

# Soft Soil Brazilian Review

SOFTSOILBRAZILIANINSTITUTE.COM.BR

SSBI

SOFT SOIL  
BRAZILIAN  
INSTITUTE

JULHO-AGOSTO 2020  
EDIÇÃO AMÉRICA DO SUL

## 3 Solos Moles

Aterros, solos moles e recalques.

## 16 Solos Moles

Melhorando solos de fundação para torres eólicas.

## 22 Solo Mole

Um caso problemático de ampliação de rodovia com presença de solos moles.

## 12 Consulta

Dicas de como interpretar curvas de recalque.

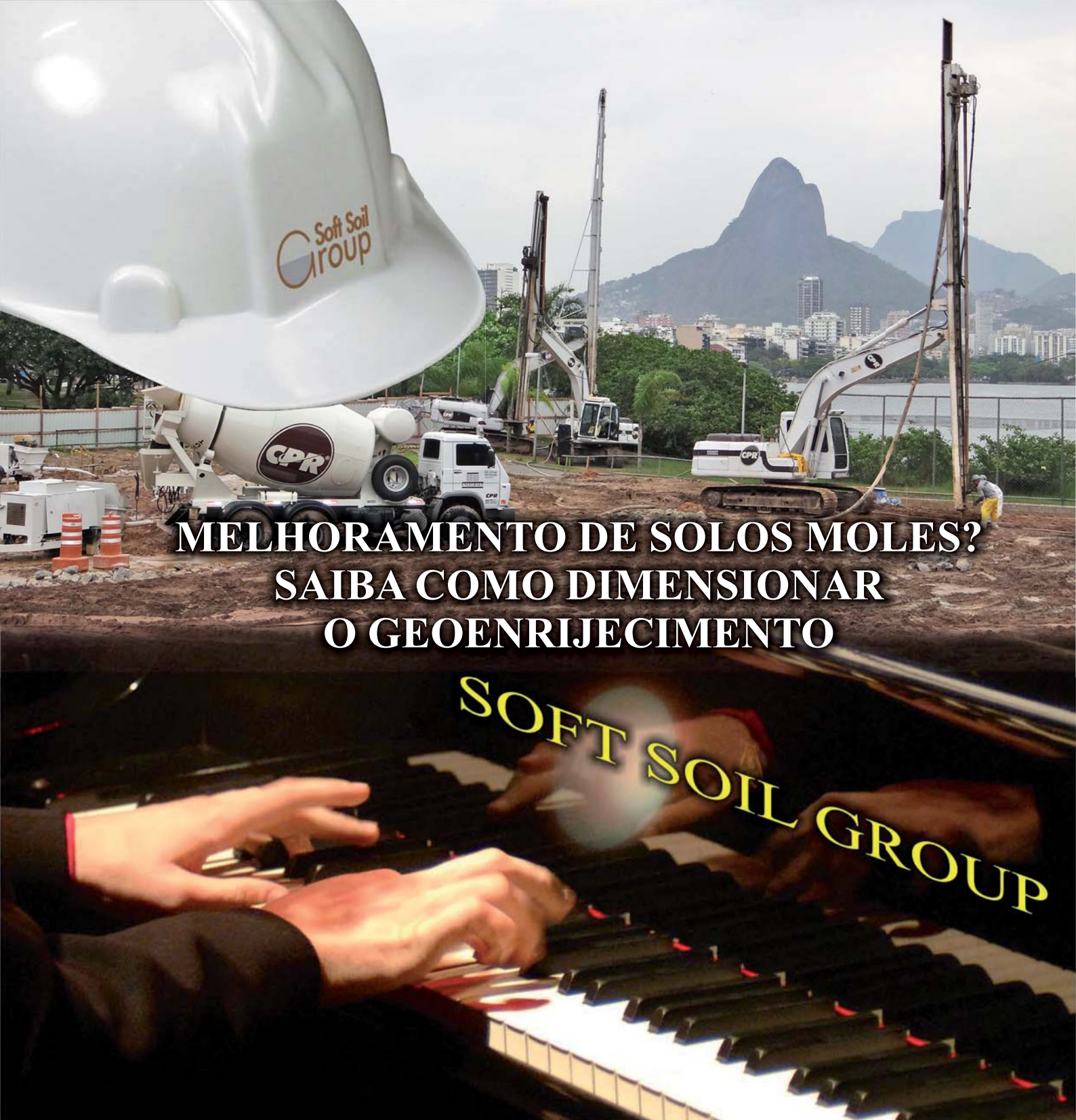


## ATERROS, SOLOS MOLES E RECALQUES

É PRECISO ENTENDER ESTA INTERAÇÃO

PÁGINA 4

12



## MELHORAMENTO DE SOLOS MOLES? SAIBA COMO DIMENSIONAR O GEOENRIJECIMENTO

**O SOFT SOIL BRAZILIAN INSTITUTE 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. Saiba como dimensionar o Geoenrijecimento do solo mole, através de planilha exclusiva. Basta apenas acessar o link: [http://www.engegraut.com.br/geoenrijecimento/MC\\_v1.0.rar](http://www.engegraut.com.br/geoenrijecimento/MC_v1.0.rar)



<http://softsoilbrazilianinstitute.com.br>

# Soft Soil Brazilian Review

Edição - Jul / Ago - Nº 12



**SSBI** SOFT SOIL  
BRAZILIAN  
INSTITUTE

A PRIMEIRA E ÚNICA REVISTA DIGITAL GEOTÉCNICA  
ESPECIALIZADA EM SOLOS MOLES.

# 12

SOLOS MOLES  
Aterros, solos moles e recalques. **04**

*Por Joaquim Rodrigues*

SOLOS MOLES  
Melhorando solos de fundação para torres eólicas. **14**

*Por Patrícia Tinoco*

SOLOS MOLES  
Um caso problemático de ampliação de rodovia  
com presença de solos moles. **22**

*Por Thomas Kim*

## EDITORIAL

Momentos difíceis, como este que passamos, no pico da pandemia, nos fazem repensar sobre nosso trabalho, nossos objetivos, nossa família e até nossas vidas. Está correta nossa trajetória de vida? Enquanto analisamos, é importante lembrar que gratidão é uma virtude importante no mundo que vivemos. Neste particular, agradeço a todos os leitores que acompanham nossa revista, o que nos impulsiona sempre positivamente.

Nesta edição, ainda sob o efeito do Coronavírus, procuramos informar três palavras mágicas, aterros – solos moles – recalques, evidenciando-as conceitualmente e sua interação, com as consequências do mal dimensionamento, tão comum nos projetos de estradas. A presença de solos moles no terreno, impõe situações cujo objetivo sempre, é ter um mínimo de recalque residual total ou homogêneo aceitável e, nunca, recalques diferenciais.

A matéria “melhorando solos de fundação para torres eólicas”, procura orientar o leitor quando da existência de solos moles no terreno de fundação, oferecendo uma solução realmente geotécnica, como opção para outras complicadas a base de colunas e estacas. Por fim, “um caso problemático de ampliação de rodovia, com presença de solos moles”, procuramos tornar evidente armadilhas de obras deste gênero, já que procura-se promover uma intervenção em massas de solo que estão em equilíbrio, o que é bem difícil. Boa Leitura.

Joaquim Rodrigues

# ATERROS, SOLO MOLE E RECALQUES



Figura 1 - Esta laje industrial está completamente apoiada em estacas premoldadas de 40cm de lado e no aterro lançado sobre espessa camada de solo mole com mais de 30m de profundidade. As estacas por sua vez apresentam recalque diferencial entre elas, motivado pelo atrito negativo. Evidentemente, o aterro recalcou também. O resultado final, são trincas e bacias na extensa laje industrial que continua recalcando.

Tensões e deformações são dois movimentos interrelacionados em que, geralmente, vemos apenas o segundo, manifestando-se no nosso dia a dia. Se lançarmos um aterro sobre um terreno, sua resistência é acionada e, claro, algum movimento ocorrerá como prova de sua capacidade de carga. Evidentemente, se no terreno houver solo mole, sua capacidade de carga é quase nenhuma e muito movimento ocorrerá. Entendamos que na engenharia geotécnica, a capacidade de carga de um terreno é sua aptidão para suportar cargas. De forma mais explícita, trata-se da pressão média máxima que ocorrerá entre o aterro/elemento de fundação e o terreno, sem que se produza a rutura do solo. Em tempo, capacidade de carga do solo é dada pela equação  $Q_a = Q_f/FS$ , onde  $Q_a$  é a capacidade de carga admissível do ter-



Figura 2 - Nesta mesma unidade industrial (acima) foram feitas sondagens GPR para verificar onde o aterro descolou da laje.

# Leica Geosystems introduces rig solutions for pile drivers and drill rigs

## New Leica iCON offering becomes latest addition to one-for-all MC1 software platform



3D machine control solution for pile drivers and drill rigs on the Leica MC1 platform

(HEERBRUGG, Switzerland, 25 February 2020) – Leica Geosystems, part of Hexagon, today announced the launch of the Leica iCON rig solutions for pile drivers and drill rigs on the one-for-all MC1 3D machine control software platform to precisely and safely guide operators to the exact position and depths needed for construction projects.

Further growing its construction portfolio of easy-to-use and easy-to-integrate products, Leica Geosystems now allows rig operators to work faster, safer and more accurate on-site and share real-time data between field and office. Users can leverage the same interchangeable MCP80 panel to run the MC1 3D machine control software as an intuitive all-in-one system for drill rigs and pile drivers.

“It is so easy! It gives me total freedom in my work. If I receive an offset height, I can build my drill pattern in the display, and I can do the drilling myself accurately. Every hole is drilled to specification with the right depth and angle. Everything is fast, and the as-built documentation is easy to export from the system afterwards,” explains Odd Are Frydenlund, drill rig operator at Fjellsprenger AS in Norway.

### Seamless integration improves construction workflows between the field and office

The Leica iCON iRP3 for pile drivers and the Leica iCON iRD3 for drill rigs 3D machine control solution on

the MC1 platform is connected to all other operations on the construction project, supporting IREDES, KOF and LandXML file formats and integrate seamlessly with the iCON portfolio. Thanks to the new configuration of the iCON rig solution, the operators can work in any GNSS-denied areas with dual total station positioning.

“We can now drive an average of 25-50 piles per day depending on the length of the piles and on how soft the underground is,” says Till Leve Röscher, project manager at Arkil A/S. “The machine control solution allows us to save 5 to 10 minutes per pile.”

MC1 allows users to share and visualise all project and as-built data directly on the panel through Leica ConX, the cloud-based collaboration platform, connecting the field and office seamlessly. With the seamless integration among the iCON portfolio, drill patterns are created in Leica iCON site.

Both innovations are available for hands-on demonstrations at CONEXPO-CON/AGG 10-14 March 2020 in Las Vegas, United States, on the Hexagon Booth in North Hall, at stand #N-12166.

when it has to be **right**

**Leica**  
Geosystems

reno em kN/m<sup>2</sup>, Qf é a capacidade de carga final do terreno, em kN/m<sup>2</sup> e FS é o fator de segurança. Todo projetista deve especificar a máxima movimentação pertinente a cada projeto. Ou seja, qual será o estado de deformação final aceitável? A presença de solos moles no terreno impõe situações em que objetiva-se, sempre, haver um mínimo de deformações traduzidas em um recalque total ou homogêneo residual aceitável e, nunca, recalques diferenciais. Em qualquer

### O recalque pertinente à consolidação do solo mole

Evidentemente, para se obter a taxa de recalque e seu valor, torna-se necessário entender a teoria geotécnica da consolidação. Pelo fato do fluxo de saída da água, do solo mole saturado, ser em todas as direções, o processo é tridimensional. Confinando-se o solo lateralmente, aceita-se a teoria da consolidação unidimensional. Como se vê,

a permeabilidade é de extrema importância para a consolidação do solo mole. Na tabela abaixo, apresentamos particularidades pertinentes aos tipos de deformação (recalques) em solos moles.

