

Soft Soil Brazilian Review

4 Solo Mole

Novos métodos para prever recalques em solos moles.

14 Solo Mole

A questão do recalque e do estado limite da estrutura geotécnica.

20 Solo Mole

Análise de estabilidade e previsão de recalques para aterro e estrada na Baixada Santista.

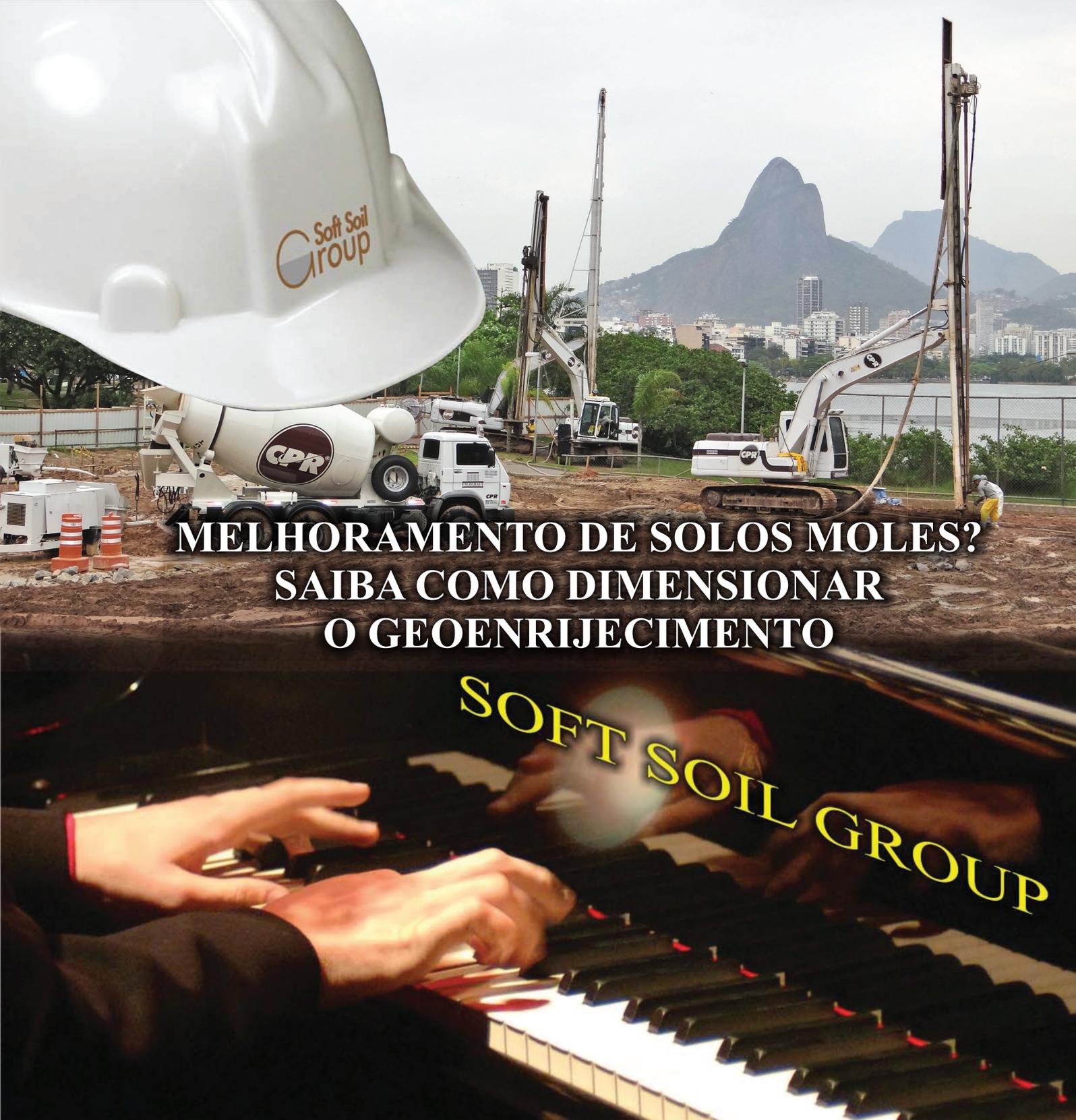
11 Consulta

O método ASAOKA, para verificação do recalque.

A DIFÍCIL QUESTÃO DE PREVER RECALQUES EM SOLOS MOLES

PÁGINA 4





MELHORAMENTO DE SOLOS MOLES? SAIBA COMO DIMENSIONAR O GEOENRIJECIMENTO

SOFT SOIL GROUP

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://softsoilbrazilianinstitute.com.br>

Soft Soil Brazilian Review

Edição - Nov / Dez - Nº 14



SSBI SOFT SOIL
BRAZILIAN
INSTITUTE

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

14

SOLO MOLE
Novos métodos para prever recalques
em solos moles. **04**

Por Joaquim Rodrigues

SOLO MOLE
A questão do recalque e do estado limite
da estrutura geotécnica. **14**

Por Patrícia Tinoco

SOLO MOLE
Análise de estabilidade e previsão de recalques
para aterro e estrada na Baixada Santista. **24**

Por Thomas Kim

EDITORIAL

Nesta edição, procuramos atender inúmeras reivindicações de nossos leitores com relação a atual situação da previsão de recalques em solos moles. De modo a se avaliar a adequabilidade de uma fundação ou de um aterro, torna-se necessário avaliar sua capacidade de carga e o recalque excessivo. Para fundações sobre solos moles, o principal critério de projeto é tipicamente o último - o controle do recalque esperado, dentro dos limites considerados toleráveis para a estrutura. Como resultado, uma vez estabelecido os recalques toleráveis, a estimativa do recalque total, na vida da estrutura, será o maior fator para a escolha do projeto de sua fundação. Assim, procuramos apresentar métodos para prever recalques, inclusive os mais recentes, incluindo um exemplo de caso na Baixada Santista. Neste particular, dever-se-á lembrar, sempre, que a presença de matéria orgânica, no solo de fundação, torna diferente a resposta do processo compressivo do carregamento na argila mole. Assim, muito cuidado ao se calcular o recalque em argilas moles, principalmente quando houver matéria orgânica ou turfa. Boa leitura.

Joaquim Rodrigues

NOVOS MÉTODOS PARA PREVER RECALQUES EM SOLOS MOLES

Figura 1 - A heterogeneidade do solo de fundação de estradas torna quase impossível estabelecer seu processo de recalque.

Solo mole é um solo argiloso ou silto-argiloso, geologicamente jovem, em equilíbrio com seu próprio peso. Qualquer carga adicional resultará em grandes deformações. O comportamento deste solo é bem caracterizado por suas propriedades indicativas de compressão, resistência e deformação, quando carregado. Independentemente de definições ou termos geológicos, solos argilosos moles são finos, podendo ser normalmente consolidados, subconsolidados ou levemente sobre-consolidados, possuindo consistência mole e/ou muito mole. De acordo com normas brasileiras e européias, solo argiloso mole pode ser caracterizado, para propósito de construção, como:



Figura 2 - Solo argiloso orgânico mole e muito mole, com cerca de 25m de profundidade, apresentando camadas turfosas ao longo da Lagoa de Jacarepaguá, RJ, torna esta região uma das mais críticas para análise de recalque.

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

- Altamente compressível, e a presença de material orgânica aumenta e torna mais complexa sua compressibilidade.
- Solo de consistência mole ou muito mole, possuindo índice de consistência $I_c < 0,75$.
- Parcial ou completamente saturado.
- Porosidade alta e atuante.
- Com propriedades tixotrópicas, etc.
- Solo graduado, predominantemente fino, com mais de 50% passando na peneira de 75μ .
- Elevados limites de liquidez e plasticidade.
- Alto teor de umidade, maior que o limite de liquidez.
- Baixa permeabilidade, sendo que a permeabilidade global pode ser ainda menor.
- Baixa resistência cisalhante que, geralmente, varia com a profundidade. Com base nos valores da resistência não drenada, solo mole pode ser classificado de duas formas:
 - Segundo a Norma Brasileira NBR 1484, solo muito mole é argiloso, podendo ser orgânico ou não, com SPT menor do que 2 golpes/30cm. O solo ultra mole é um solo argilo-siltoso, orgânico ou não, possuindo uma ou mais características abaixo mencionadas:
 - SPT igual ou menor que 1, sendo comum o equipamento de sondagem descer sob o efeito do próprio peso.



Figura 4 - Corte da vegetação e lançamento do aterro de conquista. A presença de profundo solo argiloso orgânico, posteriormente melhorado com Geoenrijecimento, na região onde, atualmente, encontra-se a Cidade do Rock, Rio de Janeiro, RJ.

- No ensaio palheta, a resistência é menor do que 10kPa, podendo-se encontrar valores menores que 5kPa.

