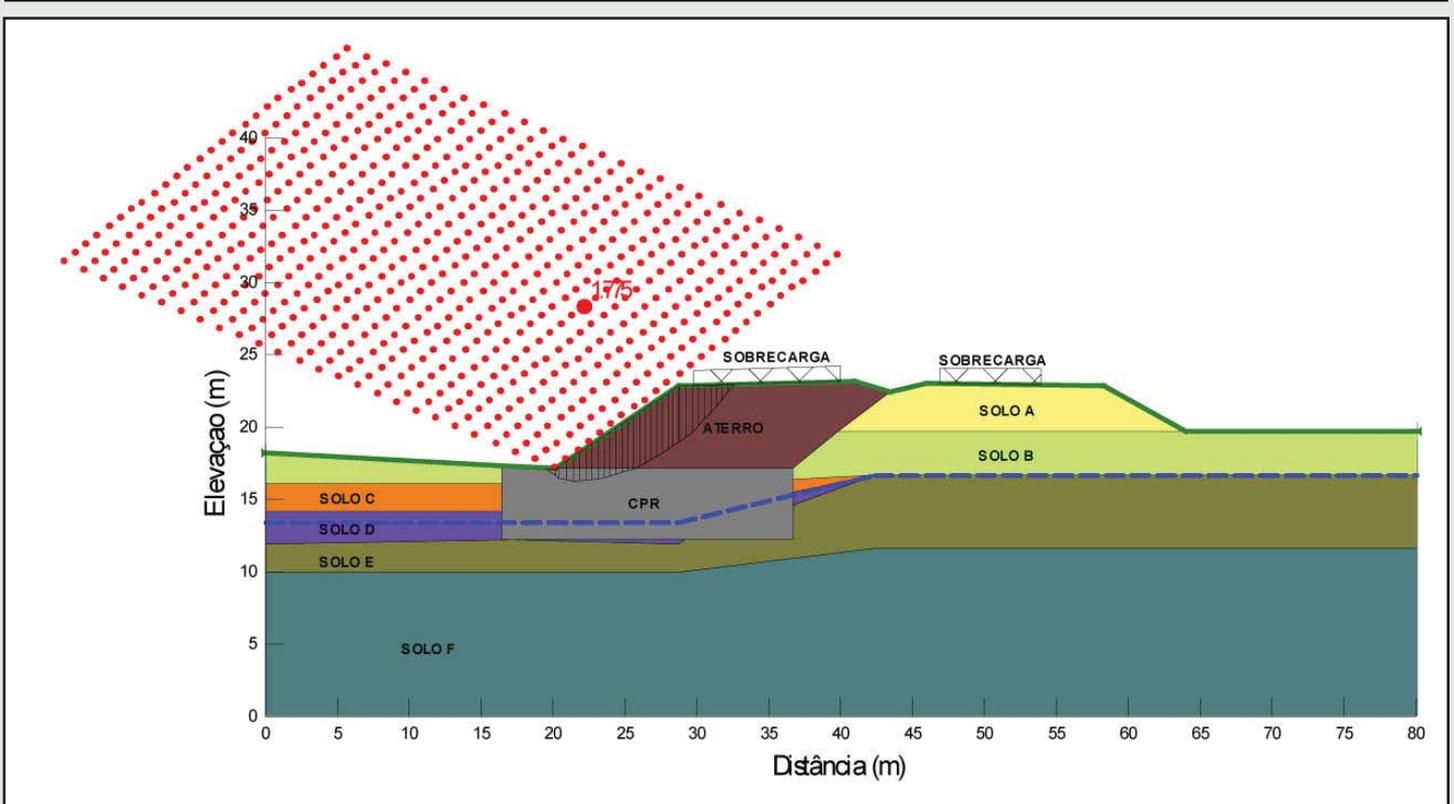


Figura 9 - Superfície crítica de ruptura ( $FS_{\text{mínimo}}$ ) para a seção transversal, com geoenrijecimento com CPR Grouting.

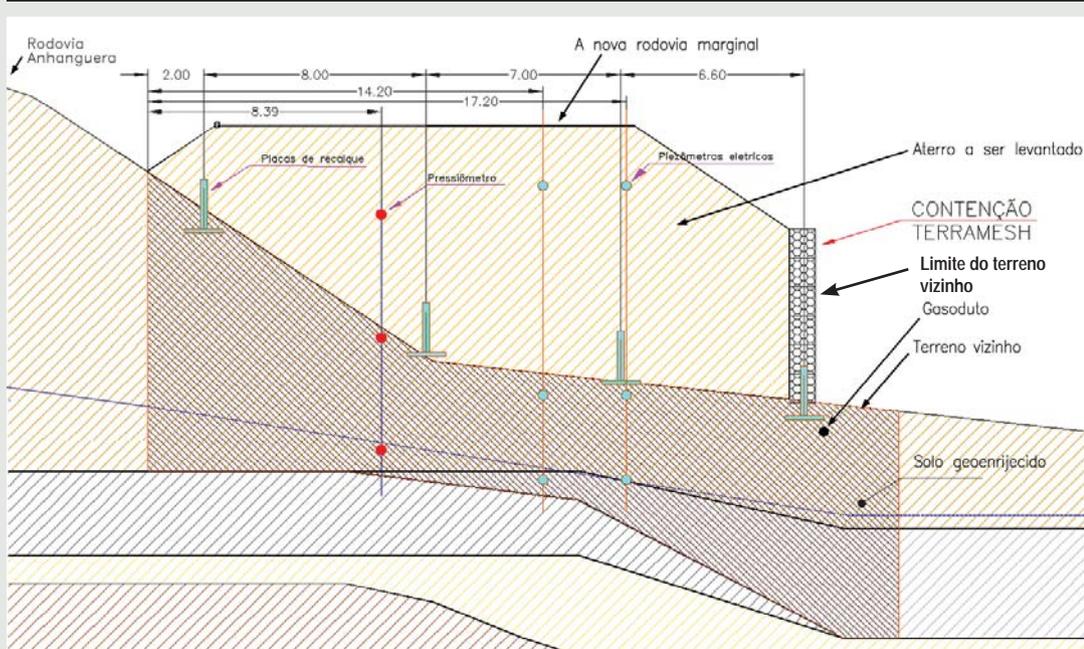
A presença do gasoduto, com 800mm de diâmetro, enterrado no local, assente sobre este depósito mole complicava ainda mais

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 executiva, ilustrada na figura 11, com a solução de Geoenrijecimento.



Figura 10 - O processo de Geoenrijecimento do solo em uma das marginais da Anhanguera.



Diversas modalidades de melhoria de solos foram analisadas. A eficiência de cada uma foi observada baseada, primeiramente, na estabilidade. Em segundo, a ínfima surgência de recalques, considerando-se a presença do gasoduto, situado na base do futuro muro de contenção. E, em terceiro, à logística do local, considerando-se as dificuldades construtivas frente à presença do gasoduto e da própria Rodovia Anhanguera, além da travessia do rio, cujo solo de

Figura 11 - Projeto, em corte, da rodovia marginal, destacando-se o muro de contenção, o gasoduto abaixo e o solo de fundação geoenrijecido com CPR Grouting. Notar a presença de talude submerso.



Figura 12 - O canteiro de obras da construção da marginal com os equipamentos de geoenrijecimento, observando-se a linha pontilhada, que corresponde a base do futuro muro de contenção, onde passa o gasoduto. À direita o rio que cruza a Anhanguera e que também teve seu solo geoenrijecido para receber a futura galeria, o aterro e a rodovia marginal.

fundação, com solo mole, também precisava de melhoramento. Houve necessidade premente de instrumentação geotécnica, particularmente inclinômetros para analisar o nível de deformações, promovido no solo, e que poderiam chegar a desestabilizar o gasoduto e também o próprio talude da Anhanguera. Técnicas de georeforço, que apresentam contraste de rigidez entre o material das colunas e o solo envolvente, 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, promovendo deformações intermediárias nas colunas.

O geoenrijecimento do solo é acompanhado com instrumentação geotécnica no sentido de se 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. A seguir, apresentam-se os resultados pressiométricos, com seu módulo médio alcançado, pós geoenrijecimento, para obtenção do módulo do solo composto final:

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

Sendo,  $G_{s,psCPR} = 8.000\text{kPa}$  e  
 $\%G_g = 240.000\text{kPa}$

Logo,  $G_{eq} = 66.696, 0\text{kPa}$  – Este módulo de cisalhamento equipara-se a uma formação de argila dura.

O módulo de cisalhamento equivalente, ( $G_{eq}$ ), estabelece relação entre os módulos

do solo geoenrijecido ( $G_g$ ) e dos bulbos com GeogROUT ( $G_s$ ), representada por média ponderada entre os bulbos de solo geoenrijecido e os bulbos do geogROUT. O módulo pressiométrico equivalente representa o solo composto após o geoenrijecimento. Na tabela a seguir, apresenta-se a classificação de solos de acordo com a velocidade de propagação de ondas cisalhantes ( $V_s$ ) (EN, 1998), pertinente aos ensaios com tomografia por imagem.

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 à resistência ao cisalhamento de argilas e seu módulo cisalhante.

Testes in situ, inerentes ao processo de geoenrijecimento do solo, antes e após, têm a grande vantagem de visualizar seu



## Classificação do solo de acordo com a $V_S$

Classe de Solo	Descrição	Características (m/s)
A	Formações rochosas	$V_S > 800$
B	Areia muito compacta / argila dura	$200 < V_S \leq 300$
C	Areia pouco compacta / argila média	$120 < V_S \leq 200$
D	Solo sem coesão / argila mole	$80 < V_S \leq 120$

estado de tensões, e a surgência das tensões efetivas. No entanto, as propriedades mecânicas do solo, relacionadas ao carregamento dinâmico, estão associadas à velocidade de onda cisalhante ( $V_S$ ) e ao módulo cisalhante ( $G$ ), também utilizadas corriqueiramente em problemas não dinâmicos. O quase nulo nível de deformações, exigido no solo mole, pós geoenrijecimento, portanto, exigia um tipo de teste associado a propriedades tipicamente de baixa deformação, somente alcançado com 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, ou seja, menor que  $10^{-3}\%$ . Este baixíssimo nível de deformações, permite acessar a teoria de elasticidade, associando medidas obtidas com as propriedades mecânicas na região linear do seu gráfico. Para um nível de deformações intermediário, em torno de  $10^{-20}\%$ , a resposta começa a ficar não linear. Para grandes deformações, maiores que  $10^{-10}\%$  até 5%, o comportamento dinâmico do solo é totalmente não linear obtendo-

-se deformações permanentes ou plásticas, eventualmente alcançando a condição instável.

A análise com tomografia sísmica induz

deformações cisalhantes menores que  $10^{-40}\%$ , e a velocidade de ondas cisalhantes,  $V_S$ , para obter o módulo cisalhante  $G$ , através de expressão seguinte:

$$G = \rho \cdot V_S^2$$

Onde  $\rho$  é a densidade do solo.

A certificação do geoenrijecimento adequado 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 perturba-



Figura 13 - No limite com o vizinho, eleva-se um muro em terramesh com 6m de altura sobre o gasoduto, onde apresenta-se a berm no meio do vão do talude. A partir desta berm, eleva-se o talude até a nova rodovia.



Linha pré-Geoenrijecimento

Linha pós-Geoenrijecimento

Figura 14 - O posicionamento das duas linhas da tomografia, uma no eixo da futura estrada e a outra fora do seu domínio, dentro do terreno vizinho.

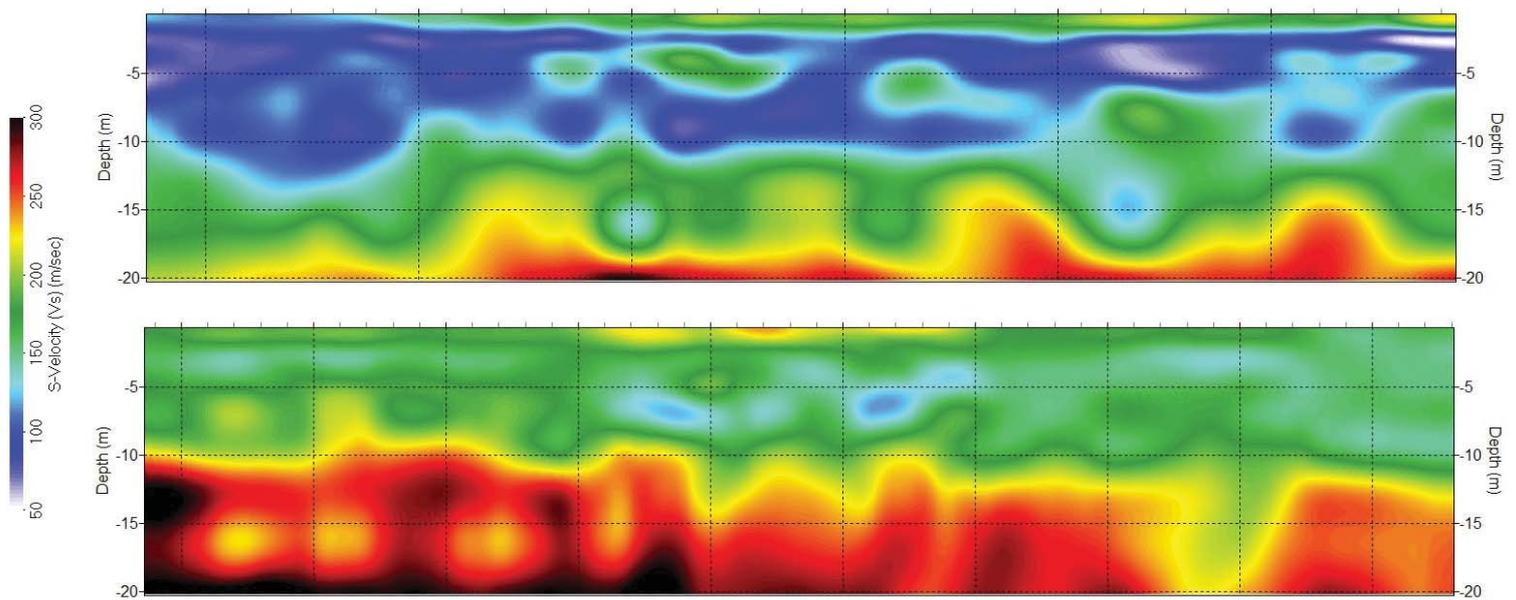


Figura 15 - As tomografias pré geoenrijecimento acima e pós abaixo. Verifica-se a condição do solo argiloso mole e orgânico com os tons azul claro, escuro e esbranquiçado. Na condição pós geoenrijecimento identifica-se a condição do solo melhorado com as tonalidades verde amareladas.