Solo saturado	Deformação			
	Imediato	Consolidação	fluência	Inchamento
Silte Argiloso	Sim	Muito Pouca	Não	Pouco
Argiloso	Sim	Sim	Sim	Sim
Argila Orgânica	Sim	Pouca	Sim	Pouco

PARTICULARIDADES DEFORMATIVAS EM TERRENOS COM SOLOS MOLES (APÓS O CARREGAMENTO)		
Permanência (deformação)	Definitivo	O solo reduziu seus vazios e, conseqüentemente, seu volume. O recalque devido a consolidação primária e secundária pertence a esta categoria.
	Provisório	O recalque imediato situa-se nesta categoria.
Modo de ocorrência (deformação)	Imediato	É um recalque característico do solo mole, que ocorre quase que simultâneo à ação do carregamento. Depende da carga aplicada e do tamanho da fundação.
	Por Consolidação Primária	São recalques que dependem do tempo, geralmente muito tempo, e deve-se a expulsão da água da massa de solo saturada. Depende da carga aplicada e do tamanho da fundação.
	Por Consolidação Secundária	É um recalque todo particular, que não depende da expulsão da água do solo e atua sob tensão constante, intensamente em presença de solos moles orgânicos. Assemelha-se à fluência (creep) do concreto.
Uniformidade (deformação)	Tudo igual ou regular (homogêneo)	Ocorre quando todo o aterro ou a construção recalca por igual, tendendo a zerar em curtíssimo prazo. Situação típica do melhoramento de solos moles com Geoenrijecimento. Este tipo de recalque (residual) não afeta a estrutura.
	Diferencial (heterogêneo)	Ocorre quando diferentes partes do aterro ou da construção recalcam com diferentes valores, o que põe em perigo a estabilidade estrutural do conjunto, assim como abre caminho para um processo de rutura catastrófica. Dentro deste contexto, torna-se necessário entender que distorção angular entre dois pontos ou pilares é o recalque diferencial entre dois pontos (ou pilares), dividido pela distância entre eles. É conhecida também como rotação relativa. Muito comum em "melhoramento de solos" com colunas.

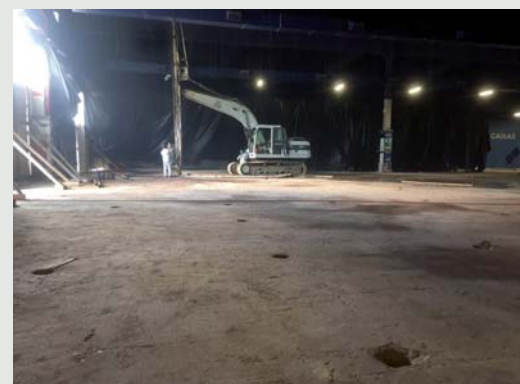


Figura 3 - interior de uma grande loja com recalques diferenciais no pavimento, apoiada sobre aterro que, por sua vez, foi lançado sobre solo mole. As paredes estão apoiadas em pilares sobre estacas.

### A questão pouco conhecida do recalque no próprio corpo do aterro, causado por seu próprio peso

Recalque é o movimento vertical do solo, para baixo, causado por alterações em suas tensões. Independentemente da presença de solos moles no terreno de fundação, a maioria dos aterros de estradas sofrem recalques, motivado por seu próprio peso, que se desenvolve mais durante a construção. No entanto, a qualidade do solo utilizado, a ausência de compactação adequada

projeto, a condição do estado limite deve ser verificada quanto à sua aceitabilidade.

### Argila mole e recalques

Quando se lança um aterro sobre um terreno, sua superfície deforma para baixo, promovendo um recalque. Se houver solo mole, o comportamento desta deformação (recalque) ficará condicionado a três particularidades pertinentes ao processo tempo dependente de redução do volume do solo mole, devido a expulsão da água (consolidação), conforme o quadro acima.

Recalque diferencial (em mm) tolerável para pequenas edificações sobre fundação direta (Entre parênteses, encontram-se valores máximos sugeridos)		
Critério	Elemento de fundação isolada	Radier
Distorção angular	1/300 O Euro Code sugere a tolerância de 1/2000 a 1/300	
Recalque diferencial	60mm (120mm)	
Recalque homogêneo (relativo ao comportamento externo)	100mm (150mm)	160mm (250mm)

### Observação importante

Estes valores são apenas de referência. Cada caso deve ser estudado em particular, considerando-se o grau de comprometimento aplicado, além das referências externas.

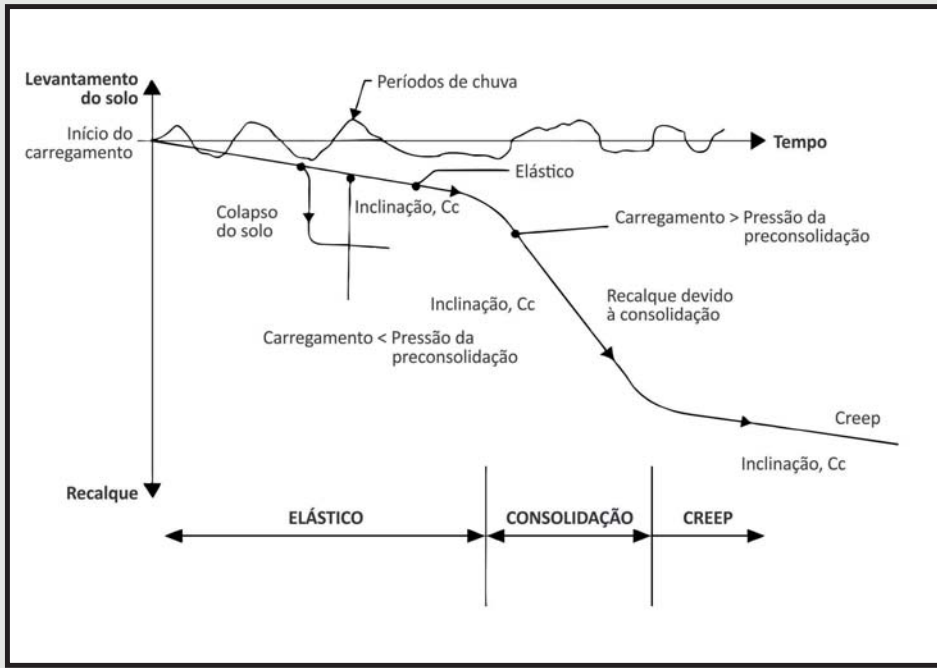


Figura 04 - Movimentos da fundação.

Recalques nos aterros causados pelo próprio peso (Geodger and Leach, 1990)		
Compactação	Tipo de Solo	Recalque pelo Próprio Peso
Bem compactado	Solo arenoso	0,5% H
	Cascalho ou pedregulho	0,5% H
	Argiloso	0,5% H
	Mistura de resíduos ou resto de obras	30% H
	Resíduos de obras bem compactados em camadas	10% H
Meio compactado	Enrocamento	1% H
Mal compactado	Solo argiloso	1,5% H
	Solo argiloso lançado em grandes camadas	1,0 - 2,0% H
Sem compactação	Solo arenoso	3,5% H
	Sedimento argiloso (bombeado ou dragado)	12,0% H

da, a altura do aterro e o fator clima são responsáveis pelo recalque causado devido ao próprio peso do aterro. Só para se ter uma idéia da dimensão deste recalque repare, na tabela acima, a grandeza do recalque causado pelo próprio peso do aterro, com altura H.

#### Recalques que comprometem estruturas

Recalques na base de aterros não se equivalem aos que ocorrem no corpo estradal. Aterros elevados são passíveis de apresentar recalque diferencial entre seu topo e a base, sem contar os recalques no próprio corpo do aterro causado por seu próprio peso. Interessante observar que independentemente

Limitação da distorção angular (Wahls, 1981)	
Dano	$\delta/L^*$
Equipamentos sensíveis à movimentação	1/750
Movimentos em vãos com diagonais	1/600
Limite de segurança para fissuração em edificações	1/500
Fissuramento em vãos construídos com painéis	1/300
Dificuldades com pontes rolantes	
Inclinação em prédios altos	1/250
Fissuramento considerável em paredes com painéis	1/150
Perigo de dano estrutural em qualquer edificação	

\*  $\delta$  - Recalque  
L - Vão



Figura 5 - Recalque diferencial manifestando-se na parede apoiada sobre fundação direta e fundação profunda (na lateral direita).



Figura 6 - Estacionamento de uma grande loja. O pavimento foi apoiado sobre aterro lançado sobre solo mole e a cobertura estaqueada. O pavimento desceu 60cm em relação a estrutura da cobertura.

do valor do recalque existente, quase sempre será a distorção angular (relação entre o recalque diferencial e cumprimento) que dará o veredito final sobre a tolerância de aceitação. Trincas, por ventura existentes, podem ser apenas estéticas, não afetando o maciço e sua funcionalidade.

Webinar - Live

# SIG Workshop: Geotechnical Analysis - Using SoilVision SVSLOPE to Determine the Factor of Safety

Apr 14, 2020

4:00 PM CEST

1 hr



Slope Stability analysis using the Limit Equilibrium Method is applied worldwide to obtain a factor of safety. With the SoilVision solution, engineers can assess ...

## Speaker Bio



### Micha van der Sloot

Technical Support Manager  
Bentley Systems, Inc.



### Marina Trevizolli

Senior Application Engineer  
Bentley Systems



Slope Stability analysis using the Limit Equilibrium Method is applied worldwide to obtain a factor of safety. With the SoilVision solution, engineers can assess critical slip failure mechanisms in 2D/3D through a deterministic and probabilistic approach. This Geotechnical Analysis Special Group virtual workshop guides engineers about concepts and methods available in SVSLOPE for determining the factor of safety.

This one-hour session works within SoilVision CONNECT Edition, Version 10 and includes a technical presentation as well as time to share questions. Topics include:

- Assessing a critical factor of safety in SVSLOPE
- Different search methods and their application in 2D/3D
- Analyzing critical slip failure shape mechanism

The Geotechnical Analysis SIG is open to all Bentley users, so invite your colleagues!