Assim, a utilização de aterros sobre depósitos de solos moles, sem melhoramento, implica em ruturas e grandes deformações, com longos prazos de consolidação. É interessante ressaltar que melhoramento de solos moles com pré-carregamento, só é eficaz quando a profundidade do solo mole não ultrapassa os 5m, já que as tensões de compressão, que viabilizarão a consolidação, não ultrapassam esta profundidade. A questão do prognóstico do

recalque, tem sido um dos principais tópicos de pesquisa na engenharia geotécnica. Como o processo de recalque, nas argilas moles saturadas, é tempo dependente, utiliza-se a curva recalque versus tempo para caracterizar seu comportamento. O método mais comum para prognosticar o recalque, a longo prazo, é observando os dados do monitoramento no campo. Tradicionalmente, utilizam-se várias curvas de ajuste, para estimar o processo de recalque nas argilas moles, como a curva exponencial, a curva hiperbólica, a curva de Poisson e o método de Asaoka. Com base em novas teorias, introduzidas no meio geotécnico, otimizou-se ainda mais



Figura 3 - Melhoramento de solos moles, em uma duplicação rodoviária no sul do país, iniciando-se com a cravação de geodrenos, seguido da formação dos bulbos de compressão radial do solo ao longo de toda a profundidade de solo mole.

a estimativa de recalque com novos métodos, como o de Gray e o de Gompertz. Avaliaremos, neste artigo, todos estes métodos, comparando-os.

O mecanismo de recalque no solo mole

O recalque total desenvolvido no solo mole, quando carregado, divide-se em três componentes,

- Recalque imediato
- Recalque por consolidação
- Recalque secundário

A visualização deste recalque, na curva recalque-tempo abaixo, pode ser apresentada da seguinte maneira:

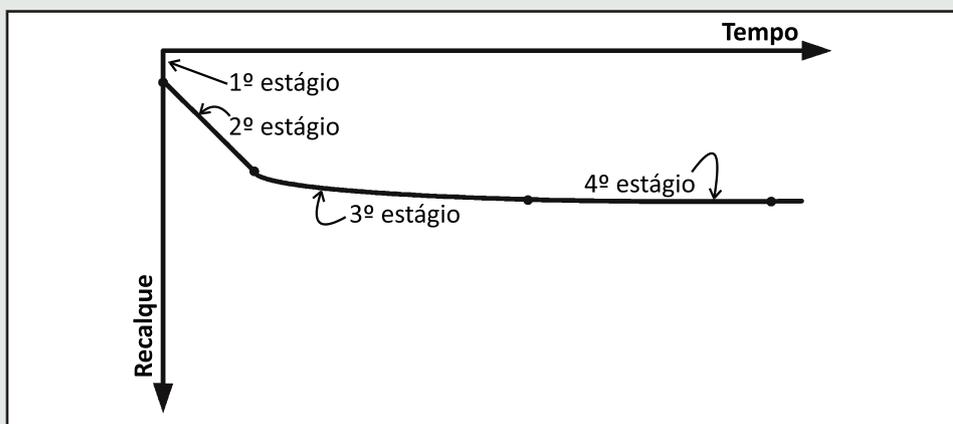


Figura 5 - Curva recalque-tempo.

- 1 No 1º estágio, o solo comporta-se elástico, fazendo com que o recalque seja linear.
- 2 Aumentando-se o carregamento o recalque, e sua velocidade, aumentam.
- 3 Mantendo-se a carga intacta, o recalque continua a aumentar, devido as propriedades deformativas e, naturalmente, à sua consolidação, ao mesmo tempo em que diminui sua velocidade. Não é demais lembrar que, comprimir areia significa compactá-la, e comprimir argila significa consolidá-la.
- 4 Passando-se bastante tempo, o recalque da argila mole alcança seu valor limite, com velocidade zero, ocorren-

do todo o processo deformativo no solo, terminando sua consolidação.

Com estas informações preliminares, percebe-se que o propósito do estudo das argilas moles é desenvolver um modelo teórico ou empírico, de modo a estimar seu comportamento para qualquer tempo e carregamento. Com base no monitoramento, do recalque no campo, há diversos métodos interessantes, baseados em curvas de ajuste, que apresentamos a seguir.

Curva exponencial

De acordo com a teoria da consolidação, proposta por Terzaghi, a relação poropressão* – tempo, é descrita por expressão exponencial. Para solos com propriedade elástica linear, seu grau de consolidação é definido pela utilização da tensão, igual à definida pelo emprego da deformação. O grau de consolidação da argila mole poderá ser,

$$U = 1 - \alpha \exp(-\beta t) \quad (1)$$

Onde α e β são parâmetros da consolidação, relacionando-se a condição de drenagem, evidenciados pela tabela abaixo:

* Poropressão é a pressão exercida pela fase água, dentro dos poros da argila saturada, composta de matéria sólida e poros saturados. Seu cálculo é feito pela média do volume dos poros elementar representativo, e não apenas de um poro individual. Sua medição é feita com base na pressão de referência atmosférica ambiente, utilizando-se piezômetro. A pressão positiva é encontrada em solos saturados, enquanto a pressão negativa, ou de sucção, obtida na região superior ao nível freático. A superfície de pressão zero, define o nível d'água do solo. A variação espacial e temporal, da poropressão, promove o gatilho indutor do processo deformativo e de ruturas no solo mole que, por sua vez, responde pela aptidão do solo suportar tensões normais e sua incapacidade de suportar cisalhamentos.

Tabela 1: Valores teóricos de α e β

Condição de drenagem	α	β
Consolidação com drenagem vertical	$\frac{8}{\pi^2}$	$\frac{\pi^2 c_v}{4H^2}$
Poços de drenagem atravessam a camada de solo	$\frac{8}{\pi^2}$	$\frac{8c_h}{F_n d_e^2} + \frac{\pi^2 c_v}{4H^2}$
Poços de drenagem não atravessam a camada de solo	$\frac{8}{\pi^2 \rho}$	$\frac{8c_h}{F_n d_e^2}$



Figura 06 - Melhoramento do solo, com a cravação de geodrenos, em uma duplicação rodoviária no sul do país.

MELHORAMENTO DE SOLOS.
EXCLUSIVIDADE



GEOENRIJECIMENTO
IDEAL PARA AMPLIAÇÃO RODOVIÁRIA.



GEOENRIJECIMENTO
ÚNICA TÉCNICA DE MELHORAMENTO EFETIVO DE SOLOS MOLES.

Portanto, de acordo com a obtenção dos dados monitorados, o grau de consolidação médio pode ser expresso por:

$$U = \frac{S_t - S_d}{S_f - S_d} \quad (2a)$$

Onde: S_t é o recalque medido no tempo t . S_d e S_f são os recalques de consolidação imediata e final.

Combinando-se a equação (1) e (2) obtém-se a seguinte equação:

$$s_t = (s_f - s_d)[1 - \alpha \exp(-\beta t)] + S_d \quad (2b)$$

No método de ajuste da curva exponencial, seleciona-se três pontos na curva recalque-tempo e o intervalo de tempo entre pontos deve ser o mesmo, ou seja:

$$\Delta t = t_3 - t_2 = t_2 - t_1 \quad (3)$$

Em seguida, coloque três pontos na equação 2b, obtendo-se 3 equações e as expressões de β , S_f e S_d serão:

$$\beta = \frac{1}{\Delta t} \ln\left(\frac{s_2 - s_1}{s_3 - s_2}\right) \quad (4a)$$

$$s_f = \frac{s_3(s_2 - s_1) - s_2(s_3 - s_1)}{(s_2 - s_1) - (s_3 - s_2)} \quad (4b)$$

$$s_d = \frac{s_t - s_f[1 - \alpha \exp(-\beta t)]}{\alpha \exp(-\beta t)} \quad (4c)$$

As equações acima, portanto, são as equações que controlam a curva exponencial.

Curva hiperbólica

Para argilas moles, com alta compressibilidade, a curva tensão-deformação não é linear, desta forma o processo de consolidação da argila mole não se adequa, necessariamente, à curva exponencial. Quando $0,6 < U < 0,9$ a relação entre U e o fator tempo T , pode ser expresso pela hipérbole equilátera. A base teórica da curva hiperbólica é explicado da seguinte maneira: O recalque no depósito de argila mole, que ocorrerá no tempo t , pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$s = s'_0 + \frac{t - t'_0}{\alpha'_0 + \beta'(t - t'_0)} \quad (5)$$

Reescrevendo a equação anterior:

$$\frac{t - t'_0}{s - s'_0} = \alpha'_0 + \beta'(t - t'_0) \quad (6)$$

Método Asaoka

A equação da consolidação, à uma dimensão, utilizando-se deformação volumétrica, pode ser expressa da seguinte maneira:

$$c_v \frac{\partial^2 \varepsilon_v}{\partial z^2} = \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (7)$$

Com base na equação (7), Asaoka empregou uma série para aproximar a expressão

$$s + \alpha_1 \frac{ds}{dt} + \alpha_2 \frac{d^2s}{dt^2} + \dots + \alpha_n \frac{d^ns}{dt^n} = b \quad (8)$$

Onde s é o recalque por consolidação, α_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) é o coeficiente de consolidação, b é uma constante para a condição de contorno. De acordo com sugestão de Asaoka, os parâmetros na equação (8) podem ser determinados pelo monitoramento de campo. Além disso, a equação (7), pode ser simplificada:

$$s_j = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i s_{j-1} \quad (9)$$

Considerando-se a condição de contorno fixo, a solução para a equação é,

$$s(t) = s_\infty - (s_\infty - s_0) \exp\left(-\frac{t}{\alpha_1}\right) \quad (10)$$

onde S_0 e S_∞ são os recalques inicial e final na argila mole, respectivamente $\alpha_1 = 5h^2/12c_v$.

