

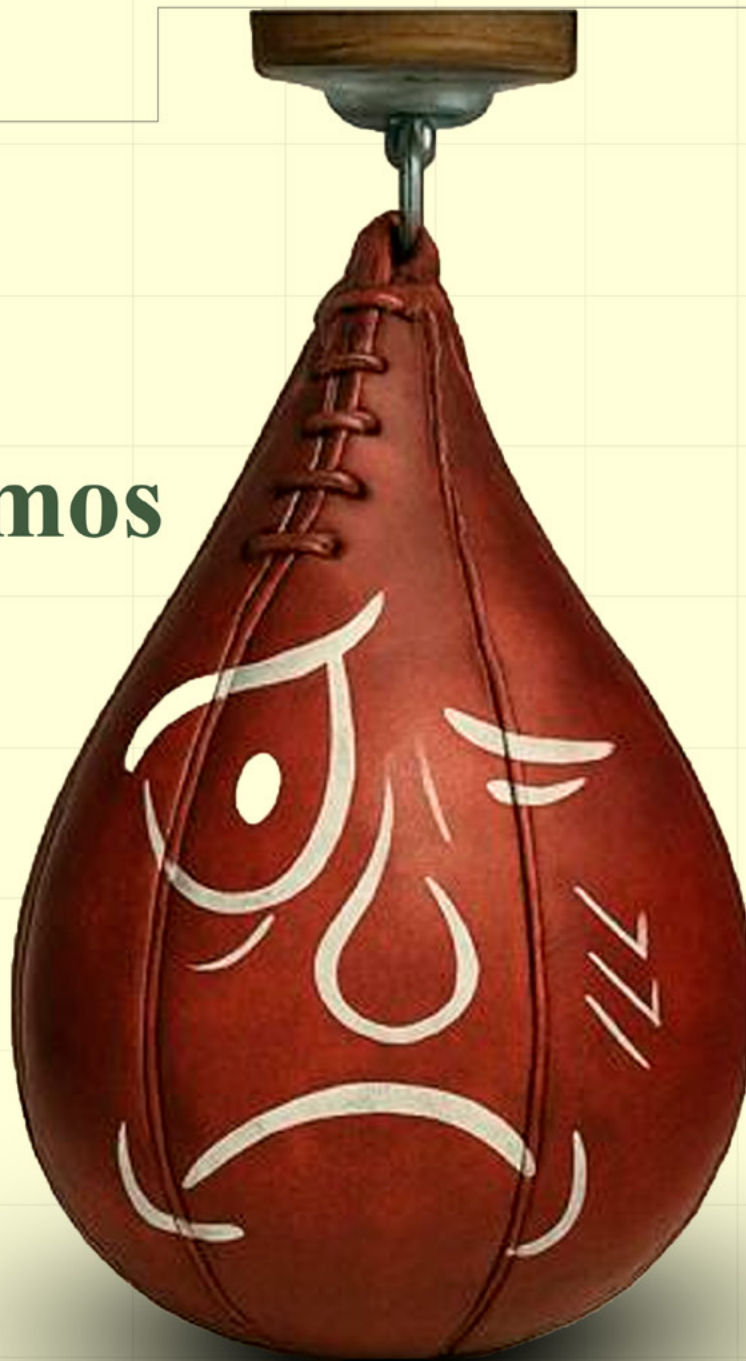
Soft Soil Brazilian Review

Edição Especial

- 03** As consequências do solo mole persistem. Onde estamos falhando?
Eng. M.Sc. Joaquim Rodrigues
- 16** Do diagnóstico à solução. O tratamento moderno para aterros.
Eng.ª Patricia Tinoco
- 36** Limitações das técnicas triviais e a solução segura.
Eng. Roger Kim
- 28** **Consulta**
há diretrizes para escolher, justificar e executar a preparação do solo para receber aterros?

Por que ainda apanhamos do solo mole?

Soluções genéricas continuam custando caro. Precisamos entender, de fato, o comportamento do solo mole para parar de errar no tratamento.



Um marco para a séria questão do tratamento do solo mole no Brasil.

Nº 45

IBSM INSTITUTO
BRASILEIRO
DO SOLO MOLE

NESTA EDIÇÃO

Revisamos a visão clássica e confrontamos os métodos de tratamento do solo mole, focando na indeformabilidade e na estabilidade, com a prática geotécnica integrada.

3 AS CONSEQUÊNCIAS DO SOLO MOLE PERSISTEM. ONDE ESTAMOS FALHANDO?

16 DO DIAGNÓSTICO À SOLUÇÃO. O TRATAMENTO MODERNO PARA ATERROS.

28 - CONSULTA

HÁ DIRETRIZES PARA ESCOLHER, JUSTIFICAR E EXECUTAR A PREPARAÇÃO DO SOLO PARA RECEBER ATERROS?

36 LIMITAÇÕES DAS TÉCNICAS TRIVIAIS E A SOLUÇÃO SEGURA.

EDITORIAL

A Soft Soil Brazilian Review mergulha profundamente no que há de mais atual na geotecnia do solo mole, tema que deixou de ser problema geotécnico, para tornar-se um campo avançado da transformação do solo de fundação. O mundo mudou desde os estudos clássicos franceses e norte americanos do início dos anos 2000. Hoje, a concepção americana, referência em regiões críticas como o Golfo do México, a Flórida e o Washington State, consolida uma visão moderna e direta que solos moles não devem ser observados, mas transformados ou readequados. Nesta edição, objetivamos chamar a atenção para o reconhecimento da presença de solos moles, em obras de construção e duplicação de rodovias, para a avaliação dos riscos estimando-se, mesmo que de forma aproximada, as consequências da presença de camadas compressíveis nos custos, na dificuldade executiva e na qualidade final do projeto. Gerenciar um projeto, significa conduzir sua execução, respeitando o cronograma da obra, ciente da importância dos pontos de controle dos riscos envolvidos. É importante reconhecer o grau de dificuldade existente, reconhecendo os especialistas, ciente da complexidade do problema, não superestimando a própria capacidade de otimizar a solução sozinho. A geotecnia contemporânea não aceita mais o risco histórico dos métodos que “esperam” o comportamento do solo. A filosofia atual é inequívoca, melhorar primeiro e aterrar depois, garantindo desempenho por pelo menos 50 anos. Apresentamos, também, a releitura atual do conceito francês, sob a ótica americana, com as práticas do FHWA e