ção física, o real estado de tensões efetivas das camadas do solo mole, independentemente da condição da poropressão.

Considerando-se as particularidades do local da obra, junto a Rodovia Anhanguera e a logística do avanço dos serviços de geoenrijecimento no local, projetou-se uma linha de pesquisa (linha 1), para a avaliação das condições originais da rigidez do solo, fora da área geoenrijecida, exatamente 5m distante da cerca do 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 geoenrijecida. A figura 11 ilustra o posicionamento das linhas com ensaios por tomografia por imagem.



#### REFERÊNCIAS

- **Joaquim Rodrigues** é engenheiro civil M.Sc. formado no Rio de Janeiro em 1977, pós-graduado pela COPPE na Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1999, Diretor do Soft Soil Group e da Enggegraut Geotecnia e Engenharia, associada à ABMS e ao American Society of Civil Engineers desde 1994. Desenvolveu duas técnicas de trata-

mento de solos moles, sendo motivo de patente o CPR Grouting, utilizada hoje em todo o Brasil. Desenvolvimento de trabalhos de Grouting, com empresas parceiras nos EUA e Alemanha. Mais de um milhão de metros quadrados de verticais de geoenrijecimento executadas em solos moles com CPR Grouting, para a construção de aterros, estradas, portos, ferrovias e armazenagem.

- CHEN WF (1975) Limit analysis and soil plasticity. Elsevier, Amsterdam.
- CORTELLAZZO, G. and COLA, S. (1999). Geotechnical Characteristics of Two Italian Peats Stabilized with Binders. Proceeding of Dry Mix Methods for Deep Soil Stabilization (pp. 93-100). Stockholm: Balkema.

Figura 16 - Situação da marginal totalmente concluída, observando-se a diferença de nível do terreno original onde está a cerca, o muro, com 5m de altura, o talude subsequente e a nova rodovia, totalizando cerca de 12m de altura.



## EQUÍVOCOS NO MELHORAMENTO DE SOLOS ARGILOSOS MOLES

Eng<sup>a</sup> Patrícia Tinoco

Melhoramento de solos moles, de maneira profunda, é um dos temas mais debatidos dentro da engenharia geotécnica brasileira e mundial. Há diversas empresas nacionais e internacionais inovando neste setor. Para contratar este tipo de serviço, torna-se necessário conhecer

Neste contexto, considerando-se o conceito de grouting, apresentam-se duas ramificações executivas. A primeira implica em abrir cavidades, seja com hidrojateamento ou pré-furo, como o jet-grouting e o deep soil mixing, respectivamente, preenchendo-as para formação de colunas, utilizadas para transferir, quase que totalmente, as cargas da superfície para camadas de solos resistentes. A segunda impõe, efetivamente, a modificação das características do solo como um todo, comprimindo-o radialmente, via expansão de cavidades, com a formação de bulbos, o que lhe confere parâmetros de resistência e rigidez superiores. Ainda dentro do conceito de grouting, somente poder-se-á usar o conceito de injeção, quando utilizam-se fluidos para pre-

de com objetivo de gerar forças de compressão radial. Para tanto, o conceito de fluidez é descartado porque, simplesmente, não se comprime solos argilosos com fluidos. O conceito de expandir cavidades, em solos argilosos moles, exige a introdução de argamassa seca, denominada geogROUT® com ângulo de atrito interno elevado, exatamente o oposto do conceito de fluidez, com objetivo de promover o processo de expansão de cavidades no interior do solo argiloso mole. O conceito de atrito interno tem a ver com forças internas, resistentes ao movimento entre partículas do material grauteado, causado por forças externas. A viscosidade, desta argamassa seca, será sua resistência ao movimento, promovido pelo atrito interno en-



Uma das muitas estradas recentes executada com melhoramento de solos pré-carregamento. Ineficiência e consequentes recalques que ocasionem o efeito tobogã. Ausência de qualidade e total insegurança.

os dois conceitos de melhoramento de solos moles existentes, como se diferenciam e, naturalmente, seus resultados.

Os dois conceitos de melhoramento de solos moles, que nos referimos, é o Geoenrijecimento e o Georeforço. O primeiro, é feito com grouting, especificamente o CPR Grouting e, o segundo, também com técnicas de grouting como o jet grouting e o soil mixing, além da coluna de brita.

enchimento das cavidades, previamente feitas, utilizando-se o fluido aglomerante universal, constituído pela calda de cimento. Jamais poder-se-á utilizar o conceito de injeção, com caldas de cimento, para “comprimir” solos argilosos com objetivo de consolidá-los, simplesmente, porque não acontece mas, sim, fraturamento hidráulico, o que piora ainda mais o solo. Consolidar solos argilosos moles, profundamente, exige não injeção mas, sim, expansão de cavi-

tre seus grãos. Dentro deste conceito ter-se-á, o atrito interno, resultado da interação entre grãos da argamassa e o atrito externo, relativo à interação com o solo hospedeiro, de modo a formar a expansão de cavidade.

Assim, a técnica de “injeção de consolidação” é completamente equivocada e inadequada para tal propósito. Da mesma maneira, o termo “injeção” é completamente indesejado para objetivos de consolidar solos argilosos moles.

**SOFT SOIL GROUP**

Rua Correia de Araújo, 131 - Barra da Tijuca  
Rio de Janeiro/RJ - Brasil - CEP 22611-070  
Tel.: (21) 3154-3250 • Fax: (21) 3154-3259

WEBSITE: <http://www.softsoilgroup.com.br>

E-mail: [contato@softsoilgroup.com.br](mailto:contato@softsoilgroup.com.br)

**SOFT SOIL BRAZILIAN REVIEW**

Diretor Editorial

**ENGº JOAQUIM RODRIGUES**

[joaquim@softsoilgroup.com.br](mailto:joaquim@softsoilgroup.com.br)

Diretor Adjunto

**ENGº ALESSANDRO CIRONE**

[alessandro@softsoilgroup.com.br](mailto:alessandro@softsoilgroup.com.br)

Publicidade

**PATRICIA TINOCO**

[patricia@softsoilgroup.com.br](mailto:patricia@softsoilgroup.com.br)

Assinatura, Livros e Vídeos

**CLEIDE FERREIRA**

[cleide@softsoilgroup.com.br](mailto:cleide@softsoilgroup.com.br)

Editor de Arte

**CRISTIANDER | ALEX CRISPIM**

Reprints Editoriais

**MARIANA TATI**

[mariana@softsoilgroup.com.br](mailto:mariana@softsoilgroup.com.br)

Solicite reimpressões de reportagens

ou artigos publicados

“Soft Soil Brazilian Review” é uma revista digital  
com publicação bimestral.



02 a 06 de Setembro, 2018

**16º Congresso Brasileiro de**

**Geologia de Engenharia**

**São Paulo, SP**

[http://www.abge.org.br/50anos/  
congresso](http://www.abge.org.br/50anos/congresso)

13 de Setembro, 2018

**I Seminário de Práticas**

**Contratuais de Túneis**

**Brasília, DF**

[https://appticket.com.br/i-  
seminario-de-praticas-contratuais-  
em-tuneis-2018](https://appticket.com.br/i-seminario-de-praticas-contratuais-em-tuneis-2018)

**Palestra Milton Vargas**

**15/10/2018 - Recife - PE**

**19/10/2018 - Belo Horizonte - MG**

**22/10/2018 - Vitória - ES**

<http://www.abms.com.br>

17 a 19 de Outubro, 2018

**XXIV Congresso Argentino de**

**Mecánica de Suelos e Ingeniería**

**Geotécnica – CAMSIG 2018**

**Salta, Argentina**

<http://camsig2018.org/>

**Palestra Milto Vargas**

**15/10/2018 - Recife - PE**

**19/10/2018 - Belo Horizonte - MG**

**22/10/2018 - Vitória - ES**

<http://www.abms.com.br>

20 de Novembro, 2018

**Frederico Falconi fala sobre**

**Norma de Fundações**

**Vila Água Funda, SP**

[www.mtexpo.com.br](http://www.mtexpo.com.br)

26 a 29 de Novembro, 2018

**M&T Expo - Part of Bauma**

**Network**

**Vila Água Funda, SP**

[www.mtexpo.com.br](http://www.mtexpo.com.br)

29 e 30 de março de 2019

**Conferência em Tecnologia de**

**Fundações 2019**

**Vitória, Espírito Santo**

[abms.es@gmail.com](mailto:abms.es@gmail.com)

17 a 20 de novembro de 2019

**XVI Congresso Pan-Americano de**

**Mecânica dos Solos e Engenharia**

**Geotécnica**

**Cancún - México**

[panamerican2019mexico.com](http://panamerican2019mexico.com)

14 a 16 de agosto de 2019

**IX Congresso Brasileiro de**

**Geotecnia Ambiental e VIII**

**Congresso Brasileiro de**

**Geossintéticos**

**São Carlos, SP**

[regeossinteticos2019.com.br/](http://regeossinteticos2019.com.br/)

29 de Setembro e 2 de Outubro de

2019

**3rd International Conference on**

**Information Technologies in Geo-**

**Engineering**

**Guimarães - Portugal**

[3rd-icitg2019.civil.uminho.pt](http://3rd-icitg2019.civil.uminho.pt)

14-18 de outubro de 2019

**XVI Asian Regional Conference on**

**Soil Mechanics and Geotechnical**

**Engineering**

**Chinese Taipei, Taipei**

[www.16arc.org](http://www.16arc.org)

# ATRITO NEGATIVO EM ESTACAS CRAVADAS EM SOLOS MOLES

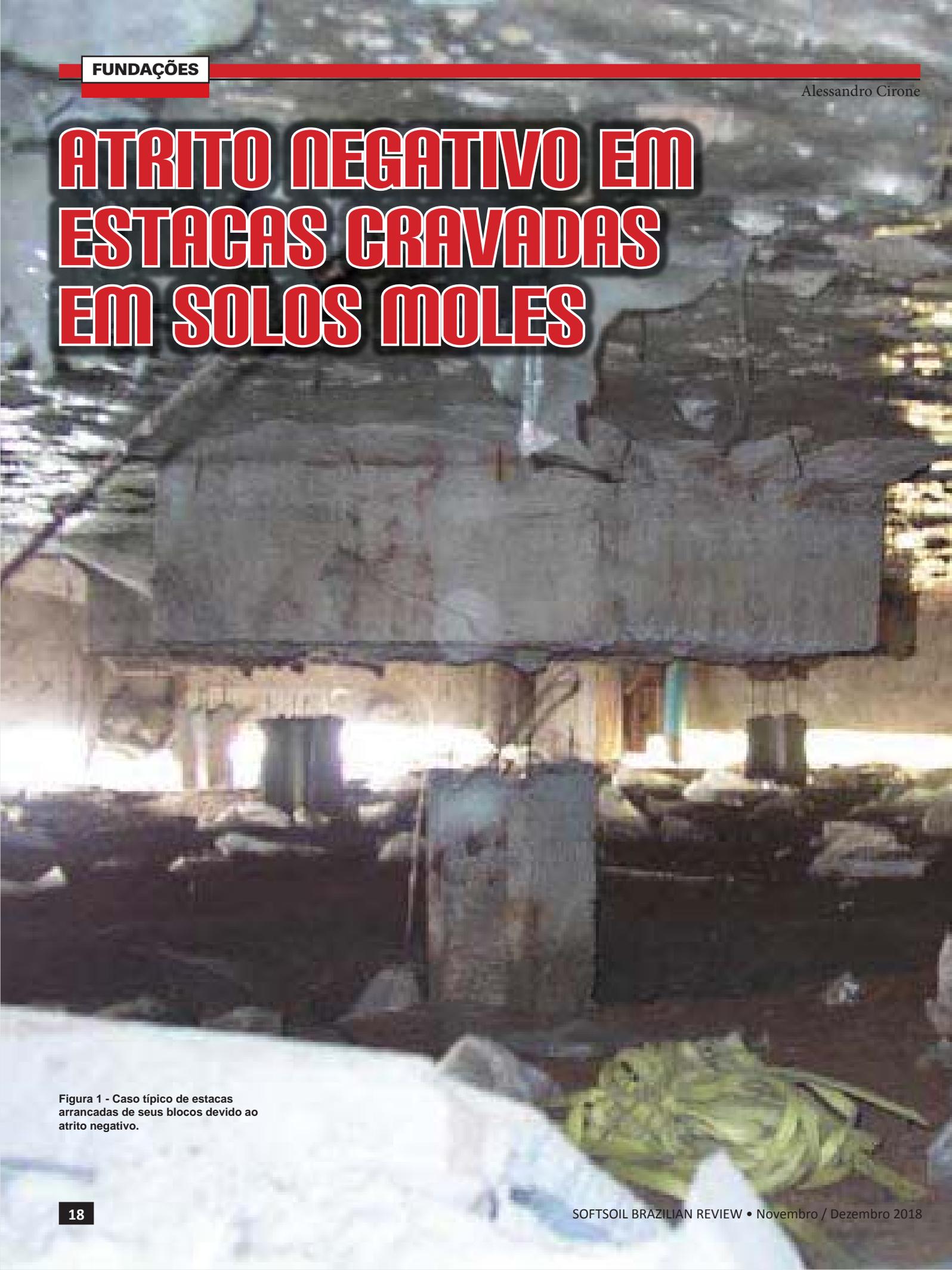


Figura 1 - Caso típico de estacas arrancadas de seus blocos devido ao atrito negativo.

O atrito negativo manifesta-se quando o solo sofre um recalque maior do que a estaca. É definido “negativo”, porque atua ao longo do fuste, com direção para baixo, gerando forças adicionais na estaca. De acordo com Velloso e Lopes, “O caso mais importante e frequente é quando estacas atravessam aterro recente lançado sobre camada de argila mole. A argila mole, em processo de adensamento, sofre recalques, e o atrito negativo desenvolve-se ao longo das camadas do aterro e da própria argila mole.”

A Figura 2 mostra a principal causa do atrito negativo, ou seja, quando há deslocamento relativo entre solo e estaca. Nota-se que o atrito negativo atua sob a forma de tensões de cisalhamento ao longo do fuste, com direção para baixo até uma determinada profundidade. Existe, na verdade, um “ponto neutro”, onde solo e estaca sofrem recalques com mesma magnitude. Abaixo deste ponto, haverá atrito positivo, pois o recalque do solo é menor que o da estaca.

Quando há atrito negativo o solo, que envolve a estaca, transfere parte do seu peso para a estaca, sofrendo redução na tensão efetiva (Figura 2.c). Ou seja, o solo “fica pendurado”, e, como consequência, há diminuição da tensão vertical na camada competente, reduzindo-se a capacidade de carga para sua ponta.