Curva de Poisson

A curva de Poisson é uma curva logística, adequada para curvas de forma "S", decrescente ou com incrementos. A expressão da curva de Poisson, normalmente utilizada, é dada por,

$$s_t = \frac{k}{1 + ae^{-bt}} \quad (11)$$

onde a , b e k são parâmetros que devem ser determinados pelos dados de monitoramento, ajustando-se à curva S_t obtida, com procedimentos a seguir. Utilizando-se um intervalo de tempo e o número total de séries $3n$, dividindo-se o tempo-séries em 3 subséries e cada subsérie com um número de pontos, ou seja,

$$\begin{cases} \text{sub - series 1} & t = 1, 2, 3, \dots, n \\ \text{sub - series 2} & t = n+1, n+2, n+3, \dots, 2n \\ \text{sub - series 3} & t = 2n+1, 2n+2, 2n+3, \dots, 3n \end{cases} \quad (12)$$

Assim, assumindo-se que S_1 , S_2 e S_3 representam a soma do inverso do recalque, correspondente a cada sub-série de tempo, obtém-se as expressões para se determinar os parâmetros a , b e k ,

$$\begin{cases} a = \frac{(S_1 - S_2)^2 (1 - e^{-b})k}{[(S_1 - S_2) - (S_2 - S_3)]e^{-b}(1 - e^{-nb})} \\ b = \frac{\ln(S_1 - S_2) / (S_2 - S_3)}{n} \\ k = \frac{n}{S_1 - \frac{(S_1 - S_2)^2}{(S_1 - S_2) - (S_2 - S_3)}} \end{cases} \quad (13)$$

Combinando-se as equações 12 e 13, o recalque do solo mole em qualquer tempo, S_t , pode ser calculado, e o recalque final é igual ao valor final de S_t , quando o tempo t tende a infinito, ou seja,

$$s_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} s_t = k \quad (14)$$

Método de Grey

Este método possui sequência isométrica de tempo, com a seguinte expressão diferencial:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + cx^{(1)} = u \quad (15)$$

A equação do tempo de resposta correspondente será,

$$\hat{x}^{(1)}(t) = [x^{(1)}(0) - \frac{u}{c}]e^{-ct} + \frac{u}{c} \quad (16)$$

A equação de resposta individualizada será,

$$\hat{x}^{(1)}(k) = [x^{(1)}(0) - \frac{u}{c}]e^{-c(k-1)} + \frac{u}{c} \quad (17)$$

Método de Gompertz

Este método possui curva de crescimento, cuja expressão matemática mostra,

$$y = m \exp[-e^{(n-l)}]$$

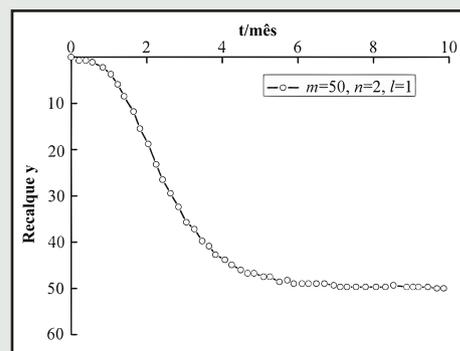


Figura 7 - Curva Gompertz típica.

A típica curva de Gompertz, apresentada na figura anterior, concorda a curva teórica com a curva do recalque medido. Portanto, é bastante interessante utilizar este método para prever o recalque em depósitos de argila mole. Os métodos apresentados, são amplamente utilizados para prever o recalque de estruturas sobre solos moles, sendo que cada modelo tem seu próprio escopo de aplicação. A curva exponencial está de acordo com a teoria da consolidação unidimensional de Terzaghi, sendo que o parâmetro a e b , com base em três pontos é subjetivo, o que influi na precisão da avaliação. De acordo com Terzaghi, o método hiperbólico faz uma relação entre o grau de consolidação U e o fator T , mais simples que a curva exponencial. Desta forma, o método hiperbólico é mais adequado para trabalhos no campo. Sua desvantagem é que os parâmetros da consolidação não podem ser refletidos. O método de Asaoka, com base na consolidação de Terzaghi, prevê a tendência de recalque, uma vez que o grau de consolidação excede 0,6, e o recalque

final da argila mole pode ser bem previsto. A curva de Poisson descreve bem a relação, em forma de S, entre recalque e tempo. Sua aplicabilidade em relação a outras curvas de recalque-tempo é questionável, necessitando muita atenção. Os quatro métodos mencionados, são tradicionais e bem aceitos pela comunidade geotécnica do solo mole. Os métodos de Grey e o de Gompertz são mais novos e especificados para argilas moles mais complexas.

SSBI

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 Engengraut 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 quadrados de geoenrijecimento executadas em solos moles

com CPR Grouting, para a construção de aterros, estradas, portos, ferrovias e armazenagem.

- Zhao, M., Liu, Y., Cao, W.: The developing regularity and forecasting of settlement in soft clay roadbed. J. Cent. South University (Nat. Sci.) 35(1), 157–161 (2004)
- Chen, S., Wang, X., Xu, X., Yu, F., Qin, S.: Three-point modified exponential curve method for predicting subgrade settlements. Rock Soil Mech. 32(11), 3355–3360 (2011)
- Zai, J., Mei, G.: Forecast method of settlement during the complete process of construction and operation. Rock Soil Mech. 21(4), 322–325 (2000)
- Tan, S.A.: Hyperbolic method for settlement in clays with vertical drains. Can. Geotech. J. 31(1), 125–131 (1994)
- Asaoka, A.: Observational procedure of settlement prediction. Soil Found. 18(4), 87–101 (1978)
- Lei, X., Bai, S., Meng, Q.: The application of Grey forecasting to analyzing soft foundation settlements. Rock Soil Mech. 21(2), 145–147 (2000)
- Xu, H., Shi, B., Li, X.: Logistic growth model and its applicability for predicting settlement during the whole process. Rock Soil Mech. 26(3), 387–391 (2005)
- Yu, C., Liu, S.: A study on prediction of embankment settlement with the Gompertz model. Rock Soil Mech. 26(4), 82–86 (2005)



Figura 09 - O grande problema do método de melhoramento de solos moles com pré-carregamento: recalques diferenciais ao longo das estradas. Ou seja, depósitos de solos moles mais profundos que 5m, este método não é eficaz.

O MÉTODO DE ASAOKA, PARA VERIFICAÇÃO DO RECALQUE

Existem diversos métodos para avaliar o grau de consolidação de solos moles, utilizando-se observações de campo, cada um apresentando vantagens e desvantagens, além de precisão diferenciada. O método de ASAOKA, para determinação do grau de consolidação, em relação ao tempo, utilizando-se observações do recalque existente no campo é considerado o mais simples e mais preciso. Baseia-se nas análises dos dados de recalque, coletados em campo, objetivando-se determinar o recalque final e os coeficientes de adensamento vertical e horizontal. Para o caso de drenagem vertical, ASAOKA adota a equação do adensamento,

$$\left(\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}\right) = c_v \cdot \frac{\partial^2 \varepsilon_v}{\partial z^2}$$

onde:

ε_v – deformação volumétrica vertical;
 c_v – coeficiente de adensamento vertical;
 t – tempo.

Assim, o valor do coeficiente de adensamento vertical proposto é:

$$c_v = -\frac{5}{12} Hd^2 \frac{\ln \beta_1}{\Delta t}$$

onde:

Hd – distância de drenagem;
 β_1 – coeficiente angular;
 Δt – intervalo de tempo considerado.

De forma análoga, MAGNAN e DEROY (1980) modificaram o método partindo da equação desenvolvida por TERZAGHI e FROLICH (1936), propondo para o coeficiente de adensamento vertical uma expressão muito semelhante à desenvolvida por ASAOKA,

$$c_v = -\frac{4}{\pi^2} Hd^2 \frac{\ln \beta_1}{\Delta t}$$

Na drenagem radial pura, segundo MAGNAN e DEROY (1980), através da equação de BARRON (1948), utilizando condição de deformações verticais iguais, propuseram o coeficiente de adensamento horizontal,

$$c_h = -\frac{F(n)}{8} d_e^2 \frac{\ln \beta_1}{\Delta t}$$

Para o caso de drenagem combinada vertical e radial, MAGNAN e DEROY (1980) propuseram a equação para o cálculo do coeficiente de adensamento horizontal,

$$c_h = -\frac{d_e^2 F(n)}{8} \left[\frac{\ln \beta_1}{\Delta t} + \frac{\pi^2 c_v}{4Hd^2} \right]$$

A expressão (5) resulta em um sistema indeterminado, com duas incógnitas, c_v e c_h , e apenas uma equação, tornando-se necessária uma informação adicional, ou seja a relação entre os coeficientes de adensamento vertical e horizontal. Atribuindo um valor para c_v e inserindo a relação r (c_h/c_v), a equação 5 passa a ser:

$$c_h = \frac{-\ln \beta_1}{\frac{8}{d_e^2 F(n)} + \frac{\pi^2}{4rHd^2}}$$

Segundo ALMEIDA (1996) o método de ASAOKA modificado por MAGNAN e DEROY (1980), consiste dos passos:

- Traça a curva recalque ao longo do tempo;
- Divida a curva em valores de tempo, igualmente espaçados, de acordo com a figura (1a), recomendando-se admitir valores entre 30 e 90 dias;
- Determine os recalques S_1, S_2, S_3, \dots correspondentes ao tempo t_1, t_2, t_3, \dots
- Construa o gráfico S_i, S_i-1 , em um sistema de eixos cartesianos de mesma escala horizontal e vertical, utilizando os valores determinados em c;
- Ajuste o traçado da reta que melhor se alinhe aos pontos do gráfico do item d;
- Determine o coeficiente angular (β_1) da curva, conforme a figura (1b);
- Traça a bissetriz dos eixos cartesianos para obter com a interseção com a curva plotada o recalque a tempo infinito S_∞ conforme ilustrado na figura (1b);
- Determine os valores dos coeficientes de adensamento vertical e horizontal.