USACE, que redefiniram completamente a abordagem para soft soils, priorizando a rigidez inicial, o controle dos deslocamentos horizontais e, principalmente, a engenharia preditiva. Apresentamos, o pensamento conceitual com as soluções triviais, pouco ou nada específicas ao solo mole, como o pré-carregamento, bermas laterais e colunas para transferência das cargas, artifícios arriscados em ambientes urbanos, industriais, rodoviários e ferroviários modernos. Revelamos, de igual maneira, a técnica que lidera a nova era do solo, moldado pela geotecnia, o geoenrijecimento, onde o solo mole natural passa a ser um composto, tendo comportamento 100% controlado e previsível. Incluímos, também, casos, conceitos e fundamentos que estão mudando a geotecnia prática, com visão integrada, combinando investigação avançada, modelagem numérica, instrumentação obrigatória e critérios de desempenho de longo prazo. Por último, o leitor poderá questionar por que dedicar uma edição inteira a este tema? Porque o Brasil vive, hoje, o que os Estados Unidos, França e Japão enfrentaram anos atrás, com a expansão inevitável de obras sobre solos moles, especialmente em áreas urbanas, portuárias, industriais e de logística. E por que a engenharia geotécnica brasileira, assim como a Soft Soil Brazilian Review, lideram esta discussão com clareza técnica e visão estratégica. Nesta edição, você vai entender, então, por que o futuro da infraestrutura passa pelo domínio absoluto do solo mole, não como obstáculo, mas como matéria prima a ser transformada.

Boa leitura.

SEÇÕES



Um guia prático para quem realmente precisa transformar o solo.

AS CONSEQUÊNCIAS DO SOLO MOLE PERSISTEM. ONDE ESTAMOS FALHANDO?

Figura 1 – Fundo de trecho de drenagem natural, com deposição de profundas camadas de solos moles, onde promove-se a complementação da BR-265, perto de Passos, em Minas Gerais. O melhoramento do solo, para execução de aterros de até 12m de altura, torna-se necessário.

A construção de aterros, quando há presença de solos moles, inevitavelmente incorre em diversos problemas, caracterizados pela alta deformabilidade, baixa resistência e permeabilidade. A profundidade do solo compressível influencia, de maneira significativa, a natureza e a extensão dos problemas decorrentes da elevação do aterro. Se este tipo de solo apresenta-se na forma de uma simples camada superficial, a elevação do aterro acarreta problemas de estabilidade, o que uma simples remoção pode resolver. Quanto mais profunda a camada compressível, menor o nível de problemas. No entanto, maior e mais lento o diversificado e complexo processo deformativo, caracterizado por complicações de estabilidade, recalques, tensões “parasitas” em estruturas vizinhas e a perturbação do nível freático, que devem ser abordados independentemente da altura do aterro a ser elevado.

A QUESTÃO DA ESTABILIDADE

Solos moles são, definitivamente, muito pouco resistentes e quando presentes na superfície do terreno podem provocar ruturas, geralmente do tipo rotacional “circular”, durante a elevação do aterro.

RECALQUES E MOVIMENTOS LATERAIS

Solos moles deformam-se verticalmente (recalques) e através de movimentos laterais sob aterros. Geralmente ocorrem não de forma instantânea, podendo demorar meses, anos e até décadas, dependendo das propriedades do solo e da espessura das camadas. O processo de recalque também não é uniforme, devido a seção transversal trapezoidal do aterro, sua espessura variável e a heterogeneidade do solo de fundação.

IMPLICAÇÕES COM OBRAS VIZINHAS

O colapso deformativo do solo, sob o peso do aterro, estende-se além dos limites da projeção da obra e, por esse motivo, sua elevação pode causar problemas em estruturas vizinhas existentes, como rodovias, ferrovias e fundações de edificações, com consequências significativas para sua continuidade operativa.

O ESCOAMENTO DAS ÁGUAS

Na construção de aterros rodoviários, é comum que o traçado da estrada atravesse áreas de baixadas, fundos de vale ou zonas alagadiças, onde predominam solos moles de natureza argilosa com elevada compressibilidade. Esses solos formam-se justamente em regiões de acúmulo de água e sedimentos finos, o que

explica sua presença no fundo de trechos de drenagem natural. Ao se executar um aterro, sobre esse tipo de terreno, o corpo do aterro atua como uma barreira física ao escoamento superficial e subterrâneo da água, principalmente durante os períodos de cheia. Assim, e desta forma, interrompe-se ou desvia-se o fluxo natural das águas, provocando represamentos, aumento do nível freático à montante e até processos de erosão concentrados nas regiões de drenagem, se o sistema não for adequadamente dimensionado. Consequentemente, dever-se-á analisar o aspecto geotécnico e hidráulico, de maneira integrada, de modo a garantir a estabilidade do aterro e do solo de fundação, obtidos através do melhoramento efetivo do solo mole, com geoenrijecimento. O escoamento, controlado, das águas de cheias, dever-se-á fazer com bueiros e galerias, de modo a não comprometer o equilíbrio natural da região. Sim, por que o escoamento superficial pode erodir a base do aterro, o que é muito frequente na região norte do país. Eventualmente, pode ser necessário criar aberturas adequadas no aterro, de modo a permitir a passagem da água. Como a deformação do solo compressível, sob o peso do aterro, reduz ligeiramente sua permeabilidade, influencia-se o fluxo subterrâneo d'água, razão pela qual "soluções de tratamento do solo" com a formação de colunas tornam-se críticas.