Figura 3 - A execução de espessos aterros sobre depósitos de solos moles promove o atrito negativo.

O atrito negativo pode ser interpretado como uma sobrecarga adicional, ou seja, ele atua em conjunto com as cargas aplica-

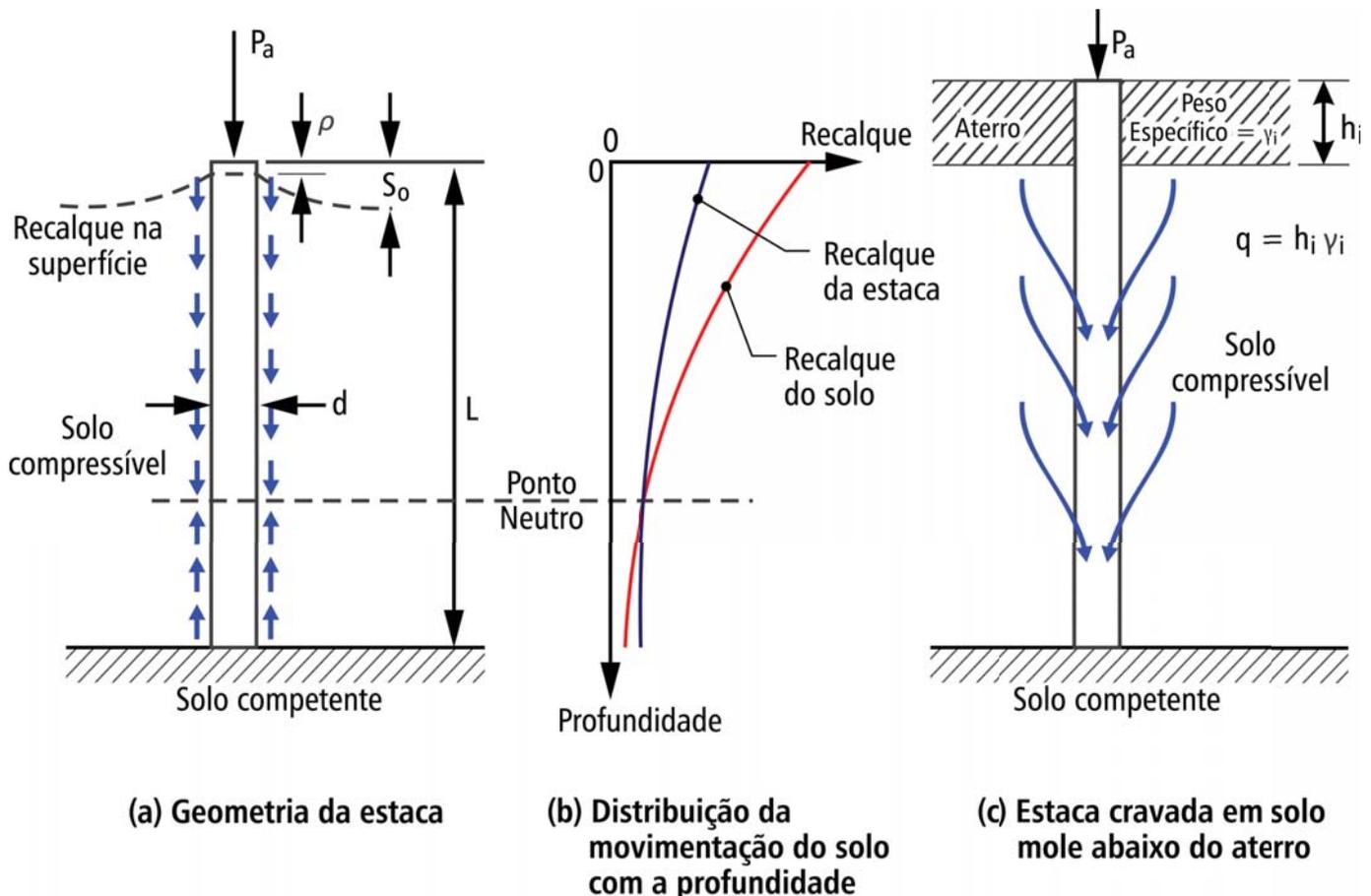
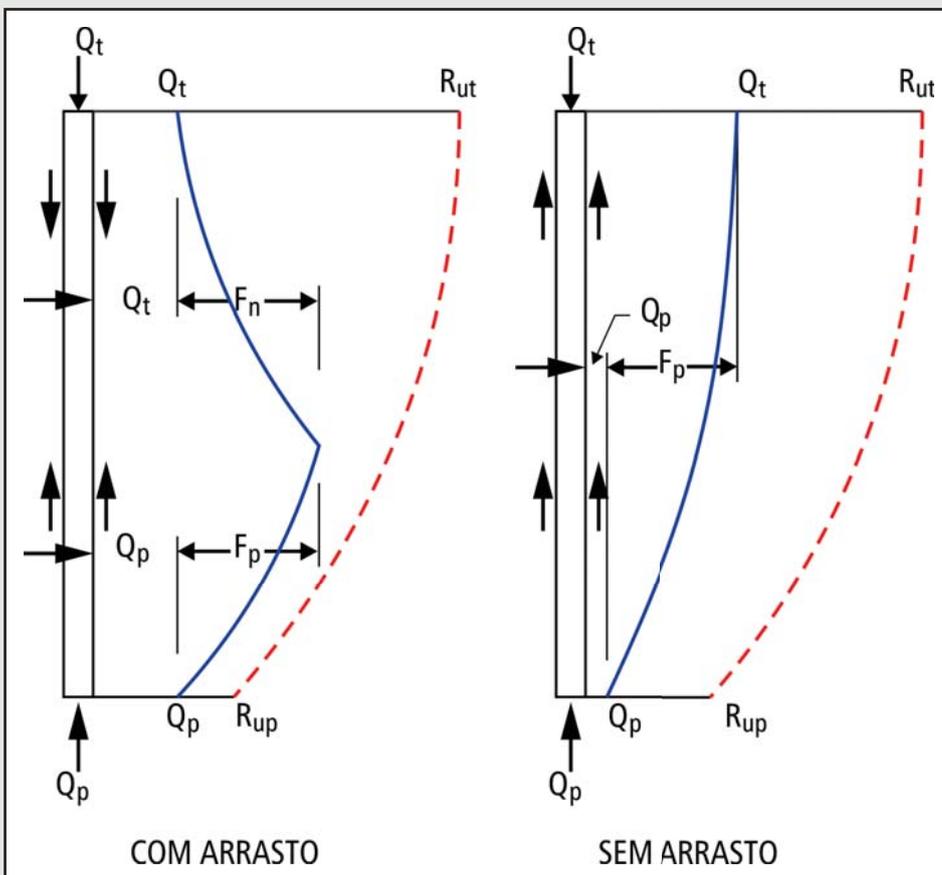


Figura 2 - Atrito negativo ocorre quando o terreno, entorno da estaca, apresenta recalque maior que a estaca.



Figura 3 - Alta densidade de estacas executadas sobre aterro apoiado em solos moles: probabilidade de problemas. O Geoenrijecimento é a melhor solução.



das no topo da estaca, conforme mostrado na Figura 4, atuando como força de arraste para baixo, produzindo esforço normal adicional na estaca ( $F_n$ ). Desta forma, a solicitação ao longo da estaca e em sua ponta, torna-se maior, gerando recalques adicionais na fundação, podendo-se ultrapassar, em teoria, a capacidade de carga para a ponta ou a resistência à compressão da estaca (seja por compressão ou por flambagem).

Figura 4 - Diagrama do esforço normal na estaca com presença ou não do atrito negativo.



A tabela, a seguir, apresenta casos em que torna-se necessário prever o atrito negativo:

1	O recalque total previsto, na superfície do terreno, será maior que 100mm
2	O recalque na superfície, devido a cravação das estacas será maior que 10mm
3	A altura do aterro será maior que 2m
4	A profundidade da camada de solo mole é maior que 10m
5	O rebaixamento do lençol freático superará 4m
6	O comprimento da estaca é maior que 25m

A força de arraste sua estaca, devido ao atrito negativo, é calculada de forma semelhante à resistência lateral por atrito lateral, dada por:

$$Q_n = \int_0^L \tau_a C dz$$

Onde:

- $Q_n$  = força de arraste devido ao atrito negativo
- $\tau_a$  = adesão lateral
- $C$  = perímetro da estaca
- $L$  = espessura da camada mole

A adesão lateral depende, essencialmente, da resistência do solo e da tensão horizontal na interface solo-estaca. Para solos argilosos, por exemplo, a adesão depende da resistência não drenada, calculando-se como  $\tau_a = \alpha s_u$ .



Figura 5 - Execução do Geoenrijecimento em região próxima ao pilar de modo a restituir a condição do solo para o estaqueamento.

## Métodos para reduzir o atrito negativo

A solução ideal para evitar o atrito negativo considerando-se, por exemplo, pequenas cargas como as existentes em empreendimentos logísticos, ou seja, da ordem de 5ton/m<sup>2</sup>, é o melhoramento do solo com Geoenrijecimento. Muitas vezes o atrito negativo é tão elevado que torna-se interessante utilizar recursos para reduzi-lo, diminuindo a adesão lateral entre estaca e solo. Apresentamos, abaixo, os principais métodos:

1. Pintura da estaca com betumes especiais
2. Criação de uma película de lama bentonítica em torno da estaca
3. Cravação com ponta alargada
4. Melhoramento do solo abaixo e entorno da estaca.

É importante que o revestimento betuminoso não seja levado até a ponta da estaca, pois seu trecho inferior responde pela capacidade de carga e não deve ser pintado. A cravação da estaca, com ponta alargada serve, além de aumentar sua capacidade, para desestruturar completamente o solo ao redor, objetivando-se obter adesão lateral reduzida.

Melhora-se o solo em torno da ponta da estaca, sem afetar seu funcionamento. Neste método, a lança do grouting deve ser posi-

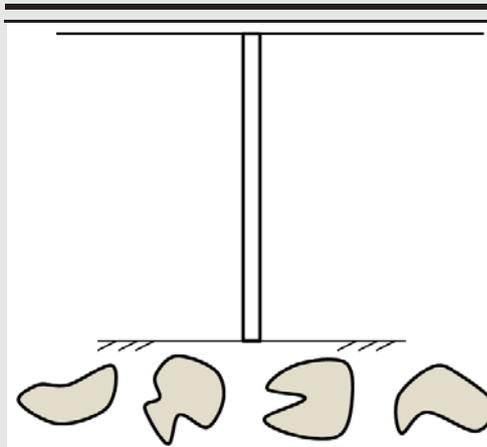


Figura 6 - Melhoramento do solo abaixo da ponta da estaca, comprimindo-se radialmente o solo, de modo a aumentar o fator Nq (que depende do ângulo de atrito) e a tensão efetiva.

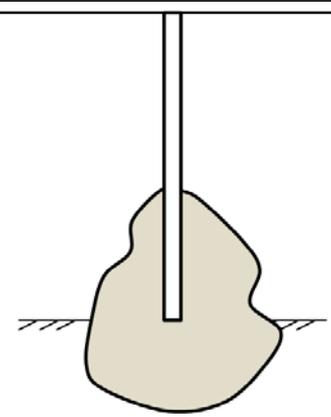


Figura 7 - Melhoramento do solo entorno da ponta da estaca, de modo a aumentar a capacidade de carga na ponta das estacas.

cionada segundo um triângulo equilátero, na profundidade desejada.

O volume de projeto é calculado com base em considerações geométricas, visando

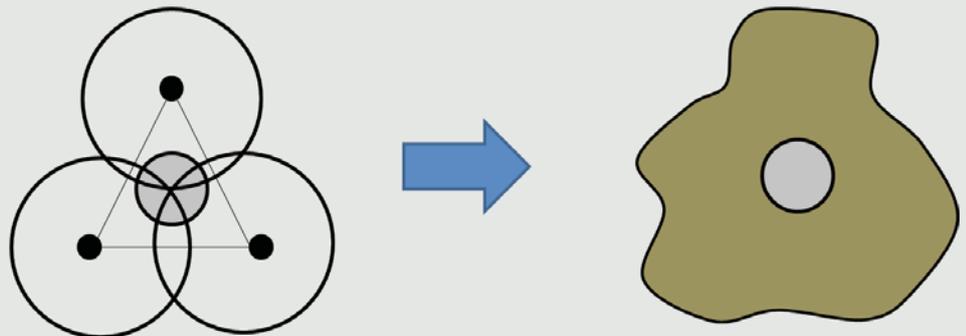
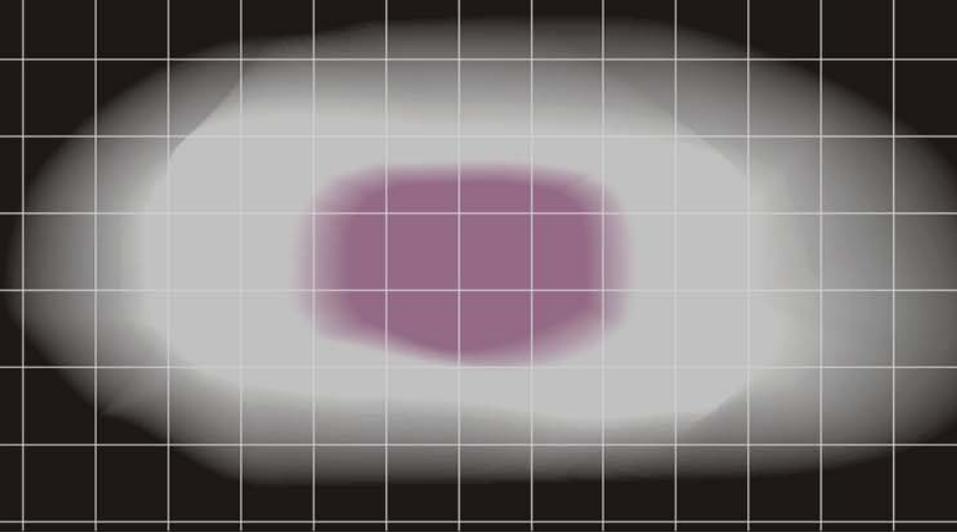


Figura 7 - Cálculo geométrico do volume necessário e espaçamento entre pontos do melhoramento do solo. O resultado é o geoenrijecimento do solo na ponta da estaca.