MASSAD (1982). Portanto, torna-se indispensável o conhecimento da estimativa do recalque final, para a correta aplicação do método. Erros correntes, pela utilização do método, fora da faixa de validação

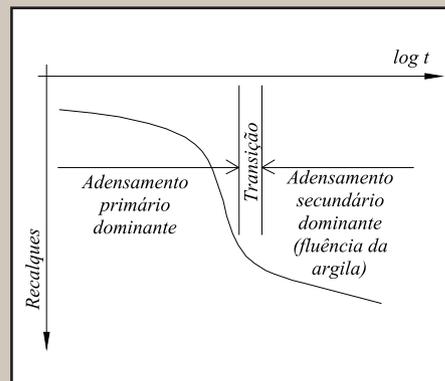


Figura 03 - Gráfico recalque x tempo em escala semi logarítmica (Leroueil e outros, 1995).

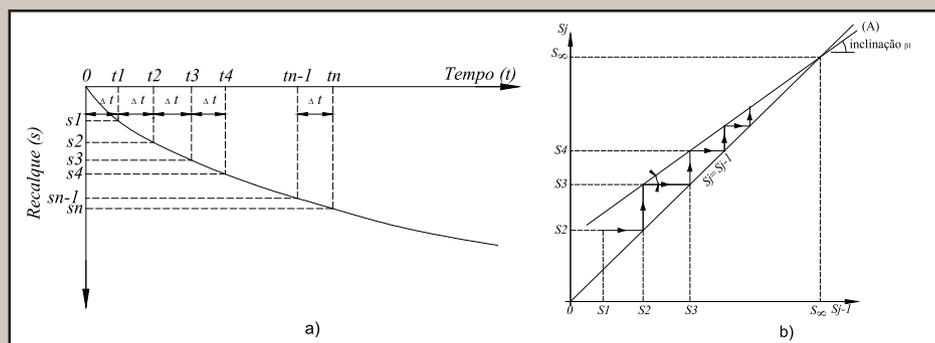


Figura 01 - a) Curva recalque x tempo na construção gráfica de ASAOKA, b) Construção gráfica modificada por MAGNAN e DEROY.

No caso de carregamento em etapas, adotar-se-á um coeficiente angular para cada etapa de carregamento constante como ilustrado em (2a). De acordo com SCHMIDT (1992), o valor encontrado de (β_1) através do método de ASAOKA é afetado pela

acarretam, no caso de adensamento predominantemente vertical, recalques menores e coeficiente de adensamento vertical maior que o real. Para o caso de adensamento radial e combinado, vertical e horizontal, respeitando a faixa de validação, apresenta

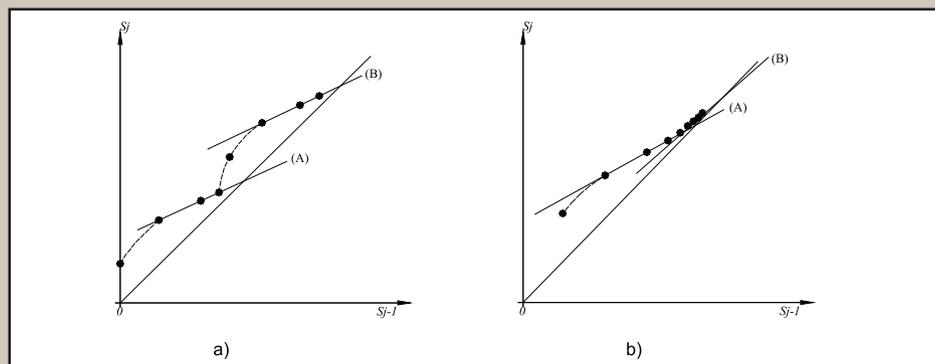


Figura 02 - a) Carregamento em duas etapas, b) Compressão secundária em cada etapa de carregamento na construção gráfica de ASAOKA.

ocorrência do adensamento secundário, juntamente com o primário. Este fato é verificado com a mudança de inclinação da curva como ilustrado na figura (2b). Analisando as curvas recalque ao longo do tempo, em escala logarítmica, conforme figura (3), de acordo com LEROUIL et al (1985), o artifício possibilita visualizar a influência e o comportamento dos recalques primário e secundário. Caso a influência do secundário seja pequena, o método proposto por ASAOKA pode ser utilizado para determinar os valores do recalque a um tempo infinito. O método de ASAOKA só pode ser aplicado após 60% do adensamento, sendo válido apenas para relações exponenciais, conforme apontado por

correta estimativa para os recalques, porém o coeficiente de adensamento depende da geometria da zona de amolamento em torno do dreno.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M.S.S. (1996), "Aterro sobre Solos Moles: da Concepção à Avaliação do Desempenho", Editora da Universidade Federal do Rio de Janeiro, novembro.
- ASAOKA, A (1978), "Observation Procedure of Settlement Prediction", Soil and Foundation, Japanese Society of soil mechanics and Foundation Engineering, Vol 18, nº 4, December, pp 87-101.



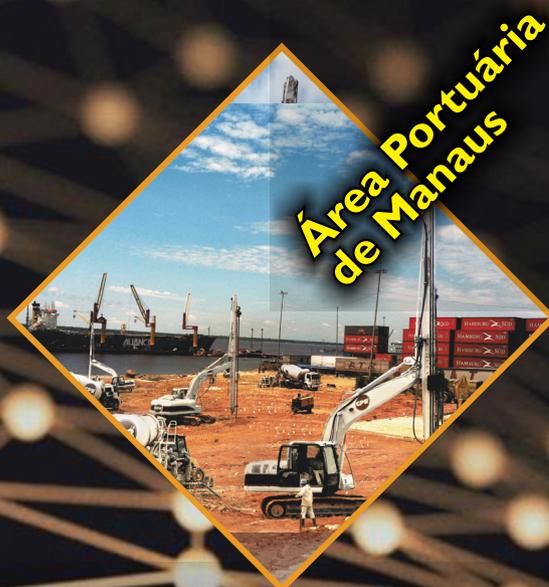
RODOANEL

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.



Duplicação da BR470



Área Portuária de Manaus

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

SOFT SOIL BRAZILIAN REVIEW

Diretor Editorial

ENGº JOAQUIM RODRIGUES

joaquim@softsoilbrazilianinstitute.com.br

Diretores Adjuntos

ENGº THOMAS KIM

ENGº ROGER RODRIGUES

PATRÍCIA TINOCO

patricia@softsoilbrazilianinstitute.com.br

Publicidade, Assinatura, Livros e Vídeos

CLEIDE FERREIRA

cleide@softsoilbrazilianinstitute.com.br

Editor de Arte

ALEX CRISPIM

Reprints Editoriais

MARIANA TATI

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



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

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/>

A QUESTÃO DO RECALQUE E DO ESTADO LIMITE DA ESTRUTURA GEOTÉCNICA

Figura 1 - Recalques entre o aterro de encontro e a ponte são comuns em nossas estradas, na maioria das vezes causado pelo tipo de solução de melhoramento imposto.

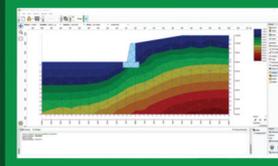
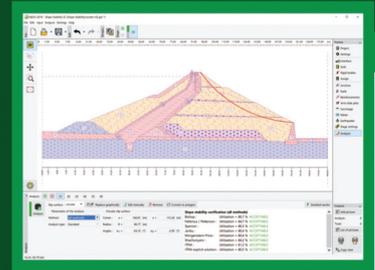
A utilização de fatores de segurança adequados, efetivamente, é a garantia da operacionalidade e do bom desempenho de estruturas geotécnicas. Recalques e ruturas são condições que nenhum geotécnico deseja. Novos códigos introduziram, literalmente, mudanças culturais exigindo, explicitamente, que se avalie o desempenho de estruturas geotécnicas, prevendo-se recalques e possíveis ruturas, possibilitando-se a escolha da solução a ser empregada. Neste artigo, procuramos discutir o desempenho e a operacionalidade de estruturas geotécnicas, focando-se em métodos de previsão de recalques de aterros sobre solos argilo-



Figura 2 - Este tipo de recalque só é evitado, melhorando-se o solo adequadamente, obtendo-se níveis de rigidez compatíveis com o carregamento imposto.