AS CONSEQUÊNCIAS PARA O PROJETO

A construção de aterros, com a presença de cada vez mais frequente de solos moles, impõe tensões particulares no solo de fundação, que devem ser analisadas no projeto. Em tese, não se deve construir aterros com a presença de camadas de solos moles no terreno de fundação. Estudos de estabilidade são, portanto, de particular importância. De forma mais abrangente, a construção de aterros não deve perturbar a estabilidade ou a condição de funcionamento de estruturas vizinhas existentes, razão pela qual dever-se-á considerar as restrições específicas do local da obra. Para limitar o impacto da construção de aterros, em estruturas que serão construídas, como parte do mesmo projeto, torna-se recomendável elevar primeiro os aterros, esperando que o natural processo deformativo finalize, antes de iniciar outras fundações, particularmente na construção de pontes/ viadutos e seus aterros de acesso. O problema primordial são recalques diferenciais, de pequeno e longo prazo. As exigências do órgão governamental, em relação ao comportamento do aterro concluído, influenciam diretamente o dimensionamento da obra, a escolha do método de tratamento do solo e as informações necessárias durante a investigação geotécnica. O órgão geralmente especifica limi-

tações geométricas para o projeto, como modificações admissíveis em seu perfil longitudinal, após a entrega da obra, considerando-se custos de manutenção e, também, deformações ao longo das seções transversais, importante para a drenagem da rodovia ou ferrovia ou mesmo ao longo de trilhos de guindastes portuários, etc, que consideram a impossibilidade prática de construir aterros sobre solos compressíveis, sem a ocorrência de deformações a longo prazo. A geometria da plataforma rodoviária, especialmente seus taludes para o escoamento superficial das águas pluviais deve, portanto, ser relativamente independente do recalque diferencial do solo de fundação, além de limitações ambientais, como o impacto no meio ambiente e, em particular, no escoamento das águas subterrâneas e superficiais, no controle da erosão, particularmente durante a obra, etc. A duração dos estudos, particularmente o da estabilidade e da deformabilidade do solo, em obras de elevação de aterros sobre solos moles além, claro, da estratégia do tratamento do solo de fundação, são fatores determinantes no planejamento que, invariavelmente consomem vários meses. Este tempo implica em custos que, considerando as exigências do cliente, em relação ao nível de qualidade do serviço, incluindo seu monitoramento, poderá ser significativo e chegar perto do custo da construção de uma obra de arte, que eliminaria o problema, desprezando a construção

dos aterros. Além disso, a persistência do quadro deformativo, após a construção do aterro, normalmente cria limitações para a subsequente manutenção da obra finalizada. O órgão deve ser informado sobre uma possível reserva financeira.

PARTICULARIDADES DOS ESTUDOS

A escolha da solução mais adequada, para a construção de aterros sobre solos moles, dependerá da geometria da estrutura e, também, das exigências do cliente em relação à qualidade do serviço, prazo de execução, custo dos estudos, da construção e da futura manutenção. Evidentemente, estas limitações devem ser acordadas com o órgão governamental e a empresa gerenciadora, além da construtora, antes do início dos estudos, de modo a orientar o projetista para a solução, que deve ser checada nas diversas etapas de preparo do projeto. Apesar dos avanços, na compreensão dos fenômenos e das técnicas construtivas, torna-se importante ter em mente que os estudos permitem, apenas, ter previsões incertas e a definição de estratégias executiva e de manutenção. As incertezas diminuem exponencialmente, à medida em que a solução caminha para a consolidação do solo de fundação, estabelecendo-se níveis de resistência e rigidez exigidos, com melhoramento do solo de fundação, utilizando-se o geoenrijecimento. As



Figura 3 – Elevação inconsequente de aterros sobre solos moles, anexo a uma rodovia federal, para sua duplicação. O resultado foram ruturas que tornaram o solo (mole) de fundação ainda menos resistente e mais complexo, além do afetamento da pista federal existente.

incertezas, relacionadas com as propriedades do solo, na fase de estudo, deixam de ser necessárias, já que no início dos serviços do geoenrijecimento, executam-se sondagens especiais com pressômetro e tomografia com imagem, que determinam os níveis de resistência e rigidez originais do solo. Durante a execução do melhoramento do solo, estes níveis são incrementados para as exigências de projeto, com fatores de segurança específicos. Ou seja, o solo é efetivamente modificado, tornando-se um solo composto, completamente diferente da sua condição inicial. Áreas e volumes de solos melhorados são certificados durante o desenvolvimento do serviço, através do método

observacional.

O MÉTODO OBSERVACIONAL

O método observacional é amplamente utilizado em obras geotécnicas sobre solos moles, especialmente na construção de aterros rodoviários, onde as incertezas relativas ao comportamento do solo de fundação, são elevadas e os parâmetros obtidos em laboratório, nem sempre representam fielmente a condição in situ. Combina projeto, instrumentação e acompanhamento sistemático, permitindo ajustar o melhoramento do solo, com base no seu comportamento



Figura 4 - Ruptura súbita de um trecho rodoviário, por perda da condição suporte, com colapso progressivo do pavimento e abertura de grandes fraturas longitudinais e transversais. O mecanismo é a erosão interna (piping), associada ao fluxo d'água subterrâneo, que removeu o solo suporte, sob a estrutura do pavimento, levando ao rompimento por flexão e cisalhamento das camadas asfálticas. É um caso de falha por recalque diferencial extremo, associada à presença de solo mole ou/ e mal compactado, com drenagem deficiente e possível nível freático elevado. O padrão geométrico das fraturas indica que o pavimento não rompeu por fadiga, mas por colapso estrutural do terreno de fundação, caracterizando falha geotécnica, não apenas estrutural, típico de obra executada sobre solo mole sem melhoramento prévio do solo mole de fundação.