## Crie sua própria Planilha de Dimensionamento para Geoenrijecimento de Solos Moles

Para maiores informações, acesse: <http://www.engegraut.com.br/geoenrijecimento>

# contaminação de solo?

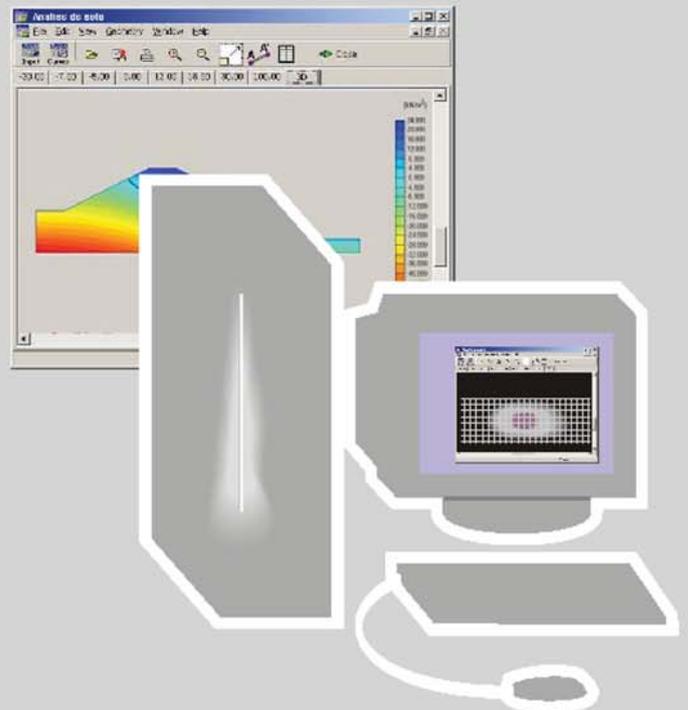


O segredo do tratamento de solos contaminados está na adequação do processo de compressão, confinamento e adensamento do solo, analisado com piezômetros e imagens tomográficas antes e depois.

Confie em quem tem experiência.



[www.engegraut.com.br](http://www.engegraut.com.br)



alargar a ponta com área suficiente para garantir a capacidade de carga necessária. Esta área é considerada somando-se as três áreas dos círculos obtidos, julgando-se o raio do bulbo com forma esférica. Os círculos devem sobrepor-se, interceptando-se no centro da estaca, conforme mostrado na Figura 8. No cálculo da área, devem-se deduzir as sobreposições. O espaçamento para o melhoramento do solo corresponde à distância entre os centros dos círculos, dispostos segundo um triângulo equilátero.

### Caso de obra

Escavações dentro de obras, frequentemente, provocam alívio de tensões na massa de solo considerada, induzindo-se recalques e movimentação em elementos de fundação existentes. Esta situação, típica, ocorreu num empreendimento logístico na zona oeste do Rio de Janeiro.



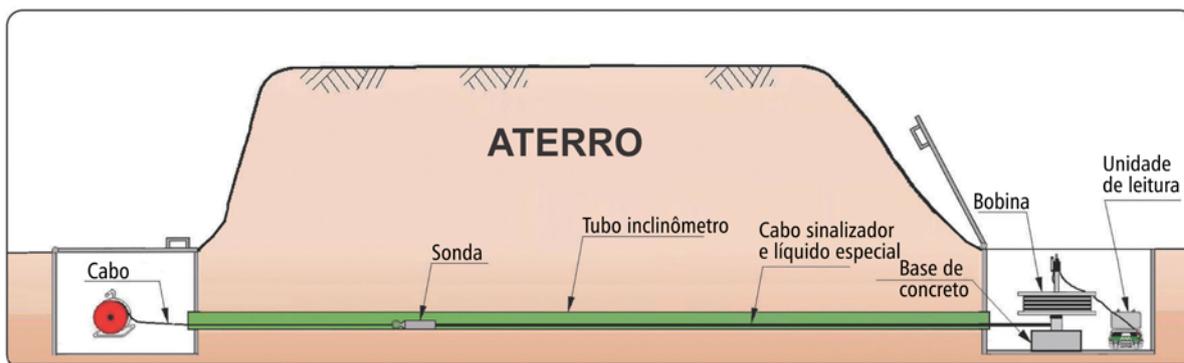
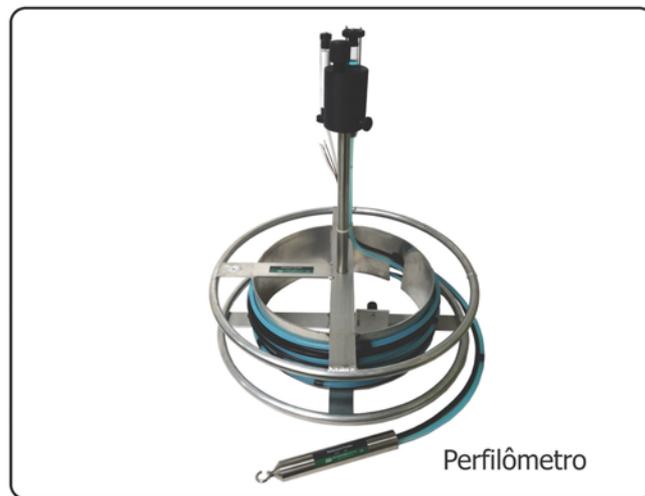
Figura 8  
empreen  
moles, d

## Medidor Portátil do Perfil de Recalques (Perfilômetro)

Este equipamento mede, precisamente, recalques e levantamentos através de aterros, estradas, tanques, etc. O perfilômetro tem sonda conectada com cabo sinalizador e tubo genérico com líquido especial. Quando a sonda passa através do tubo inclinométrico ou qualquer tubo de PVC, analisa a pressão existente, calculando-a como deslocamento vertical.

### Aplicações:

- Aterros rodoviários e barragens.
- Reservatórios de água.
- Pontes e viadutos.
- Recalque do solo de fundação.



Instalação do medidor do perfil de recalques

Para maiores informações, acesse: <http://softsoilgroup.com.br>  
ou envie um e-mail para: [atendimento@softsoilgroup.com.br](mailto:atendimento@softsoilgroup.com.br)





- A alta densidade de estaqueamento em edifícios logísticos, invariavelmente sobre solos já margem à surgência de atrito negativo.



Figura 9 - Geoenrijecimento do solo com Compaction Grouting abaixo da ponta das estacas, inclusive nivelando-as.



Figura 10 - Execução de pré-furos para acesso ao solo de fundação sob a ponta das estacas.

Os pilares da estrutura do galpão sofreram recalques (de 65 a 75 mm) após a escavação de um poço, com mais de 11m de profundidade, junto a estacas existentes. Para resolver este problema, optou-se pelo melhoramento do solo, como corretivo para reestabelecer a parcela do atrito lateral prejudicada pela escavação.

Por se tratar de galpão com pé-direito limitado a 8m, executou-se melhoramento do solo com equipamento diminuto, particularmente adequado às condições do local. Executou-se pré-furos, junto às estacas a

fim de, posteriormente consolidar o solo, com geoenrijecimento, tornando-o homogêneo, rígido e compacto. Melhorou-se excepcionalmente a interação solo/estrutura, certificando-se todo o trabalho com controle geotécnico com pressiômetro e piezômetros.

Com base em análise pressiométrica, houve melhoria geotécnica significativa no solo melhorado, aumentando-se sua capacidade de carga, grau de compactação e seu nível de rigidez.



## REFERÊNCIAS

- **Alessandro Cirone** é engenheiro civil geotécnico, especialista em projetos e serviços de melhoramento de solos moles.

# CONHEÇA SOLOS ORGÂNICOS E TURFAS II

## OBTER AMOSTRAS FIDEDIGNAS DE SOLOS MOLES, ORGÂNICOS OU NÃO, PARA ANÁLISES EM LABORATÓRIO BEIRA A UTOPIA.

Segundo Hvorslev, 1949, são quatro as modalidades de afetamento das amostras, amolgadas ou simplesmente comprometidas, para análises laboratoriais:

- Alteração para as condições de tensão.
- Alteração no teor de umidade e índice de vazios.
- Alteração da estrutura do solo.
- Mistura e segregação dos constituintes do solo.

Turfas, geralmente, contém mais de 90% d'água, com camadas de material fibroso/ esponjoso, difíceis de serem cortados sem

danificar seu estado de compressão, mesmo utilizando-se tubos de amostragem de parede fina e cortante. Alguns pesquisadores, sugerem fazer a amostragem com rotação, pois danifica menos a condição do “solo”. A questão é que, quase que invariavelmente, é missão impossível retirar amostras de solos orgânicos moles ou turfas sem alterar sua condição original. Amostras consideradas amolgadas, do ponto de vista geotécnico, ou seja, com sua densidade e propriedades mecânicas alteradas, podem, no entanto serem represen-

tativas do solo, com relação a sua natureza, tipo, preparação de seus constituintes, teor de umidade, etc, bastando, para pequenas profundidades, um simples trado, operado manualmente. Para maiores profundidades faz-se uso de perfuratriz.



Figura 1 - Localidade perto de Navegantes, SC, sendo preparada para o Geoenrijecimento de profundos depósitos de solos moles, objetivando-se a duplicação da BR470. Nesta região há depósitos de solos moles orgânicos com 30m de profundidade, com diversas camadas de turfas. Ou seja, solo extremamente difícil de melhorar.



Na realidade não há, ainda, ferramentas específicas para se determinar as propriedades in situ de turfas. No entanto utiliza-se, rotineiramente, os mesmos métodos de análises de solos argilosos moles. Devido a grande variabilidade presente nos depósitos orgânicos, particularmente com relação ao sua textura, utilizam-se diversos testes, complementados com análises laboratoriais, objetivando-se obter propriedades específicas para um determinado projeto. São eles:

#### **a) Ensaio palheta (Vane Test)**

O teste com base na ruptura do solo, utilizando-se miniatura de palheta, pode ser utilizado objetivando-se estimar, rapidamente, a resistência cisalhante não drenada de solos moles, assim como na condição altamente orgânico ou com turfa, desde que não se ultrapasse os 200kPa. Solos muito sensitivos podem ser amolgados durante a inserção da palheta.

#### **b) CPT ou CPTU**

Este ensaio, também com base na ruptura do solo, determina a resistência de ponta e o atrito lateral, ou seja, os com-

ponentes da resistência à penetração na medida em que se procede a lenta cravação do instrumento.

#### **c) Ensaio pressiométrico**

Este ensaio, ao contrário dos dois anteriores, baseia-se na deformação do solo, obtendo-se a resposta tensão-deformação in situ. O módulo pressiométrico e a pressão limite são extremamente úteis para a análise geotécnica, objetivando-se projetos de fundação.

#### **d) Provas de carga com aterros teste**

Este ensaio é o mais realista para a obtenção da capacidade de carga do solo. São aterros monitorados, geralmente em formato quadrado, com 3 a 6m de lado, com altura sugestiva da carga do aterro mais a do empreendimento, adicionando-se uma carga de segurança. Este ensaio fornece o recalque que o solo apresentará quando carregado.

Uma análise atual dos testes in situ, para solos orgânicos e turfas deixam claro que, infelizmente, não acompanharam a prática desenvolvida para solos minerais inorgânicos. Torna-se necessário reconhecer estas

diferenças, estabelecendo-se que com teores orgânicos até 25%, poder-se-á Geoenriçê-los como solos argilosos inorgânicos, utilizando-se todos os ensaios pertinentes. Por outro lado, há sérias questões com relação a aceitabilidade dos ensaios convencionais in situ, quando aparecem solos fibrosos, altamente orgânicos, já que apresentam inerente anisotropia, tendência de alta compressibilidade, rápida drenagem, alta ou nenhuma resistência (variável), tornando-se inviável interpretar seus parâmetros mecânicos. Principalmente porque são irrelevantes os modos de ruptura, induzidos nos ensaios laboratoriais ou penetrométricos de campo (palheta, CPTU, SPT), considerando-se a interação com suas fibras, anisotropia e compressibilidade, resultando em propriedades mecânicas nada representativas ou, frequentemente, inconsistentes. É muito interessante observar que no ensaio palheta, a superfície cisalhante é vertical, no CPTU é mal definida, inclinada na compressão triaxial e horizontal no ensaio de cisalhamento direto. O ensaio pressiométrico, por outro lado, por ser um ensaio com características deformativas é o que apresenta melhores resultados. Contudo, esta inerente dificul-



Figura 2 - Neste terreno, com solos orgânicos e turfosos já a superfície, tentou-se escavar para a construção da galeria de águas pluviais, sem sucesso.

dade com solos orgânicos e turfosos, tem feito com que pesquisadores, como Landva, recomendassem execução de provas de carga, com aterros testes, objetivando-se de obter parâmetros mais realistas para cada projeto.

### Propriedades dos solos orgânicos e turfosos

O grau de humificação, resistividade, teor de umidade, limites líquidos, peso específico e pH são parâmetros mais que indi-

cadores para solos orgânicos e turfosos. Estes parâmetros são úteis para descrever ou caracterizá-los, mas, principalmente, relacioná-los com outras variáveis geotécnicas, como o índice de vazios, parâmetros de deformação e da resistência cisalhante.



Figura 3 - Dificuldades de trabalho em terrenos com solos moles.



## LANÇAMENTO DO LIVRO

# MELHORAMENTO DO SOLO MOLE E O GEOENRIJECIMENTO



Adquira seu exemplar através do email [ofitexto@ofitexto.com.br](mailto:ofitexto@ofitexto.com.br)  
ou pelo site [www.lojaofitexto.com.br](http://www.lojaofitexto.com.br)



Figura 4 - Terreno com profundos depósitos de solos moles orgânicos, sendo preparado para o geoenrijecimento na duplicação de uma BR.

Na mecânica do solo convencional, solos são considerados materiais particulados, independentes podendo, simultaneamente, conter as fases sólida, líquida e gasosa. As fases líquida e gasosa estão contidas nos vazios ou poros entre partículas sólidas. A partir destas fases, deduz-se sua relação peso-volume, ou seja, seu teor de umidade, grau de saturação, peso unitário, densidade, índice de vazios, etc. No caso dos solos orgânicos e turfosos, a

fase sólida consiste dos componentes caracterizados pela matéria orgânica e materiais minerais inorgânicos. Sua proporção relativa e natureza determinam suas propriedades física e geotécnica. Com relação ao componente mineral deste solo não há qualquer dúvida. Com relação a matéria orgânica do solo, Russel, 1952, descreve “uma série de produtos que procedem de plantas ainda não decompostas, tecidos animais travestidos de materiais efêmeros

em decomposição, até materiais amorfos, de cor preta a amarronzada, fracamente estáveis, sem qualquer traço de estrutura anatômica, em relação à condição original, redundando no húmus”. Adicionalmente contém, também, produtos de síntese microbiana, o que permite resumi-la em:

- Resíduos vegetais e animais (em decomposição).
- Húmus (resistente ou inerte).
- Materiais inertes semelhantes ao carbono (carvão vegetal ou grafite).



