

Soft Soil Brazilian Review

4 Certificação

Avaliando o melhoramento do solo mole.

10 Ampliação Rodoviária

Ampliação rodoviária. Uma obra complexa quando há presença de solos moles.

22 Portos

Estabilização de margem portuária fluvial. Caso de obra.



Sobre SOLOS MOLES

Novos Conceitos



INFORMAÇÕES SOBRE MELHORAMENTO DE SOLOS MOLES?

O SOFT SOIL GROUP ajuda você a tocar sucessos

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

Sumário

Soft Soil Brazilian Review

Edição - Jan / Fev - Nº 09



SSBI SOFT SOIL
BRAZILIAN
INSTITUTE

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

9

CERTIFICAÇÃO
Avaliando o melhoramento do solo mole. **04**
Por Patrícia Tinoco

AMPLIAÇÃO RODOVIÁRIA
Ampliação rodoviária. Uma obra complexa
quando há presença de solos moles. **10**
Por Joaquim Rodrigues

PORTOS
Estabilização de margem portuária fluvial.
Caso de obra. **22**
Por Thomas Kim

EDITORIAL

O mundo está mudando de forma rápida e profunda. O universo do solo mole também, com o advento da técnica de melhoramento de solos, particularmente com relação a questão da instabilidade e do real controle da deformação.

Esta técnica, que impõe verdadeira modificação nas condições geotécnicas iniciais do solo mole alteram, de forma significativa as frentes de trabalho pertinentes a área de certificação, ampliação rodoviária e na construção portuária. Vejam porque. Na área de certificação das técnicas de tratamento de solo, seja por melhoramento efetivo com o geoenrijecimento do solo mole, seja pela imposição de colunas ou georeforço que, efetivamente, não melhoram o solo, apenas transferem as cargas da superfície para as camadas resistentes profundas, apresentaremos um normativo de certificação interessante. Para a determinação do comportamento geotécnico, torna-se necessário avaliar a resistência final do solo, de modo a oferecer a estabilidade, a capacidade de carga e a durabilidade necessárias além, claro, da rigidez que possibilita reduzir ou eliminar a compressibilidade, evitando recalques.

O natural advento do volume de tráfego em nossas rodovias, torna obrigatório o aumento de sua capacidade viária, ampliando-se o aterro rodoviário existente. Duas questões sobressaem, o da ampliação do corpo estrada e a trivial presença de solos moles no local. Esta associação torna a obra geotécnica extremamente complexa e perigosa, em razão de inúmeros problemas. As consequências são extremamente prejudiciais aos usuários, além de custosas e de difícil solução, em razão do fechamento de faixas de tráfego. Procuramos dimensionar uma situação típica de duplicação rodoviária, identificando uma solução com georeforço e outra com geoenrijecimento, que muito ajudará você em situações semelhantes. Projetos portuários, por sua vez, geralmente estão situados ao longo de áreas costeiras, desafiando engenheiros geotécnicos com a combinação de solos moles, cargas pesadas, exposição e riscos naturais e, naturalmente, a construção no ambiente marítimo ou fluvial. Nesta edição estaremos apresentando novo conceito de como preparar o solo mole, de maneira segura e rentável, de modo a viabilizar futuras obras portuárias. Um excelente Ano Novo.

Joaquim Rodrigues

AVALIANDO O MELHORAMENTO DO SOLO MOLE



Figura 1 - A certificação do melhoramento do solo com geoenrijecimento é feito com tomografia do solo por imagem (TSI).

As técnicas de melhoramento de solos moles utilizam o conceito de solo compósito, o qual consiste de inclusões rígidas ou semi-rígidas inseridas no solo original. As técnicas de melhoramento profundo de solos moles com geoenrijecimento, com bulbos de compressão radial do solo, via expansão de cavidades, e com georeforço, seja com coluna de brita, deep soil mixing ou jet grouting, utilizam este conceito. Esta matriz de solo compósito ou composto é feita, tipicamente, em intervalos regulares, definindo-se uma malha de inserção de inclusões no solo, que pode ser triangular ou quadrada. Nas figu-

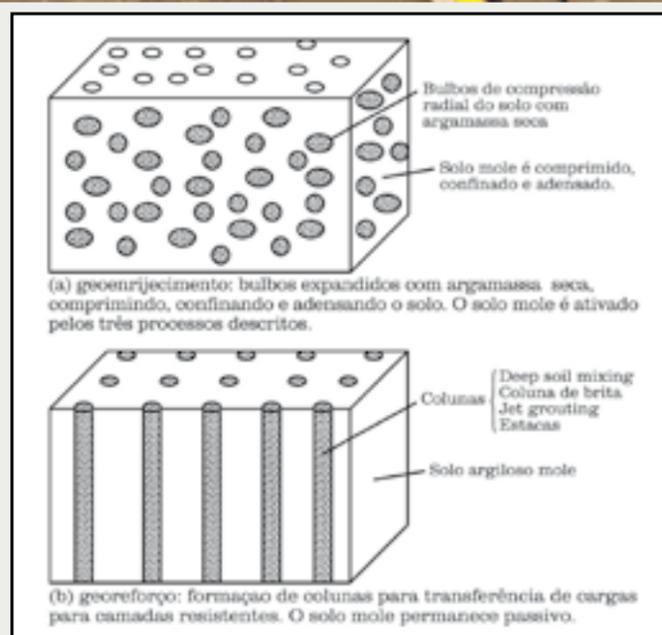
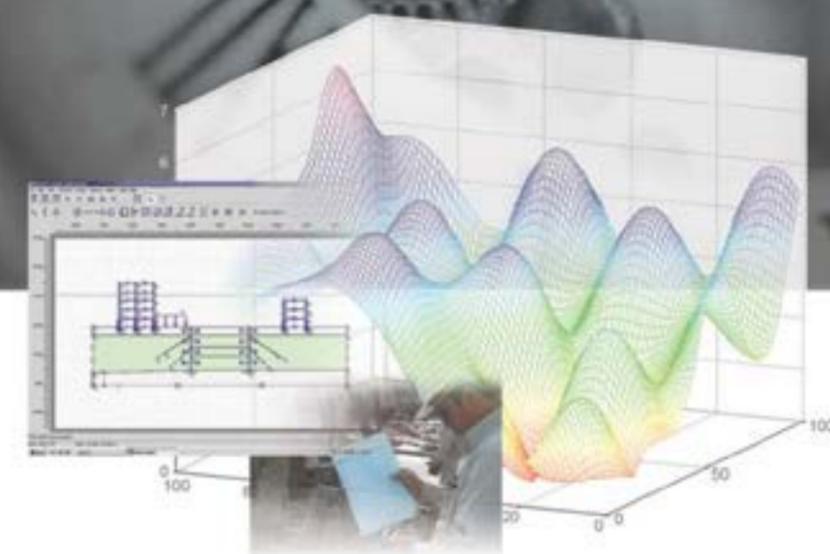


Figura 2 - No solo compósito, por geoenrijecimento, o solo fica homogeneizado. No georeforço fica uma parte ativa e outra passiva (o solo mole continua mole).

MELHORAMENTO DE SOLOS MOLES EXIGE PRECISÃO E SEGURANÇA

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



CPR
GROUTING

www.engegraut.com.br

O CPR Grouting é tecnologia específica para geoenrijecimento de depósitos de solo mole, desenvolvida pela ENGEGRAUT e executada há 15 anos em todo o Brasil, estando protegida no INPI por patente.

ras ao lado, apresentam-se os dois tipos de melhoria de solos moles idealizados com base no solo compósito.

Ocorre que a maioria dos desenvolvimentos teóricos sobre o comportamento tensão deformação do solo compósito são empíricos ou muito complexos, razão pela qual desenvolveu-se um meio homogêneo equivalente de modo a prognosticar, mais realisticamente, o comportamento do solo compósito. Este método de homogeneização baseia-se no conceito de ligas metálicas, podendo-se extrapolar para a situação do concreto armado. Portanto, a técnica de homogeneização foi desenvolvida para modelar diversos e complexos sistemas de melhoria de solos, estabelecendo propriedades de solos equivalentes para um determinado solo compósito. Para se compreender a questão chave do procedimento de homogeneização, considera-se os dois modelos de célula unitária para o solo compósito, que consiste do solo matriz e do material de reforço, como apresentado na figura a seguir, respectivamente para o geoenrijecimento e o georeforço.

Estes modelos de células unitárias são a microestrutura representativa da massa ou volume do solo melhorado, pelos respectivos métodos, razão pela qual qualquer análise ou avaliação destes sistemas, dever-se-á realizar tomando-se como base

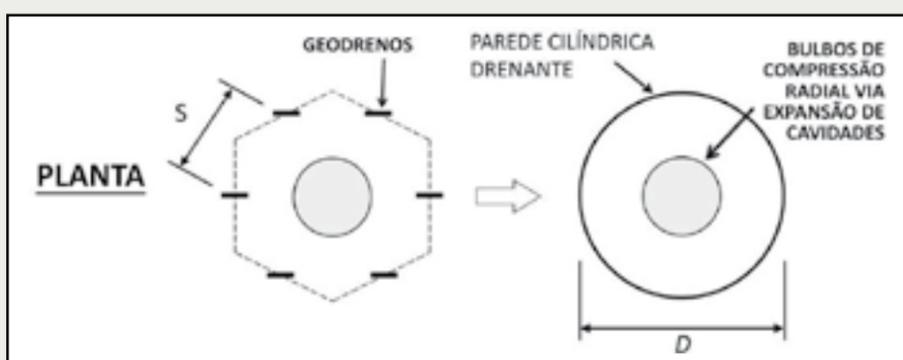


Figura 4 - No geoenrijecimento, os geodrenos são transformados em paredes cilíndricas drenantes (Ye et al., 2012)

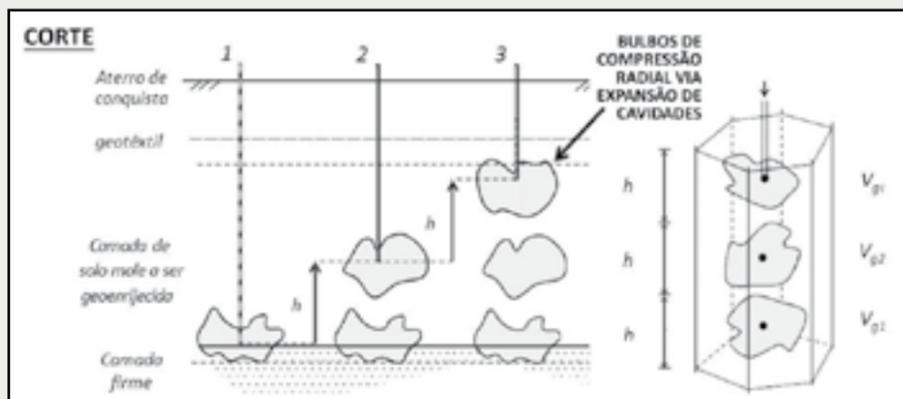


Figura 5 - Idealização da célula unitária do geoenrijecimento, Cirone, 2016.