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

Distribuído por:

SOLUÇÕES CAD
BIM

www.solucoescad.com.br

so moles, como o método unidimensional (edômetro). Cálculos simples, com base em soluções atraentes, tem a vantagem de focar nos parâmetros mais importantes a serem considerados. Procuramos focar na teoria da elasticidade, de modo a se determinar tensões, deformações e deslocamentos induzidos pelas cargas superficiais, particularmente relacionando recalques aos inerentes danos causados, relacionando os fatores influenciadores, o tempo de obra e, claro, a certeza da dissipação de todo o excesso de poropressão causado (consolidação), durante o melhoramento do solo, o que só é viável apenas com a técnica de Geoenrijecimento, de modo a não impactar na obra subsequente. Por isso, exige-se saber quanto os recalques total e diferencial ocorrerão na estrutura, e com que rapidez irão acontecer.

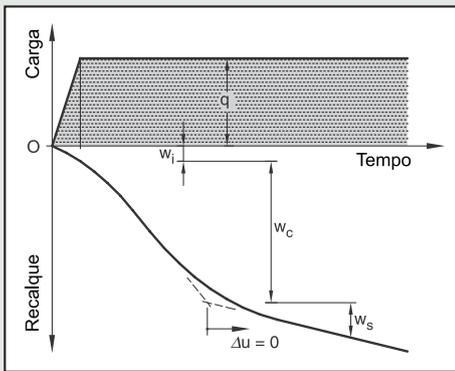


Figura 3 - Evolução do recalque com o tempo.

A evolução do recalque

Quando impõe-se um aterro, seguido de outro carregamento, sobre um terreno com extensão limitada e presença de solos moles, poderá ocorrer os seguintes fenômenos, de acordo com a figura 3.

a Com a imposição do processo compressivo, proveniente do melhoramento do solo, ocorrerão excessos de poropressão na argila mole, devido a baixa condutividade hidráulica. A hipótese de trabalho, nesta fase inicial, é que o solo comportar-se-á em condição virtualmente não drenada. É o que ocorre com as técnicas de “melhoramento de solo” à base de colunas, já que o solo mole, entre colunas, sofre deformações, sem redução de volume e os recalques diferenciais na superfície representam pura distorção, conhecida como recalque imediato. Embora não seja realmente elástico, costuma-se estimar seu valor utilizando-se a teoria da elasticidade ou, de forma alternativa, utilizando-se métodos empíricos que preveem seu valor, como sendo uma fração do recalque total. No Geoenrijecimento, não há ocorrência de recalques diferenciais, já que o solo melhorado, torna-se homogêneo devido à forte compressão radial imposta, metro a metro, com excelente

processo de drenagem previamente implantado.

- b Subsequentemente, desenvolve-se o recalque de consolidação, devido ao processo, totalmente dependente do tempo, que é a dissipação da poropressão e o estabelecimento das pressões efetivas. No “melhoramento do solo” com colunas, o efeito compressivo é extremamente limitado no solo mole, entre inclusões verticais, postergando o processo de consolidação com consequentes recalques diferenciais em relação às colunas, que tentam transferir cargas para camadas profundas resistentes.
- c Finalmente, após a conclusão do processo de consolidação, desenvolve-se o recalque secundário, com tensões efetivas constantes, particularmente quando há material orgânico no solo.

A importância de cada componente, dependerá da geometria do problema, da natureza do solo mole e do carregamento. Com relação à distribuição espacial do recalque, utiliza-se ampla terminologia para identificar movimentos no solo e nos elementos de fundação. A figura 4, apresenta o recalque, w , que ocorre em diversos pontos da estrutura, sendo que o recalque diferencial máximo é apresentado como Δw_{max} . O termo inclinação w , descreve a rotação do corpo rígido. A rotação relativa, β , descreve o giro da linha reta, unindo-se dois pontos de referência em relação a inclinação. Observar que é idêntico à distorção angular apresentada por Skempton e MacDonald, em 1956. A deformação angular é dada por,

$$\alpha = \frac{w_B - w_A}{L_{AB}} + \frac{w_B - w_C}{L_{BC}},$$

sendo parâmetro de referência para estimar-se a abertura de trincas em edificações, que apresentam movimentos em linhas ou planos específicos. De um modo geral, aceita-se que a deformação angular é considerada positiva se a concavidade é para cima, e negativa com a concavidade para baixo. A deflexão relativa, Δ , é o deslocamento máximo, em relação à linha reta, interligando-se dois pontos de referência, com distância L , e a relação Δ/L é definida como relação de deflexão.

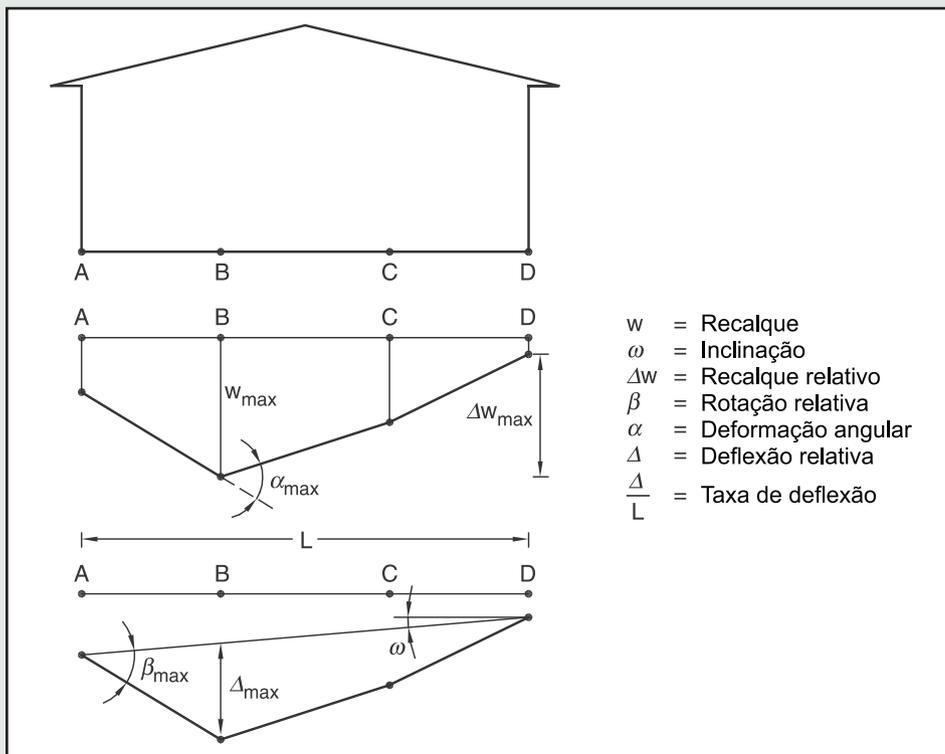


Figura 3 - Definição dos movimentos da fundação.

LANÇAMENTO DO LIVRO

MELHORAMENTO DO SOLO MOLE E O GEOENRIJECIMENTO



Adquira seu exemplar através do email ofitexto@ofitexto.com.br
ou pelo site www.lojaofitexto.com.br

Previendo-se o recalque

A escolha de um modelo constitutivo de solo e os parâmetros geotécnicos relacionados é um tremendo dilema na mecânica dos solos. De um modo geral, confiamos em modelos simples, mas que condensem todas as dificuldades para a seleção da rigidez representativa do solo. Devemos considerar, pelo menos, a trajetória e o estado de tensões, além do nível de deformações. A teoria da elasticidade é uma boa opção para previsão do recalque, exatamente porque fornece soluções mais fáceis. Para se estimar o recalque de uma estrutura geotécnica sobre argila, há necessidade de se desenvolver 3 etapas:

1 Definir o perfil de projeto, usualmente

com camadas, adequadamente caracterizado em termos do histórico de tensões e sua compressibilidade.

2 Com o perfil do solo em camadas, as tensões verticais são computadas, assumindo-se que o solo é isotrópico, linearmente elástico e homogêneo, ignorando-se as diferenças nas propriedades do solo, presente nas diversas camadas.

3 Computa-se as deformações verticais de cada camada do solo, utilizando-se o método unidimensional (edométrico) e reduções em suas espessuras são adicionadas para se obter o recalque na superfície do solo.

Cada uma das etapas apresentadas, são sustentadas por suposições arbitrárias que, no entanto, baseiam-se em evidências experimentais que conferem confiabilidade,

o que justifica sua popularidade. **SSBI**

REFERÊNCIAS

- **Patricia Karina Tinoco** é engenheira civil. Trabalha com melhoramento de solos moles.
- R.O. Davis and A.P.S. Selvadurai (1996) *Elasticity and Geomechanics*, Cambridge University Press.
- H.G. Poulos and E.H. Davis (1974) *Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics*, Wiley.
- S.P. Timoshenko and J.N. Goodier (1970): *Theory of Elasticity* (3rd edn), McGraw-Hill.
- A.P. Selvadurai (1979) *Elastic Analysis of Soil-Foundation Interaction*. *Developments in Geotechnical Engineering*, Vol. 17.
- B.B., Burland, B.B. *Behaviour of foundations and structures*, IX ICSMFE, Tokyo, 2, 495-54.
- *Geotechnical Engineering*. Renato Lancelotta.