[www.bentley.com](http://www.bentley.com)

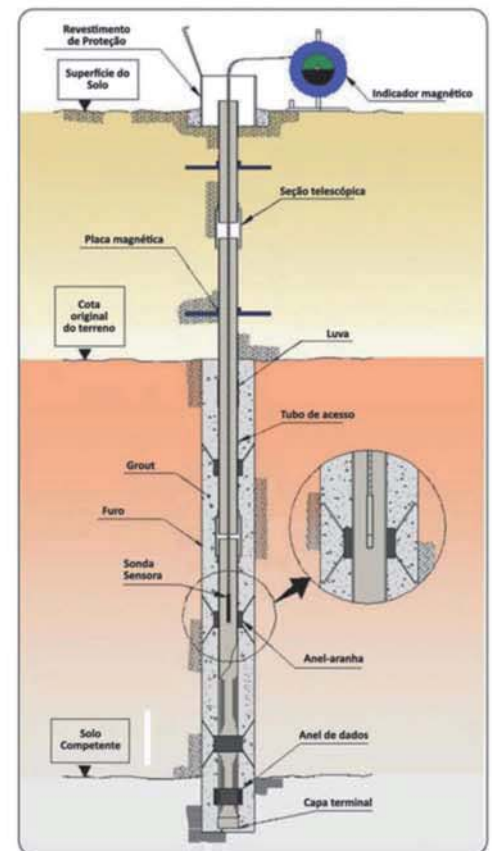


# Aranhas Magnéticas



## Descrição

Aranhas magnéticas consistem de anéis sensoriais, indicadores magnéticos, tubo de acesso incluindo anel de placa e anel aranha. De acordo com o tamanho da medição, o indicador magnético é dividido em 6 tipos com 50m, 100m, 200m, 300m, 350m e 500m.



## Fatores de distorção (após Boscardin d Cording, 1989)

Distorção	Tipo de construção	Limite superior	
		Distorção angular ( $\times 10^{-3}$ )	Deformações horizontais ( $\times 10^{-3}$ )
Nenhuma	Todas	< 1,6	0
Discreta		< 3,2	0
Moderada à severa		< 6,6	0
Severa à crítica		$\geq 6,6$	0
Nenhuma	Túneis	0	< 0,7
Discreta		0	< 1,5
Moderada à severa		0	< 3,0
Severa à crítica		0	$\geq 3,0$
Moderada à severa	Cortes estruturados no terreno	4,5	1,5
Moderada à severa	Recalques na edificação	6,1	0,4
		6,6	0



Figura 7 - Grande loja de supermercados em terreno com solo mole e talude submerso. O projetista elaborou seu projeto com fundação direta e profunda: grandes deformações tanto vertical quanto horizontal. O melhoramento do solo com Geoenrijecimento interrompeu o processo deformativo.

Se analisarmos mais profundamente qualquer dano, seja em uma construção seja em um aterro ou qualquer obra geotécnica, veremos que sua causa é uma combinação de deformações.



Deformações relativas sob aterros	
Medida	Símbolos/relação
Movimento horizontal	$\delta_H$
Movimento vertical	$\delta_V$
Inclinômetro instalado na lateral do aterro quando há presença de solos moles	$\delta_H/\delta_V \sim 0,3$

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

## DICAS DE COMO INTERPRETAR CURVAS DE RECALQUE

Monitorar recalques, pós-obra, tem papel fundamental na avaliação do desempenho do melhoramento do solo mole, para posterior aterro, já que o processo de consolidação final apresenta alguma demora\*. Evidentemente, todo melhoramento de solos moles deve ter eficiência mínima de 90%, em relação à condição de recalques sem tratamento. Todo monitoramento deve ser executado com placas de recalque, que fornecem a cota dos pontos monitorados por meio de nivelamento geométrico. O recalque é, então, deduzido a partir da cota de referência. De acordo com Rixner et al. (1986), quando aterros são lançados sobre terrenos com solos argilosos saturados, há ocorrência de recalques, classificados em três componentes:

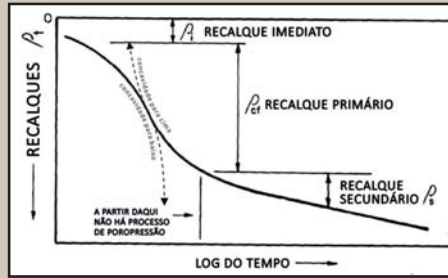
1. Recalque imediato ou elástico que, ocorre imediatamente após o lançamento do aterro, não havendo variação de volume, pois é devido somente às tensões de cisalhamento.
2. Recalque primário que, em geral, é o que predomina e ocorre ao longo do tempo, na medida em que a consequente poropressão dissipa, associada ao incremento da tensão efetiva.
3. Recalque secundário, muito comum quando há presença de matéria orgânica, sendo caracterizado pela relação linear com o logaritmo do tempo. É completamente dependente do tempo. As deformações continuam, após a completa dissipação do excesso de poropressão (término do recalque primário). Este fenômeno é chamado de creep ou fluência: o solo fica submetido a carga constante, deforma com o tempo.

Nas figuras, a seguir, as curvas de recalque são apresentadas de duas maneiras, identificando-se as três componentes mencionadas anteriormente:  $\rho_i$  recalque imediato,  $\rho_c$  recalque primário e o  $\rho_s$ , do recalque secundário. A Figura 1, é curva típica em que, após a aplicação da carga, observa-se a evolução do recalque com concavidade unicamente para cima. Nesta condição, é impossível identificar o término do adensamento primário.



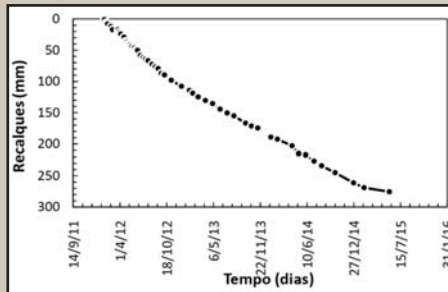
Na Figura 2, a mesma curva está representada com o tempo, em escala logarítmica, per-

mitindo melhor distinção entre a componente primária e a secundária do recalque. Observa-se que o trecho da curva, referente ao adensamento primário possui, inicialmente, concavidade para baixo. Entretanto, na fase final, encontra-se para cima. O trecho final da curva corresponde à compressão secundária que, na escala logarítmica, é linear.

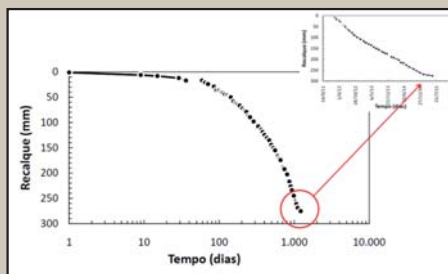


Para a compreensão da curva do recalque, portanto, deve-se representá-la em escala linear e em escala logarítmica. Analisar-se-á a seguir, um caso real, de modo a materializar-se uma curva de recalque.

O desenvolvimento dos recalques, apresentado na figura a seguir, não sugere nenhuma informação útil sobre seu eventual término.

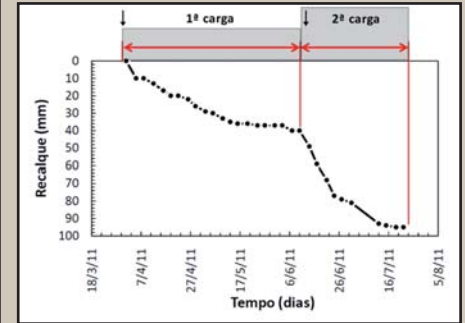


Esta mesma curva, representada com tempo em escala logarítmica, evidencia o recalque primário próximo ao fim, observando-se mudança da concavidade no trecho final da curva.

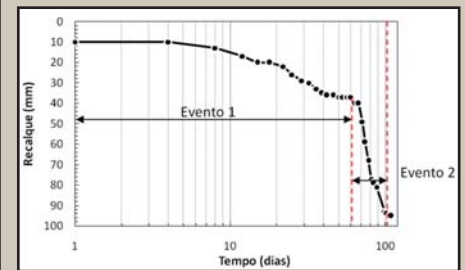


Em alguns casos, o aterro construído sobre terreno com solos moles, não é lançado em uma única fase, preferindo-se seguir um processo de realização em etapas. Dependendo do tempo transcorrido entre cada etapa, poder-se-á obter a total consolidação do solo mole suporte. Evidentemente, é um fenômeno tempo-dependente. Para entender melhor esta situação, apresenta-se um caso típico de lançamento de aterro, em duas etapas, defasadas. Os gráficos

a seguir, informam a ocorrência de recalque após a aplicação da primeira e segunda cargas. Observa-se-á, que a representação da escala do tempo, é fundamental para a compreensão do fenômeno da consolidação da argila mole. No primeiro gráfico, apresenta-se a escala linear de tempo.

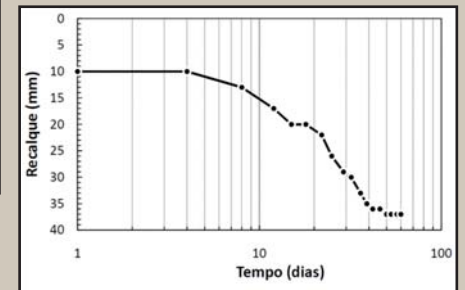


Na figura abaixo, colocou-se o tempo em escala logarítmica, ficando evidente a severidade da situação. Isto acontece porque visualiza-se dois eventos, no mesmo gráfico.

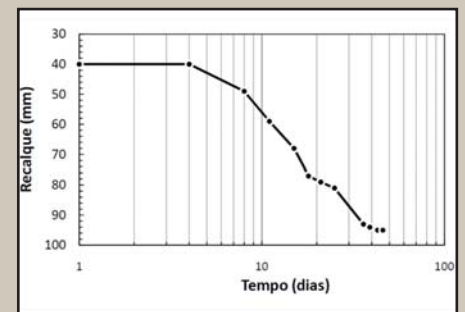


Para se obter uma correta interpretação, torna-se obrigatório construir um gráfico para cada fase, de modo a se identificar a verdadeira condição do processo de consolidação do solo mole, que ocorre para cada carregamento.

Primeiro carregamento → 1ª fase do Recalque



Segundo carregamento → 2ª fase do Recalque



\* O melhoramento do solo mole com Geoenrijecimento impõe um acelerado processo de consolidação, na argila mole, reduzindo-o ao tempo da obra. O "melhoramento do solo" feito com transferência de cargas (a base de colunas ou estacas) é complexo pois ignora o solo mole. A parte do aterro, apoiado no solo mole, permanece em estado crítico e com acelerado processo de recalque. A parte apoiada na coluna ou estaca dependerá de suas particularidades e do solo mole.



## Geotechnical Analysis SIG: Simulating Soil Lab Tests for PLAXIS Soil Model Parameters



Micha van der Sloot  
Technical Support Manager  
Bentley Systems, Inc.

11 February 2020  
10:00 A.M. CET  
04:00 P.M. CET

*PLAXIS: Simulating Soil Lab Tests*

[www.bentley.com](http://www.bentley.com)

Dear User,

When conducting laboratory test results – such as Triaxial and Oedometer tests – you want to make sure that the behavior of your chosen constitutive soil model captures the test result data. With the SoilTest feature, PLAXIS offers a quick and simple method to simulate these lab tests and verify the model behavior. To learn more, this Geotechnical Special Interest Group virtual workshop is a must see!

The agenda for the one-hour session encompasses:

- How to start a soil lab simulation
- Optimizing your model parameters to replicate real-life behavior
- After optimizing, how to quickly update the soil material definition in PLAXIS

The Geotechnical Analysis SIG is open to all Bentley users, so invite your colleagues!

**Geotechnical Analysis SIGs – complimentary virtual  
workshops to keep you working optimally!**



## ABRANGENTE

O Geoenrijecimento é a única técnica de melhoramento de solos que modifica suas características mecânicas, oferecendo capacidade de carga pré-especificada e, caso haja contaminação do solo com metais pesados ou outros contaminantes, imobiliza-os impedindo sua movimentação pelo lençol freático.