## PEAT PROFILE SAMPLER KIT

Este é um dos kits para amostragem de solos turfosos vendido pela Soilmoisture



Para maiores informações, acesse: <http://softsoilgroup.com.br> ou envie um e-mail para: [atendimento@softsoilgroup.com.br](mailto:atendimento@softsoilgroup.com.br)

Soft Soil Group

Sem dúvida, o carbono (c) é o elemento chefe da matéria orgânica, facilmente medido, quantitativamente, pela queima (c é determinado como CO<sub>2</sub> emitido). O teor de carbono orgânico utiliza-se para estimar a matéria orgânica total, multiplicando-o pelo fator 1.724 ou um valor próximo de 2. De forma alternativa, pode-se utilizar a queima do solo, à temperaturas de 450 a 550°C, de modo a se destruir toda a matéria orgânica determinando-se seu conteúdo orgânico. Este método de perda com queima, resulta na oxidação quantitativa da matéria orgânica podendo decompor também alguns dos constituintes minerais



ou inorgânicos, o que resulta em valor excessivo para o conteúdo orgânico do solo (Edil, 2003).

A matéria orgânica, quando extraída, pode ser subdividida no componente vegetal, ou matéria não húmica, o que inclui gorduras, ceras, óleos, resinas, polissacarídeos solúveis em água, hemicelulose, celulose e proteínas. E no componente não húmico, é caracterizado pelo ácido húmico e fúlvico, além da humina, nas fases sólida e líquida (Huttuneu et al, 1996). Solos orgânicos e turfosos caracterizam-se, também, pelo seu tecido ou microestrutura, relacionando-se à sua morfologia e ao arranjo espacial dos elementos constituintes, considerando-se suas partículas ou fibras. Seu macrotecido ou macroestrutura, refere-se às características visíveis a olho nú. De acordo com o Musked Engineering Handbook, 1969, é a estrutura do solo orgânico e seus vários aspectos, que afetam seu comportamento geotécnico, grosseiramente subdividido em fibroso e amorfo. Com imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV), visualiza-se, perfeitamente, a composição de seu tecido.

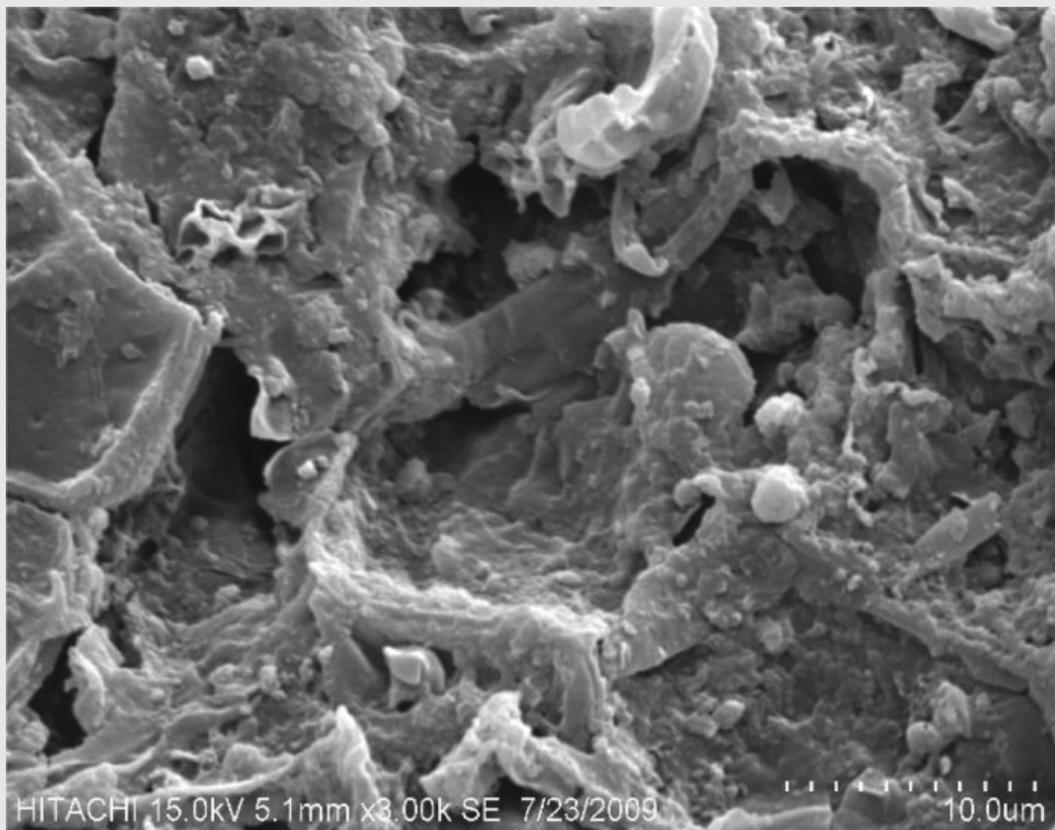


Figura 5 - Microfotografia eletrônica de varredura de solo orgânico turfoso fibroso (após Kazemian et al., 2011).

Na figura 5, observa-se um "solo" fibroso, com poros relativamente grandes e com estrutura aberta e perfurada. A figura 6, a seguir, evidencia a mesma característica fibrosa do "solo", agora com alto nível de humificação. Na figura 7, apresenta-se uma MEV de um "solo" com característica amorfa. Todas estas imagens pertencem a

solos turfosos, com teores orgânicos superiores a 80%, e com alto grau de humificação o que, geralmente, é difícil de se reconhecer (Landva e Pheaney, 1980). O material húmico, de solos orgânicos e turfosos, forma um meio contínuo, com partículas dispersas, apresentando diâmetro inferior a 2 micrômetros e constituin-



Figura 8 - A presença de solos moles altamente orgânicos exige melhoramento com Geoenrijecimento, já que impõe tensões efetivas pré-estabelecidas, homogeneizando-se o solo de fundação. Ideal para fundação de torres eólicas.

do-se de grande quantidade de grupos ácidos que, uma vez saturados, promove-se redução drástica do fornecimento de oxigênio, diminuindo a atividade microbiana aeróbica, o que dá lugar a decomposição anaeróbica lenta, provocando acúmulo de material vegetal, Fuchsman, 1986. Regiões com climas quentes, apresentam variação no pH do solo, principalmente quando situa-se entre o neutro e o básico. Assim, quanto mais ácida a matéria orgânica mais tempo é preservada. Considerando-se a condição trivial de solo orgânico saturado, a degradação completa do seu conteúdo orgânico ficará limitada à volatilidade ácida e ao desequilíbrio dos nutrientes. A flutuação do nível d'água do solo, introduzirá nutrientes, o que é fundamental para o processo de decomposição.

A trajetória deste processo causa diminuição no volume sólido do solo, similar ao processo de compressão. Do ponto de vista geotécnico, a humificação causa redução do teor de umidade total, aumento do peso específico, aumento da compactação, diminuição dos poros e, finalmente, alteração na cor do "solo", tendendo para o marrom bem escuro e o preto (Gunther, 1983). Já que falamos em variação do nível freático do solo, seu rebaixamento, permite que a função orgânica entre em contato com o ar o que, automaticamente, promove processos de retração e oxidação, impondo processo acelerado de decomposição, destruindo a estrutura das fibras, o que torna-a mais amorfa (Vonk, 1994). Este ciclo de atividades, no solo orgânico, resulta em alterações significativas de suas características geotécnicas. Se interiorizarmos mais nossa visão, perceberemos que a matéria

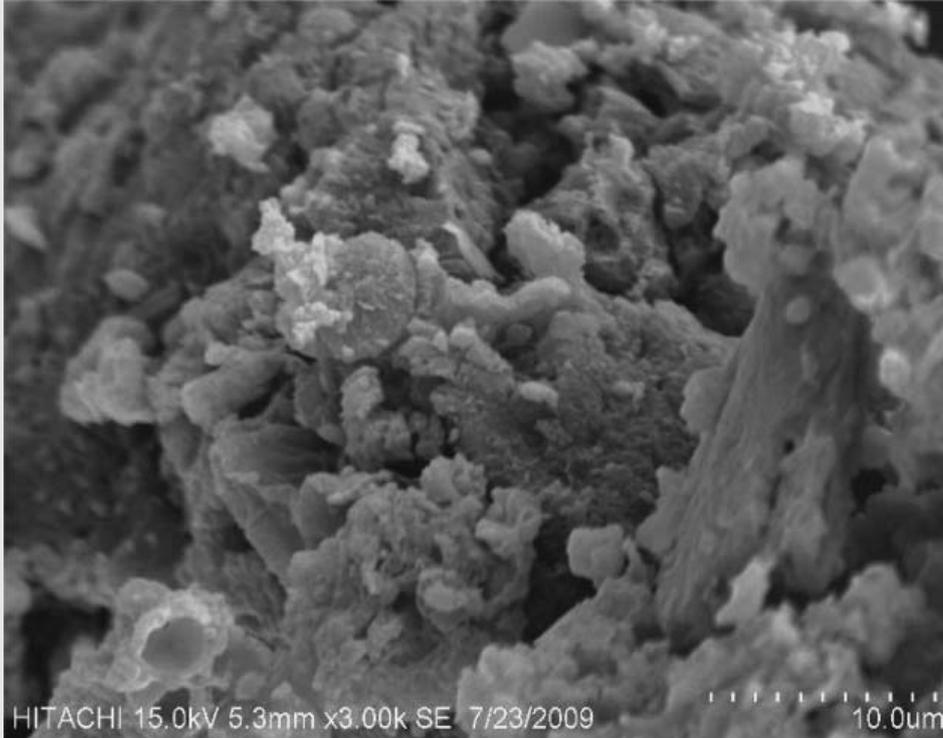


Figura 6 - Microfotografia eletrônica de varredura de solo turfoso (após Kazemian et al., 2011).

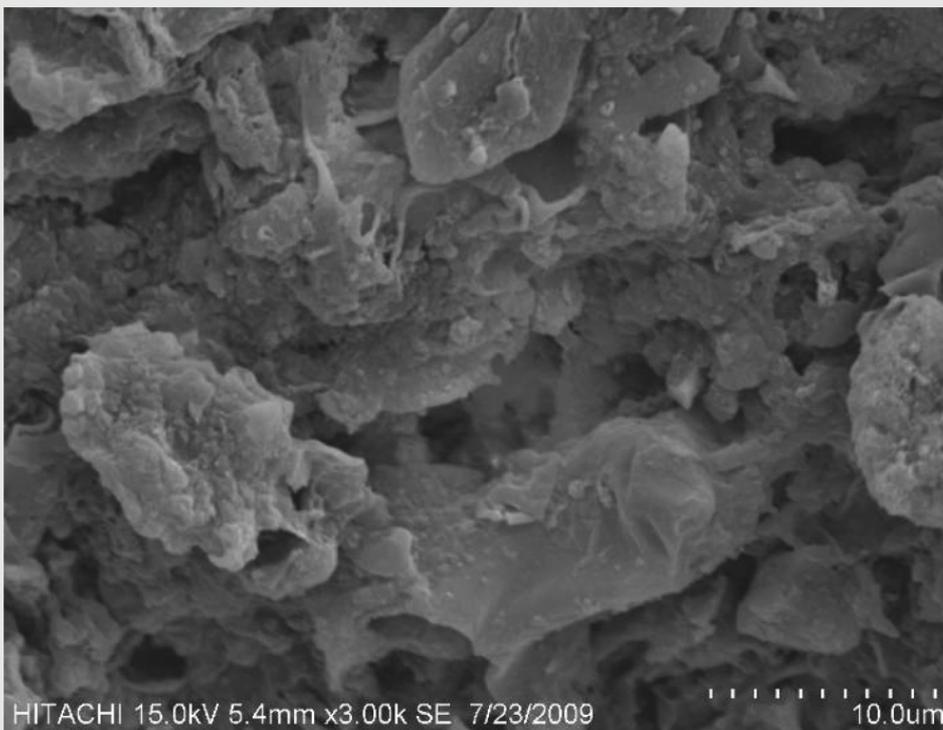


Figura 7 - Microfotografia eletrônica de varredura de solo turfoso (após Kazemian et al., 2011).



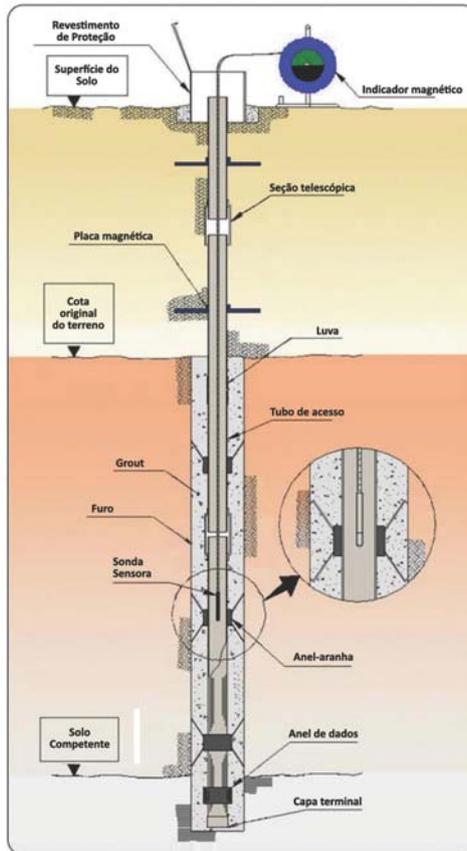
Figura 8 - Terreno de baixada, com solos moles orgânicos, antes dos serviços de melhoramento.

orgânica é envolvida com reações ácidas, promovidas pelo dióxido de carbono e ácido húmico, resultante do natural processo de decomposição. A água presente na matéria orgânica é, praticamente livre de sais e, quase sempre evidenciando pH entre 4 e 7 (Lea, 1986). O conteúdo orgânico do solo, na condição submerso, não fica totalmente

inerte, ou seja, seu processo de decomposição existe, mas lento, acompanhado da produção de gás metano, com pouca presença de nitrogênio e dióxido de carbono (Musked Engineering Handbook, 1969). Outro gás, também presente, é o sulfeto de hidrogênio, proveniente da presença de enxofre. Estes gases tem importância prá-

tica considerável já que, no geral, alteram a performance física do solo, relacionada às propriedades de compressão e do fluxo d'água, impactando no ensaio de consolidação. Seu conteúdo, no entanto, é difícil de ser avaliado, mesmo porque não há método reconhecido disponível. O Musked Engineering Handbook, 1969, informa que

## Extensômetro Magnético



### Descrição

O extensômetro magnético consiste de anéis sensoriais, indicador magnético, tubo de acesso, acessório de tubo incluindo anel de placa, anel aranha e anel de data. De acordo com o tamanho da medição, o indicador magnético é dividido em 6 tipos com 50m, 100m, 200m, 300m, 350m e 500m.