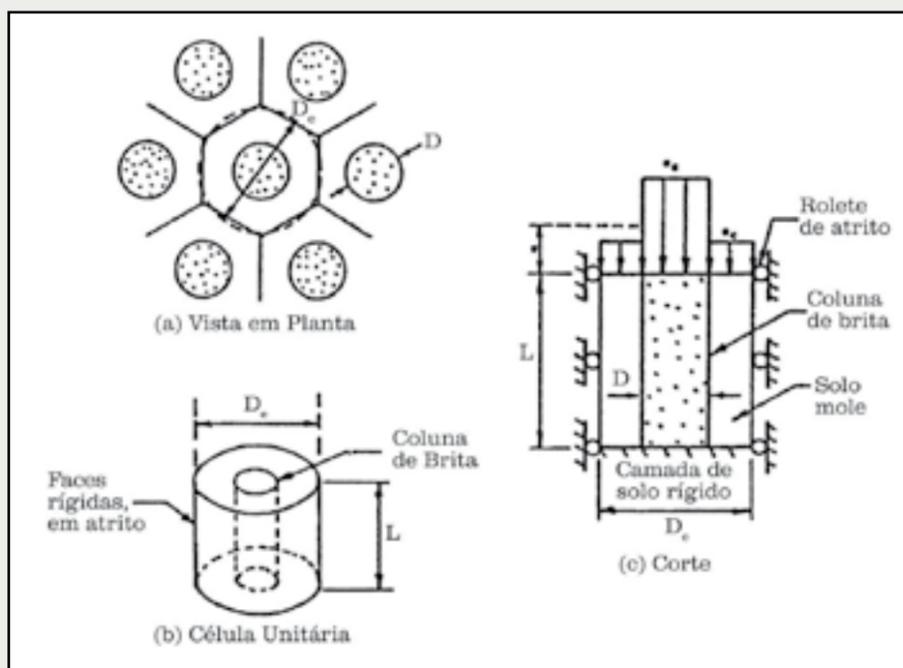


Figura 6 - Idealização de célula unitária do georeforço com coluna de brita – NYSDOT Geotechnical Design Manual - outubro - 2013.

não apenas o solo original, mas o conjunto dos dois elementos – o solo matriz e a inclusão rígida / semi-rígida – sejam elas na forma de bulbos expandidos ou colunas, com seus inerentes campos de tensões, resultando em de um solo homogeneizado.

Este meio homogêneo equivalente permite passar da descrição do comportamento microscópico para o macroscópico, utilizando-se as leis constitutivas de cada componente na escala microscópica. No meio homogêneo equivalente, os resultados da



Figura 3 - A certificação do geoenrijecimento com o piezômetro de cordas vibrantes, que atesta o grau de adensamento imposto.

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

análise de deformações do solo compósito concorda plenamente com realizações em 3 dimensões.

A avaliação em campo do solo melhorado

O comportamento mecânico do solo compósito, de acordo com sua célula unitária, que estabelece suas propriedades mecânicas portanto, está associado a dois elementos que trabalham conjuntamente, sendo governado por suas propriedades, forma e topologia. Para a determinação de seu comportamento geotécnico, torna-se necessário avaliar sua resistência cisalhante, de modo a oferecer estabilidade, capacidade de carga e durabilidade, além da rigidez que possibilita reduzir ou eliminar a compressibilidade, evitando recalques. A avaliação do solo compósito, portanto, deverá considerar a condição da célula unitária de modo estabelecer o meio ou a forma adequada de medir os dois parâmetros associados. Dever-se-á considerar que quando da inserção do 2º elemento, seja na forma de bulbos ou colunas, o solo fica fragilizado ou amolgado, tornando impróprio ensaios de resistência com base na penetração (e ruptura) do solo pela ponta dos instrumentos SPT, CPT-U e palheta. Cabe, portanto, a realização de ensaios de deformação, seja com pressiómetro ou tomografia por imagem.

Avaliação do solo compósito Geoenrijecido

O geoenrijecimento do solo argiloso mole cria, inicialmente, um ambiente drenante artificial no solo, com a cravação de geodrenos para, a seguir, formar bulbos com argamassa seca, de modo a comprimir radialmente o solo mole, via expansão de cavidades, confinando, adensando e elevando drasticamente sua resistência. A sequência do processo estabelece condições de confinamento, entre bulbos que, naturalmente, estabelece níveis controlados de resistência e rigidez. Trata-se, portanto, de um processo em que há uma forte ativação do solo, via expansão de cavidades, entre bulbos formados. Ou seja, a célula unitária é um ambiente de solo comprimido, confinado e adensado entre bulbos de material rígido. A análise tensão-deformação do solo in situ, considerando-se o processo construtivo deste tipo de melhoramento de solo, que fragiliza o solo, só pode ser feita com análise pressiométrica, ou seja, com ensaio de deformação, de modo a analisar o nível de compressão, confinamento e adensamento dentro do solo entre bulbos, o que permite avaliar o estado de homogeneização do solo. A utilização de ensaio de resistência (ruptura), como os penetrométricos CPT-U, SPT e palheta só analisam um dos elementos da célula unitária, no caso o solo, rompendo-o. Por outro lado, Howie et al, 2000, Campanella, R. G. &

Robertson, P. K et al, 1983, Peifer et al 1991 e 1998, Campanella, R. G. & Robertson, P. K et al, 1985, Campanella, R. G. & Robertson, P. K et al, 1989, posicionam esta questão, afirmando que a ponta destes equipamentos penetrométricos são insensíveis para analisar solos melhorados. Portanto, são equipamentos inadequados para avaliação de solos melhorados, já que não “traduzem” a interação entre solo, inclusões e o inerente campo de tensões, promovido pelo contexto homogeneizado, não identificando, portanto, os benefícios do estado de confinamento imposto ou da condição imposta pelos elementos vizinhos. Esta asserção é particularmente confirmada quando se executam ensaios penetrométricos junto ou em cima dos geodrenos, onde a resistência de ponta é particularmente nula, devido ao estado de amolgamento imposto. Um outro método inovador, que permite analisar solos melhorados geoenrijecidos de forma não destrutiva, rápida e econômica é a Tomografia do Solo por Imagem (TSI), que tem a vantagem de examinar volumetricamente o solo, através de ondas sísmicas, que deformam o solo, geradas na superfície do terreno. As ondas captadas por inúmeros geofones são processadas e visualizadas em imagens, na condição original e pós melhoramento do solo. As tomografias são, então, comparadas, o que permite avaliar a eficiência do melhoramento do solo, apresentando a profundidade e a disposição do

geoenrijecimento. Todas as informações são deduzidas a partir de perfis da velocidade de onda cisalhante, que informa o grau de melhoramento do solo, relacionada ao nível de rigidez do solo. O uso desta técnica, torna-se cada dia mais frequente complementando, efetivamente, sondagens tradicionais com pressiómetro, para a certificação do geoenrijecimento. A aceitação do solo melhorado, é feita com a confirmação obtida em campo dos parâmetros de resistência e rigidez concebidos no projeto.

A avaliação do solo compósito georeforçado

Segundo o Geotechnical Design Manual do NYSDOT (New York State Department of Transportation), Out/2013, a utilização do georeforço, com coluna de brita, em solos argilosos moles, é feita introduzindo-se um tubo sonda vibratória, no qual insere-se o material granular, compactando-o, formando um elemento vertical, de baixo para cima, com objetivo de transferir a carga da superfície para uma camada profunda resistente. Repare que, efetivamente, não há qualquer tipo de melhoramento de solo, apenas elementos que se posicionam para receber a carga no lugar do solo mole. No entanto, o modo como colunas de brita são executadas dependerá da tecnologia utilizada, principalmente no que se refere à execução do furo e à compactação do material de enchimento, Domingues, 2005. Por meio de curtos movimentos descendentes e ascendentes do vibrador, o material granular é vibrado, e também o solo ao redor, ao mesmo tempo em que mais material é introduzido dentro do furo pré-formado. Paralelamente realiza-se, também, jateamento para garantir a formação de uma coluna com material granular lim-

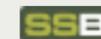
po. Essa operação é realizada até próximo à superfície do terreno quando se completa a formação da coluna.

Na análise de projeto, considera-se que as cargas verticais sejam direcionadas às colunas de brita e, também, ao solo argiloso mole contribuinte de cada coluna. Evidentemente, a força resistente não é dividida igualmente entre os dois materiais. Para incorporar esta condição na análise de cálculo, considera-se o conceito de célula unitária. De acordo com o Ground Improvement Methods do NYSDOT, “para propósitos da análise de recalque e estabilidade, é conveniente associar a área contribuinte do solo envolvente de cada coluna, conforme figura 8. Apesar da área contribuinte formar um hexágono regular superior, pode ser considerada como um círculo equivalente com mesmo diâmetro. O cilindro equivalente resultante, com diâmetro D_e , envolvendo o solo contribuinte e a coluna de brita formará a célula unitária”. Portanto, a célula unitária estabelece o “modus operandi” do georeforço. Da mesma maneira que no geoenrijecimento, torna-se evidente que qualquer sondagem penetrométrica, realizada no solo envolvente, nada informará acerca do melhoramento com georeforço. De acordo com o Ground Improvement Methods do NYSDOT, “a necessária avaliação do georeforço, com coluna de brita, deve ser feita com teste na obra, de modo a se avaliar o efeito do “melhoramento do solo”, em relação ao solo original”. Neste caso, subentende-se um aterro teste sobre a célula unitária representativa. Jie Han, em seu livro “Principles and Practice of Ground Improvement” (2015), sugere, com base na norma ASTM D1143, “Método para teste de fundações profundas sob carga compressiva axial estática”, que sejam realizados testes de carga sobre placa para se

determinar a capacidade de carga e o recalque em colunas individuais e no conjunto, como apresentado na figura abaixo.

No teste individual da coluna, dever-se-á utilizar uma base ou chapa metálica com o mesmo diâmetro da coluna. No teste da coluna, mais solo contribuinte (solo compósito), dever-se-á utilizar placa metálica com as dimensões da área considerada. Assim, para o caso do teste representativo do solo compósito, a área da chapa metálica deverá ser igual ao número de colunas, sob a chapa, multiplicado pela área contribuinte da célula unitária. Em todos os testes, a área analisada deverá estar cercada por, pelo menos, uma linha de colunas, de modo a estabelecer a condição representativa.

Segundo Jie Jan, 2015, caso se considere apenas o teste da coluna, dever-se-á levá-la à ruptura. Se, por outro lado, a análise for para projeto, a carga a ser aplicada será limitada a 1,5 vezes a carga de serviço. No caso de análise do solo compósito, dever-se-á utilizar a norma americana ASTM D1196, “método para testes não repetitivos de carga em solos sobre placa e componentes de pavimentos flexíveis, para avaliação e projeto de aeroportos e outros estudos”. A aceitação do solo melhorado, com georeforço deverá atender, portanto, os parâmetros de resistência e rigidez estabelecidos em projeto, certificando-se com testes de placa em colunas e no solo compósito.



REFERÊNCIAS

- Patricia Karina Tinoco é engenheira civil. Trabalha com melhoramento de solos moles.
- ASTM D4719 (1987) Standard Test Method for Pressuremeter Testing in Soils. Annual Book of ASTM Standards, New York, v. 04.08.
- BERILGEN M., Investigation of Stability of Slopes under Drawdown condition, Computers and Geotechnics, Vol. 34, 81-91, 2007.
- DIXON, S.J., Burke, J.W. (1973). Liquefaction case history. ASCE J Soil Mech Found Eng SM10:823-840.
- DUNCAN JM, Wright SG, Wong KS. Slope stability during rapid drawdown. In: Proceedings of the H. Bolton seed memorial symposium, Vol. 2; May 1990. p. 253-72
- HEMPHILL, R. W. and Consolidation Behavior of Peats. Geotechnical Testing Journal - GEOTECH TESTING J. 3. 10.1520/GTJ10881J.
- EDIL, Tuncer & DHOWIAN, A.W.. (1981). Atrest lateral pressure of peat soils. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE. 107. 201-217.



Figura 7 - Análise pressiométrica do geoenrijecimento: A expansão da sonda no solo equivale ao processo de melhoramento do solo com geoenrijecimento, que é por expansão de cavidades.