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



O CPR Grouting viabiliza.

Entre em contato, para saber mais detalhes a respeito.
www.engegraut.com.br

SOLOTEST®

A solotest equipa os melhores laboratórios de solos, concreto e misturas asfálticas da América Latina, com equipamentos próprios e de seus parceiros internacionais.



 1.014.250 - Extrator Shelby de Bancada



 1.055.001 - Prensa de Adensamento



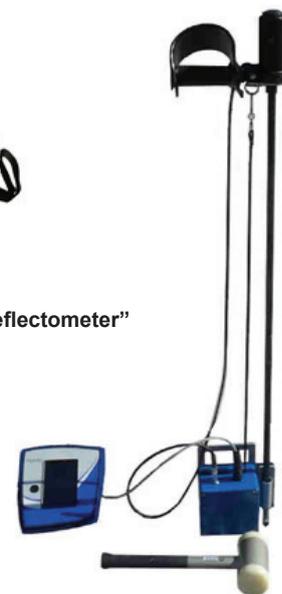
 1.022.250 - Prensa CBR / Marshall Digital Microprocessada



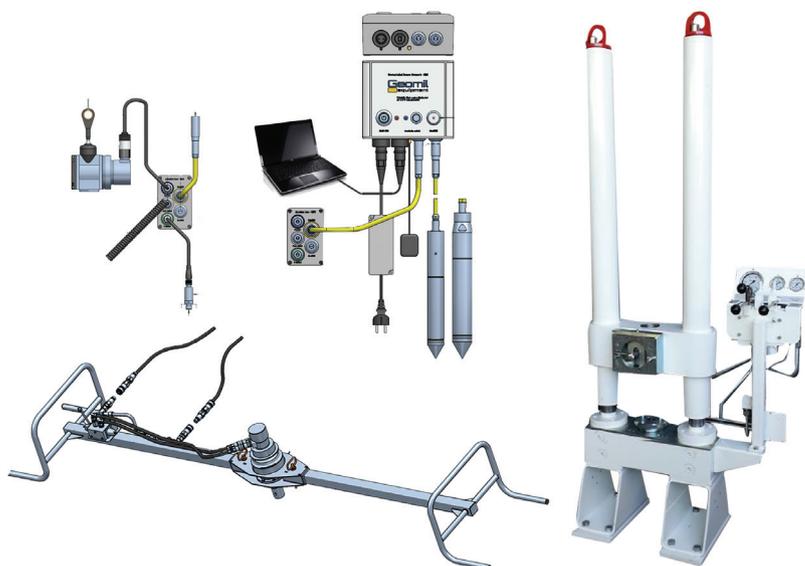
 4.100.030 - Medidor de Densidade de Solo Não Nuclear (SDG)



 4.100.300 - LWD "Light Weight Deflectometer"



 4.100.035 - Penetrômetro Dinâmico Eletrônico para Solos Panda



 4.688.020 - Sistema hidráulico para realização de ensaio CPT em diversos tipos de Solos

ANÁLISE DE ESTABILIDADE E PREVISÃO DE RECALQUES PARA UM FUTURO ATERRO E ESTRADA NA BAIXADA SANTISTA.



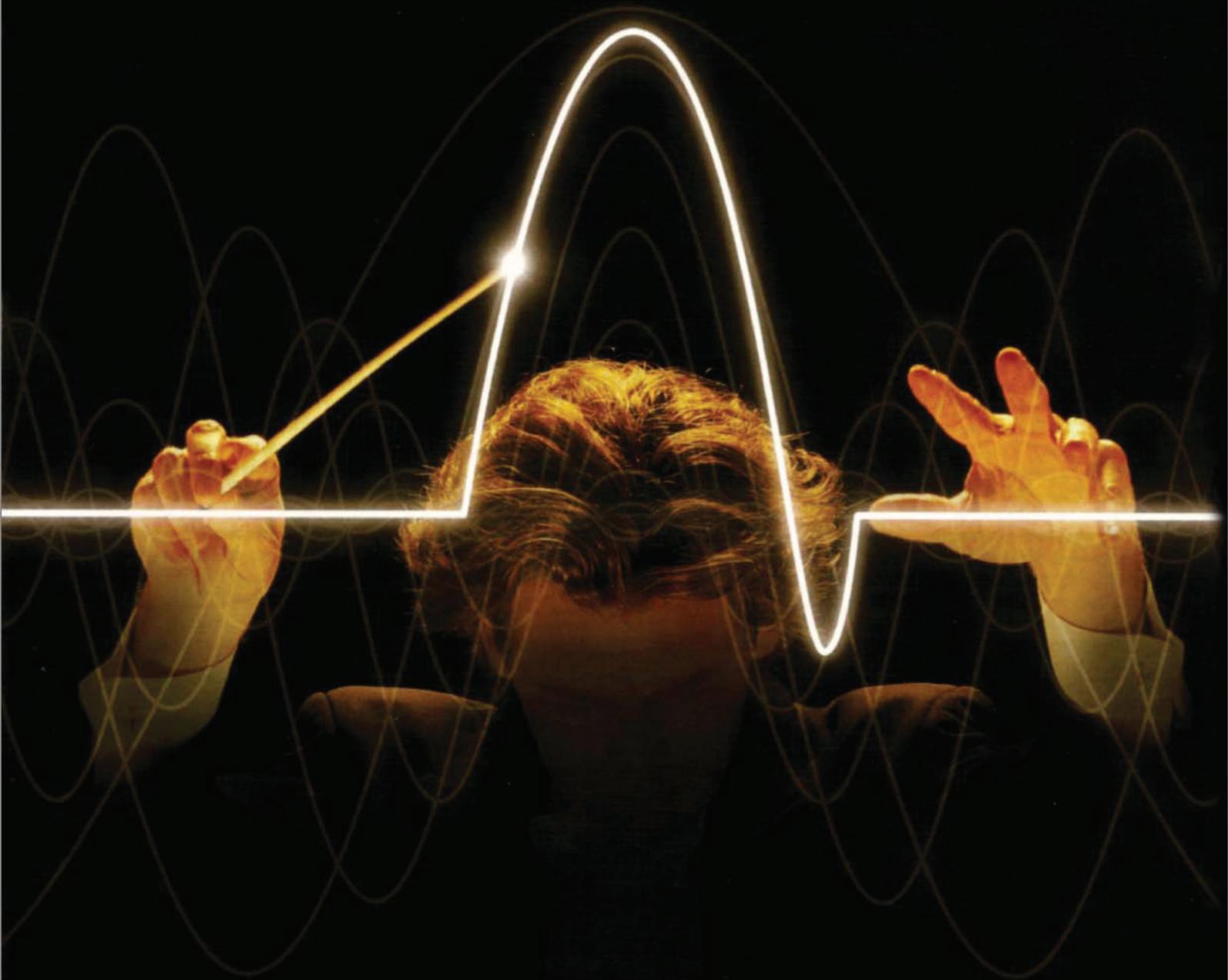
Figura 1 - A cravação de geodrenos, iniciando-se o melhoramento do solo mole de fundação.

Há necessidade de execução de uma estrada para acesso de caminhões em uma região da Baixada Santista. O projeto proposto, com Geoenrijecimento, com CPR Grouting, prevê uma área de aproximadamente 2.750 m², sendo necessário uma análise numérica para avaliar estabilidade e a previsão de recalques. O projeto prevê a realização de toda a infraestrutura necessária para melhorar a estrada de acesso, elevando sua cota até +3,55 m. Inclusive, são previstas obras de drenagem e compatibilização com o duto de gás enterrado ao lado. Evidentemente, qualquer lançamento de aterro sobre solos moles, gera recalques por adensamento.



Figura 2 - Uma marginal sendo preparada para o Geoenrijecimento.

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



No pior caso, pode ocorrer ruptura por falta de capacidade suporte. O melhoramento do solo com a técnica de geoenrijecimento elimina tais riscos, possibilitando a construção do aterro e dos serviços ali previstos (luz, gás, drenagem etc.), além da estrada, com total segurança. O aterro, a infraestrutura e a estrada serão implantadas, realizando-se a ligação de um empreendimento com a rua principal. A cota do nível da estrada atual, situa-se próxima de +1,50 m. O projeto prevê a elevação de novo aterro até a cota + 3,55m, correspondendo a um aumento relativo de 2 m em altura. Na região há depósitos de solos argilosos moles, que possuem insuficientes características geotécnicas (i.e. baixa resistência e elevada compressibilidade). Toda a área é cercada por manguezais.