## INCONFUNDÍVEL

Melhorar solos moles, só com Geoenrijecimento. Sistemas a base de transferência de cargas (com colunas) são pouco eficientes porque não melhoram o solo mole.

## CUSTO-BENEFÍCIO

Ausência de recalques, posterior ao melhoramento do solo não tem preço. Analise a eficiência da técnica de melhoramento antes de projetar sua nova obra rodoviária.

# GEOENRIJECIMENTO

100% melhoramento de solos  
tecnologia exclusiva...



SOFT SOIL BRAZILIAN INSTITUTE

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.softsoilbrazilianinstitute.com.br>

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

SOFT SOIL BRAZILIAN REVIEW

**Diretor Editorial**

ENGº JOAQUIM RODRIGUES

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

**Diretores Adjuntos**

ENGº THOMAS KIM

ENGº ROGER RODRIGUES

PATRÍCIA TINOCO

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

**Publicidade, Assinatura, Livros e Vídeos**

CLEIDE FERREIRA

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

**Editor de Arte**

ALEX CRISPIM

**Reprints Editoriais**

MARIANA TATI

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

Solicite reimpressões de reportagens

ou artigos publicados

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

**NEWSLETTER**  
em casa

Receba sua revista SSBR em seu e-mail.

Inscrição-se:

[contato@softsoilbrazilianinstitute.com.br](mailto:contato@softsoilbrazilianinstitute.com.br)

# Agenda

1 a 4 de março de 2020

**PDAC 2020 - Prospectors & Developers Association of Canada**

Toronto - Canadá

<http://pdac-2020.org/>

15 e 17 de março de 2020

**4ª Conferência Europeia de Modelagem Física em Geotecnia**

Luleå University of Technology

971 87 Luleå, Suécia

<http://www.ltu.se/ecpmg>

17 a 19 de março de 2020

**Intermodal South America – 2020**

São Paulo Expo – São Paulo / SP

<https://www.intermodal.com.br/pt/>

26 a 29 de Abril de 2020

**Geoamerica 2020 - 4º Congresso Panamericano de Geossintéticos**

Rio de Janeiro - RJ

[geoamericas2020@geoamericas2020.com](mailto:geoamericas2020@geoamericas2020.com)

3 a 6 de maio de 2020

**17º Congresso Nacional de Geotécnia & 10º Congresso Luso-Brasileiro de Geotécnia**

Lisboa, Portugal

<http://17cng2020.lnec.pt/>

10 a 14 de maio de 2021

**International Foundations Conference and Equipment Expo**

Dallas - TX - Estados Unidos

<http://ifceexpo.com/>

13 a 15 de maio de 2020

**XII Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas**

Pestana Rio Atlântica Hotel. Av. Atlântica, 2964 – Copacabana – Rio de Janeiro – Brasil

<http://www.cbpe2020.com.br/site/>

15 e 18 de junho de 2020

**Deep Mixing 2020**

Gdansk, na Polónia

<http://www.dfi.org/dfieventlp.asp?13330>

15 a 19 de junho de 2020

**XIII ISL – International Symposium on Landslides**

Cartagena, Colômbia

<http://www.scg.org.co/xiii-isl/index.html>

25 a 28/ de julho de 2021

**3rd Pan-American Conference on Unsaturated Soils**

PUC-Rio - Gávea - Rio de Janeiro, RJ

<https://panamunsat2021.com/>

15 a 18 de setembro de 2020

**XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**

Campinas – SP

<https://cobramseg2020.com.br/>

21 a 25 de setembro de 2020

**Fourth International Dam World Conference**

Lisboa - Portugal

<https://dw2020.lnec.pt/>

29 e 30 de outubro de 2020

**3rd International Symposium on Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics**

Kyoto University's - Kyoto

<https://cpeg2020.org/details/>

12 a 17 de setembro de 2021

**20th International Conference on Soils Mechanics and Geotechnical Engineering**

Sydney - Austrália

<http://www.icsmge2021.com/>

# MELHORANDO SOLOS DE FUNDAÇÃO PARA TORRES EÓLICAS

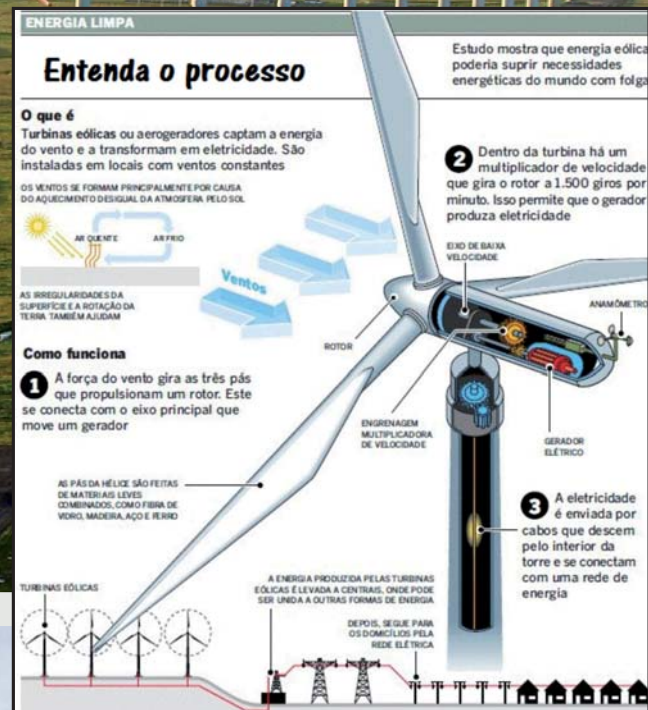
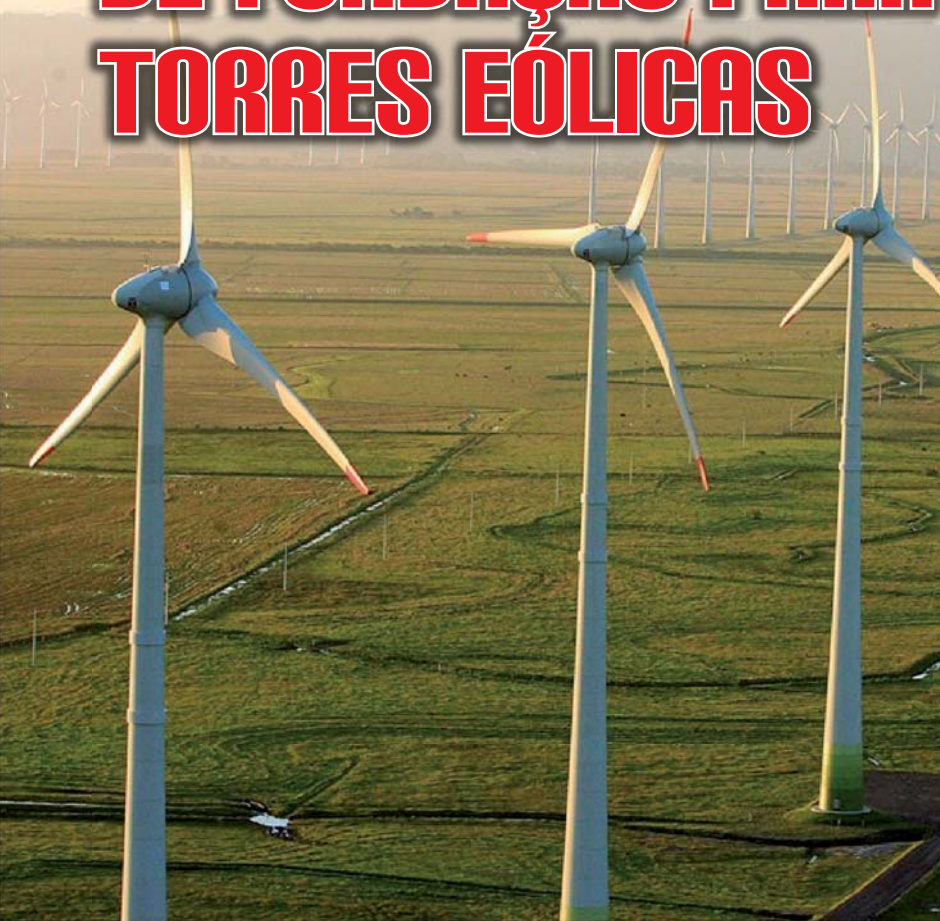










Figura 1 - Fundação de torres eólicas adequam-se perfeitamente a solos melhorados com Geonrijecimento.

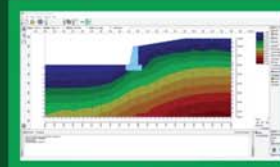
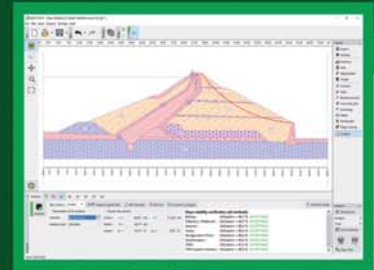
Com a 5ª posição, no ranking mundial de expansão da capacidade de geração eólica em 2016, o Brasil conta atualmente com cerca de 457 parques eólicos em operação. Na construção de um parque eólico, a fundação das bases dos aerogeradores é etapa crítica, principalmente, porque turbinas eólicas são estruturas robustas, com alturas da ordem de 120m, impondo esforços que solicitam a fundação com elevada magnitude, exigindo cuidadoso estudo e adequação do solo. Exigem cuidados dobrados tanto na fase de projeto, como durante sua execução. As especificações técnicas por sua vez, reivindicam parâmetros geotécnicos bem



Figura 2 - Melhoramento de terreno com solo mole para execução de empreendimento no sul do Brasil.

## Software de Geotecnia para uma vasta gama de análises:

-  Análise de Estabilidade
-  Escavações e Contenções
-  Muros e Gabiões
-  Recalque
-  Sondagens de Solo
-  Túneis e Poços
-  Estudos geológicos
-  Muros e Gabiões



**AVALIE GRATUITAMENTE**

Solicite: [comercial@solucoescad.com.br](mailto:comercial@solucoescad.com.br)

Distribuído por:

**SOLUÇÕES** 

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

conservadores para o solo de fundação, que vão além dos normalmente empregados. Portanto, solos com NSPT médio são julgados, em geral, inaptos para receberem cargas impostas à fundação de uma torre, principalmente devido a dois fatores:

1. A altura da torre eólica gera fortes momentos na base, gerando rotação na fundação, promovendo recalques diferenciais e perda de verticalidade.
2. As solicitações são, principalmente, dinâmicas, ou seja, a fundação deve ser dimensionada para absorver vibrações produzidas pelo aerogerador.

### ESTUDO DO PROJETO GEOTÉCNICO DE FUNDAÇÃO DE UMA TURBINA EÓLICA

Considerando-se a normal heterogeneidade que se observa em um perfil estratigráfico, conclui-se que a interação solo-estrutura é, por consequência, uma variável que deve ser tratada com bastante cautela no projeto de fundação de torres eólicas, principalmente pela adequação à geometria circular da torre da turbina. Para sua fundação, trabalha-se com a estrutura super exposta à ação do vento, com ação essencialmente horizontal. Dada a altura da torre das turbinas que, em mé-

dia, chegam aos 80m, ao multiplicar-se a ação do vento no topo do aerogerador por sua altura, resultarão elevados momentos fletores atuando na base, compreendendo-se que o dimensionamento e a verificação desta fundação levam em conta um carregamento essencialmente excêntrico. Tal qual ocorre no projeto de fundações para edifícios, pontes e outras estruturas arrojadas, a concepção da fundação da torre eólica também dependerá do solo que a suportará. Desta maneira, para solos mais frágeis, é necessário melhorá-lo com Geoenrijecimento.