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

CPR GROUTING

O CPR Grouting viabiliza.

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

real. Seu conceito básico origina-se em um projeto seguro, permitindo ajustes durante sua execução, conforme os dados medidos indicam a evolução do desempenho do solo. A filosofia central é medir-comparar – decidir, equiparando-se o comportamento observado com o previsto, tomando-se decisões corretivas, caso haja divergências. Suas etapas principais são:

a) Projeto inicial com as hipóteses de comportamento.

- Definem-se os parâmetros de compressibilidade, resistência e permeabilidade esperados.
- Simula-se cenários de recalques e estabilidade (via análises de adensamento e equilíbrio limite).
- Estabelecem-se limites aceitáveis: recalque máximo, velocidade de adensamento e o fator de segurança mínimo.

b) Instrumentação geotécnica.

Implantam-se instrumentos para monitorar o comportamento do solo durante seu melhoramento:

- Piezômetros para controle do excesso e dissipa-

ção das poropressões.

- Medidas de volume e pressão que medem o processo deformativo e tensional imposto ao solo.
- Inclínômetros que avaliam os deslocamentos laterais.

c) Avaliação e correção.

- As leituras instrumentais são comparadas aos parâmetros de resistência e rigidez predefinidos.
- Se houver discrepância significativa, reanalisa-se o modelo numérico e ajusta-se o método executivo.
- O objetivo é assegurar a estabilidade e eliminar o recalque diferencial.

Suas vantagens são a redução das incertezas, como a de soluções inespecíficas que ignoram a condição de resistência e rigidez necessária à obra. Um ajuste dinâmico do cronograma e das etapas, oferecem maior segurança contra recalques diferenciais, gerando um banco de dados real para futuras obras em solos semelhantes. Sua aplicação é típica para melhoramento de solos moles, procedendo-se o controle deformativo do solo e a condi-

ção da poropressão. Controla-se o avanço condicionado da dissipação de pelo menos 80–90% da poropressão, promovendo-se a instrumentação ativa e leituras diárias ou semanais. Em alguns casos, quando o solo não apresenta resposta adequada, executam-se novas verticais, com bulbos de compressão radial do solo, impondo mais resistência e rigidez.

Geralmente é irreal obter, em uma única etapa, conhecimento suficiente sobre o solo compressível dos trechos do terreno em questão, de modo a definir uma solução. Os estudos, como a campanha de investigação geotécnica e seus cálculos, devem ser adaptados a cada caso, e como seu custo é elevado, deve-se dispensar uma abordagem simplista que limite o custo do estudo. Assim, sugere-se as seguintes etapas:

- Análise dos objetivos definidos pelo órgão governamental;
- Definição dos problemas geotécnicos, como a delimitação da zona de solo compressível, os tipos de solo, a geometria das camadas sensíveis e a estimativa preliminar dos fenômenos;
- Possível adaptação dos objetivos pelo órgão;
- Análise de soluções possíveis;
- Definição das campanhas geotécnicas e sua execução;
- Quantificação dos fenômenos, definição da solução escolhida e os métodos executivos, com a estratégia para o edital da licitação; equipamentos de monitoramento e gerenciamento do projeto;
- Análise das medições realizadas durante a execução.

A análise do solo de fundação, quando há surgência de camadas de solos moles, leva mais tempo do que em estudos triviais. Primeiro, devido a necessária escalonagem para entendimento do assunto e, segundo, devido a

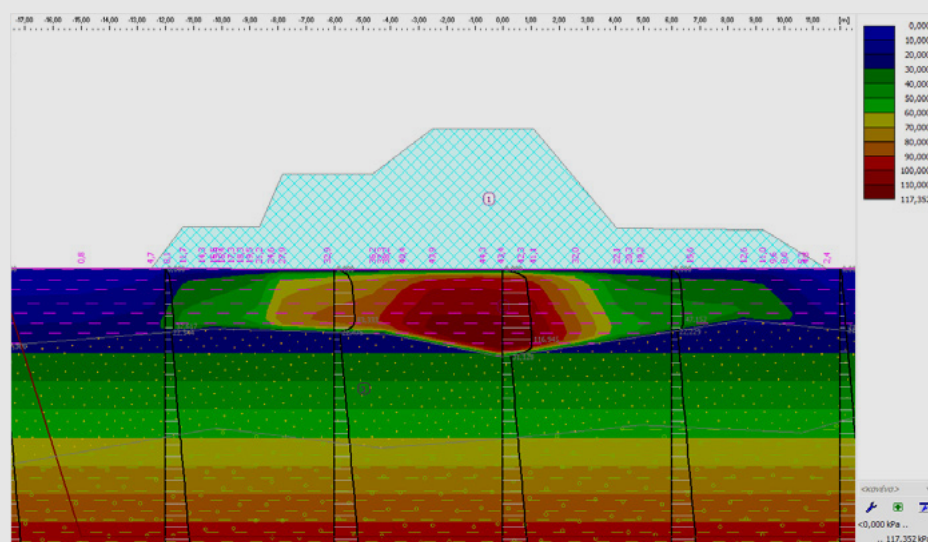


Figura 4 - O inconveniente das soluções alternativas/ paliativas com tratamento de solos moles com colunas de transferência que, apenas, desviam as cargas para camadas profundas, sem melhorar o solo mole. O maciço permanece fraco, deformável e sujeito a recalques diferenciais, mantendo o risco de instabilidade ao longo do tempo.



Aparelhos para Mecânica do Solo LTDA.