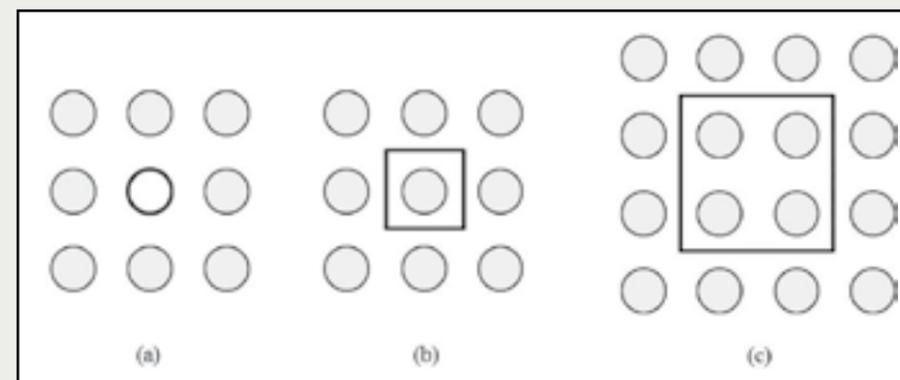


Figura 8 - Certificação do melhoramento do solo com georeforço. Dever-se-á realizar obrigatoriamente, testes de carga sobre placa em colunas isoladas e em grupos.

AMPLIAÇÃO RODOVIÁRIA

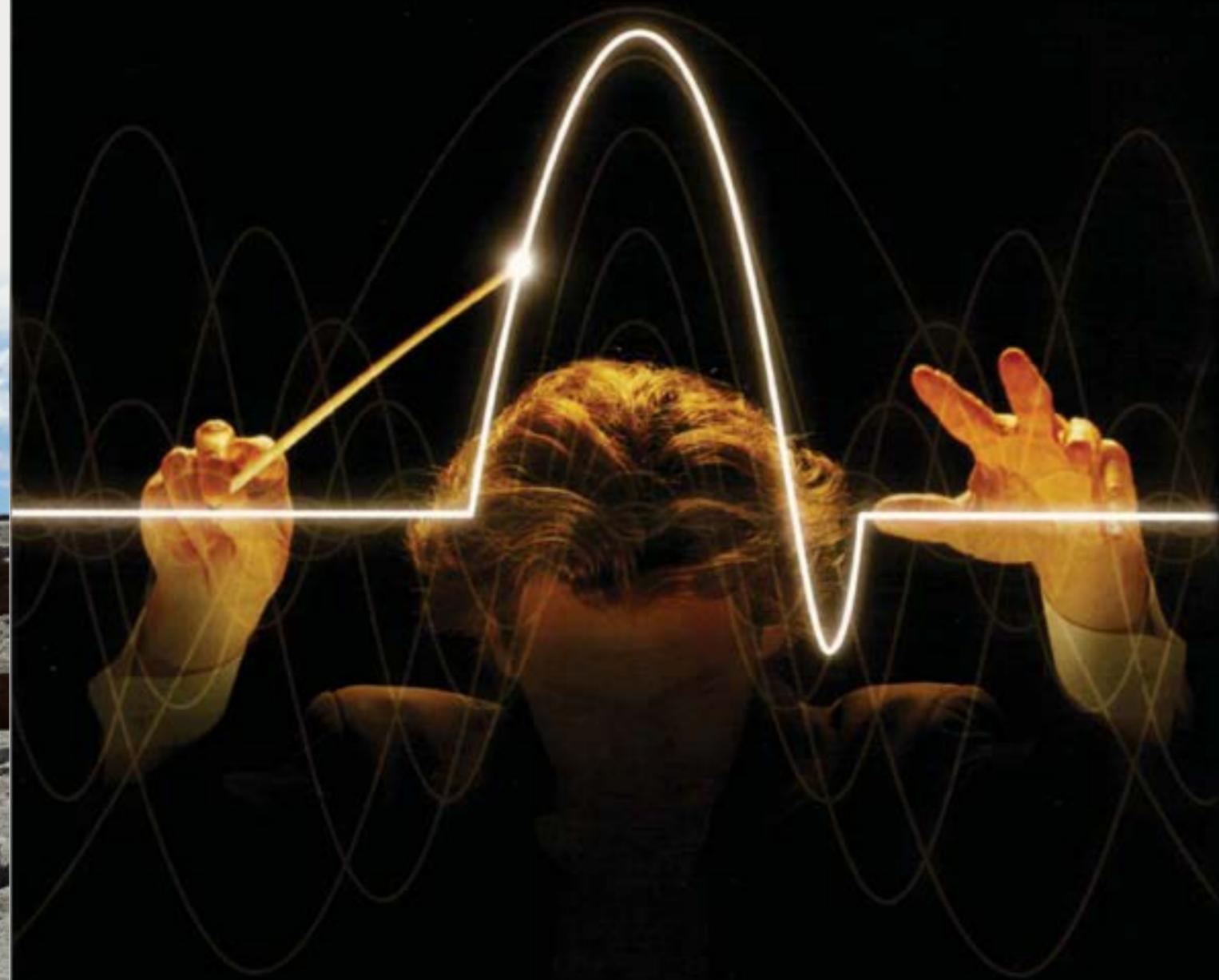
Uma obra complexa quando há presença de solos moles.



Figura 1 - Rutura de um aterro lançado sobre solo mole, com objetivo de ampliar uma rodovia, sem melhoramento do solo mole prévio. No detalhe as placas de aterro deslocadas.

O volume de tráfego em nossas estradas aumenta desproporcionalmente, se considerarmos as medidas que objetivam a construção de mais estradas. Logo, o aumento de sua capacidade viária, ampliando-se o aterro rodoviário existente é, certamente, a bola da vez. Duas questões sobressaem: a da ampliação rodoviária e a presença de solos moles no local. Esta associação torna a obra geotécnica

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

extremamente complexa e perigosa, em razão de problemas que induzem recalques diferenciais entre o novo e o antigo pavimento, além de empuxos horizontais decorrentes do processo de consolidação do solo e que afetarão as estacas da

ponte, trincas longitudinais que aparecem ao longo desta interseção e a natural instabilidade do aterro. Com relação aos recalques diferenciais e as trincas longitudinais, muito comuns nas ampliações de estradas, quando não se obedecem

diretrizes específicas pertinentes, está o natural processo de escalonamento, pouco executado no talude antigo, além de todo o critério de geoenrijecimento do solo sob esta região de interseção, entre o novo e o antigo, sem o que induz-se patologias. Alega-se, como de costume, limitação para a correta preparação do solo de fundação (com presença de solo mole) e do seu talude original. As consequências, contudo, são extremamente prejudiciais aos usuários, além de custosas e de difícil solução, em razão do fechamento de faixas de tráfego e a natural diferença de rigidez entre o novo e o antigo maciço.

Tanto a nível de projeto, quanto de sua execução, ampliar rodovias aumentando-se a largura das faixas de tráfego, em presença de depósitos de solos muito moles, como é o caso, é extremamente complexo, porque reduz-se a margem de segurança da estabilidade dos taludes dos aterros existentes. Dever-se-á, sempre, considerar a estabilidade do aterro principal e do aterro de ampliação. Planos de rupturas preferenciais, quando da presença de solos muito moles, comumente ocorrem na interface do aterro original com o ampliado, tornando esta região extremamente vulnerável, razão pela qual torna-se obrigatório geoenrijecer o solo da área a ser ampliada e parte da existente, eliminando-se o diferencial de rigidez do local e, claro, qualquer possibilidade de recalques.

A velha questão da tentativa e erro e um exemplo de ampliação rodoviária

Muitas de nossas estradas passam sobre depósitos de solos moles e o processo de ampliação ou alargamento do corpo estradal é obrigatório. Há inúmeros casos de tentativas de ampliação rodoviária, em que a construtora lança o aterro sobre o talude antigo, seja para construir imediatamente a ampliação, seja para promover aterro de sobrecarga. O resultado pode ser visualizado nas figuras 1, 2 e 3.

Com este objetivo apresenta-se, a seguir (figuras 5 e 6), uma rodovia cuja condição do solo de fundação sobressai uma argila silto argilosa muito mole, seguindo-se camadas de solo na condição mole até cerca de 12m de profundidade. Neste projeto,

objetiva-se elevar um aterro com cerca de 4m de altura para ampliar ambos os lados da rodovia. Analisamos, portanto, duas soluções, com aterros estaqueados e com geoenrijecimento.

Solução com aterro estaqueado

Aterro estaqueado é uma técnica de “melhoramento de solos”, denominado georreforço, que trabalha por transferência de carga, tentando melhorar sua condição frente à recalques, sem no entanto eliminá-la. Dependendo de sua eficiência, que é baixa, haverá recalques residuais no contexto construído. Consiste de uma malha de estacas, com capitéis no seu topo, para suportar o aterro, onde a questão principal é conhecer a proporção desta carga que será suportada pelas estacas. De um modo geral esta técnica funciona por três ações distintas. A primeira é a cravação de estacas no solo mole que, ao mesmo tempo em que amolga-o, cria condições de suporte direto por transferência de cargas. A segunda, é o processo de carregamento indireto do aterro pela ação do arqueamento entre capitéis (adjacentes). A terceira, deve-se a utilização de geogrelha(s) sobre camada granular, disposta sobre o estaqueamento, onde atua com tensões de tração, formando uma plataforma de transferência.

O processo de aterro estaqueado pelo método aluvial anker, segundo M. Barbosa, 2009, é caracterizado por estacas de pequeno diâmetros, moldadas no local. Um tubo de aço sem costura (2 1/2” de diâmetro), de comprimento 50cm superior a profundidade do furo, com ponta cortante é instalado no solo através de rotação. Os 50cm excedentes servem de suporte para os capitéis e para auxiliar as operações de injeção.

Durante a instalação é feita a injeção do fluido cimentante, que funciona como elemento de refrigeração da ferramenta de corte e de retirada do resíduo de perfuração. Para garantir a formação de um bulbo de maior diâmetro, nos últimos três metros a injeção da calda de cimento deve ser mais demorada. A quantidade estimada de cimento absorvido é de dois sacos por metro linear de estaca.

Depois de executadas as estacas, um capitel de concreto armado pré-moldado ou de chapa de aço é colocado sobre cada estaca. Entre os capitéis, e na mesma altura, é colocado um aterro de brita. Sobre a brita



Figura 2 - Outra grande rutura de uma tentativa irresponsável de ampliação rodoviária sem o necessário melhoramento do solo.



Figura 3 - Rutura de um aterro de sobrecarga, pouco após sua construção. Esta técnica é perigosa e pouco efetiva para melhoramento de solos moles.



Figura 4 - Lado A da rodovia.



Figura 5 - Lado B da rodovia.