No que tange ao eixo de giro das pás, existem basicamente dois tipos de turbinas eólicas, a de Eixo Horizontal, mais comum usualmente equipada com três pás, que giram em torno do eixo horizontal, e que passa pelo rotor. A figura 4 mostra um exemplar deste tipo de aerogerador. A Turbina Eólica de Eixo vertical, figura 5, tem como princípio de funcionamento o mesmo conceito das noras de água, que chegam perpendicularmente ao seu eixo de rotação. Necessitam de impulso para o seu sistema elétrico começar a funcionar. Possuem altura de torre menor e, por esta razão, são menos eficientes uma vez que a captação do vento é tão maior quanto maior a altitude da torre. Neste



Figura 4 - Turbina eólica de eixo horizontal (Acervo técnico de empresa do ramo de energia renovável, 2017).



Figura 5 - Turbina eólica de eixo vertical (Eólica Fácil, [s,d,])

O Geoenrijecimento do solo consiste das fases de cravação dos geodrenos e da formação de verticais com bulbos de compressão que adensam e aumentam a resistência do solo, ao mesmo tempo em que promove sua rigidez.

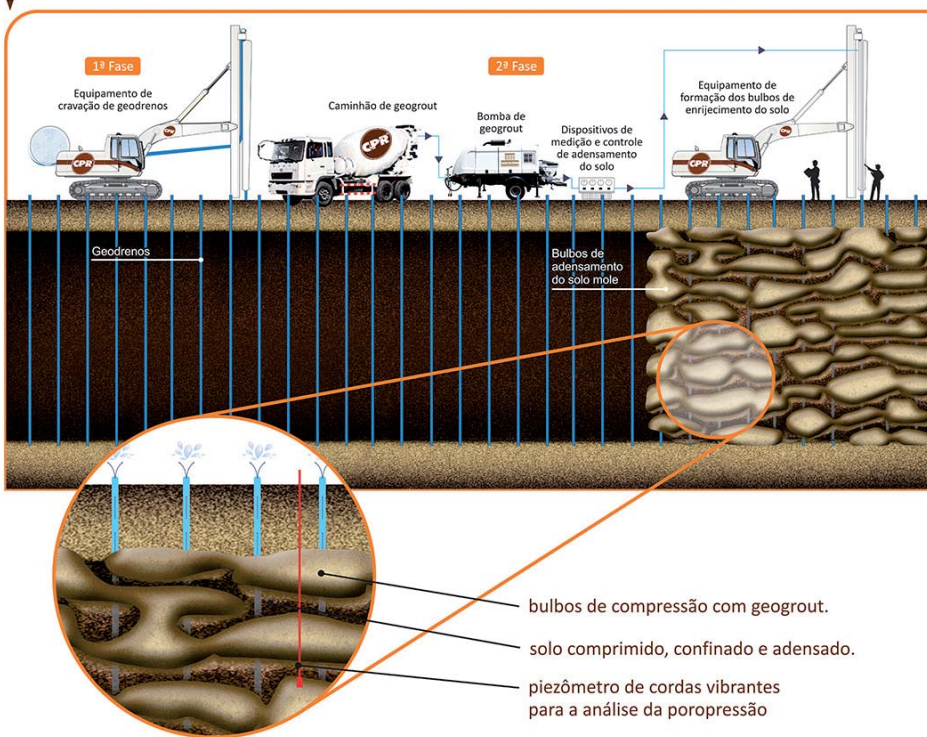


Figura 3 - Processo executivo do Geoenrijecimento com CPR Grouting.

contexto, as técnicas de melhoramento do solo com Geoenrijecimento, combinam altíssima eficiência, rapidez e economia, substituindo-se soluções a base de estacas e colunas. A tecnologia do Geoenrijecimento, tanto para modificar solos arenosos como argilosos, propicia resistência e rigidez a níveis mais do que necessários para fundações de torres eólicas.

Assim, o Compaction Grouting é adequado para solos arenosos permeáveis. Enquanto o CPR Grouting é adequado para solos argilosos moles, caracterizados por alta compressibilidade, muito pequena resistência e baixíssima permeabilidade.



# 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)

## O GEOENRIJECIMENTO

O Geoenrijecimento com CPR Grouting, é específico para solos argilosos moles, impondo níveis de rigidez e resistência adequados, a qualquer projeto de torre eólica, possuindo três etapas básicas: dimensionamento, cravação de geodrenos, seguindo-se de uma inteligente formação de verticais com bulbos de compressão, com controle de volume e pressão que promovem o adensamento ultrarrápido do solo mole, via expansão de cavidades, de baixo para cima, metro a metro, sem limitação de profundidade.

Todo este processo, aliado a sua modelagem numérica avançada e ao rigoroso monitoramento geotécnico de campo, com

tomografia por imagem, piezômetros e pressiômetros, garante alta performance com certificação automática de maciços homogêneos, com características geotécnicas de resistência e rigidez preestabelecidas, essencial para fundações de turbinas eólicas.

O Geoenrijecimento, com Compaction Grouting, é a técnica de melhoramento para solos arenosos, objetivando compactá-los, razão pela qual, chama-se Compaction Grouting. É realizado bombeando-se geogROUT, sob pressão, produzindo-se bulbos que compactam o solo arenoso, de baixo para cima, induzindo a formação de verticais que atuam compactando o solo arenoso fôfo, eliminando sua condição de instabilidade, homogeneizando-o.



Figura 6 - Melhoramento do solo de fundação com Geoenrijecimento.

### Especificação típica para uma fundação de torre eólica

Diâmetro da fundação	$B = 17,60 \text{ m}$
Altura da fundação	$h = 2,85 \text{ m}$
Classe de resistência do concreto	$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
Aço para armaduras	B 500B
Peso total da fundação	$W = 47,3 \text{ t}$
Recalque diferencial máximo em 25 anos	$\Delta s = 40 \text{ mm}$
Capacidade de carga do solo de fundação	$\sigma_{adm} = 250 \text{ kPa}$ ou $2,5 \text{ kg/cm}^2$
Módulo de cisalhamento dinâmico do solo	$G_0 = 40.000 \text{ kPa}$
Módulo de cisalhamento estático do solo	$G = 5.850 \text{ kPa}$

## Diretrizes de projeto para fundação de torres eólicas

Torres eólicas são fixadas no sistema de fundação por meio de sapatas circulares de ancoragem, que transferem as cargas para sua grande base que, por sua vez, translada para o solo. A popularização das sapatas circulares se dá, essencialmente, pela distribuição uniforme das forças, que independente da direção do vento, garantem a inexistência de sobrecarga nas quinas, como em sapatas poligonais, por exemplo. Adicionalmente, fica evidente o formato otimizado, particularmente para consumo



Figura 7 - Após a adequação do solo é feita a base circular de ancoragem armada, pronta para concretagem. As bases podem ser retangulares, trapezoidais mas, a mais comum é a circular.

de concreto e de aço, viabilizando o aspecto econômico. A desvantagem do formato circular é a necessidade de uma mão-de-obra mais especializada, considerando-se as armaduras radiais, exigindo profissionais mais qualificados. De uma modo geral, sua fundação é escolhida com base nas peculiaridades do solo local e de acordo com a potência da turbina eólica. A tabela abaixo, resume a diretriz básica para este tipo de fundação.

São de grande importância os seguintes pontos:

- Altura e diâmetro da fundação;
- Seu peso;
- Capacidade de carga desejada;
- Recalque diferencial máximo;
- Módulo de cisalhamento dinâmico e estático do solo.

### A vantagem das sondagens pressiométricas

Em função da complexidade desta obra de fundação, torna-se necessário avaliar, com precisão, as propriedades de resistência e



Figura 5 - Melhoramento do solo de fundação com Geoenrijecimento para empreendimento no sul do Brasil.

rigidez do solo antes de sua construção, principalmente para certificação final do serviço, com a condição do solo após seu Geoenrijecimento. A prova pressiométrica fornece o comportamento tensão-deformação do solo, permitindo estabelecer tanto sua resistência como sua rigidez. O módulo de cisalhamento é o parâmetro de maior interesse geotécnico. Ciclos de descarga e recarga são realizados durante o ensaio para sua determinação, utilizando-se a equação sugerida pela norma americana ASTM D.4719-87 (1994):

$$G = V_m \frac{\Delta P}{\Delta V}$$

onde:

G = módulo de cisalhamento

V<sub>m</sub> = volume médio expandido no ciclo

ΔP = variação de pressão no ciclo

ΔV = variação de volume no ciclo

Deformações cisalhantes, impostas durante os ciclos de carga/descarga são, então, relacionadas com o nível de rigidez, podendo-se estabelecer a variação do módulo com o nível de deformações, e os fatores

de segurança adequados ao projeto. Conhecido o módulo de cisalhamento, estimam-se os recalques e possíveis rotações da fundação circular rígida, aplicando a teoria da elasticidade. O resultado relaciona-se às cargas aplicadas e ao diâmetro da base. O recalque é calculado com a seguinte expressão:

enquanto possíveis rotações da fundação, de acordo com a seguinte expressão:

$$s = \frac{1 - \nu}{G} \frac{P}{2B},$$

onde:

P = carga vertical (valor característico)

$$\theta = \frac{3(1 - \nu)}{G} \frac{M}{B^3}$$

M = momento atuante na base (valor característico)

G, ν = constantes elásticas

B = diâmetro da fundação

As equações consideram todo o maciço como um semi-espaço linear elástico, com módulo de deformabilidade constante com

a profundidade. A espessura do solo, considerando na estimativa do recalque, assim como a variabilidade do módulo com a profundidade, são fatores que deverão ser respeitados na estimativa do recalque. Além da rigidez, a prova pressiométrica permite estimar a capacidade de carga do solo de fundação, correlacionando a pressão limite com a tensão admissível de projeto. O Eurocode 7-2, estabelece procedimento para estimar a capacidade de carga com a equação:

$$q = \sigma_{v0} + k p_L^*$$

onde:

q = capacidade de carga

σ<sub>v0</sub> = tensão vertical na base da fundação

p\*L = pressão limite líquida dentro do bulbo de tensões da fundação

k = fator de capacidade de carga

Para fundações circulares rasas, Briaud (1992), apresenta que o fator da capacidade de carga assume valor k = 0,8, aumentando com a profundidade. Sugere, também, calcular a pressão limite pela média