Para maiores informações, acesse: <http://www.softsoilgroup.com> ou [atendimento@softsoilgroup.com](mailto:atendimento@softsoilgroup.com)

seu conteúdo, dentro da matéria orgânica, varia de 5 a 10% do volume total de solos orgânico/turfosos analisados.

Este é um dos motivos principais em que exige-se o melhoramento de solos moles com Geoenrijecimento, pois impõe processo de homogeneização, transformando-o, impedindo que a parte orgânica sofra alterações.

### Materializando o conteúdo orgânico do solo

Percebe-se, portanto, que o conteúdo orgânico dos solos orgânicos e turfosos é fator determinante na performance geotécnica destes solos. Sua determinação é feita com a queima da matéria orgânica, como porcentagem da massa seca (ASTM D2974). Primeiramente, seca-se a amostra úmida na estufa à temperatura de 105°C, por 24 horas, até a obtenção da consistência da massa. A partir daí, coloca-se no forno, por uma hora, em cadinho coberto à temperatura de 450°C, pesando-o para obter-se sua massa M1. O solo, seco no forno, é então pesado com o cadinho, fornecendo a massa M2. A amostra de solo, juntamente com o cadinho é, finalmente, aquecido por cinco horas no forno à temperatura de 450°C, obtendo-se a massa M3, que é esfriada à temperatura ambiente. A perda N, pela queima, é calculada como:

$$N = \frac{(M_2 - M_3)}{(M_2 - M_1)}$$

O teor orgânico, H, é calculado de acordo com a equação proposta por Skempton e Petley, 1970:

$$H\% = 100 - C(100 - N)$$

Onde C é o fator de correção. Para uma temperatura de 450°C, o C = 1,0, de acordo



Figura 14 - Corte de vegetação pertinente à Lagoa de Jacarepaguá. Posteriormente foi feito o geoenrijecimento para a construção da Cidade do Rock, no Rio de Janeiro.

### Conteúdo orgânico de vários solos turfosos, no mundo.

Solos orgânicos e turfosos (SOT)	Teor orgânico (%)
SOT fibroso de Antoniny, Polônia	65-85
SOT fibroso de Co. Offaly, Irlanda	98-99
SOT amorfo de Cork, Irlanda	80
SOT Massachusetts, EUA	60-77
SOT Italiano	70-80
SOT Japonês	20-98
SOT Canadense	17-80
SOT da Malásia	65-97



Laboratório Credenciado pelo INMETRO

Tel.: 11 3611-0833

www.falcaobauer.com.br

bauer@falcaobauer.com.br

- Inspeções, recuperação e reforço estrutural convencional e com fibra de carbono.
- Gerenciamento e fiscalização de obras.
- Provas de carga e controle de recalque.
- Controle global da qualidade na construção civil, controle tecnológico de concreto, solos, pavimentação e estruturas metálicas.
- Análises químicas, físicas e metalográficas.
- Meio ambiente.



com Arman, 1971. Na Europa utiliza-se, para a queima de solos turfosos, uma temperatura mais alta, de 550°C, aplicando-se um C = 1,04, com correção.

No entanto, segundo Edil, 2003, a diferença é usualmente menor e, portanto, pouco significativa para questões práticas. O quadro da página anterior apresenta teores orgânicos de vários depósitos de turfas no mundo, com o objetivo compativo.

A água, presente na matéria orgânica, é o seu teor de umidade, um de seus parâme-

tros mais importantes, representado em termos de massa ou peso:

$$W = \frac{W_w}{W_s} \cdot 100\%$$

Onde:

W é o teor de umidade

W<sub>w</sub> peso de água

W<sub>s</sub> peso de solo seco

Solos orgânicos com pequenos teores de umidade, W, indicam que está seco, en-

quanto que com valores maiores há água presente. O teor de umidade pode, facilmente, ser medido em laboratório, seguindo-se recomendações do padrão americano ASTM D2216, que seca o solo em forno, durante 24 horas, à temperatura de 105°C. Para o caso de amostras de solos turfosos, há sempre a questão de que o teste padrão de secagem, a 105°C, durante 24 horas, carboniza a matéria orgânica, produzindo valor elevado do teor de umidade. Contudo, a prática padrão é secar a amostra à temperatura de 105°C e, com 24 horas de secagem, calculando-se o teor de umidade com a seguinte fórmula:

$$W = \frac{(W_2 - W_3)}{(W_3 - W_1)} \cdot 100\%$$

Onde:

W<sub>1</sub> é o peso (ou a massa) do recipiente mais a tampa

W<sub>2</sub> é o peso (ou massa) do recipiente + tampa + solo úmido

W<sub>3</sub> é o peso (ou massa) do recipiente + tampa + solo seco

No caso de solos turfosos, a água fica contida na matéria orgânica, enquanto permanecem as células das plantas. De um modo geral, o teor de umidade do solo diminui, à medida em que aumenta seu teor mineral. Solos turfosos fibrosos costumam apresentar teor de umidade bem superiores aos solos turfosos humificados, chegando-se a valores da ordem de 1.500%, se compararmos aos solos minerais, que variam de 3 a 70%. Depósitos de solos moles, por sua vez, quando abaixo do nível d'água, podem apresentar teores de umidade bem superiores a 100%. Na próxima edição apresentaremos mais informações.



Figura 8 - Limpeza superficial de terreno, com solo orgânico turfoso, preparando-se para o melhoramento.

## REFERÊNCIAS

- **Thomas Kim** é engenheiro civil e trabalha com melhoramento de solos moles.
- CASAGRANDE, A. and Fadum, R. E. (1940). Notes on Soil Testing for Engineering Purposes. Publication 268, Graduate School of Engineering, Harvard University, Cambridge, MA.
- COUTINHO, R. Q. Aterro experimental instrumentado levado à ruptura sobre solos orgânicos de Juturnaíba. 1986. 632 f. Tese (Doutorado) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1986.
- DHOWIAN, AW & EDIL, Tuncer. (1980). Consolidation Behavior of Peats. Geotechnical Testing Journal - GEOTECH TESTING J. 3. 10.1520/GTJ10881J.
- EDIL, Tuncer & DHOWIAN, A.W.. (1981). At-rest lateral pressure of peat soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. 107. 201-217.

# DIMENSIONANDO O MELHORAMENTO DO SOLO MOLE COM GEOENRIJECIMENTO I

Figura 1 - Processo de melhoramento do solo mole, com Geoenrijecimento na Cidade do Rock, RJ. A presença de solos ultra moles com total ausência de resistência foi um desafio vencido.

Quando comparamos soluções de melhoramento de solos, seja por transferência de cargas ou com geoenrijecimento, sempre há debate e surgem questões relacionadas à custo. Mas como comparar, tecnicamente, estes dois sistemas, já que ambos objetivam obter um solo compósito como produto final? Evidentemente, a eficiência ou redução do recalque é a resposta certa além, claro, da estabilidade do solo melhorado. Na realidade, não há como comparar tecnicamente os dois sistemas que, como veremos, representam conceitos distintos. No entanto, muito pode-se falar sobre intervenção ou melhoria das características dos solos argilosos moles. Talvez o mais antigo método, além da formação de colunas, seja o de simplesmente remover o solo, substituindo-o por solo competente. No entanto, só é razoável e econômico para profundidades que não excedam os 3m, e que não ultrapasse o nível d'água do terreno. O aspecto ambiental, também, é fator limitante. Com relação ao pré-carregamento, com uso de geodrenos, ainda hoje muito utilizado no aumento da capacidade de carga de solos moles, é solução genérica e muito pouco eficiente, na medida em que varia a profundidade desses depósitos ao longo de um trajeto, o que se materializa

em estradas com enormes deformações verticais e distorções, tornando nossas estradas perigosas e de baixa qualidade. Além disto, tem como desvantagens uma série de imposições que, normalmente, não são cumpridas:

- A solução é crítica para encontros de pontes e viadutos.
- A sobrecarga deve-se estender horizontalmente por pelo menos 10m além do perímetro da construção;
- Implica em transporte de grandes quantidades de solo. Seu custo, hoje, torna o preço inviável nas grandes capitais;

- A sobrecarga deve permanecer por meses ou até mesmo anos, até que instrumentos geotécnicos como piezômetros, placas de recalque e inclinômetros, além de cálculos necessários, sinalizem sua remoção;
- É completamente ineficiente quando da existência de depósitos de solo argiloso mole profundos, que apresentam pouca ou nenhuma permeabilidade;

Esta matéria se propõe a conceituar a técnica de melhoramento profundo de solos moles, subdividindo-a em geoenrijecimen-



Figura 2 - O controle piezométrico da poropressão é fundamental durante o melhoramento de solos moles.



to e georeforço. Começaremos com o Geoenrijecimento.

### O geoenrijecimento do solo mole

O melhoramento de solo com geoenrijecimento é uma modalidade de grouting, desenvolvido especificamente para solos argilosos moles, denominado CPR Grouting. Mas o que é Grouting? Grouting é a única modalidade geotécnica de intervenção no solo que, efetivamente, modifica suas propriedades, fazendo com que o próprio solo passe a suportar as cargas previstas, com parâmetros geotécnicos previamente impostos, sem qualquer efeito coluna. O geoenrijecimento com CPR Grouting, portanto, utiliza integralmente a Teoria da Consolidação do solo, basicamente criando meio artificial drenante, seguido de um intenso processo de compressão radial do solo, com bulbos de argamassa seca (geogROUT), via expansão de cavidades. O resultado é um solo completamente modificado e homogeneizado, com parâmetros de resistência e rigidez pré-estabelecidos em toda a profundidade do depósito de solo mole. Sua grande particularidade recai sobre os parâmetros de resistência e rigidez do solo, permanentemente verificados à medida em que o serviço evolui, estabelecendo-se rígido controle da qualidade do

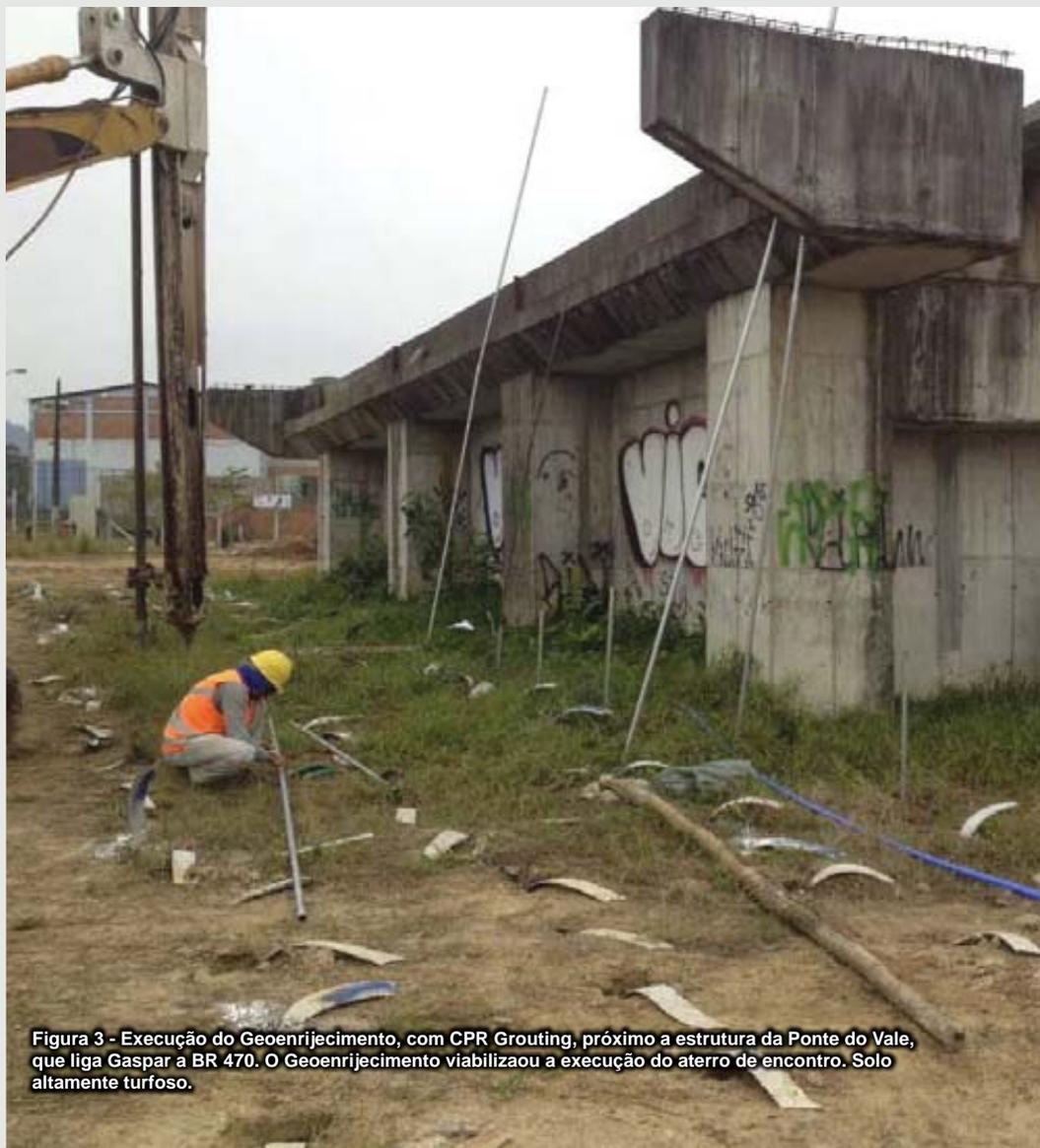


Figura 3 - Execução do Geoenrijecimento, com CPR Grouting, próximo a estrutura da Ponte do Vale, que liga Gaspar a BR 470. O Geoenrijecimento viabilizou a execução do aterro de encontro. Solo altamente turfoso.

volume do solo geoenrijecido, com certificação geotécnica com análises piezométricas e pressiométricas ou volumétricas com tomografia por imagem, seguindo-se as diretrizes do estudo de Cirone, 2018, “Geoenrijecimento - Projeto e Execução”. Geoenrijecer solos argilosos moles envolve estabelecer parâmetros geotécnicos necessários, com base em programa de cálculo específico, que idealiza a futura condição do solo homogeneizado, com características de resistência e rigidez adequada a cada projeto.