• SOLOS • ASFALTO & BETUME • CIMENTOS • CONCRETO & AGREGADOS
 • GEOLOGIA • AREIA, FUNDIÇÃO, METALOGRAFIA • AÇO & OUTROS METAIS
 • AGRICULTURA • GERAL DE LABORATÓRIOS
 • LABORATÓRIO DE CALIBRAÇÃO ACREDITADO À RBC

duração/ interpretação/ quantificação das sondagens realizadas. A complexidade dos estudos e os contatos a serem realizados, particularmente com a empresa de melhoramento de solos moles, além dos custos de soluções alternativas, exigem disponibilidade das informações geotécnicas, de modo a obter-se informações precisas sobre a eficiência desejada. Soluções alternativas (ou paliativas) pouco ou nada informam, acerca da eficiência do necessário processo de consolidação do solo argiloso mole a ser imposto, ou seja, a desejada resistência/rigidez do solo de fundação para receber o futuro aterro.

PARTICULARIDADES DOS ESTUDOS

Como já observamos, o tempo de execução é critério importante para a escolha das soluções. Modernamente, já não se utiliza a técnica de aterro de precarregamento, que acaba por consumir o tempo da obra, causando inconvenientes de segurança, de materiais e, no final das contas, sua eficiência contra recalques, particularmente os diferenciais, é extremamente baixa. Ou seja, é uma solução econômica, sim, mas no final das contas os resultados ficam longe do esperado. O gerenciamento da construção, de aterros sobre terreno com camadas de solo mole deve ser rigoroso, dispondo de procedimentos executivos precisos, ou seja, estamos falando do plano de garantia da qualidade dos serviços. A execução das atividades do tratamento do solo de fundação, não poderá gerar recalques diferenciais dentro da área de trabalho, devendo haver estudo executivo que garanta a não existência de colunas, seja de brita ou solo cimento (DSM), ou seja, método de “tratamento”, por transferência de cargas para camadas profundas, as chamadas técnicas alternativas, já que a permanência do solo mole ao redor de cada coluna, gera este tipo de deformação. A solução para o tratamento das camadas de solo argiloso mole, deverá ser sempre por meio do seu real melhoramento, com sua consoli-

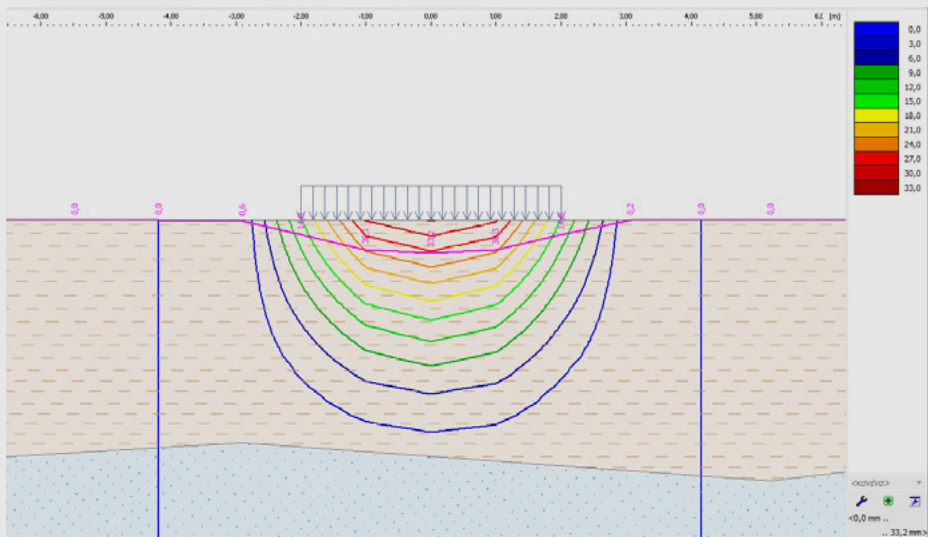


Figura 5 - Formação de uma bacia de recalques, sob uma carga de aterro executada sobre solos compressíveis. As isolinhas evidenciam que as deformações se propagam em profundidade e lateralmente, mobilizando um grande volume de solo, mesmo quando há camadas mais rígidas em níveis inferiores. Este comportamento demonstra que soluções simples, com transferência de carga, não eliminam o problema do recalque, pois o maciço mole, entre os elementos estruturais, continua deformando. O controle efetivo do recalque exige o aumento da rigidez do próprio solo, e não apenas a transferência de esforços.