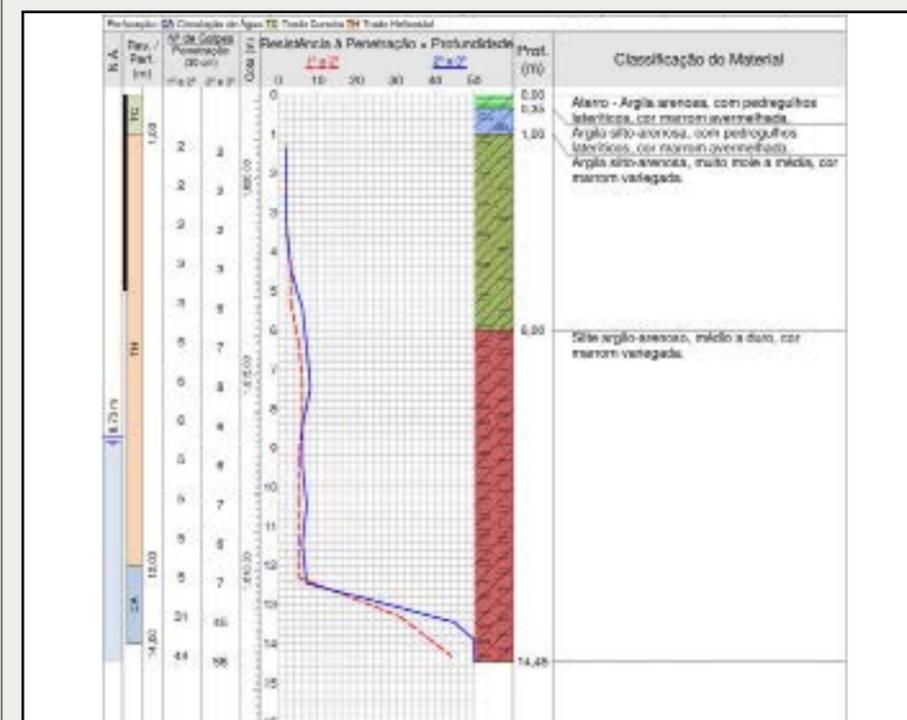


Figura 6 - Sondagem típica do local.

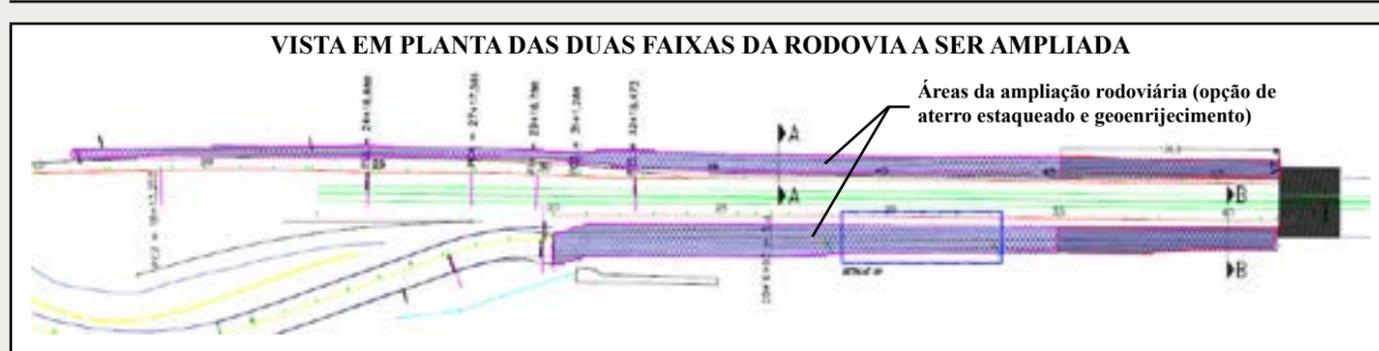


Figura 7 - Planta de ampliação a ser executada.



Figura 8 - Trincas longitudinais ao longo da rodovia demarcando a linha divisória entre o novo e o antigo aterro: diferenças de rigidez nos dois maciços aliado a ausência de escalonamento no antigo talude.



Figura 9 - Princípio de rutura em uma ampliação de estrada sem melhoramento do solo mole. Com a surgência dos sintomas a construtora contratou o serviço de melhoramento do solo, iniciando-se a cravação de geodrenos, seguido do georrijecimento.

é colocada uma geogrelha, seguida de um aterro de transição, que funciona como dissipador de tensões. Toda esta preocupação visa diminuir o processo inerente de recalque proveniente do solo mole, que continua mole.

De acordo com o Institute of Geotechnical Engineering of the University of Stuttgart (IGS) da Alemanha, há diversos métodos analíticos para projetar aterros estaqueados. Entretanto, para todos, há incertezas, pois consiste de uma complexa interação solo-estrutura.

Segundo Almeida e Marques (2010), o dimensionamento do aterro estaqueado consiste, inicialmente, na definição da geometria: espaçamento (s), largura do capitel (b), altura do aterro ($h = 1,50$ m em média). De acordo com o EBGEO (2011), a altura

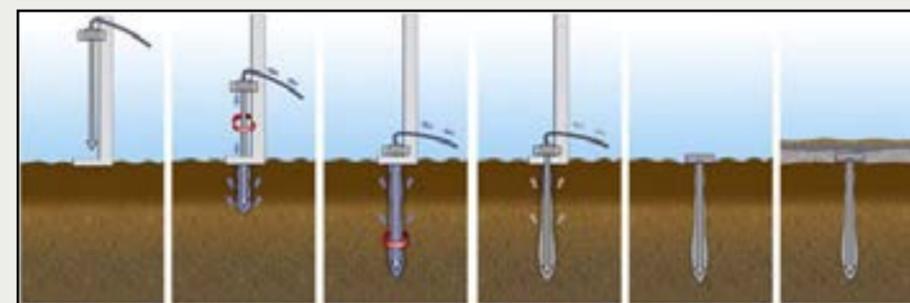
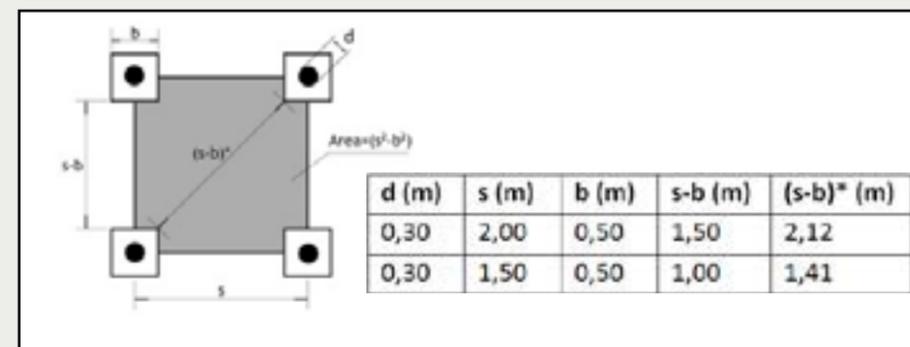


Figura 10 - Sequência executiva da instalação da estaca alluvial anker, colocação do capitel, aterro de brita, geogrelha e aterro de transição.



ra h da plataforma granular deve atender o critério $h \geq (s-b)$. Esta condição impõe especificar uma plataforma granular com altura mínima de 1,50 m, para que se realize a transferência de carga ao longo de todo o trecho. Ainda, segundo o EBGEO (2011), é necessário satisfazer as seguintes condições geométricas:

- $h \geq (s-b)$
- $b \geq 0,15 s$
- ângulo de atrito mínimo da plataforma granular: $\phi \geq 30^\circ$

Estas condições não são satisfeitas ao longo do trecho, pois o aterro tem altura que varia entre 1,0 m e 2,0 m. Portanto, em algumas áreas, onde o aterro não tem altura suficiente, as verificações não passam. Adicionalmente, segundo Nordic handbook (o código sueco NGG, 2002), a altura mínima do aterro deve respeitar a condição $h \geq 1,2 (s-b)$, ou seja, sua altura deve ser minimamente 1,8m. Quando a altura do aterro é menor que o vão entre capitéis, aproximadamente 1,50 m neste caso, não há o efeito de arqueamento, o que compromete definitivamente o sistema. Outro parâmetro importante, relacionado com o aterro estaqueado, é sua "altura crítica", h_c , definida como altura do aterro mínima para que não haja deformações no pavimento, devido a recalques diferenciais que ocorrem em sua base. Se-

gundo Almeida e Marques (2010), a altura crítica é:

$$h_c = 0,58(s-b) + 1,63 b = 2,0 \text{ m}$$

Com isso, demonstra-se que a solução é completamente inadequada, pois o aterro não possui altura suficiente para evitar trincas e deformações na superfície, devido a inevitáveis recalques diferenciais entre solo mole e os capitéis.

A experiência negativa brasileira mais marcante, neste tipo de obra situa-se no Rio de Janeiro, situada no grande empreendimento do SESC/SENAC, onde demonstrou-se, na prática, que esta solução é inapropriada para aterros com pequena altura. Neste exemplo, recente, relatado por Almeida e Marques (2010), o aterro executado apresentou, inúmeras trincas e recalques expressivos.

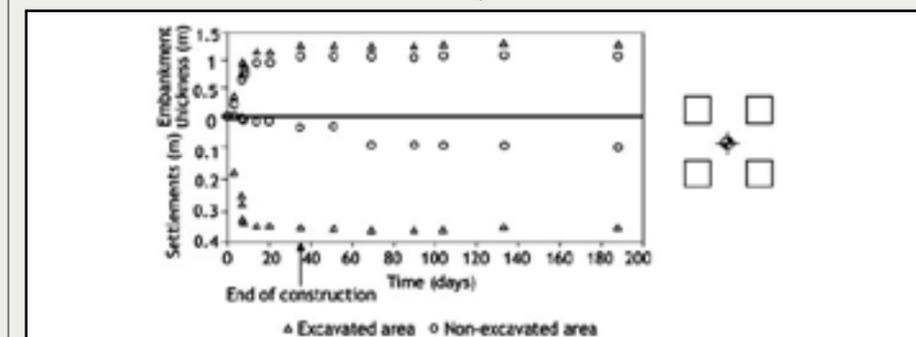


Figura 11 - Resultados da instrumentação no aterro da escola do SESC/SENAC no Rio de Janeiro. O recalque foi medido no meio dos capitéis, conforme mostrado na figura ao lado da curva de recalque. Almeida e Marques (2010).

Na figura, são apresentadas as leituras de recalques juntamente com as cotas de elevação do aterro, que alcançou 1,50 m de altura. Os recalques foram da ordem de 35 cm. A obra analisada, serve de exemplo para aterros de pequena altura que, inevitavelmente, sofrem grandes recalques, sendo incompatíveis para obras de ampliação rodoviária.

O arqueamento é nulo sob carregamento dinâmico (tráfego)

Todos os métodos de cálculo propostos na literatura adotam o conceito de arqueamento, válido somente para o caso de carregamento estático. Sob ação dinâmica, este mecanismo não consegue se desenvolver, conforme foi demonstrado experimentalmente por Yu et al. (2009). São necessárias apenas poucas passadas de caminhões para anular qualquer arqueamento, tornando o esforço vertical, atuante nos capitéis, igual ao existente no solo confinado. Por outro lado, o inevitável carregamento cíclico acelera o processo de abrasão na geogrelha, justamente nos cantos dos capitéis, onde as deformações do geossintético são altamente concentradas.