### Aplicações típicas

- Estabilização de solos.
- Eliminação de recalques.
- Reforço de fundações readequando o solo à fundações existentes.
- Escavações.
- Regiões com Karst.
- Encontros de pontes.
- Torna inerte solos contaminados.
- Específico para aterros sobre solos moles.
- Ideal para torres eólicas.

### Vantagens

- Econômica.
- Ausência total de vibrações.
- Redução significativa no tempo de construção.
- Amiga do ambiente.
- Ausência de aterros, refugos e lama.
- Chuvas não interrompem o serviço.
- Sem limite de profundidade.
- Eficiência inigualável.
- Ausência de colunas e efeito de arqueamento.

O geoenrijecimento basicamente consiste das fases de cravação de geodrenos e da formação de verticais com bulbos de compressão radial do solo, promovendo o geoenrijecimento.

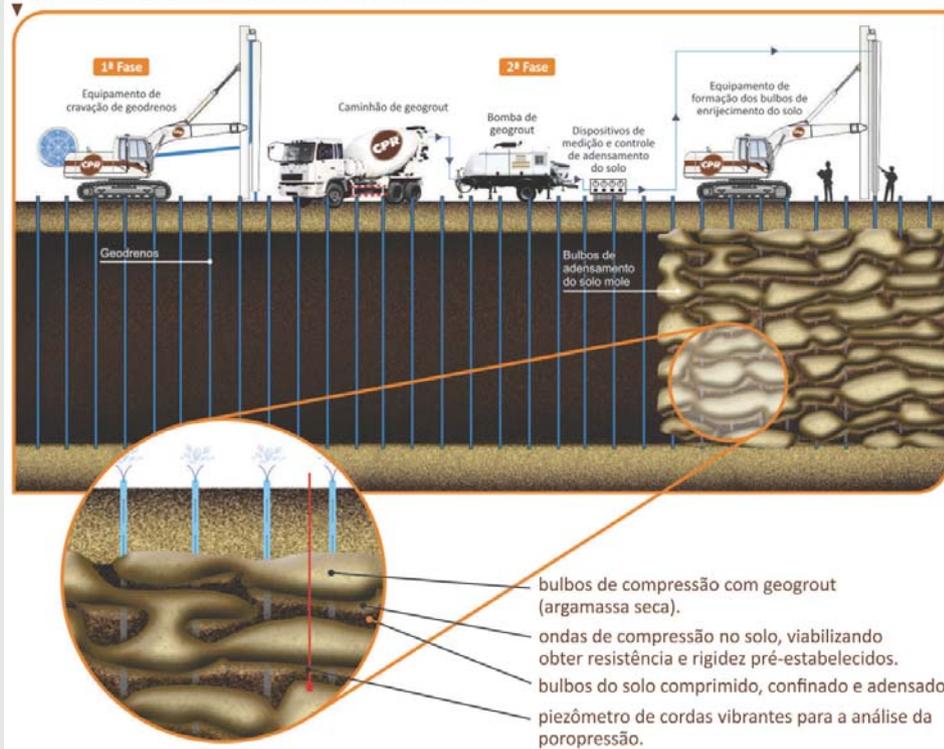


Figura 4 - Representação das fases de execução do processo de geoenrijecimento do solo mole.

### Princípios básicos do geoenrijecimento do solo mole

No processo de geoenrijecimento, produz-se pressões que induzem a consolidação, à medida em que comprime-se o solo radialmente, via expansão de cavidades, com argamassa seca, fazendo com que o excesso de poropressão, intencionalmente criado, seja, agora, dissipado na rede de geodrenos pré-fixada. Este forte processo deformativo imposto no solo, é pré-estabelecido metro a metro, ao longo de verticais, em seu contexto volumétrico, promovendo alterações irreversíveis em sua massa, à medida

em que modificam-se porções relativas de seu volume.

Para tal, estabelecem-se dois critérios - o de volume e o de pressão - para a formação dos bulbos de compressão radial do solo, considerando-se a diversidade de camadas mais ou menos resistentes. Assim, por exemplo, se o programa de cálculo estabelece o critério de volume de 900 litros e o critério de pressão de 7kg/cm<sup>2</sup> para cada bulbo, significa dizer que, no campo, se o solo está aceitando 900 litros por bulbo, metro a metro, apresenta bastante compressibilidade. Se, por outro lado, surgir uma camada mais resistente, o que acon-



Figura 5 -

# POR QUE VOCÊ DEVE SE INTERESSAR POR NOSSOS WEBINARS GEOTÉCNICOS?

## Construção

Apresenta detalhes executivos.

## Conhecimento

Profissionais passam dicas valiosas.

## Desenvolvimento

Acesso a cursos, workshops, conferências e artigos.

## Atualização

A informação tecnicamente mais atualizada.



Para maiores informações, acesse: <http://www.softsoilgroup.com.br/webinar>  
ou envie um e-mail para: [atendimento@softsoilgroup.com.br](mailto:atendimento@softsoilgroup.com.br)



tecerá é que não será possível expandir os 900 litros, mais sim, digamos 500 litros. Automaticamente adotar-se-á o critério de pressão até obter-se os 7kg/cm<sup>2</sup> naquele bulbo de 500 litros e assim sucessivamente. Os dois critérios deverão ser atendidos. O objetivo conceitual do geoenrijecimento é a homogeneização completa do volume de solo mole, estabelecendo novos parâmetros geotécnicos. A análise de projeto, no geoenrijecimento do solo mole, assume que cargas verticais cisalhantes sejam integralmente suportadas pela massa de solo homogeneizado, através das seguintes proposições:

- Desenvolvem-se verticais, com bulbos que comprimem radialmente o solo mole em meio drenante artificial previamente imposto, estabelecendo-se o conceito de célula unitária.
- Estabelece-se uma razão de substituição, função do volume necessário de bulbos, que comprimem radialmente o solo via expansão de cavidades.
- A célula unitária é deformada.
- Há conseqüente aumento da resistência e rigidez do solo.
- Induz-se tensões positivas.
- Estabelece-se a resistência equivalente e, finalmente, obtém-se o conceito de solo homogeneizado.

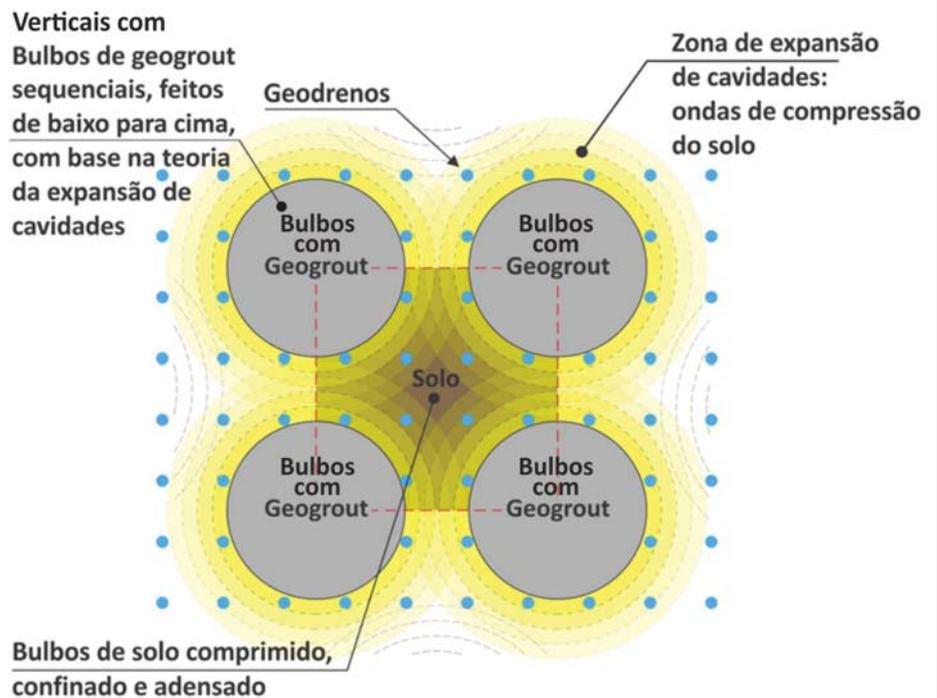


Figura 6 - Representação, em planta, da célula unitária do geoenrijecimento do solo mole, homogeneizando o solo.

### O conceito de célula unitária

O processo de geoenrijecimento inicia-se com o estabelecimento de meio drenante artificial, de modo a viabilizar o processo de consolidação. Assim, cravam-se ge-

odrenos até a base do solo mole. Em seguida, o equipamento promove verticais executando bulbos com argamassa seca, comprimindo o solo radialmente, de baixo para cima, utilizando-se espaçamentos que variam, em planta, de 2,0 m a 6,0 m.



Figura 7 - Processo de geoenrijecimento do solo com a formação de bulbos de geogROUT para formação de verticais de modificação do solo tendo, cada uma, diâmetro aproximado de 1,10m, a partir da cota -12m.

Desta forma, geodrenos e verticais de adensamento são realizadas conforme malhas regulares, compondo um padrão geométrico, triangular ou quadrado (figura 6), desencadeando-se o Geoenrijecimento.

Para cada malha apresentada define-se uma célula unitária, que representará o novo solo geoenrijecido. A célula unitária pode ser convenientemente comparada a um cilindro (figura 10), cujo diâmetro é obtido igualando-se a área transversal da célula unitária à área do círculo equivalente. A presença de geodrenos, ao longo do perímetro da célula unitária, permite definir um “volume padrão, delimitado por contorno rígido drenante, sem atrito, simétrico às verticais com bulbos de compressão radial do solo”. Com isto, efetua-se a transformação apresentada na figura 10. O número de geodrenos e sua disposição na célula unitária, influencia a condição de contorno do processo de compressão radial que, dependendo da malha utilizada, o número de geodrenos variará de 3 até 8, oferecendo amplas opções de drenagem, melhorando a eficiência do sistema geoenrijecido.

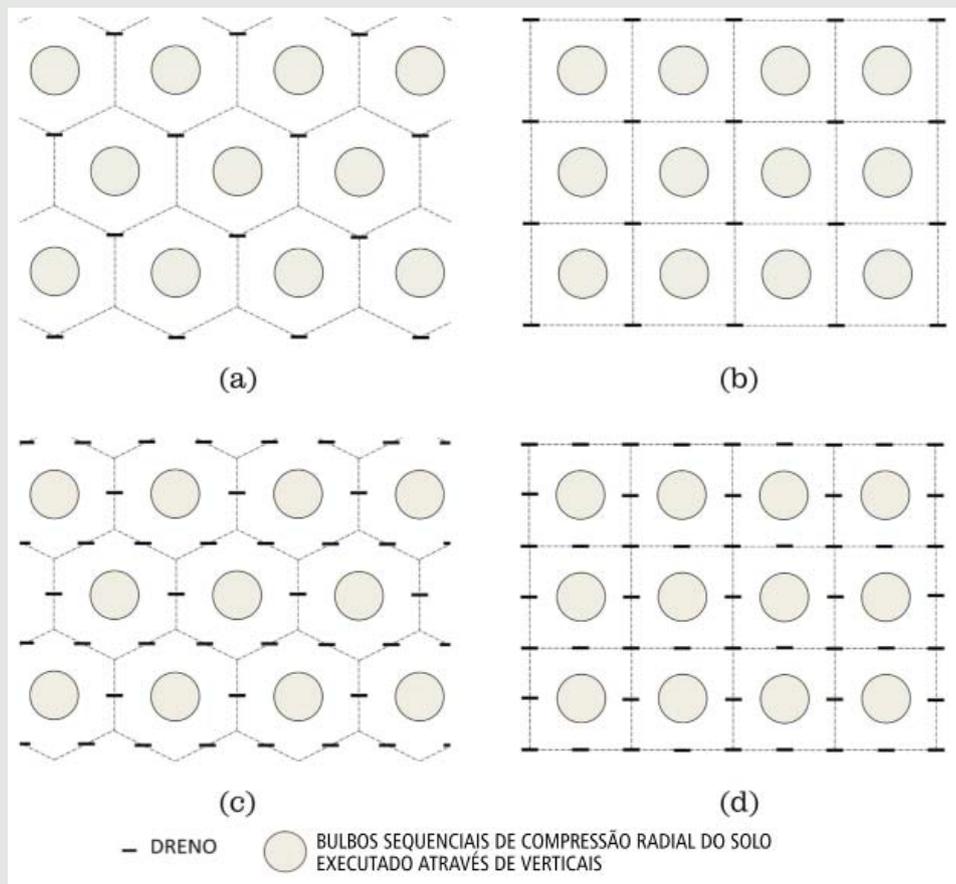


Figura 8 - Visualização, em planta, das malhas de geoenrijecimento do solo frequentemente utilizadas. Nos casos (a) e (b) o espaçamento entre verticais é igual ao espaçamento entre geodrenos. Nos casos (c) e (d) o espaçamento entre verticais é igual ao dobro do espaçamento entre geodrenos.





Figura 9 - Formação das duas linhas de verticais de Geoenrijecimento do solo pertinente ao 1º “muro” de reforço do solo, totalizando 99 verticais que consumiram 91 caminhões betoneira de geogrou de 8m³ cada, ou seja, praticamente um caminhão por vertical.

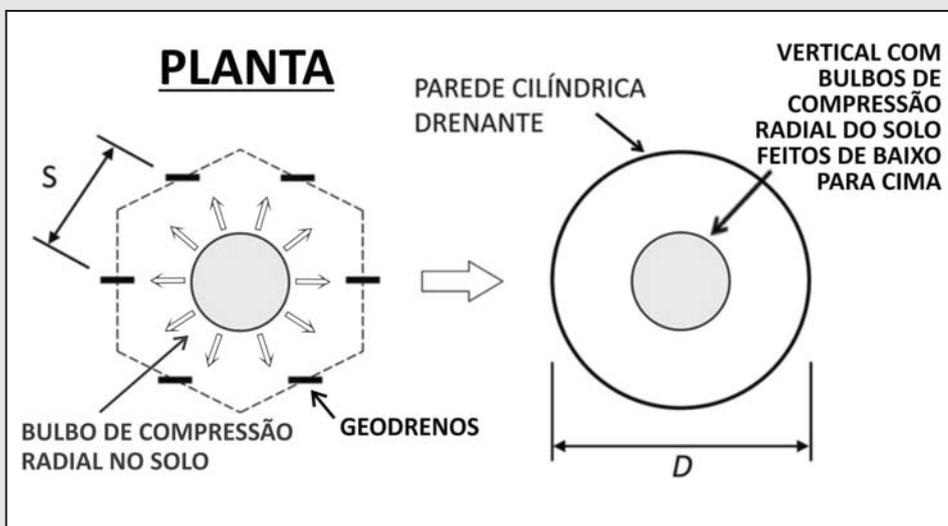


Figura 10 - Geodrenos são transformados em paredes cilíndricas drenantes (Ye et al., 2012).