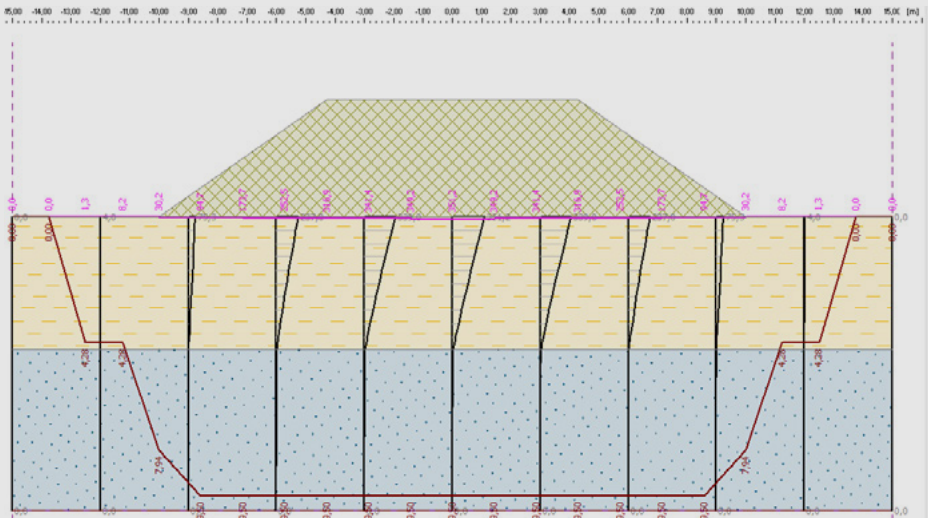


Figura 6 - Soluções alternativas/ paliativas à base de formação de colunas, para transferência de cargas para camadas resistentes profundas, como coluna de brita, Jet Grouting, DSM e estaqueamento ignoram, efetivamente, o solo mole ao redor. Este mecanismo gera um comportamento que lembra fundação mista, na qual parte da carga é rigidamente transferida pelas colunas e outra parte sobre o solo mole circundante, resultando em recalques elevados e diferenciais expressivos, além de patologias precoces e grandes custos de manutenção. O perfil mostra, claramente, duas camadas principais, a superior (amarela) é um solo arenoso/ siltoso mais competente e a inferior (azulada) é um solo mole compressível (argila mole orgânica muito mole). As colunas atravessam a camada muito mole, reduzindo parte do processo de recalque, melhorando um pouco a estabilidade global. O recalque máximo ocorre na região central do aterro, diminuindo gradualmente em direção às bordas, com valor máximo de 351mm.

dação efetiva, o que torna-o um solo composto, com parâmetros de resistência e rigidez adequados ao projeto. É a técnica do geoenrijecimento, com CPR Grouting. Infelizmente, é muito comum, ainda, a utilização de técnicas alternativas para o tratamento de solos argilosos moles, razão pela qual, nesta condição, torna-se sempre necessário equipar os trechos em obra com dispositivos de monitoramento, de modo a acompanhar seu desenvolvimento. As medições realizadas nos locais, com a realização destas técnicas, permitem a

tomada de decisão diretamente mas, é muito comum que as decisões, acerca da existência de recalques, dependam de análises complexas, com cálculos que somente especialistas em solos moles podem realizar. O gestor da obra, que acompanha os trabalhos do tratamento do solo mole, com técnicas alternativas, deve informar explicitamente ao cliente de que a estrutura deve continuar a ser monitorada, após a sua entrada em serviço, exatamente pelo fato de que já há processos deformativos em curso.

A Importância da Tensão de Pré-Adensamento (σ'_p).

A tensão de pré-adensamento, σ'_p , é o limite histórico do solo, ou a maior tensão efetiva que já suportou. Quando o carregamento de um aterro ultrapassa esse valor, o solo deixa de apenas reajustar sua estrutura, passando a colapsar volumetricamente, entrando na faixa da compressão virgem. Ou seja, ultrapassando σ'_p , ocorrem grandes recalques e risco geotécnico elevado. Por isso, conhecer σ'_p é decisivo no projeto de aterros sobre solos moles.

DETECTANDO E CARACTERIZANDO A PRESENÇA DE SOLO MOLE.

Em qualquer projeto rodoviário, a investigação geotécnica é realizada em paralelo com as fases do desenvolvimento do projeto, objetivando-se:

- Fornecer a gerenciadora da obra, informações oportunas sobre a limitação geotécnica, que possa influenciar a escolha da solução do tratamento do solo mole.
- Fornecer base para os cálculos necessários ao dimensionamento da futura obra.

Desta forma, a investigação fornecerá estudos para o alinhamento dos aterros rodoviários ou outras estruturas lineares (canais, ferrovias, etc.), além dos elementos para a tomada de decisão, quanto à escolha do melhor trajeto e, a seguir, seu alinhamento, permitindo a elaboração do plano de execução da obra. O princípio, geralmente aceito, é que a investigação de campo e do solo, devem ser realizadas progressivamente, aumentando-se a frequência de sondagens à medida que o projeto avança. Todos os tipos

de levantamento e ensaios devem ser realizados desde o início do estudo, como a amostragem do solo para sua identificação e ensaios de laboratório, ensaios mecânicos in situ e a realização de sondagem geofísica por ondas (tomografia com imagem). A identificação dos trechos com solo compressível, deve começar assim que for detectado durante a investigação geotécnica geral do local, envolvendo, necessariamente, ensaios extensos (como o ensaio de compressibilidade), e seus resultados têm um impacto decisivo no custo total do projeto.

Cc x Cs: Dois Mundos Diferentes de Compressibilidade

A curva e-log σ' revela dois regimes claros:

- Cs (recompressão): baixa deformação, estrutura preservada, recalques pequenos.
- Cc (compressão virgem): alta compressibilidade, grandes deformações e risco de ruptura.

A diferença entre Cs e Cc não é apenas numérica, é estrutural, já que no trecho Cc, o esqueleto do solo é destruído. Em resumo, sair de Cs para Cc é atravessar uma fronteira geotécnica crítica.

COMPORTAMENTO TÍPICO DOS SOLOS COMPRESSÍVEIS.

O reconhecimento específico dos trechos com solo compressível, justifica-se por suas particularidades, para os cálculos necessários para o dimensionamento da estrutura, para a justificativa de sua estabilidade e de suas deformações ao longo do tempo. Solos argilosos, orgânicos e siltes argilosos apresentam três características básicas:

- alta deformabilidade, função da carga aplicada e do tempo,
- baixa permeabilidade, que varia com a deformação do solo,
- resistência bem limitada que, geralmente, aumenta com a profundidade.