A ruptura da geogrelha, neste caso, é inevitável. De pouco serve posicionar geotêxteis para absorver o atrito entre capitel e geogrelha ou arredondar os cantos. Autores brasileiros (Almeida et al., 2008; Sandroni, 2007) relatam ter encontrado rasgos em geogrelhas posicionadas em locais com tráfego de maquinários pesados, independentemente de o capitel possuir ou não cantos arredondados. Na realidade, geossintéticos sujeitos a carregamento repetido e vibrações, sofrem danos mecânicos e fadiga, responsáveis por inúmeras falhas apresentadas na literatura, que se relacio-

SOLUÇÃO COM ATERRO ESTAQUEADO

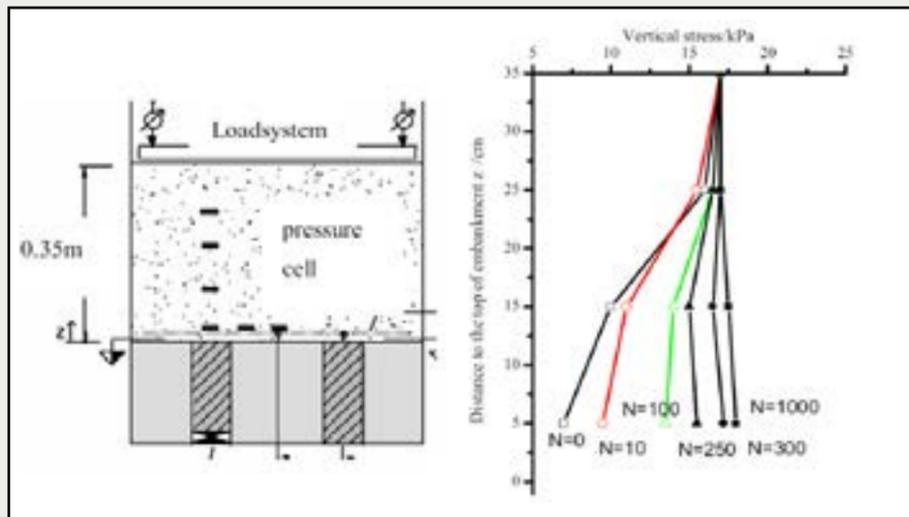
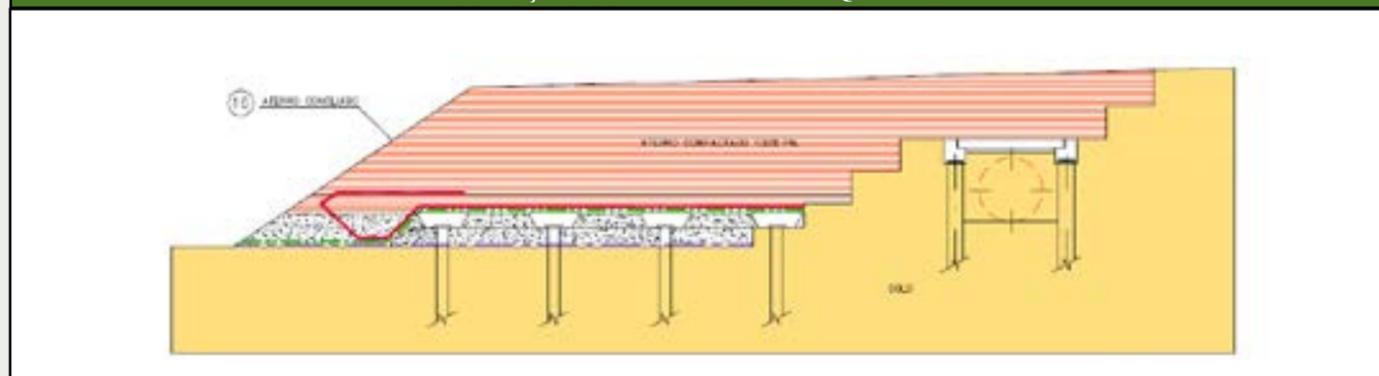


Figura 12 - Anulamento do efeito de arqueamento sob carregamento dinâmico (adaptado de Yu et al., 2009). Após 100 ciclos de carregamento, o arqueamento não consegue se desenvolver.

nam também com casos nacionais de insucesso (por exemplo, a já citada a grande obra da Escola Nacional do SESC no Rio de Janeiro).

A solicitação dinâmica começa, inicialmente, já na terraplanagem, quando da passagem repetida dos cilindros compactadores, que imprimem esforços cíclicos no solo acima da(s) geogrelha(s) e capitéis, tornando-se contínuo ao longo de toda a vida útil da obra, devido ao inerente volume de tráfego pertinente no local.

Recalques diferenciais e movimentação horizontal

A construção da ampliação de aterros rodoviários induz movimentos horizontais nos depósitos de solos moles. Este movimento ocorre, preferencialmente, abaixo do novo aterro, com direção para fora. Nestas condições, as estacas estão sujeitas a empuxos horizontais, gerando deflexões, momentos fletores e esforços de cisalhamento. Estes deslocamentos laterais, promovem graves

problemas, como fraturas ou até mesmo o colapso da estaca, além de danos nos capitéis e rasgos na geogrelha. Estacas esbeltas, como a Alluvial Anker, são particularmente susceptíveis a este fenômeno.

Adicionalmente, devido ao efeito de arqueamento, ocorrem recalques diferenciais, com o aterro que recalca, tensionando a geogrelha. Segundo Qian e Ling (2009), este comportamento leva aos seguintes problemas, pertinente a inúmeros casos semelhantes ocorridos:

- A ancoragem da geogrelha, no aterro existente, é precária, mas fortemente solicitada. Há portanto tendência ao arrancamento;
- O máximo recalque diferencial, ocorre nos capitéis mais internos, que ficam abaixo da saia do aterro existente. Devido à esta deformação, ter-se-á repercussões na projeção do novo com o antigo pavimento;
- O atrito negativo, atua em todas as estacas e é particularmente pronunciado nas estacas mais externas;

O arqueamento promove concentração de cargas nos capitéis, variando muito, de 13% (Briançon e Simon, 2010) até 90% (Chen et al., 2010), em função do espaçamento da malha e da altura do aterro. O mecanismo de transferência de carga

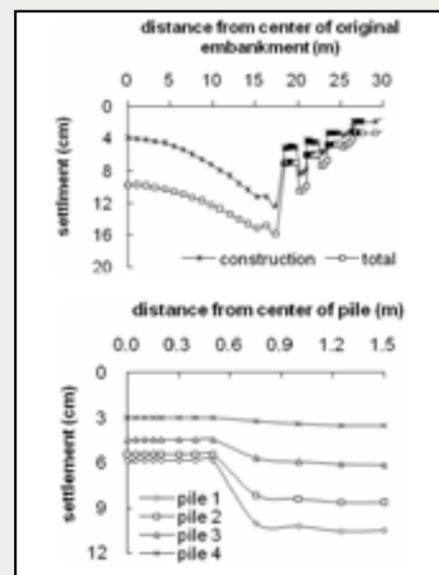


Figura 13 - (a) Recalque diferencial entre aterro novo e antigo. (b) Recalque diferencial entre estacas e aterro.

dependerá, principalmente, das condições do aterro levantado. A geogrelha pouco influi. Por exemplo, Oh e Shin (2007) apud Briançon e Simon (2010) compararam duas seções experimentais, observando que a eficiência aumentava, ligeiramente, na seção com geogrelha, concluindo que a plataforma granular de transferência de carga desempenha papel mais importante do que propriamente a geogrelha. Contudo, o risco é enorme.

Com relação à sua eficiência, Briançon e Simon (2010) mostram que o fator de redução do recalque fica entre 2,5 e 4, correspondendo a **eficiência de apenas 60% a 75%**.

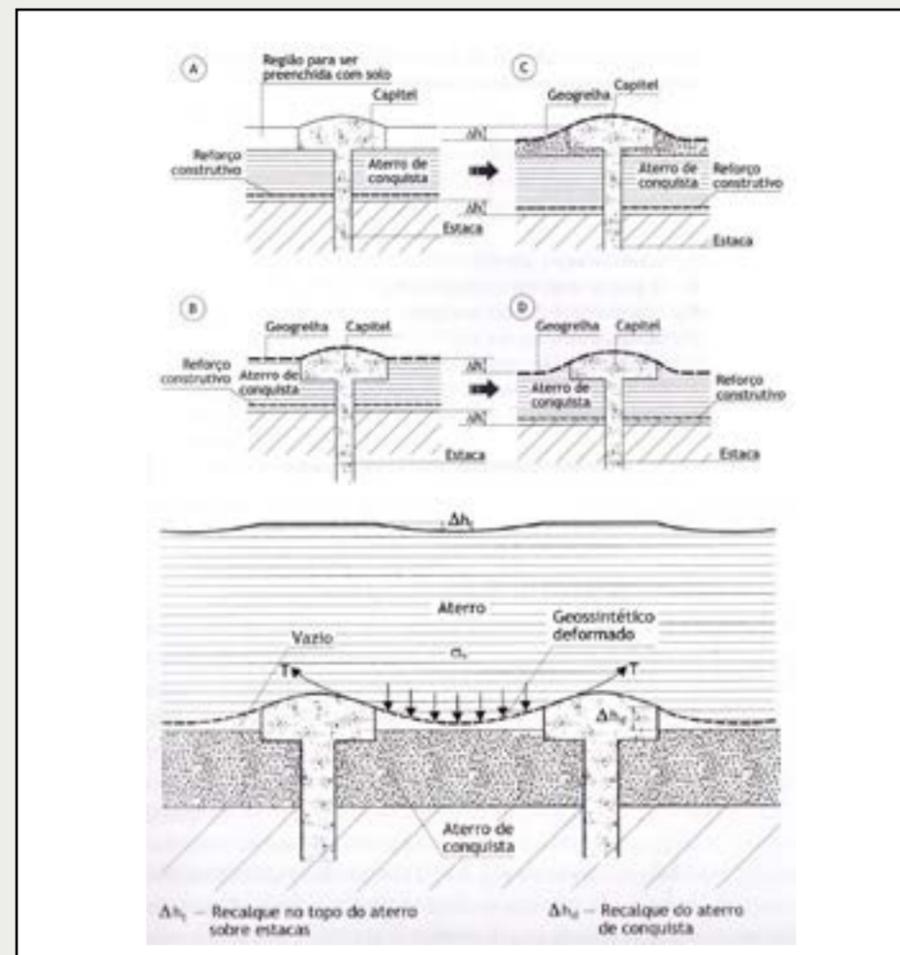


Figura 14 - Detalhe da execução de capitéis com aterros estruturados: (A) e (C) capitel executado acima do terreno; (B) e (D) capitel executado dentro do terreno.

Section	Settlement reduction (%) ^a	Stress reduction (%) ^b
2R	60	13
3R	73	50
4R	75	70

Tabela 1
a Compared with settlement in unreinforced section.
b Calculated from stress applied between four piles compared with stress in unreinforced section

A solução com melhoramento de solo com GEOENRIJECIMENTO

A tecnologia do GEOENRIJECIMENTO do solo argiloso mole utiliza o CPR Grouting, que baseia-se na moderna noção da homogeneização do solo, obtendo-se parâmetros geotécnicos pré-estabelecidos, sem o tradicional e limitado conceito de transferência de cargas. Sua execução e controle fundamentam-se no conceito geotécnico da consolidação do solo. Os principais pa-

com características de resistência e rigidez adequada a cada projeto.

O conceito do geoenrijecimento de solos argilosos moles, de duas décadas para cá, tem sido implementado não como uma alternativa, mas como a única medida capaz de realmente transformar solos moles em solo competente, razão pela qual diferencia-se dos processos tradicionais de georeforço, que utilizam estacas ou colunas.

O resultado é um solo completamente homogeneizado, livre de recalques, com parâmetros de resistência e rigidez pré-estabelecidos em toda a profundidade do depósito de solo mole.

Nas duas laterais, o aterro terá 4m de altura, com carga de projeto, apenas para o aterro, de cerca de 80kPa. A disposição da malha de geodrenos seguirá um formato triangular com espaçamento 1,50m x 1,50m. As verticais de geoenrijecimento do solo serão executadas em malha triangular com espaçamento 3,00m x 3,00m. Desta forma, ter-se-á 6 drenos ao redor de cada vertical. O volume de projeto dos bulbos de compressão deverá ser de 800 litros. Desta forma, ter-se-á um diâmetro médio de bulbos de compressão do solo de 115cm. A execução dos bulbos terá início na profundidade de 13m, terminando entre 1 e 2 metros abaixo do atual nível do terreno. Será executado um bulbo a cada metro de profundidade.