Em todos os casos possibilita-se calcular a área da célula unitária,  $A$ , e seu diâmetro equivalente,  $D$ , a partir do espaçamento entre geodrenos,  $S$ . O tipo de ma-



Figura 11 - Melhoramento de solos moles com Geoenrijecimento para construção de rodovia no Contorno de São Roque para acesso à Raposo Tavares, em São Roque, SP.





Figura 13 - Início do Geoenrijecimento do solo nas obras da Rodovia Transoeste no Rio de Janeiro.



Figura 12 - O Geoenrijecimento do solo a mais de 12m de profundidade permitiu a escavação no solo mole e o assentamento de galerias de drenagem na obra do novo Bairro "Pontal Oceânico, RJ.

Iha utilizada, determinará o espaçamento entre verticais. A tabela, a seguir, resume características geométricas em função do espaçamento entre geodrenos, para diversas células unitárias.

### Razão de substituição

A formação dos bulbos de compressão radial do solo com geogrou, na realidade, é um processo de expansão de cavidades feito através de verticais, com bulbos que não ficam apurados, em razão do ambiente do solo mole (figura 13). O passo seguinte estabelece o volume de geogrou de formação dos bulbos de compressão radial do solo, ao longo das verticais da célula unitária, que caracterizarão o processo de geoenrijecimento para um projeto específico.



Figura 14 - O Geoenrijecimento de depósitos de solo mole foram essenciais para a construção do bairro Pontal Oceânico no Rio de Janeiro.

### Geometria das células unitárias

Formato	Espaçamento entre verticais	Área da célula unitária	Diâmetro equivalente
	$S$	$\frac{\sqrt{3}}{2} S^2$	$D = 1,05 S$
	$S$	$S^2$	$D = 1,13 S$
	$2S$	$2\sqrt{3} S^2$	$D = 2,1 S$
	$2S$	$4S^2$	$D = 2,257 S$

$S$  = espaçamento entre geodrenos.

Esta condição pode ser materializada com o conceito da Razão de Substituição,  $R_S$ , significando “o volume dos bulbos de compressão radial do solo produzidos por uma vertical, dividido pelo volume da célula unitária indeformada”. Portanto, com base nesta figura, é possível definir a razão de substituição com a seguinte expressão:

$$R_S = \frac{\sum_{i=1}^N V_{gi}}{A N h}$$

onde  $V_{gi}$  é o volume do bulbo expandido  $i$ -ésimo,  $A$  é a área da seção transversal da célula unitária,  $N$  é o número de bulbos e  $h$  é

o espaçamento vertical entre verticais. Para o caso de todas as verticais com bulbos que farão a compressão radial do solo terem volumes iguais, a razão de substituição será:



$$R_S = \frac{V_g}{A h}$$

onde  $V_g$  é o volume de cada bulbo pelo critério de volume,  $A$  será a área da seção transversal da célula unitária e  $h$  o espaçamento vertical entre centros de bulbos.

Considerando-se todo o solo com um determinado volume, a razão de substituição será o volume substituído pelo geogROUT. Este parâmetro tem importante efeito no comportamento do geoenrijecimento, conforme será apresentado a seguir, com duas demonstrações.

### Deformação na célula unitária

Por meio de considerações pertinentes à mecânica dos solos, relaciona-se a deformação volumétrica imposta ao solo com a razão de substituição (Cirone, 2016a). A relação obtida estabelece que a deformação volumétrica dependerá do processo de

### CORTE

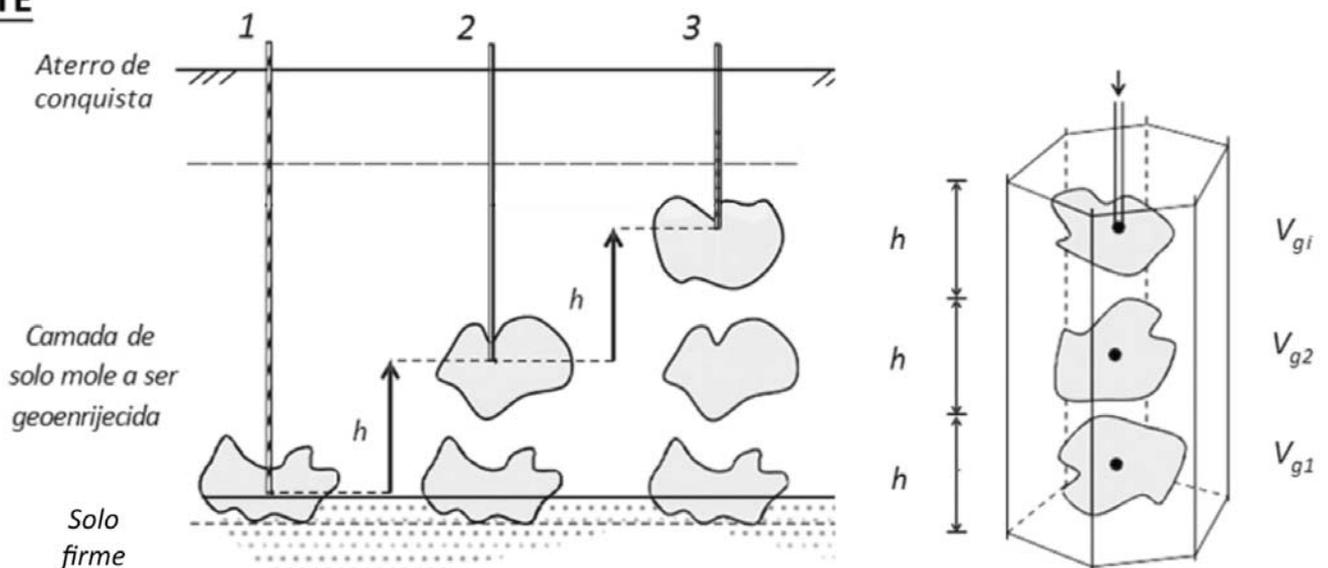


Figura 15 - Representação, em corte, esquemática do processo de expansão dentro da célula unitária indeformada, considerando-se uma malha triangular.

## Demonstração 1

A razão de substituição é determinada em função da geometria da malha de geodrenos e das verticais com bulbos de compressão do solo que terão critério de volume. Considere a malha (c) da figura 8, adotando-se um espaçamento de drenos igual a  $S = 1,5\text{m}$ . A área da célula unitária é calculada de acordo com a tabela da página anterior:

$$A = 2\sqrt{3}S^2 = 7,79\text{m}^2$$

O critério de volume, sugerido para cada bulbo, é  $V_g = 900\text{ l}$ , expandindo-o a cada metro. Logo, tem-se:

$$R_S = \frac{V_g}{Ah} = \frac{0,9}{7,79 \times 1} = 11,55\%$$

Significando que 11,55% do volume original do solo será substituído por bulbos de compressão radial expandidos com geogROUT.

adensamento (através do coeficiente  $\lambda_c$ ) e da razão de substituição, ou seja:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta e}{1 + e_0} = \lambda_c R_S$$

onde,  $\lambda_c$  é o coeficiente de redução de volume devido ao adensamento,  $R_S$  a razão de substituição e  $e_0$  o índice de vazios do solo na condição natural.

A expressão permite levantar, de maneira simplificada, o índice de vazios final ao término do geoenrijecimento, com o excesso de poropressão completamente

## Demonstração 2

Deseja-se montar planilha eletrônica que realize cálculos de geoenrijecimento de solos moles automaticamente, otimizando projetos. O ábaco, a seguir, foi idealizado com planilha Excel para facilitar a estimativa da razão de substituição no caso da malha (c) da figura 16. A razão de substituição foi calculada variando-se o espaçamento da malha e o volume dos bulbos de compressão radial do solo, a cada metro, ao longo de uma vertical.

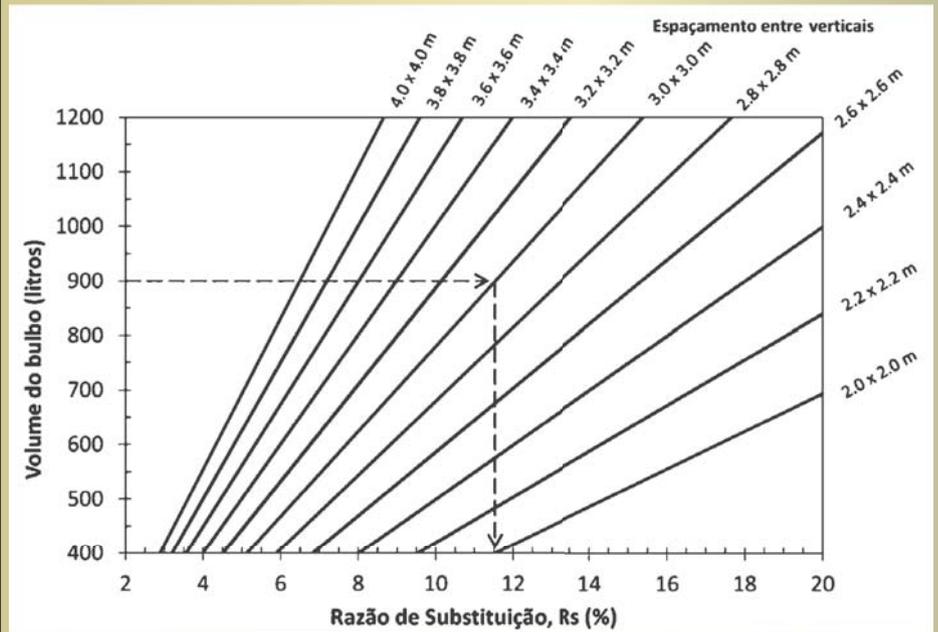


Figura 16 - Gráfico com a relação volume de bulbo versus razão de substituição.

dissipado, após o processo de compressão radial do solo. Dever-se-á considerar este valor como deformação média dentro da célula unitária.

A determinação, em laboratório, do coeficiente de redução de volume imposto pelo adensamento,  $\lambda_c$ , possibilita melhores estimativas. Para efeito de cálculo, considera-se  $\lambda_c = 1$ .

Soft Soil Group

## REFERÊNCIAS

- **Patricia Karina Tinoco** é engenheira civil. Trabalha com melhoramento de solos moles.
- ASTM D4719 (1987) Standard Test Method for Pressuremeter Testing in Soils. Annual Book of ASTM Standards, New York, v. 04.08.
- BERILGEN M., Investigation of Stability of Slopes under Drawdown condition, Computers and Geotechnics, Vol. 34, 81-91, 2007.

# Cravação de Geodrenos

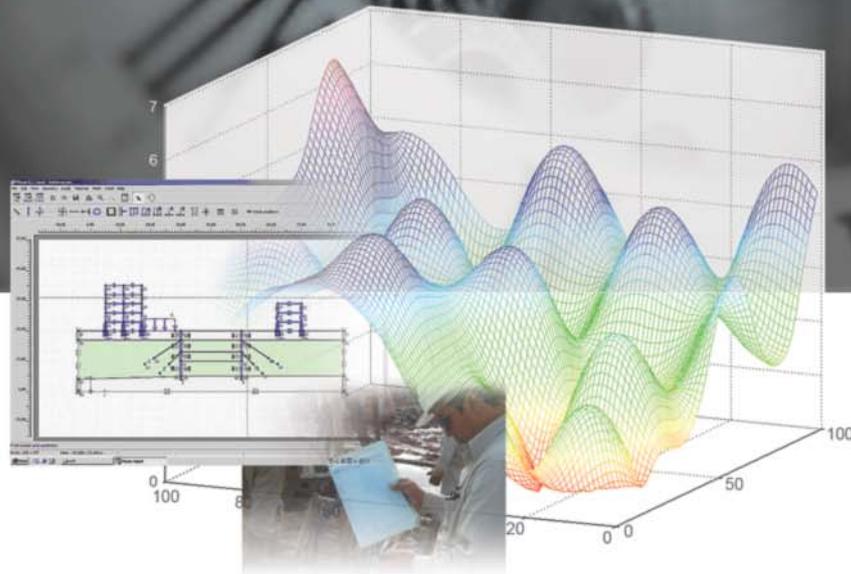


O uso de geodrenos verticais, objetiva remover água do subsolo, promovendo o adensamento vertical da camada de argila mole, obtendo-se assim a melhoria da compressibilidade do solo mole. O método é o da cravação de membranas plásticas, com cerca de 10 cm de largura por 5 mm de espessura, envolvidas por geomembranas. A cravação é feita por meio de lanças verticais, que podem atingir cerca de 30 metros de profundidade.



# GEOENRIJECIMENTO DE SOLOS MOLES PRECISÃO E SEGURANÇA

Todo solo de fundação exige condições geotécnicas estáveis e precisas, o que se traduz em um investimento sujeito a risco. A presença de solos moles, com valores de SPT inferiores a 5, implica em soluções que podem durar meses e até anos e, assim mesmo, apresentam algum risco, seja ambiental ou de recalques inesperados. O geoenrijecimento do solo é a resposta para o melhoramento de solos moles, pois promove a segurança necessária à presença de deformações laterais e recalques, além de, principalmente, induzir um intenso e seguro processo de adensamento, muito superior ao exigido pelo futuro projeto, eliminando qualquer possibilidade de recalques posteriores. Tudo isto, com o acompanhamento preciso de sondagens tomográficas por imagem e pressiométricas, com respostas antes, durante e depois dos serviços executados. Ou seja, com a precisão e a segurança de um bom relógio Suíço.



# GEOENRIJECIMENTO [CPR GROUTING]

[www.engegraut.com.br](http://www.engegraut.com.br)

O geoenrijecimento de depósitos de solo mole, foi desenvolvido pela ENGEGRAUT e executada há mais de 15 anos em todo o Brasil, estando protegido no INPI por patente.



# UNIONTECH

TECNOLOGIA DE JUNTAS

UNIONTECH JUNTAS E IMPERMEABILIZAÇÕES LTDA.

Fone/Fax: (11) 2215-1313 / 2215-1325 E-mail: [uniontech@uniontech.com.br](mailto:uniontech@uniontech.com.br)

[www.uniontech.com.br](http://www.uniontech.com.br)