As informações, pertinentes a estes solos, encontra no livro “Melhoramento do solo mole e o geoenrijecimento”, podem ser posicionadas por 4 diretrizes:

1ª - Analisa-se a deformabilidade, utilizando um edômetro (ensaios de carga escalonada, e fluência) e por uma relação semilogarítmica, entre o índice de vazios e a tensão vertical efetiva, conforme figura abaixo:

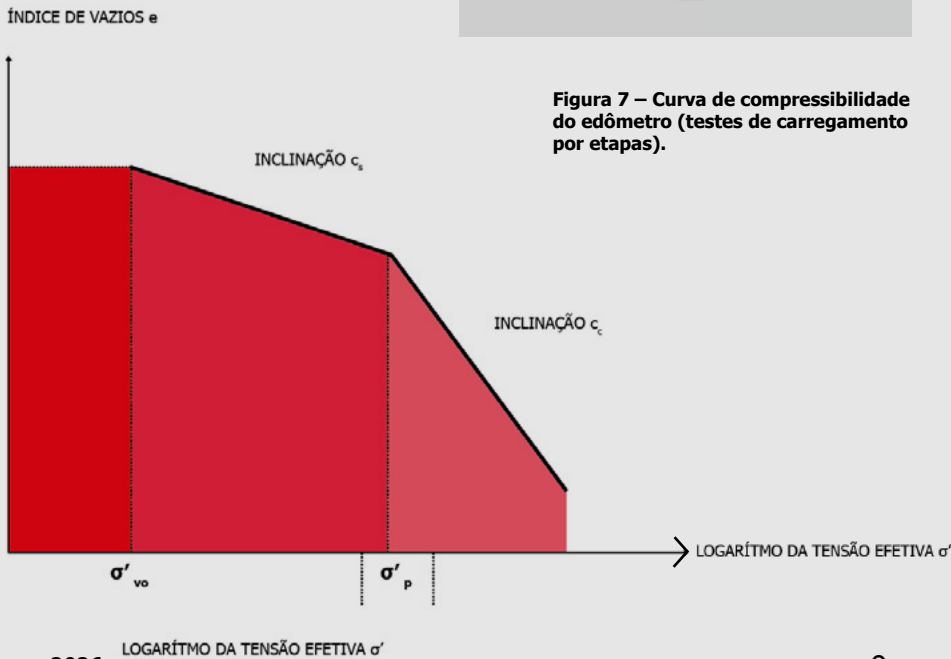


Figura 7 – Curva de compressibilidade do edômetro (testes de carregamento por etapas).

Epa! Solo mole.



Melhorar solos moles exige visão.

Não aceite solução paliativa para seu solo de fundação.
Exija melhoramento efetivo do solo. **Exija CPR Grouting.**

EXPLICAÇÃO PARA A CURVA E-LOG Σ' (CURVA DE COMPRESSIBILIDADE EDOMÉTRICA)

A curva de compressibilidade é obtida em ensaios edométricos, com carregamentos por estágios, base da Mecânica dos Solos moderna, referência tanto nas escolas francesas quanto nos métodos americanos (NAVFAC, FHWA, US Army Corps). A curva mostra a relação entre o índice de vazios do solo e a tensão efetiva vertical aplicada, σ' , no eixo horizontal, em escala logarítmica. Esta representação evidencia como o solo mole sofre redução expressiva de volume, quando ultrapassa-se sua tensão de pré-adensamento. A região inicial representa a recompressão, regime elástico-reativo. No trecho inicial da curva (inclinação c_c), a inclinação é suave, correspondendo ao trecho em que a tensão atual, σ' , é menor que a do pré-adensamento σ'_p . Nesta fase, o geotécnico menos atento pode achar que o terreno "está se comportando bem". Mas é apenas o prelúdio. O ponto de virada é o σ'_p , a fronteira invisível. A tensão de pré-adensamento σ'_p é o ponto de quebra da curva, sendo a verdadeira linha divisória entre a estabilidade e a deformação acelerada. É o limite histórico do solo, ou seja, a maior tensão efetiva que presenciou. Ultrapassá-la significa remover o "escoramento" que sustenta a estrutura interna do solo. A tensão atual é menor que a tensão de pré-adensamento σ'_p . O solo apresenta apenas reajustes na estrutura e pouca deformação permanente, fazendo com que o índice de vazios diminua lentamente. Nos métodos americanos, este trecho é chamado de recompression ou overconsolidated branch. O ponto crítico é a tensão de pré-adensamento σ'_p , representando a transição entre os comportamentos "suave" e o "fortemente compressível", reproduzindo a maior tensão efetiva que o solo experimentou no passado que, se ultrapassada, o solo colapsa e a compressão cresce fortemente. Já a região principal de compressão (compressão virgem) ocorre ultrapassando-se σ'_p . A partir daí, a curva apresenta inclinação acentuada, c_c , caracterizada por ser a compressão virgem, ocorrendo deformações volumétricas expressivas, redução intensa do índice de vazios e comportamento plástico, sem retorno elástico. Aqui está o perigo das obras realizadas sobre solos moles, onde pequenas variações de tensão, produzem grandes recalques. A curva, na realidade, evidencia 3 mensagens-chave:

- O solo mole apresenta baixa resistência antes de atingir o σ'_p
- Ao ultrapassar σ'_p , ocorre colapso estrutural e grande compressão
- Sem melhoramento efetivo do solo (geoenrijecimento), qualquer aterro ou fundação vai, inevitavelmente, entrar no trecho c_c , gerando enormes riscos de rutura.

Esta visão permite ao leitor compreender, de forma intuitiva, por que técnicas triviais ou inespecíficas ao solo mole, como construção por etapas, bermas laterais ou pré-carregamento tornam-se perigosamente limitadas. O aterro cresce, o solo não consegue responder e a curva c_c confirma o inevitável colapso volumétrico em andamento. Ou seja, a curva expõe a fragilidade do solo mole, de forma quase cirúrgica, evidenciando quando suporta pequenas alterações de tensões e quando, simplesmente, colapsa sob carregamento. Portanto, a curva e-log σ' não é apenas um gráfico de laboratório, é o DNA mecânico do solo mole, o indicador primário do risco de rutura sob o aterro e a prova científica definitiva de que a solução do melhoramento do solo, com sua reorganização ou modificação, com geoenrijecimento, transforma o problema na origem, elevando a resistência e a rigidez, simultaneamente, antes que a estrutura geotécnica seja solicitada. O entendimento deste gráfico permite ao geotécnico avaliar, com precisão e, principalmente, verificar se o projeto opera abaixo ou acima da fronteira crítica σ'_p .