A tensão admissível final do solo, após o Geoenrijecimento, pode ser avaliada pela formulação clássica da capacidade de carga de fundações rasas, considerando-se a resistência não drenada do solo como um todo (meio homogêneo equivalente). O natural aumento na resistência do solo deve-se a dois efeitos:

- **Consolidação do solo mole.** O processo de expansão de cavidades, com a formação dos bulbos de compressão do solo, induz enormes deformações e, como resultado, há enorme redução do índice de vazios.

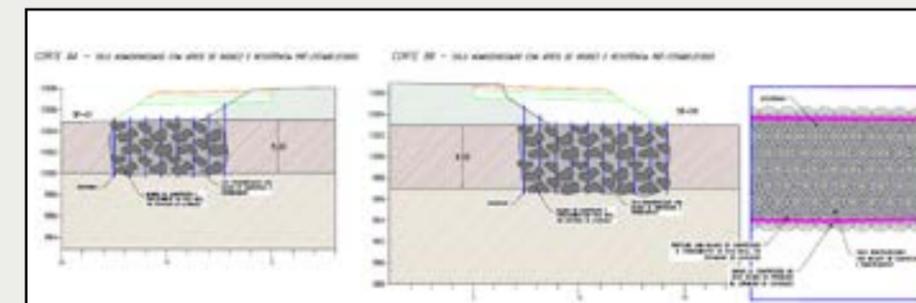


Figura 15 - Solução com melhoramento do solo (GEOENRIJECIMENTO).

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

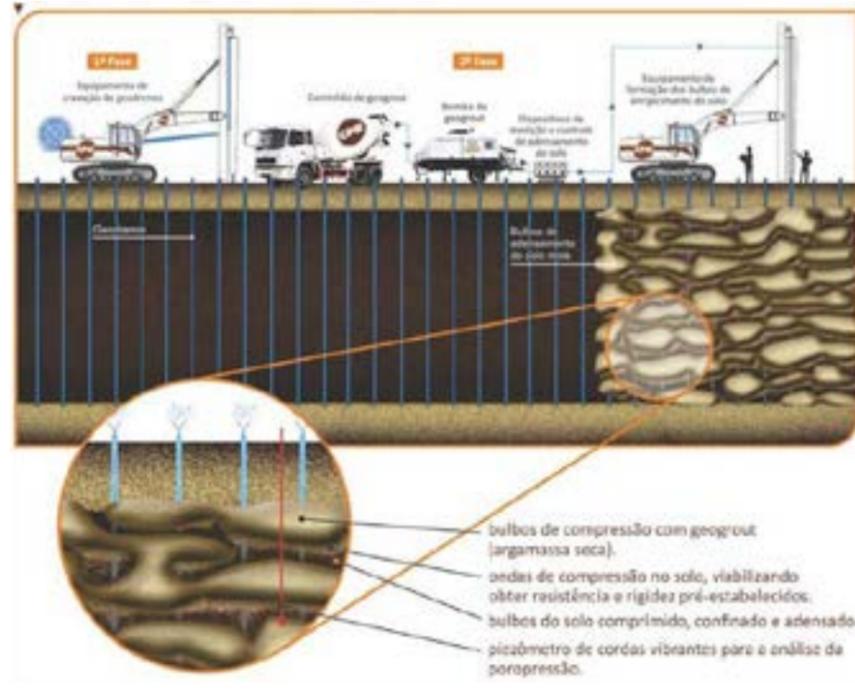


Figura 15 - Sequência executiva do CPR Grouting, específico para solos moles.

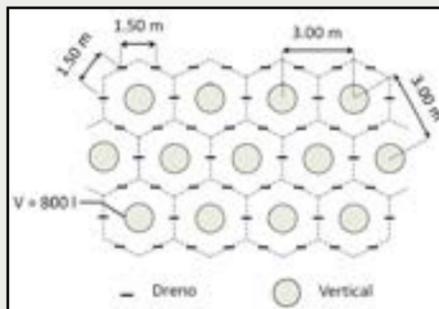


Figura 16 - Configuração do projeto.

• **Inclusões rígidas dispersas.** Após a pega do geogROUT, os bulbos possuem resistência e rigidez muito superiores ao do solo envolvente, atuando como reforço rígido, indeformável.

A tensão admissível do solo compósito, pós-Geoenrijecimento, pode ser calculada pelas seguintes expressões:

$$a) R_s = \frac{V_g}{Ah}$$

OBS: a Razão de Substituição R_s representa a incidência volumétrica do CPR Grouting, é expressa em porcentagem e depende do volume de geogROUT por metro V_g/h e da área de influência de uma vertical, calculada como $A = \sqrt{3/2} * S_{vert}^2$.

$$b) \frac{s_u}{s_{u0}} = \exp\left(2.3 \lambda_c R_s \frac{1+e_0}{C_c}\right)$$

OBS: o aumento da resistência não drenada no solo entre as verticais é estimado pela teoria do estado crítico.

$$c) s_{u,eq} = \left[f_c \frac{R_s}{2b_r} + s_u(1-R_s) \right] (R_s b_r + 1 - R_s)$$

$$b_r = \left(\frac{f_c}{2s_u} \right)^{1/2}$$

OBS: o solo geoenrijecido não pode ser avaliado apenas com a contribuição da fase “solo”, mas sim com a interação “solo-bulbos”. Portanto, utiliza-se a teoria da homogeneização.

$$d) \sigma_{adm} = \frac{N_c s_{u,eq}}{F_s}$$

O valor do fator de capacidade de carga adotado é $N_c = 5,5$. O fator de segurança adotado é $FS = 2$.

A tabela a seguir resume os valores de tensão admissível obtidos, em função da geometria das malhas adotadas.

A tensão admissível calculada atende às premissas de projeto, sendo maior que a tensão aplicada pelo aterro, estimada em 80kPa.

Conclusão

Da literatura pesquisada, tanto brasileira quanto internacional, sobre aterro estaqueado, há inúmeras incertezas que ficam sem solução quando se idealiza projetos e, da mesma forma, procedimentos que conte-

Malha	Triangular
S_{grid}	1,5 m
S_{vert}	3,0 m
V_g	800 l
R_s (a)	10%
s_u (b)	77,6 kPa
$s_{u,eq}$ (c)	90 kPa
σ_{adm} (d)	248 kPa

Obs: $Cc/(1+e_0) = 0,203$; $f_c = 0,5$ MPa; $N_c = 5,5$; $FS = 2$.

nam análises numéricas. O ambiente é o mesmo para as estacas aluvial anker. Paralelamente, tanto a nível nacional quanto internacional, há inúmeros casos de obras com problemas, menos complexas que o caso desta ampliação rodoviária. A principal diretriz, que nos chama a atenção, após análise detalhada, é que não pode ser aplicado em aterros com pouca altura. Um outro aspecto importante, também pertinente a projetos de aterro estaqueados, é o seu processo de ancoragem da geogrelha no aterro existente, de modo a estabelecer o necessário comprimento de ancoragem, principalmente porque não há altura de aterro suficiente. Portanto, não se recomenda a solução por aterro estaqueado. Sugere-se a solução de Geoenrijecimento do solo, com CPR Grouting, que satisfaz plenamente todos os requisitos necessários, particularmente, se o solo tiver características de colapsível, pois neutraliza totalmente esta condição. Em última análise, não há como comparar os dois sistemas, um representando o conceito de Geoenrijecimento do solo e o outro o conceito de reforço de solo. Os dois conceitos são bem distintos e fica claro seus objetivos assim como suas eficiências, que é o que realmente importa.



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 Engegraut 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.

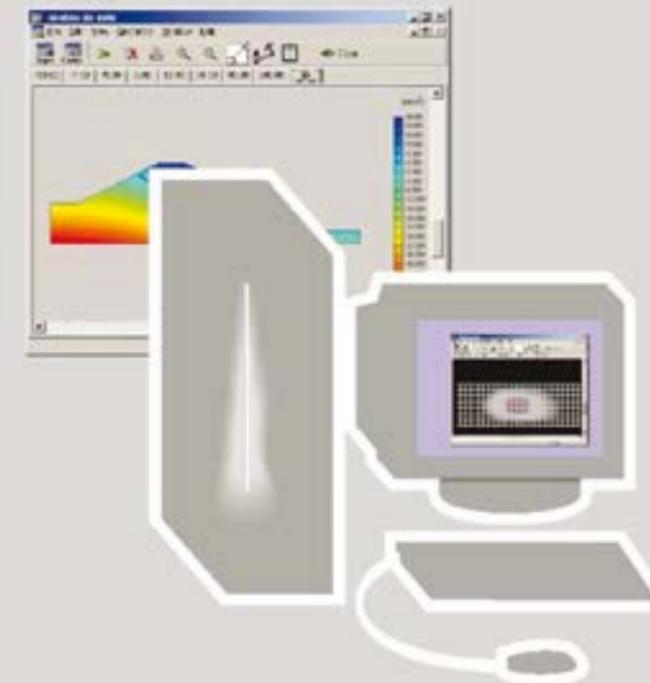
contaminação de solo?

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

Confie em quem tem experiência.



www.engegraut.com.br



A QUESTÃO DA RESISTÊNCIA DO SOLO MOLE

Trata-se de quesito fundamental na compreensão geotécnica do solo mole, exatamente porque a maioria das ruturas que ocorrem, neste tipo tão particular de solo, é do tipo cisalhante, exatamente porque o solo argiloso é composto por minerais, que apresentam tamanho inferior a $2\mu\text{m}$ e que deslizam uns sobre os outros, quando carregado. No laboratório geotécnico, existem diversos tipos de testes de resistência cisalhante que podem explicar esta questão. Dois grupos de testes sobressaem:

O teste da resistência cisalhante, com base na tensão total

Obtém a resistência cisalhante não drenada, S_u , do solo ou do envelope de ruptura*, referente às tensões totais (coesão total**, c , e ângulo de atrito total ϕ). Exemplos são o Vane Test, o teste de compressão não confinada, o teste triaxial não drenado e não consolidado e o triaxial não drenado consolidado.

O teste da resistência cisalhante com base na tensão efetiva

Destina-se a obter a resistência cisalhante efetiva do solo***, com base no envelope de rutura em termos de tensão efetiva (coesão efetiva c' e ângulo de atrito efetivo ϕ'). São conhecidos como testes de resistência "drenada", e os exemplos são o teste de cisalhamento direto, o triaxial drenado consolidado, o triaxial não drenado consolidado com medição da poropressão e o da resistência residual drenada.

Evidentemente, a resistência cisalhante de um solo coesivo é muito mais complexa de que de um solo não coesivo, além de possuir valores bem mais inferiores, muito comumente por ter partículas de silte e argila que dão a característica de

plástico, podendo ser facilmente moldado.

A resistência ao cisalhamento das argilas podem ser dividida em três grupos

1ª - Resistência cisalhante não drenada

Para se obter a resistência não drenada de solos argilosos altamente plásticos, com base nos parâmetros da tensão total c e ϕ , executa-se o teste de compressão triaxial não drenado consolidado (ASTM D-4767) que, basicamente, informará que a máxima resistência cisalhante do solo, na rutura, tem um certo valor (exemplo 8kPa), mais tantos por cento (exemplo 25%) da pressão total atuando perpendicularmente ao plano de rutura. Na prática, poderia corresponder a construção de uma estrutura, como um aterro, sobre solo mole, que teria tempo suficiente para consolidar. Se o aterro fosse construído rapidamente, o solo mole estaria sujeito a um carregamento não drenado. A consolidação, promovida pelo carregamento rápido, poderia ser modelada pelo mesmo teste triaxial de compressão não drenado consolidado.