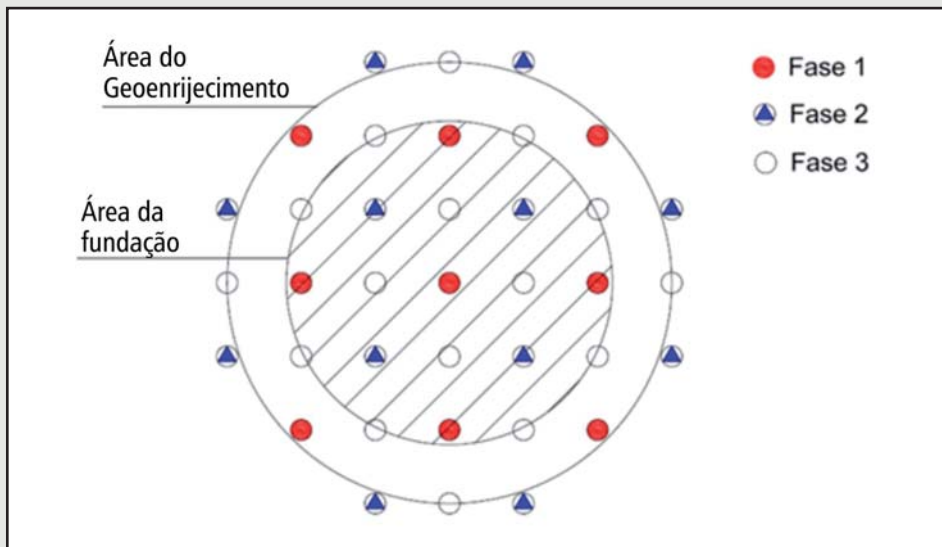


Figura 6 - Malha quadrada e sequência executiva típica de melhoramento de solo com Geoenrijecimento. Nas Fases 1 e 2, o espaçamento entre verticais é maior que na Fase 3.

geométrica dos resultados obtidos dentro do bulbo de tensões:

$$p_L^* = \sqrt[n]{p_{L1}^* \times p_{L2}^* \times \dots \times p_{Ln}^*}$$

A capacidade de carga, obtida com pressiômetro, deve ser reduzida por um fator de segurança apropriado, porém aplicado somente ao termo  $kp^*L$ . De acordo com a NBR6122/96, o valor de cálculo da resistência, no estado-limite último de um elemento de fundação, pode ser determinado a partir de método semi-empírico, aplicando-se o fator de ponderação da capacidade de carga, igual a  $\gamma_R = 2,2$  (item 5.6.1.5). Caso seja fornecido um único tipo de carregamento, aplica-se o fator de segurança global  $FS = 3$ .

Tabela 2. Cálculo da capacidade de carga com análise pressiométrica.

Capacidade de carga de cálculo	$q_d = \sigma_{v0} + \frac{kp_L^*}{2,2}$
Capacidade de carga admissível	$\sigma_{adm} = \sigma_{v0} + \frac{kp_L^*}{3}$

### A grande vantagem da sondagem tomográfica por imagem (TSI)

O módulo cisalhante, a pequenas deformações,  $G_0$ , é obtido a partir da velocidade de propagação das ondas da TSI, por meio da

$$G_0 = \rho V_s^2$$

teoria da elasticidade:

onde:

$G_0$  = módulo de cisalhamento dinâmico

$\rho$  = massa específica do solo

$V_s$  = velocidade de propagação das ondas cisalhantes

Para a caracterização tomográfica do solo, utiliza-se 24 geofones, podendo ser expandido até 48. Após a aquisição de dados no campo, há a fase de processamento, que consiste na obtenção da curva de dispersão velocidade-frequência, posteriormente utilizada para fornecer as propriedades dinâmicas e o perfil do solo, através do terceiro passo, chamado de inversão. Ensaios de campo, que analisam as características dispersivas das ondas tomográficas são de grande utilidade na caracterização dinâmica do solo, devido à abrangência espacial dos resultados, como na aquisição do módulo de cisalhamento à pequenas deformações, permitindo avaliar o nível de rigidez existente e o imposto após o Geoenrijecimento do solo. A análise avalia o solo como um todo, considerando-se toda a profundidade. Interpretando-se a curva de dispersão tomográfica e estabelecendo-se a relação entre velocidade de fase e frequência, estabelece-se o perfil de velocidades das ondas cisalhantes do solo, em 1D, 2D ou 3D, com o qual obtém-se, para cada camada, o módulo de cisalhamento  $G_0$ .

### Melhorando-se o solo

A área do solo melhorado deve ser maior que a área da fundação de projeto.



Figura 7 - Geoenrijecimento do solo de fundação para empreendimento no nordeste.



Figura 8 - Geoenrijecimento de terreno em solo mole para empreendimento no nordeste.

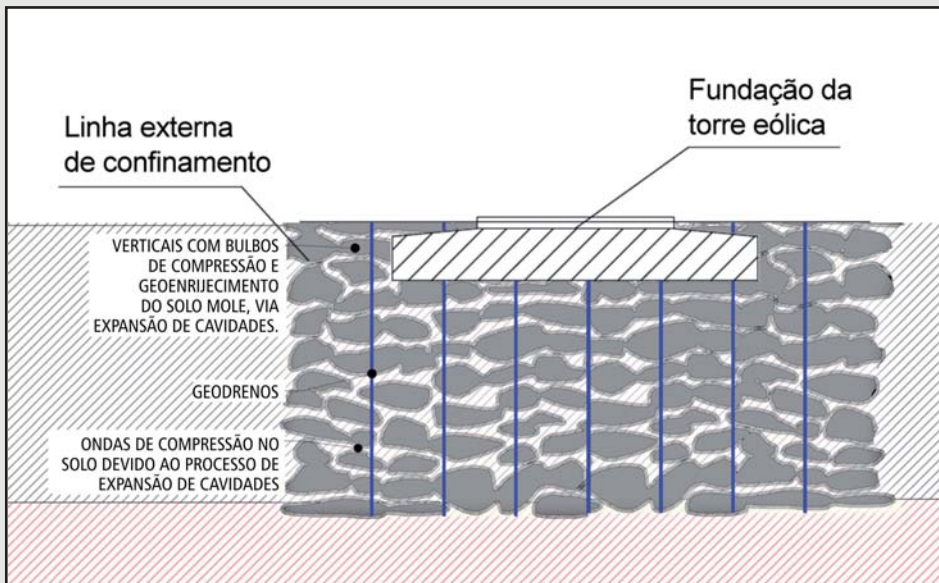


Figura 9 - Vista em corte de um terreno com solos moles, Geoerijecido com CPR Grouting.

Utiliza-se, preferencialmente, malha quadrada, com espaçamento que varia de 3,0m a 4,0m devido, essencialmente, a dois motivos:

1. Adapta-se facilmente ao formato circular;

2. Permite dividir o Geoerijecimento do solo em fases, conforme apresentado na figura 6.

Após o melhoramento do solo e sua consequente certificação com sondagens presiométricas e com TSI, escava-se o solo até

a profundidade estabelecida em projeto. Desta forma, não será necessário recorrer a custosas e complexas fundações profundas.

**SSBI**

#### 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.
- EN 1997-2 (2007) Eurocode 7: Geotechnical design – Part 2: Groung investigation and testing
- NBR 6122 (1996) Projeto e execução de fundações, ABNT
- Andrus, R. D., Chung, R. M. (1995) Ground improvement techniques for liquefaction re-mediation near existing lifelines. US National Institute of Standards and Technology
- Briaud, J. L. (1992) The pressurimeter, Rotterdam, Balkema Publ.
- BERILGEN M., Investigation of Stability of Slopes under Drawdown condition, Computers and Geotechnics, Vol. 34, 81-91, 2007.
- DIXON, S.J., Burke, J.W. (1973). Liquefaction case history. ASCE J Soil Mech Found Eng SM10:823-840.
- DUNCAN JM, Wriugh SG, Wong KS. Slope stability during rapid drawdown. In: Proceedings of the H. Bolton seed memorial symposium, Vol. 2; May 1990. p. 253– 72

**Localização estratégica e eficiência logística geralmente estão localizadas em terrenos ruins.**

**CPR<sup>®</sup>  
GROUTING**

**O CPR Grouting viabiliza.**

**Entre em contato, para saber mais detalhes a respeito.  
[www.engegraut.com.br](http://www.engegraut.com.br)**

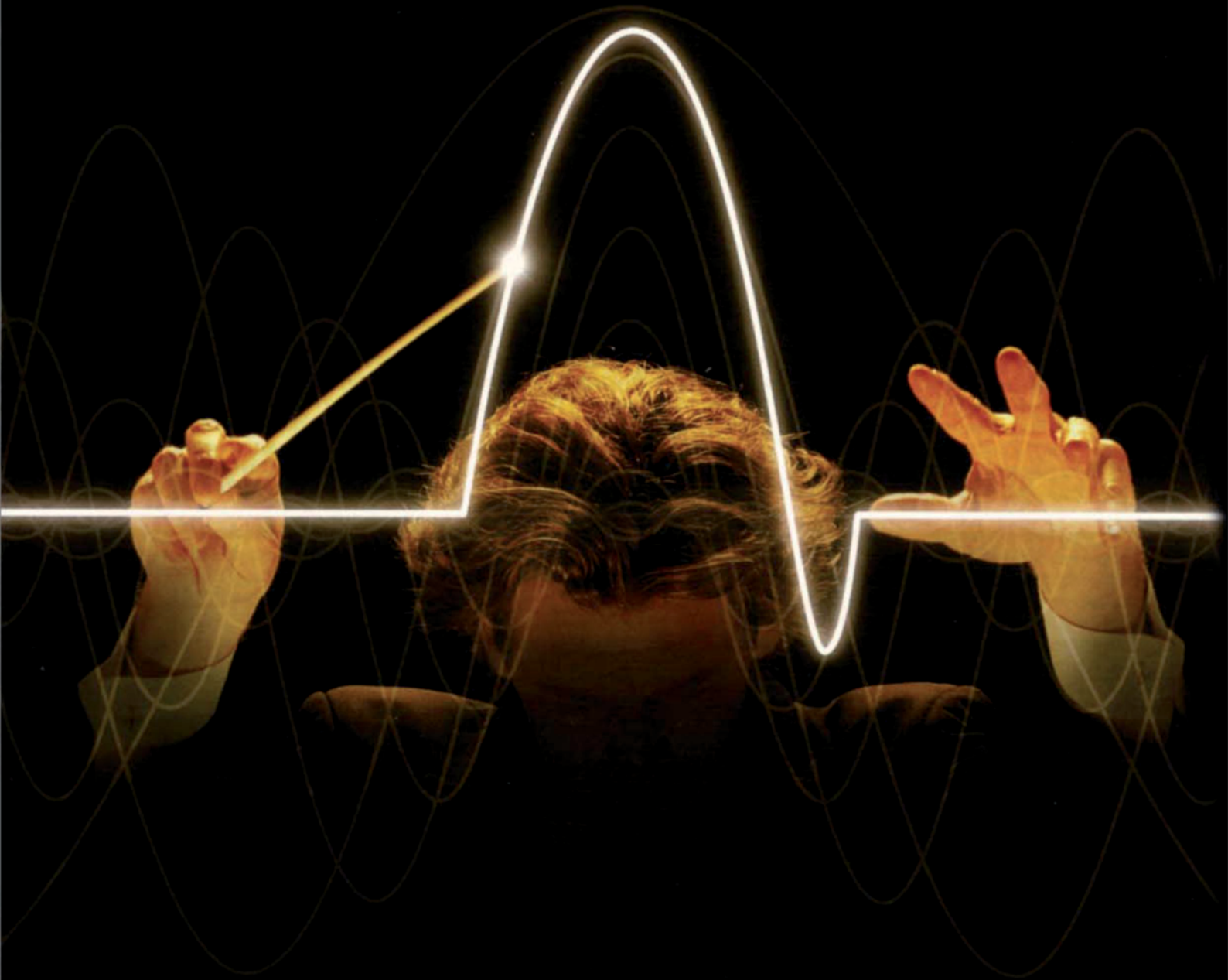
# UM CASO PROBLEMÁTICO DE AMPLIAÇÃO DE RODOVIA COM PRESENÇA DE SOLOS MOLES

Figura 1 - O pré-carregamento nesta ampliação rodoviária, jamais poderia ser idealizado, em razão dos profundos depósitos de solo mole e muito mole existentes no local. O resultado foram ruturas.