Caracterização geológica-geotécnica

As Baixadas Santista, Fluminense e a de Jacarepaguá, além da região do Recife, são amplamente estudadas, do ponto de vista geológico-geotécnico, já que nessas regiões ocorrem amplos e profundos depósitos de solos moles. As argilas da Baixada Santista foram divididas por Massad [Ref. 5] em três grandes grupos: Argilas de Manguezais, Argilas Flúvio-Lagunares (SFL) e Argilas Transicionais (AT). Areias Pleistocênicas e Holocênicas se intercalam a estes sedimentos. Ainda segundo Massad [Ref. 5], as argi-



Figura 3 - Localização da obra.

las possuem propriedades geotécnicas bem definidas, as quais são resumidas na Tabela 1, a seguir. Sabe-se que ao longo do Canal do Porto, até o Largo do Caneú, em locais como Alemoa, Saboó, Macuco e Conceiçãozinha, os solos apresentam-se mais arenosos, o que se reflete nos índices

de compressão mais baixos e em densidades naturais mais elevadas. De acordo com o modelo geológico, apresentado na Figura 5, a área em questão localiza-se na região LH, onde ocorrem sedimentos Holocênicos Lagunares. Para confirmação dos tipos de sedimentos, pode-se utilizar as sondagens

Tabela 1. Propriedades geotécnicas das argilas marinhas da Baixada Santista [Ref. 5].

Tipo de argila	Prof. (m)	SPT (-)	Su (kPa)	$C_c/(1+e_0)$ (-)	C_r/C_c (%)	IP (%)	γ_n (kN/m ³)
Mangue	≤ 5	0	3	-	-	-	13,0
SFL	≤ 50	0-4	10-60	0,43 (0,33)	8-12	20-90	15,5
AT	20 ≤ z ≤ 45	5-25	> 100	0,39	9	40-90	15,0-16,3



Figura 4 - Início dos trabalhos de melhoramento do solo mole com Geoenrijecimento.

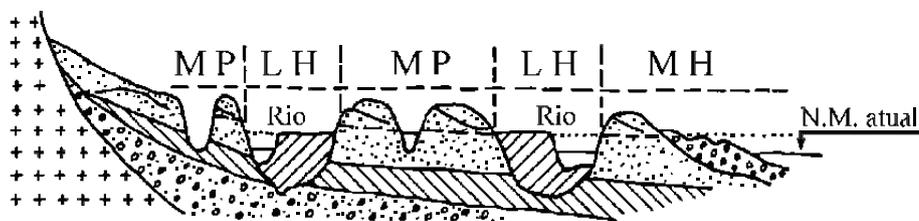


Figura 5 - Modelo geológico de Santos segundo Suguio e Martin (1980). Legenda: MP – Marinho Pleistoceno; MH – Marinho (Holoceno); LH – Laguna (Holoceno); N.M. – nível do mar.

SPT ou os ensaios de piezocone (CPTu). Para se avaliar as propriedades geotécnicas do subsolo local, realizou-se campanha de investigação geotécnica, que compreendeu sondagens de reconhecimento tipo SPT. A Figura 6, apresenta o perfil geotécnico fornecido pelas sondagens SP-101, SP-102, SP-106 e SP-107, selecionadas por sua posição ao longo do acesso dos caminhões. De um modo geral, a área apresenta três camadas bem distintas. Há aterro até 2 – 4 m de profundidade, seguido de profundo depósito de argila muito mole (SPT = 0) até 30 m de profundidade, em média. Mais abaixo, encontra-se areia média e grossa, siltosa, pouco argilosa, com compactidade crescente com a profundidade. O impenetrável ao SPT, fica em torno dos 40 m de profundidade. O nível d'água situa-se logo abaixo da superfície, a meio metro de profundidade, podendo ser até tomado coincidente com o nível atual do terreno. Certamente, não há Argilas Transicionais (AT) no local de interesse. Há dúvidas acerca das argilas poderem ser classificadas como Argilas de Manguezais ou Argilas Flúvio-Lagunares (SFL). Em geral, as argilas de Manguezais não são muito profundas, sendo encontradas até no máximo 15m de profundidade. Por este motivo, parece mais razoável adotar a classificação SFL para este depósito.

Com a ausência de ensaios complementares (palheta, piezocone ou ensaios triaxiais), optou-se por definir o perfil de resistência não drenada, por meio de correlações empíricas. Uma primeira estimativa foi obtida adotando-se o método pro-

sados, portanto, justificável neste caso, onde há aterro preexistente no local.

Parâmetros geotécnicos adotados

Os parâmetros geotécnicos adotados, fo-

Tabela 2. Determinação de Su via SPT pelo método energético [Ref. 6].

Prof. (m)	γ (kN/m ³)	σ'_{v0} (kPa)	N_{SPT}	Penetração total (cm)	Penetração por golpe (m)	Energia (J)	Força (kN)	Su (kPa)
5	15	31	0	62	0,62	494	0,80	15
10	15	57	0	79	0,79	754	0,95	17
15	15	83	0	76	0,76	846	1,11	18,5
20	15	109	0	99	0,99	1259	1,27	20
25	15	135	0	84	0,84	1201	1,43	22

posto por Schnaid e colaboradores [Ref. 6], baseado na energia de cravação. Desta forma, obteve-se o resultado resumido na Tabela 2. Outra estimativa foi obtida empregando-se a conhecida fórmula de Mesri (1975), que relaciona a resistência não drenada à tensão vertical efetiva. A fórmula é válida para depósitos normalmente aden-

ram obtidos com base em correlações empíricas, com o índice de resistência à penetração N_{SPT} . Assim, definiu-se propriedades geotécnicas das camadas para a realização das análises numéricas. Os parâmetros geotécnicos adotados, são apresentados a seguir:

Nome	Modelo	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (graus)
Areia	Mohr-Coulomb	18	0	35
Argila SFL	$S = f(\text{depth})$	15	C-Top = 10 kPa, C -Max = 26 kPa, C-Rate = 0,6 kPa/m	
Aterro antigo	Mohr-Coulomb	18	5	25
Aterro compactado	Mohr-Coulomb	18	15	25

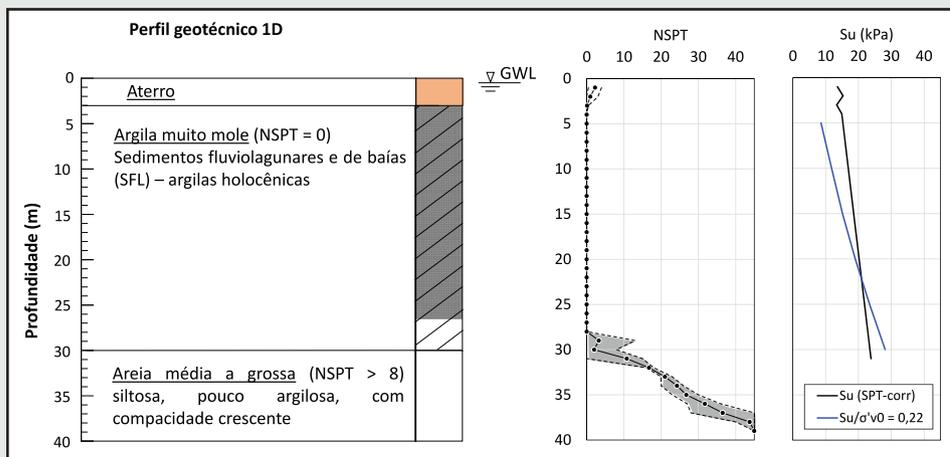


Figura 6 - Perfil geotécnico pelas sondagens SP-101, SP-102, SP-106 e SP-107.

O melhoramento do solo com Geoenrijecimento (CPR Grouting)

O Geoenrijecimento tem como objetivo principal incrementar a resistência/rigidez de depósitos de solos moles, reduzindo/eliminando recalques, impondo total estabilidade. O fundamento teórico do Geoenrijecimento, baseia-se no princípio da compressão radial do solo, utilizando-se expansão de cavidades, de forma rápida e segura, assegurando a rápida dissipação da poropressão por meio drenante artificial (geodrenos), e sua consolidação, estabelecendo-se um solo homogêneo,

adaptado ao projeto. O processo de formação das verticais de adensamento, com bulbos de compressão, com geogROUT, assegura a rigidez necessária ao solo. O resultado final do Geoenrijecimento é um solo compósito adensado, confinado e comprimido entre bulbos de geogROUT. A intervenção consiste, inicialmente, na cravação de geodrenos, em malha projetada. Em seguida, são formadas as verticais de adensamento/enrijecimento, expandindo-se bulbos de compressão, utilizando-se geogROUT (argamassa seca), a cada metro de profundidade, de baixo para cima, controlando-se os processos de deformação e de tensão impostos. O processo de

do a planilha MC_v1.2.xlsx, existente na internet, que segue em anexo. Foram introduzidos parâmetros do solo (na condição virgem), de acordo com os resultados da investigação geotécnica. Em seguida, dimensionou-se 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, 6 drenos ficam ao redor de cada vertical. O volume calculado de projeto, de cada bulbo de compressão, foi de 900 litros. A execução dos bulbos, a cada metro de profundidade, terá início no solo competente arenoso, a partir dos 30 m

Desta forma, o meio homogêneo equivalente terá as seguintes características:

Resistência não drenada:

C-Top = 37 kPa, C-Max = 68 kPa, C-Rate = 1,2 kPa/m

Fator de redução de recalques:

$\beta = 3,9$

Estes parâmetros podem ser introduzidos no modelo numérico, para avaliar a estabilidade e prever-se os recalques pós-geoenrijecimento.