2ª - Resistência cisalhante drenada

O teste da resistência cisalhante drenada (como o teste de cisalhamento direto drenado), pode ser utilizado para se obter os parâmetros c' e ϕ' da resistência efetiva. Como solos argilosos moles apresentam baixíssima permeabilidade, é mais conveniente fazer o teste de compressão triaxial não drenado consolidado, medindo-se a poropressão de modo a se obter os parâmetros da resistência cisalhante efetiva. Como exemplo, poderíamos imaginar um teste triaxial com medição da poropressão (ASTM-4767) de um solo mole, submetido ao GEOENRIJECIMENTO, obtendo-se os parâmetros da resistência cisalhante em termos de tensão total e os parâmetros da resistência cisalhante em termos de tensão efetiva.

3ª - Resistência cisalhante residual drenada

É definida como a resistência cisalhante que, literalmente, sobra (resíduo) do solo mole, após considerável processo deformativo cisalhante imposto. Comumente observa-se que a resistência

cisalhante residual drenada ϕ' pode ser muito pequena.

5 fatores que afetam a resistência cisalhante nos solos argilosos moles

Amostragem - É tecnicamente impossível obter amostra não amolgada em solos moles. Ladd et al. 1980, e Day 1980, relatam redução de 75% na resistência cisalhante não drenada. A sensibilidade dos depósitos de argilas moles é um fator considerável (quando certas argilas são submetidas a alguma perturbação, sua resistência diminui, ainda que o índice de vazios seja mantido constante).

Anisotropia - Solos argilosos possuem, naturalmente, variação de resistência onde o S_u dependerá do plano de rutura. Portanto o S_u , ao longo de um plano de rutura horizontal, não será igual ao S_u em um plano de rutura vertical.

Vane Test - Bjerrum 1972, 1973 demonstrou que os resultados da resistência não drenada, S_u , realizados no campo, são maiores do que na realidade, atribuindo à combinação da anisotropia dos depósitos argilosos com a rapidez do cisalhamento do teste, razão pela qual propôs que a S_u seja reduzida de acordo com o índice de plasticidade do solo obtido.

Teste de compressão não confinado - Da mesma maneira que o Vane, este teste pode obter valores de S_u muito altos, porque solos saturados plásticos cisalham muito rápido.

Experiência - Devido a estes fatores, toda experiência é necessária para conduzir trabalhos e projetos em solos moles.

* Envelope de rutura é pertinente a uma série de círculos de Mohr (representação gráfica das tensões que agem em vários planos em um determinado ponto) representando tensões na condição de rutura em um determinado solo mole.

** Coesão é a porção da resistência cisalhante do solo mole na equação de Coulomb ($\tau=c+\sigma\tan\phi$)

*** Intensidade de resistência cisalhante do solo, sustentando carregamento durante longo tempo, em condição de tensão efetiva, ou seja, totalmente drenado.



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

Publicidade

PATRICIA TINOCO

patricia@softsoilbrazilianinstitute.com.br

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.



14 a 16 de Agosto, 2019
Regeo 2019 (IX Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental) e o Geossintéticos 2019 (VIII Congresso Brasileiro de Geossintéticos)
São Carlos - SP
<http://www.regeossinteticos2019.com.br/>

20 a 25 de Setembro, 2019
ISRM 2019 - International Congress of Rock Mechanics Foz do Iguaçu - PR
<http://www.isrm2019.com/message.php>

7 a 11 de Setembro de 2019
6ª Conferência Internacional de Geotécnica e Geofísica Budapeste, Hungria
<http://www.isc6.org/>

11 a 14 de Setembro de 2019
Congresso Brasileiro de Redução de Riscos e Desastres - CBRDD Belém - PA
<http://www.cbrdd2019.com.br/>

12 de Setembro de 2019
Workshop de Geofísica Vila Mariana - SP
<https://www.abge.org.br/workshop-de-geofisica/> / abge@abge.org.br

29 de Setembro e 2 de Outubro de 2019
3rd International Conference on Information Technologies in Geo-Engineering Guimarães - Portugal
3rd-icitg2019.civil.uminho.pt

14-18 de outubro de 2019
XVI Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical

Engineering Chinese Taipei, Taipei
www.16arc.org

16 a 18 de Outubro de 2019
GeoMin - Congresso de Geotecnia Aplicada à Mineração Ouro Preto - MG
panamerican2019mexico.com

17 a 19 de Outubro de 2019
GeoSUL - XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul Joinville - Santa Catarina
<http://geosul2019.com.br>

8 e 9 de Novembro de 2019
GeoBASE - Seminário Geotécnico Bahia/Sergipe Cruz das Almas - BA
<https://geobase2019.com.br/>

13 e 14 de Novembro de 2019
GeoNE - 6º Simpósio de Geotecnia do Nordeste Recife - Pernambuco
<http://www.geone.com.br/2019/inicial/>

17 a 20 de novembro de 2019
XVI Congresso Pan-Americano de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Cancún - México
panamerican2019mexico.com

26 a 29 de Abril de 2020
Geoamerica 2020 - 4º Congresso Panamericano de Geossintéticos Rio de Janeiro - RJ
geoamericas2020@geoamericas2020.com

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.

Aplicações:

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



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

ESTABILIZAÇÃO DE MARGEM PORTUÁRIA FLUVIAL.

Caso de obra.

Figura 1 - Solução de contenção de talude portuário com construção de três linhas de colunas de jet grouting e parede de concreto estacada sofre rutura na zona portuária de Manaus, AM.

O conhecimento da estabilidade dos aterros/taludes na zona portuária de Manaus, AM, seria viável se fosse possível determinar a real geometria dos taludes ribeirinhos e, principalmente, as verdadeiras condições dos aterros que geram enormes fontes de incertezas e histórico de rupturas, frente ao fenômeno das terras caídas. A elevação da cota do Rio Negro, a alturas de até 15m e o rápido esvaziamento no período de 6 meses é a causa de todos os problemas. A extensão da intervenção atingiu mais de 1km, em uma área de aproximadamente 220.000m², com profundidade de geoenrijecimento de 30m. Cinco situações chamaram a atenção neste grande problema. As condições do solo de fundação com fartas características geotécnicas de rupturas desconhecidas, o projeto do geoenrijecimento do solo que,

basicamente, objetivou neutralizar as forças atuantes e aumentar as forças resistentes, as dificuldades pertinentes à execução dos serviços, função das heterogeneidades de aterros superpostos a profundas camadas de solo mole, junto à margem do Rio Negro, a instabilidade presente função das tensões provocadas no solo pela interven-

ção e, por último, as particularidades da certificação do geoenrijecimento, sempre dependentes da elevação e esvaziamento do rio.

Até o ano de 2010, diversas técnicas de melhoramento de solos foram aplicadas nesta zona portuária ribeirinha de Manaus (figura 2), caracterizada por sucessivos aterros e ta-



Figura 2 - Vista aérea de parte da região portuária de Manaus, onde se processou um volumoso processo de geoenrijecimento de depósitos de solo mole, a profundidades de 30m, ao longo do Rio Negro. Tanto para efeito de recuperação das áreas degradadas pela tragédia de 2010, quanto para ampliação da zona portuária.



Figura 3 - Processo de ruptura, em outra parte da região portuária, com perda considerável de bens e até vidas.



Figura 4 - Situação de ruptura típica da região portuária de Manaus.

ludes com diferentes características. Poucas técnicas, no entanto, conseguiram sucesso frente ao enorme desafio geotécnico proposto pelas condições locais. A opção pelo geoenrijecimento do solo foi justificada pelas sucessivas rupturas ocorridas, principalmente nos meses de setembro e outubro, em regiões anteriormente melhoradas com outras tecnologias, sem sucesso, quando o Rio Negro chega a sua cota mais baixa.

Toda a extensão portuária foi motivo de várias campanhas de sondagens SPT, que deu como característica variações de areia argilosa ou argila muito mole, variando de 2 a 15 golpes, com camadas resistentes de argila / areia média e grossa argilosa até 30m de profundidade. A figura 6 apresenta sondagens típicas do tipo de solo apresentado na região portuária analisada.

De forma característica, em toda a extensão da área portuária, há predominância de cerca de 3 a 7m de aterro com pedregulhos, restos de construção, etc. Nas regiões planas, pavimento de concreto executado sobre camada de base de brita e sub-base de rachão com cerca de 1m de espessura. Nas regiões de taludes e ribeirinhas, denominadas “praias”, há presença de aterro arenoso com restos de construção. Não há maiores informações sobre as propriedades geotécnicas do solo mole.



Figura 5 - Serviços de geoenrijecimento sendo executados em região pós-ruptura.

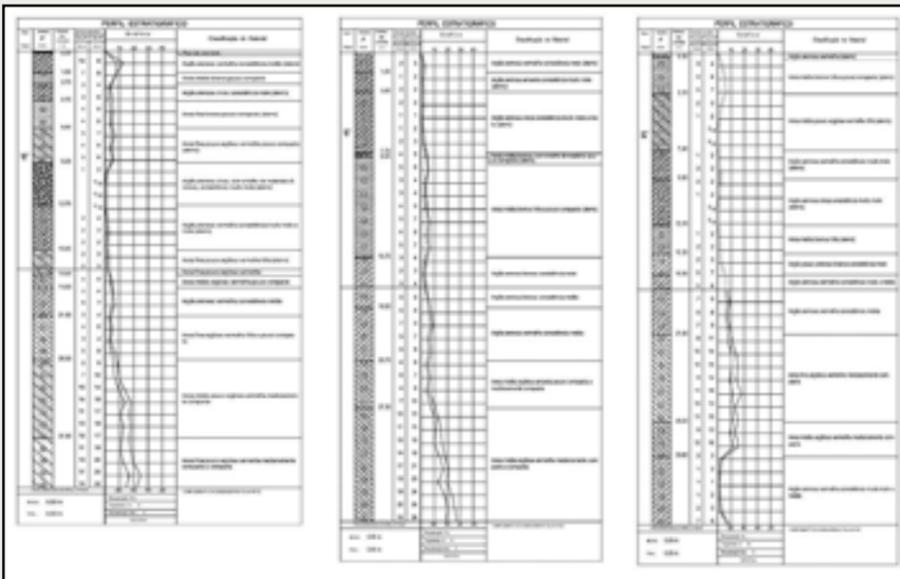


Figura 5 - Sondagens SPT, que caracterizam o solo de fundação da região portuária de Manaus.



Figura 6 - Panorama do georrijecimento na Zona Portuária, pós-ruptura.

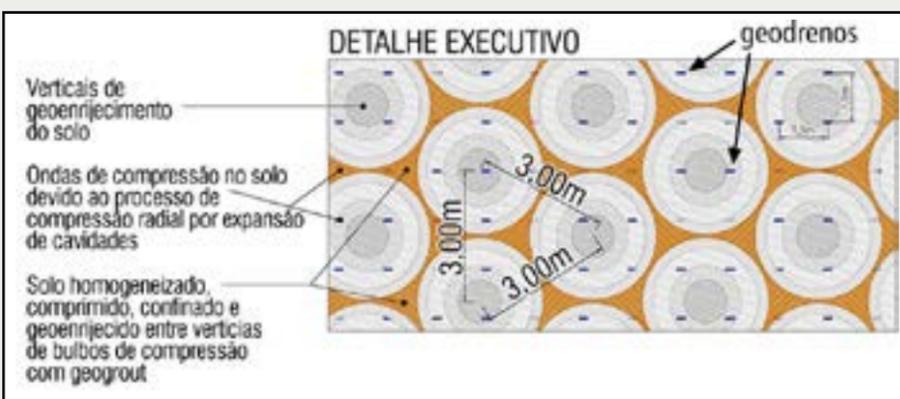


Figura 7 - Detalhamento básico do georrijecimento do solo, na Zona Portuária.