**E**sta matéria apresenta informações acerca de uma ampliação rodoviária, onde passa-se de duas para quatro faixas em uma importante estrada, o que exigiu a construção de 12km de novos aterros, com altura variando além de 1,5m. 10km desta ampliação passa por uma planície aluvionar, com presença de depósitos de solos moles e muito moles, orgânicos, altamente compressíveis. A própria execução da estrada original, a cerca de 50 anos atrás, apresentou relatos de ruturas, com a utilização de pré-carregamento.



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)



Esta ampliação rodoviária foi realizada com o necessário melhoramento do solo de fundação, motivado pela presença de depósitos de solos moles e muito moles. O melhoramento do solo foi feito de modo a eliminar qualquer possibilidade de ruturas do solo junto a atual rodovia, além de consequentes recalques, pertinentes ao peso dos aterros a serem construídos, assim como reduzir enormemente o período da obra. Após o melhoramento do solo, iniciou-se a elevação dos aterros monitorando-se, com piezômetros e análises tomográficas com imagem, o comportamento da poropresão e o natural incremento da rigidez com a tomografia. Do ponto de vista geotécnico, o alinhamento desta rodovia foi dividido em segmentos que apresentavam elevação, em relação ao restante, caracterizado por terrenos levemente inclinados e solos competentes, com cerca de 2 quilômetros. O restante do trecho caracterizou-se por planície rural do rio local incluindo-se, além da construção dos necessários aterros, medidas de drenagem, melhoramento das interseções, relocação e substituição das instalações existentes, conforme necessário, além de muros de contenção, pois havia limitação da faixa de domínio, devido aos terrenos vizinhos. Em outros trechos, houve a implantação de faixas laterais para tráfego local. De um modo geral, a largura estabelecida pressupôs folga de 10m, além



Figura 4 - Posicionamento dos equipamentos para uma ampliação rodoviária no interior do Rio de Janeiro.

da crista e pés dos aterros para atender as obras de drenagem, além da segurança da via e dos terrenos vizinhos.

#### A condição do solo

- Depósitos de argila mole a muito mole orgânica, com presença de turfa fibrosa amorfa, com espessura de cerca de 4,5m. A presença de camadas turfosas ocorre na região periférica da planície. O teor de água, medido nas camadas de turfa, variou de 300% a 800%, o que indica alta compressibilidade à cargas verticais.

O  $N_{SPT}$  variou de zero a 4 golpes.

- Solo argiloso siltoso mole a muito mole, com maior e menor presença de areia e matéria orgânica, até os 15m de profundidade. O  $N_{SPT}$  variou de 5 golpes a 10 golpes.
- Abaixo, visualizou-se argilas com consistência média ( $N_{SPT}$  de 6 a 10) intercalada com lentes arenosas até 23m de profundidade. Esta condição permite drenagem excelente ao necessário processo de consolidação. Mais abaixo, entre 23m e 37,5m de profundidade (em média), encontrou-se argilas variegadas (tanto na consistência como na coloração), classificadas como argilas profundas.

#### A resposta do solo mole e muito mole às cargas dos aterros

Toda ampliação rodoviária, com presença de solo mole e muito mole é complexa, já que promove-se intervenção em massa de solo em equilíbrio. Efetivamente, torna-se necessário melhorar o solo, adequando-o às circunstâncias existentes, particularmente sua rigidez, sem o que não surgirão recalques mas trincas longitudinais ao longo da estrada, na interface do pavimento novo com o antigo, tipo junta de dilatação. O peso dos aterros laterais, sobre o solo mole saturado, caso não fosse feito melhoramento do solo, desenvolveria grandes tensões, não drenadas, no solo de fundação aumentando, de imediato, a poropresão que, devido a quase impermeabilidade do solo mole, demoraria enormes períodos de tempos para se dissipar. Sem o melhora-



Figura 3 - Formação de verticais do Geoenrijecimento em uma ampliação rodoviária no Sul do país.





Figura 5 - Análises pressiométricas para aferir o nível de rigidez do solo melhorado em relação ao maciço da antiga rodovia.

mento do solo, a argila mole deformaria à volume constante, sob o peso do aterro, semelhante a um líquido viscoso, expandindo-se lateralmente em direção às regiões com menos pressão de confinamento. Na ampliação de estradas, os aterros são bem limitados lateralmente com relação ao seu comprimento, fazendo com que ocorram deformações não drenadas, deslocando-se lateralmente em direção ao pé do aterro, devido a baixa pressão de confinamento existente. Nas camadas de solo mole mais superficiais, sob o pé do aterro, haveria imediato desequilíbrio, fazendo com que

as tensões de confinamento, bem mais baixas que as tensões horizontais, impulsio-nem e desloquem o solo mole para cima, promovendo ruturas, já que as tensões cisalhantes atuantes chegam ao limite de sua resistência, fazendo com o que o aterro, em construção, perca sustentação. Esta rutura costuma ser progressiva, podendo acontecer durante o levantamento do aterro, ou após, podendo durar meses após sua construção, envolvendo a transferência das inexistentes tensões de cisalhamento das regiões com rutura, para regiões da massa do solo ainda intactas, em função do processo

conhecido como “amolecimento deformativo”. Ou seja, nada mais é do que um prolongamento deformativo, mesmo após às primeiras ruturas do solo. O solo de fundação, nesta obra de ampliação rodoviária, normalmente adensado e particularmente sensível, desenvolve poropressões na medida em que acumulam-se deformações cisalhantes. Estas poropressões, produzidas pelo cisalhamento do solo, tornam-se significativas à medida em que o solo começa a alcançar o limite para a rutura. O grande excesso de poropressão normalmente alcançado, é concordante com o limiar da rutura do solo, estabelecendo o limite de sua resistência. O que acontece, a seguir, é a perda total da resistência do volume de solo que resiste, o que faz com que a massa de solo adjacente absorva o impacto já que possui, ainda, capacidade resistente. Nada impede que o solo adjacente possa, também, entrar em rutura. Esta é a geomecânica da rutura, típica de processos de precarregamento em solos desta natureza.

#### As exigências e desafios do projeto

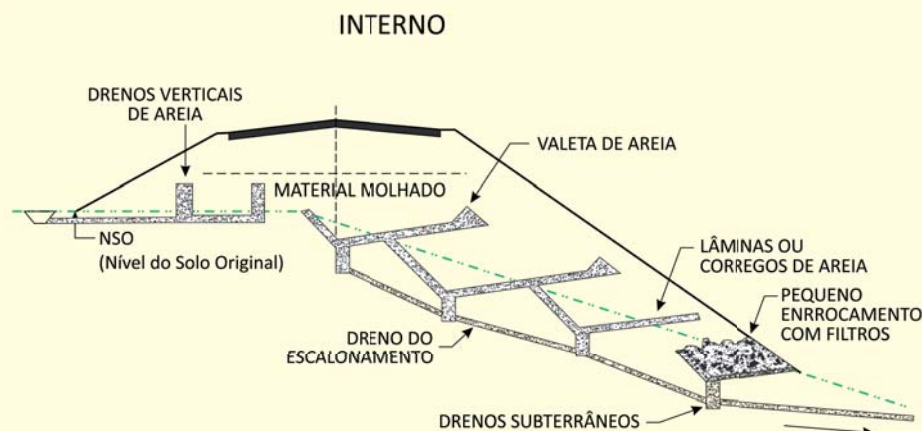
- A ampliação desta rodovia, através da planície local, exigiu a elevação do greide até cerca de 1,5m acima do nível do atual pavimento.
- Na travessia do rio, o nível da estrada original, teve que ser elevado cerca de 2m, de modo a adaptar-se à estrutura da ponte, com boa folga acima do nível de enchente de projeto. O greide exigido cresceu cerca de quase 3m acima do terreno original. Evidentemente, caso não se executasse o melhoramento do solo, os aterros simples e os de acesso à ponte, necessários para esta nova obra, causariam recalques diferenciais consideráveis e alto risco de instabilidade.
- Nesta extensa ampliação rodoviária, promoveu-se o aterramento das valetas, caixas coletoras e demais dispositivos de drenagem existentes, construindo-se novo sistema de drenagem ao longo do novo pé do aterro da ampliação. Em alguns trechos, novas valetas foram executadas, seguindo-se um padrão normativo, observado em regiões agrícolas, que exigem profundidades de até 2m abaixo do greide do terreno de plantação. Pelo fato de que grande extensão da ampliação rodoviária corria paralelo à lavoura, procurou-se manter a drenagem durante todo o tempo da obra.



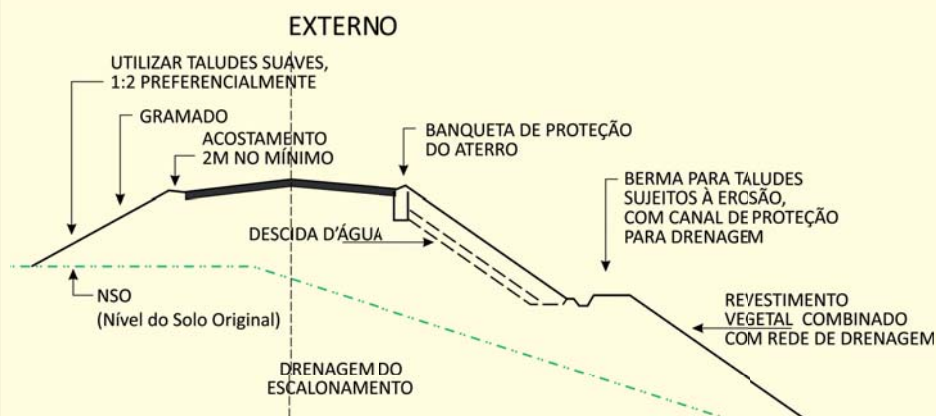
Figura 6 - Melhoramento do solo para a ampliação rodoviária na região de Recife, PE.

## Escalonamento ou degraus no aterro

São cortes no talude, em forma de degraus (piso e espelho), com intervalos de altura constante, dando ao corte aspecto escalonado. É necessário para a estabilidade do talude, já que o piso do degrau elimina o efeito de escorregamento do futuro aterro. Geralmente, os pisos dos degraus tem sua declividade transversal orientada para dentro, em direção ao espelho, minimizando o efeito da erosão onde, geralmente, constrói-se uma valeta de drenagem revestida. A declividade longitudinal acompanha, paralelamente, o greide da estrada, permitindo a drenagem das valetas.



O escalonamento é muito útil em aterros altos, pois permitem o acesso aos taludes laterais, para fins de manutenção ou de drenagem das superfícies. A largura dos degraus depende da inclinação do talude, podendo variar, no entanto, não devendo ser inferior a 4m, excluindo-se a valeta de drenagem.