Análise de estabilidade

Desenvolveu-se análises numéricas, via Equilíbrio Limite, pelo método de Bishop, utilizando o Software GeoSlope, com o intuito de verificar a estabilidade do aterro sobre o solo mole, e a influência do geoenrijecimento, em relação ao fator de segurança. A Figura 7, apresenta apenas a construção do aterro sobre o solo mole. Uma sobrecarga de 10 kN/m² aplicada no topo do aterro simula o tráfego de caminhões. Neste caso, obteve-se o valor de FS = 1,04, i.e. instável. Em outras palavras, há alto risco de rutura do solo sem o prévio melhoramento do solo. A Figura 8, apresenta a mesma análise, desta vez considerando o melhoramento do solo com Geoenrijecimento com CPR Grouting. Obteve-se o valor de FS = 1,852, i.e. estável. O melhoramento das características de resistência, pós-geoenrijecimento, está refletida no aumento do fator de segurança.

1. Solo mole pré-CPR		
1.1 Perfil geotécnico	3	Tipo P-S
1.2 Espessura da camada de solo mole	H =	27,0 m
1.3 Resistência não drenada	$s_u =$	10,0 kPa
1.4 Coeficiente de adensamento	$c_v =$	20,0 m ² /ano
1.5 Rigidez (módulo elástico)	E =	850 kPa
1.6 Condições de drenagem		dupla



certificação, com análise pressiométrica, piezométrica e tomográfica, (com imagem), é inerente ao desenvolvimento do geoenrijecimento. A seguir, apresenta-se a memória de cálculo realizada, utilizando

de profundidade, terminando entre 1 e 2 metros abaixo do nível do terreno. Será executado um bulbo a cada metro de profundidade. O croqui da malha do Geoenrijecimento é apresentado a seguir.

2. CPR Grouting		
2.1 Tipo de malha	1	Triangular
2.2 Espaçamento de geodrenos	$S_{geo} =$	1,50 m
2.3 Volume de geogROUT por metro de profundidade	$V_g =$	900 l/m
2.4 Resistência à compressão do geogROUT	$f_c =$	1,0 MPa
2.5 Coeficiente de redução volumétrica por adensamento	$\lambda_c =$	0,5
2.6 Profundidade de geoenrijecimento	$z =$	30,0 m
2.7 Espaçamento entre verticais	$S_v =$	3,00 m
2.8 Razão de substituição	$R_s =$	11,5%

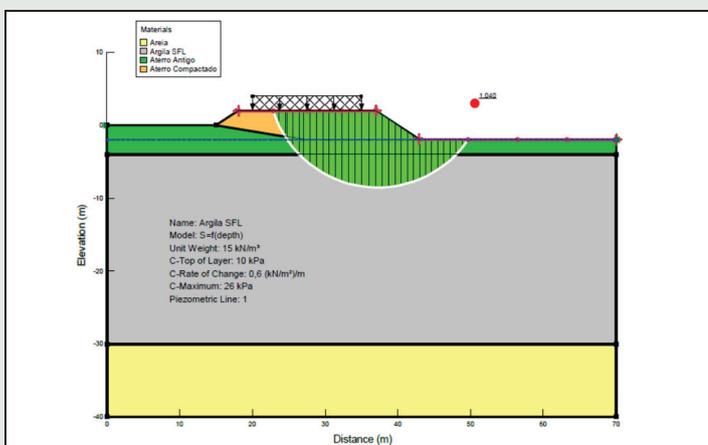
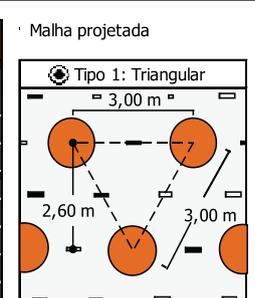


Figura 7 - Análise de estabilidade para a solução "Nada a Fazer" (FS = 1,040).

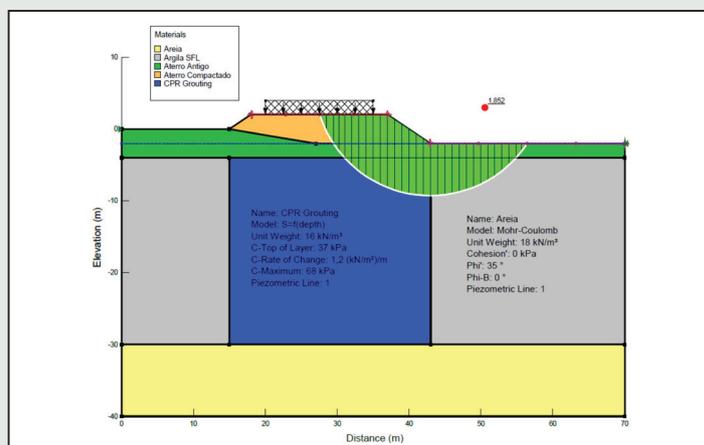


Figura 8 - Análise de estabilidade para a solução com geoenrijecimento (FS = 1,852).

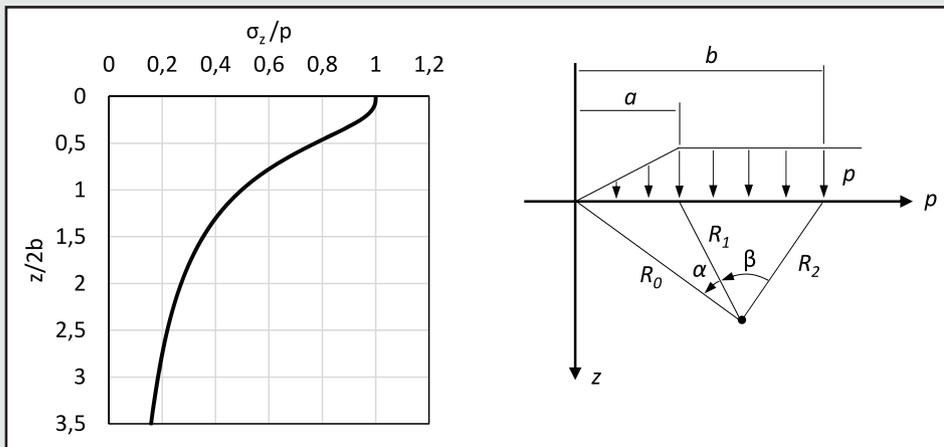


Figura 9 - Fator de influência para carregamento trapezoidal [Ref. 7].

Tabela 2. Estimativa de recalques por adensamento.

Sub-camada	Prof. (m)	$C_c/(1+e_0)$	σ'_{v0} (kPa)	$\Delta\sigma_v$ (kPa)	$\Delta\rho$ (m)
1	-	-	39	35	0,28
2	6,00 – 14,00	0,33	54	30	0,51
3	14,00 – 30,00	-	96	20	0,43
Recalque total				1,22m	<small>(caso não seja feito o melhoramento do solo)</small>



Figura 10 - Análise pressiométrica para análise do solo na condição original. Ensaios penetrométricos (SPT, CPTu e palheta) via rutura, não certificam qualquer melhoramento de solos, já que só avaliam o componente solo. Ensaios por deformação, tipo pressiométrico e tomografia do solo com imagem, conseguem analisar os dois componentes, de forma simultânea, do solo composto melhorado.

Previsão de recalques

Para o modelo anteriormente apresentado, calculou-se o recalque no topo (nível do terreno), considerando-se o carregamento vertical trapezoidal de 35 kPa. Para efeito de cálculo, utilizou-se o ábaco da Figura 9, para estimar o aumento na tensão efetiva vertical, ao longo da profundidade do depósito de solo mole.

Com base nos dados apresentados anteriormente (vide Tabela 1), o recalque por adensamento foi estimado sob a hipótese de solo normalmente adensado, dividindo o depósito em três sub-camadas. O cálculo está apresentado na Tabela abaixo. Trata-se de cálculo aproximado, fornecendo uma primeira estimativa. A previsão de recalques, poderá ser mais precisa, caso ensaios de adensamento sejam realizados. Considerando-se o fator de redução de recalques, calculado em função da geometria da malha de projeto, o recalque do aterro, construído sobre solo geoenrijecido, é estimado em torno de 30 cm, dissipando-se completamente durante a obra, considerando-se o nível de drenagem existente entre cada vertical de compressão radial do solo. Com relação à análise de adensamento desenvolvida, constata-se que a utilização do Geoenrijecimento aumentará, significativamente, a capacidade de carga do solo, suficiente para receber o aterro e a futura estrada. A análise de estabilidade evidenciou que o futuro aterro, sem melhoramento do solo de fundação, resultará em condição não estável, com $F.S \leq 1.5$. No entanto, percebe-se que com a execução do melhoramento do solo mole, com o Geoenrijecimento, o fator de segurança passa a atender aos critérios de projeto, com valores bem maiores que 1.5.

SSBI

REFERÊNCIAS

- 1 Thomas Kim é engenheiro civil e trabalha com melhoraamento de solos moles.
- 2 Projeto de Melhoramento do Solo de Fundação. ENGEGRAUT.
- 3 Massad, F. (2009). Solos marinhos da Baixada Santista: características e propriedades geotécnicas. Oficina de Textos, São Paulo.
- 4 Schnaid, F. (2009). In situ testing in geomechanics: the main tests. Taylor & Francis.
- 5 Poulos, H.G. & Davis, E.H. (1974) Elastic solutions for soil and rock mechanics.