A resistência ao cisalhamento não drenada, ao longo dos 30m de profundidade, obtida com sondagens pressiométricas de certificação do georrijecimento, antes do melhoramento, variava de 2kPa a 20kPa. O nível do Rio Negro, apresenta variação

de vasante, de cerca de 15m, nos meses de setembro e outubro. O projeto de georrijecimento do solo, com CPR Grouting desenvolvido, procurou alcançar ao máximo os seguintes parâmetros:



Figura 8 - Zona do cais, com georrijecimento do solo, em profundidades de 30m.

- Acesso às propriedades e o comportamento geomecânico da área portuária (análise pressiométrica).
- O mecanismo e a tipologia do histórico de rupturas, incluindo a velocidade, as direções dos movimentos e as geometrias das rupturas.
- Os fatores geológicos, hidrológicos, a magnitude e as dimensões influentes na instabilidade da região, e que motivavam os permanentes estados de ruptura.
- Os níveis freáticos, as pressões da água na extensão em questão, além da permeabilidade através das sondagens SPT existentes.
- Os fatores ambientais e o histórico da ação humana no local.
- A premência da intervenção
- A futura modificação da geometria dos taludes, o processo de drenagem consequente e, por fim...
- O projeto de georrijecimento, sua adequabilidade, função do melhoramento do solo em antigos planos/superfícies de ruptura, culminando com a estruturação de todo o solo de fundação, com aumento significativo de sua rigidez.

Após quase 5 anos de serviço, a área georrijecida atingiu 220.000m², contando-se áreas planas de armazenagem com pavimento rígido e áreas de taludes, além de "praias". As figuras 9, 10 e 11 apresentam a sequência do georrijecimento do solo ao longo da área portuária.



Figura 9 - Trabalhos de pré-furo, com ar comprimido, até a profundidade de 30m, seguido da posterior formação de bulbos de compressão do solo de modo a georrijecê-lo.



Figura 10 - Serviços de pré-furo na região das "praias" do porto.

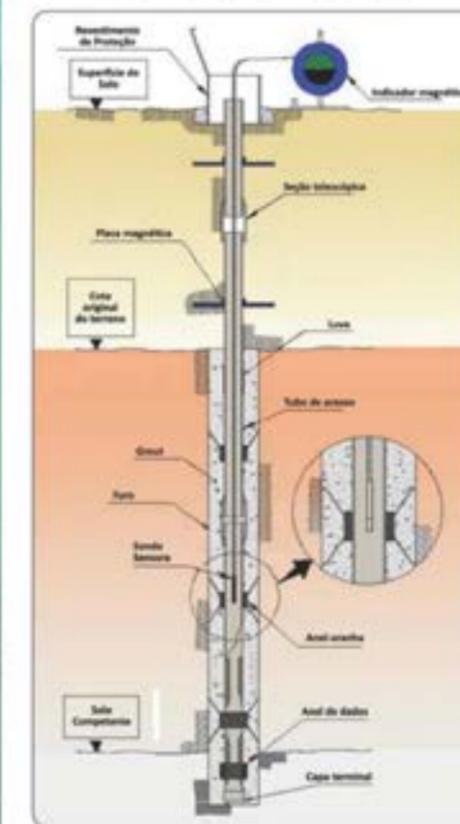


Figura 11 - Extenso cais portuário retificado pelo georrijecimento do solo de fundação, com muro gabião com cerca de 8m de altura, definindo o novo cais. Notar que o nível do rio está em sua cota máxima e o aterro apenas aguardando a base granular para assentamento do piso intertravado.



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.



No projeto abaixo (figura 12), o geoenrijecimento abrange a retroárea portuária além da região das praias, adequando-se a orla do cais, caracterizando o novo muro. A sequência executiva de formação das verticais de compressão radial do solo foi calculada de forma a provocar o mínimo de tensões no solo, de modo a não induzir rupturas, particularmente nos meses de vasante máxima, devido a fragilização motivada pelas extensas e profundas rupturas.

do período de esvaziamento. Para a condição transiente, a superfície do NA é curvilínea dentro do maciço, dependente da velocidade de esvaziamento do Rio Negro e, principalmente das propriedades do solo (aterro), assim como sua condutividade hidráulica, porosidade, etc. Conseqüentemente, a poropressão remanescente no maciço é do tipo transiente, ou seja, varia com o tempo e com a capacidade dos aterros reterem a água.

A variação das características do aterro, ao longo dos anos em toda a extensão portuária, é crítica e influencia enormemente a dissipação da poropressão. Aterros arenosos drenam rápido durante o esvaziamento do Rio, já aterros argilosos confinam a água, fazendo com que a descida da superfície piezométrica não acompanhe a do nível da água livre do Rio, causando rupturas repentinas de toda a massa de aterros, taludes e “praias” da região portuária. A figura 15 mostra a situação de cheia em aterros argilosos. Já, na figura 16, é evidenciada a execução do geoenrijecimento.

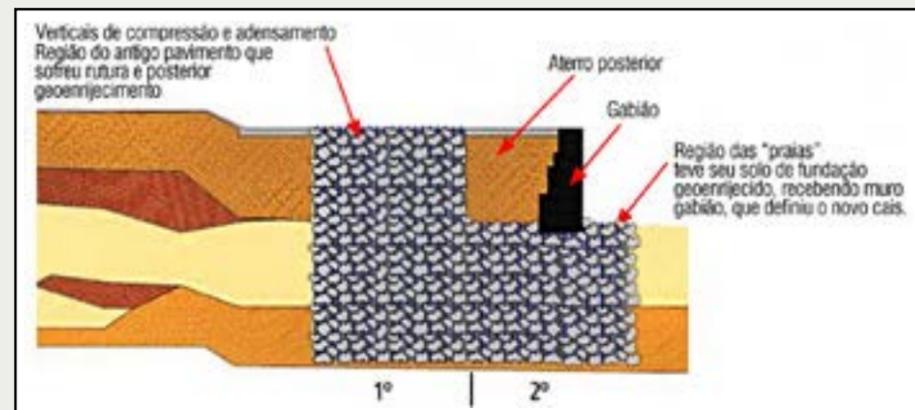


Figura 12 - Projeto básico do geoenrijecimento, na Zona Portuária, abrangendo 2 segmentos. O segundo segmento serve de suporte para o muro de contenção com cerca de 8m de altura.



Figura 13 - As três modalidades de esvaziamento do Rio Negro ao longo da região portuária, de acordo com o tipo de aterro empregado.

Os problemas de ruptura, apresentam-se de 3 maneiras distintas, conforme condições climáticas e a condição do solo nas regiões ribeirinhas (figura 13). Na condição lento e completo, a situação do fluxo e da poropressão ficam equilibradas (condição hidrostática). Na condição rápido e completo o solo, tipicamente aterros argilosos nada permeáveis, funciona como não drenado, o NA permanece na condição inicial superior, em grande parte



Figura 14 - Serviços de geoenrijecimento na praia, na ampliação da área portuária de Manaus, após os trabalhos de melhoramento do solo na região superior do cais motivado pelas rupturas.

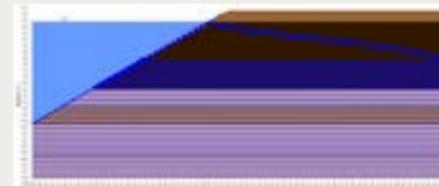


Figura 15 - Nível piezométrico alto quando da cheia do Rio Negro.

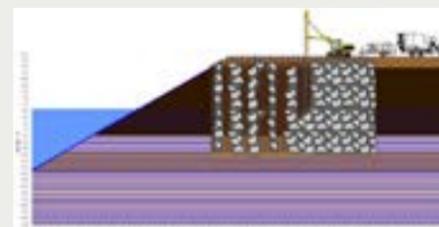


Figura 16 - Os serviços de geoenrijecimento neutralizam a compressibilidade do solo e a ação piezométrica, restituindo a segurança necessária.



Figura 17 - Serviços de geoenrijecimento do solo próximo às áreas afetadas pelas rupturas ocorridas.



Figura 18 - Geoenrijecimento do solo objetivando as obras de ampliação.



Figura 19 - Análise pressiométrica executada na "praia" da Zona Portuária, com vistas a ampliação portuária.



Figura 20 - Análise pressiométrica executada na área pavimentada da Zona Portuária.

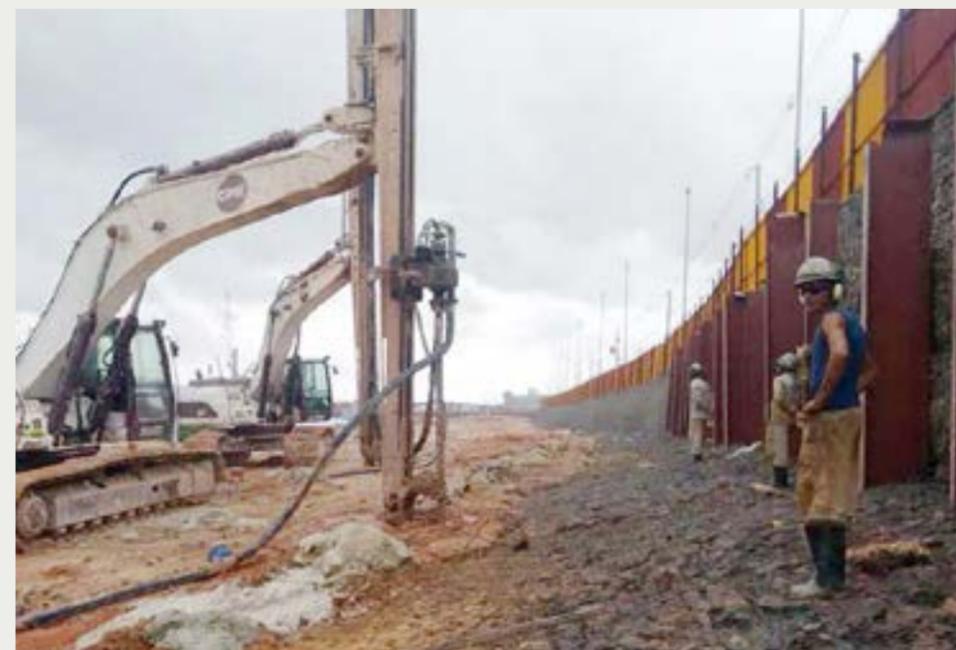


Figura 21 - Geoenrijecimento na ampliação do porto.

Todo o serviço de geoenrijecimento do solo é aferido antes e depois com análises pressiométricas que, basicamente, utilizam sonda cilíndrica inflável, posicionada a diversas profundidades. O pressiômetro utiliza unidade de controle hidráulico para carregar a sonda, monitorando a resposta do solo na profundidade ensaiada. As figuras 19 e 20 mostram essas análises sendo executadas.

A zona portuária de Manaus, por sua importância crescente na vida da cidade, tem apresentado situações catastróficas cuja intervenção impacta em sua população. A utilização do geoenrijecimento do solo com CPR Grouting demonstrou, ao longo de cinco anos ininterruptos de atuação, ser completamente eficiente para este grande problema da região e, por extensão, de toda a Amazônia. Como a escolha do fator de segurança é vital em qualquer projeto, o conhecimento dos parâmetros de resistência, rigidez, distribuição da poropressão, experiência acumulada com as diversificadas massas de aterro e solo de fundação da crítica zona portuária de Manaus e, por fim, a experiência adquirida, permitem viabilizar o geoenrijecimento como sistemática de melhoramento segura, econômico e 100% eficaz para soluções portuárias.



REFERÊNCIAS

- Thomas Kim é engenheiro civil e trabalha com melhoramento de solos moles.



UNIONTECH

TECNOLOGIA DE JUNTAS

UNIONTECH JUNTAS E IMPERMEABILIZAÇÕES LTDA.

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

www.uniontech.com.br