Os degraus do escalonamento podem ser construídos a medida em que eleva-se o aterro, com material escavado, se for de boa qualidade, incorporando-se ao aterro. Em algumas situações, os degraus devem ser executados de maneira a adentrar, profundamente, no solo natural, de modo a eliminar qualquer possibilidade de deslizamento ou rutura, particularmente se houver presença de minação d'água. Um dos melhores indicadores é o tipo de vegetação, que deve ser visualizado antes da operação de limpeza e destocamento. O uso de drones é particularmente interessante. Outro indicador de instabilidade é a multicoloração do solo, com manchas suspeitas ou mesmo de intemperismo. Para o caso especial da construção de aterros, posicionados sobre aterros existentes, como no caso de ampliação rodoviária, a face ou espelho do degrau geralmente deverá ter 1m de altura, podendo variar bastante.

- Com a elevação do novo aterro, linhas de instalação de serviço públicos enterrados, como redes de gás, esgoto e água, certamente recalçariam. Esta preocupação foi eliminada com o melhoramento do solo.
- Qualquer projeto de ampliação rodoviária, quando da presença de solos moles é crítico e desafiador, considerando-se a presença da antiga estrada e a inevitável instabilidade, na medida em que se trabalha com o solo mole comum. O grande desafio, no entanto é, primeiro, procurar melhorar o solo mole, sob a ampliação estradal, dando-lhe rigidez semelhante à existente, sob a antiga estrada, o que só é possível com Geoenrijecimento. E, segundo, tão importante quanto o primeiro, é executar o escalonamento nas saias do antigo aterro de modo a receber a ampliação.
- Estas exigências tornam-se necessárias, já que caso haja disparidades de rigidez entre os dois solos de fundação, ocorrerão trincas na interface do novo asfalto com o antigo, acompanhadas de recalques diferenciais ao longo do novo pavimento/acostamento. Para o caso de se fazer apenas o melhoramento do solo, com Geoenrijecimento, sem se executar o escalonamento nos antigos taludes ocorrerão apenas fissuras na interface do novo pavimento com o antigo, como se fosse uma junta de dilatação, devido a falta de travamento entre o novo e o antigo.

### O estudo das soluções

A decisão sobre a metodologia a ser empregada, de modo a obter-se a resistência e rigidez necessárias, está diretamente relacionado aos seguintes fatores:

- Perfil geotécnico-geológico.
- Tempo e a intensidade dos recalques.
- Materiais, mão de obra e equipamentos disponíveis.
- Prazos e custos envolvidos.
- Histórico de problemas na região.

A seguir, as soluções geotécnicas estudadas:

- 1 – Aterro sobre o solo existente, sem qualquer melhoramento.
- 2 – Aterro de sobrecarga.
- 3 – Coluna de brita e Deep Soil Mix.
- 4 – Geoenrijecimento.

MELHORAMENTO DE SOLOS.  
EXCLUSIVIDADE



GEOENRIJECIMENTO  
IDEAL PARA AMPLIAÇÃO RODOVIÁRIA.



GEOENRIJECIMENTO  
ÚNICA TÉCNICA DE MELHORAMENTO EFETIVO DE SOLOS MOLES.

1 – Aterro sobre o solo existentes, sem qualquer melhoramento.

O simples lançamento de 1,5m de aterro sobre este solo, sem qualquer melhoramento, incorrerá em ruturas, inadmissíveis para a região em questão.

2 – Aterro de sobrecarga com drenos verticais.

A condição de camadas de solo mole e muito mole profundas desaconselha o uso de pré-carregamento, já que as tensões de compressão gerados pelo carregamento mal chegam a 5m de profundidade, inviabilizando a solução. Historicamente, aterros sobre o solo mole local mostrou-se ineficaz e catastrófico para a região.

3 – Colunas de brita e Deep Soil Mix

Técnicas de “melhoramento” de solo à base de colunas, por não melhorarem efetivamente o solo, deixando-o passivo em relação às colunas, para o caso de ampliação estradal, considerando-se o histórico local, tornar-se-ia extremamente perigoso e até proibido.



Figura 7 - Cravação de Geodrenos concomitante com a formação das verticais do Geoenrijecimento., em ampliação de estrada no Rio de Janeiro.



Figura 8 - A etapa de cravação dos geodrenos, no Geoenrijecimento, em uma ampliação no Recife, PE.

4 – Geoenrijecimento

O Geoenrijecimento tem como objetivo principal aumentar, de forma ajustada e significativa, a resistência/rigidez de depósitos de solos moles, reduzindo/eliminando recalques e impondo total estabilidade. O fundamento teórico do Geoenrijecimento baseia-se no princípio da compressão radial do solo, utilizando-se expansão de cavidades, o que possibilita o adensamento do solo de forma rápida e segura, ao longo de toda a profundidade mole, assegurando a total dissipação da poropressão por meio drenante artificial (geodrenos).

O processo de formação das verticais do Geoenrijecimento é realizado

de baixo para cima, com bulbos que geram compressão radial no solo, utilizando-se geogROUT, o que assegura resistência e rigidez necessárias. O resultado final, portanto, é um solo adensado, confinado e comprimido entre bulbos. Um novo solo homogêneo.

A intervenção consiste, inicialmente, na cravação de geodrenos, em malha projetada. Em seguida, são formadas as verticais que possibilitará o Geoenrijecimento, expandindo-se bulbos que comprimem radialmente o solo. O processo de certificação, com análise tomográfica e piezométrica, é inerente ao desenvolvimento do geoenrijecimento. A seguir, apresenta-se memória de cálculo para avaliar o desempenho do geoenrijecimento quanto a

1. Solo mole pré-GEOENRIJECIMENTO			<input type="radio"/> Sem distinção <input checked="" type="radio"/> Parâmetros definidos pelo usuário
1.1 Perfil geotécnico	5	(usuário)	
1.2 Espessura da camada de solo mole	H =	15,0 m	
1.3 Resistência não drenada	$s_u =$	18,5 kPa	
1.4 Coeficiente de adensamento	$c_v =$	4,7 m <sup>2</sup> /ano	
1.5 Rigidez (módulo elástico)	E =	857 kPa	
1.6 Condições de drenagem		uma face	
			<b>C<sub>c</sub> = 1,09</b> <b>e<sub>0</sub> = 2,43</b>



Figura 9 - Cravação de Geodrenos concomitante com a formação das verticais do Geoenrijecimento, em ampliação no Rio de Janeiro.

Figura 9 - Formação das verticais de Geoenrijecimento, em uma ampliação no Rio de Janeiro.



recalques e o ganho de resistência. O dimensionamento foi feito utilizando a planilha existente na internet no seguinte endereço: [http://www.en-gegraut.com.br/geoenrijecimento/MC\\_v1.0.rar](http://www.en-gegraut.com.br/geoenrijecimento/MC_v1.0.rar).

Introduziu-se parâmetros para o solo (condição virgem) de acordo com os resultados da investigação geotécnica realizada. Em seguida, optou-se por malha de geodrenos, em formato triangular, com espaçamento de 1,50 x 1,50 m e verticais de adensamento, também em malha triangular, com espaçamento igual ao dobro dos drenos. Desta forma, obteve-se 6 drenos ao redor de cada vertical. O volume dos bulbos de compressão radial do solo, calcula-

do, foi de 900 litros. A execução dos bulbos teve início no solo competente arenoso ou, no máximo, a 15 de pro-

Desta forma, o meio homogêneo equivalente terá as características apresentadas no quadro abaixo:

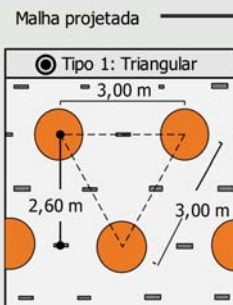
### 3. Parâmetros pós-GEOENRIJECIMENTO: Meio Homogêneo Equivalente

3.1 Resistência não drenada	$S_{u,eq} =$	<b>53 kPa</b>
3.2 Rigidez (módulo elástico)	$E_{eq} =$	<b>3.162 kPa</b>
3.3 Coeficiente de adensamento equivalente	$C_{v,eq} =$	<b>878,1 m<sup>2</sup>/ano</b>
3.4 Tensão admissível	$\sigma_{adm} =$	<b>1,45 kg/cm<sup>2</sup></b>
3.5 Fator de redução de recalques	$\alpha =$	<b>3,7</b>

fundidade, até aproximadamente 1,5m da superfície do terreno. Executou-se um bulbo de compressão radial a cada metro de profundidade.

Estes parâmetros foram introduzidos no modelo numérico, considerando-se o melhoramento do solo com geoenrijecimento até cerca de 15 m de profundidade.

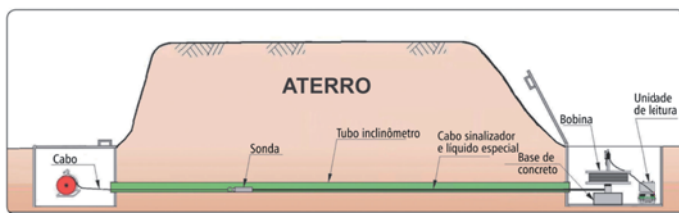
2. CPR Grouting		
2.1 Tipo de malha	<b>1</b>	<b>Triangular</b>
2.2 Espaçamento de geodrenos	$S_{geo} =$	<b>1,50 m</b>
2.3 Volume de geogROUT por metro de profundidade	$V_g =$	<b>900 l/m</b>
2.4 Resistência à compressão do geogROUT	$f_c =$	<b>1,0 MPa</b>
2.5 Coeficiente de redução volumétrica por adensamento	$\bar{h}_c =$	<b>0,5</b>
2.6 Profundidade de geoenrijecimento	$z =$	<b>15,0 m</b>
2.7 Espaçamento entre verticais	$S_v =$	<b>3,00 m</b>
2.8 Razão de substituição	$R_S =$	<b>11,5%</b>



### REFERÊNCIAS

- 1 Thomas Kim é engenheiro civil e trabalha com melhoramento de solos moles..
- 2 Hans Teunissen, Modelling strains of soft soils, 2017.
- 3 K.J. Bathe, Finite element procedures, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- 4 A. van Duinen, "SBW Werkelijke sterkte van dijken, WS01 Analyse veld- en laboratoriumonderzoek", Deltares-Report 1001463-022-GEO-0001 (in Dutch), 2010.
- 5 R. Hill, The mathematical theory of plasticity, Oxford: Oxford University press, 1950.
- 6 J. Huetink, On the simulation of thermo-mechanical forming processes, PhD thesis TU Twente, 1986.
- 7 H. van Langen, Numerical analysis of soil-structure interaction, PhD thesis TU Delft, 1991.
- 8 L.D. Libersky, A.G. Petschek, Smooth Particle Hydrodynamics with Strength of Materials, Advances in the Free Lagrange Method, Lecture Notes in Physics 395 (1990), 248-257.
- 9 L.D. Libersky, A.G. Petschek, A.G. Carney, Hipp T.C., Allahdadi J.R., High F.A., Strain Lagrangian hydrodynamics: a three-dimensional
- 10 SPH code for dynamic material response, J. Comput. Phys. 109 (1993), 67-75.
- 11 W.K. Liu, T. Belytschko, H. Chang., An arbitrary Lagrangian-Eulerian FE-method for path-dependent materials, Comp. Meth. App. Mech. Eng. 58 (1986), 227-245.

## 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 inclinômetro ou qualquer tubo de PVC, analisa a pressão existente, calculando-a como deslocamento vertical.



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