PROPRIEDADES CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS COMPRESSÍVEIS

PROPRIEDADES	RIO DE JANEIRO		VALE DO ITAJAÍ	
TEOR DE UMIDADE (%)	50-200	150-600	100-250	55-20
ÍNDICE DE VAZIOS (e)	1,5-3,5	3-8	100-250	55-20
POROSIDADE (n)	0,55-0,80	0,70-0,92	0,70-0,92	0,60-0,x
COMPRESSIBILIDADE $C_c / (1+e_0)$	0,03-0,15	0,07-0,18	0,07-0,18	0,05-0,x
ÍNDICE DE FLUÊNCIA c_{ae}	0,01-0,03 c_c	0,02-0,04 c_c	0,02-0,04 c_c	0,01-0,0x
COEF. DE PERMEABILIDADE K(m/s)	10^{-8} a 10^{-9}	10^{-9} a 10^{-10}	10^{-9} a 10^{-10}	10^{-9} a 10^{-10}
COEF. DE CONSOLIDAÇÃO c_v (kPa)	3×10^{-8} – 10^{-7} (orgânicos)	10^{-9} a 7×10^{-9}	1×10^{-8} – 7^{-9}	10^{-9} a 10^{-10}
COESÃO NÃO DRENADO c_u (kPa)	20-50(mol.) 5-20(org.)	5-20	2×10^{-3} – 4×10^{-9}	15-25
TAXA DE VARIAÇÃO DO c_u	0,4-1,0	0,4-1,2	0,4-1,2	0,3-0,8
MASSA ESPECÍFICA SÊCA	1,0 – 1,4	1,0-1,3	1,-1,3	1,2-1,5

Tabela comparativa das propriedades características de solos moles do Rio de Janeiro e do Vale do Itajaí, SC.

Observações técnicas pertinentes à tabela ao lado.

Os solos muito moles da região de Boa Viagem – Recife apresentam estrutura altamente floclada, frequentemente associada a depósitos argilo-orgânicos recentes, com baixa tensão efetiva histórica. Os elevados valores do índice de vazios e do teor de umidade natural são características intrínsecas desses depósitos e explicam: a alta compressibilidade primária, a fluência secundária significativa, a baixa resistência não drenada e a elevada suscetibilidade a recalques.

* Importante esclarecer que:

Teor de umidade (w) é expresso em percentual (%), podendo assumir valores elevados (100% a 250%) em argilas orgânicas muito moles. Índice de vazios (e) é um parâmetro adimensional, com valores típicos entre 3 e 6 nesses solos. Porosidade (n) é uma fração volumétrica, normalmente variando entre 0,75 e 0,85, diretamente relacionada ao índice de vazios pela expressão:

n = 1 / (1 + e)

Portanto, valores elevados de w, e e n não representam inconsistências, mas sim refletem o estado estrutural extremamente solto e compressível dos solos moles de Recife.

A execução de ensaios pressiométricos ou penetrométricos, permite determinação rápida da ordem de grandeza da amplitude do recalque. Em locais onde é difícil, ou mesmo impossível, coletar amostras representativas indeformadas, para ensaios de laboratório, esses ensaios (sondagens) são essenciais para investigação.

COMPORTAMENTO CARACTERÍSTICO DO ATERRO SOBRE SOLO MOLE

As propriedades do solo compressível têm três consequências para o aterro:

- Sua estabilidade não é, automaticamente, garantida;
- Submete-se a recalque significativo e prolongado o que, às vezes, torna problemático a manutenção do seu nível, com pontos indeslocáveis;
- Sua construção perturba estruturas vizinhas, estabelecendo-se atrito negativo e forças horizontais em fun-

Tabela comparativa das propriedades características de solos moles do Rio de Janeiro e Recife, PE.

PROPRIEDADES CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS COMPRESSÍVEIS		
PROPRIEDADES	RIO DE JANEIRO	RECIFE
TEOR DE UMIDADE W (%)	50-200 (argilas moles) 150-600 (orgânicos)	100-250 (argilas muito moles e orgânicas)
ÍNDICE DE VAZIOS (e)	1,5-3,5 (moles) 3-8 (orgânicos)	3 a 6 (orgânicos)
POROSIDADE (n)	0,55-0,80	0,75-0,85
COMPRESSIBILIDADE C _c / (1+e ₀)	0,03-0,15	0,07-0,18
ÍNDICE DE FLUÊNCIA c _{ae}	0,01-0,03 cc	0,02-0,04c _c
COEF. DE PERMEABILIDADE K(m/s)	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁹ (moles) 10 ⁻⁶ a 10 ⁻⁸ (orgânicos)	10 ⁻⁹ a 10 ⁻¹⁰ (muito moles) 10 ⁻⁶ a 10 ⁻⁹ (orgânicos)
COEF. DE CONSOLIDAÇÃO c _u (m ² /s)	3x10 ⁻⁸ – 1x10 ⁻⁷ (moles) 5x10 ⁻⁸ – 2x10 ⁻⁷ (orgânicos)	1x10 ⁻⁸ – 7,0 ⁻⁸ (muito moles) 2x10 ⁻⁸ – 1x 10 ⁻⁷ (orgânicos)
COESÃO NÃO DRENADA c _u (kPa)	20-50 (moles) 5-20 (orgânicos)	5-20 (moles) 20-40 (moles sobreconsolidados localmente)
TAXA DE VARIAÇÃO DO C _u	0,4-1,0	0,4 – 1,2
MASSA ESPECÍFICA SÊCA (t/m ³)	1,0-1,4	1,0,4 – 1,3

dações profundas, recalque diferencial do aterro e em fundações diretas, além de tensões adicionais em muros de contenção.

O principal objetivo da investigação geotécnica, do cálculo durante o projeto e dos procedimentos de cons-

trução específicos é o controle desses fenômenos.

A ESTABILIDADE

Aterros executados sobre solos compressíveis apresentam duas formas de instabilidade, conforme figura abaixo:

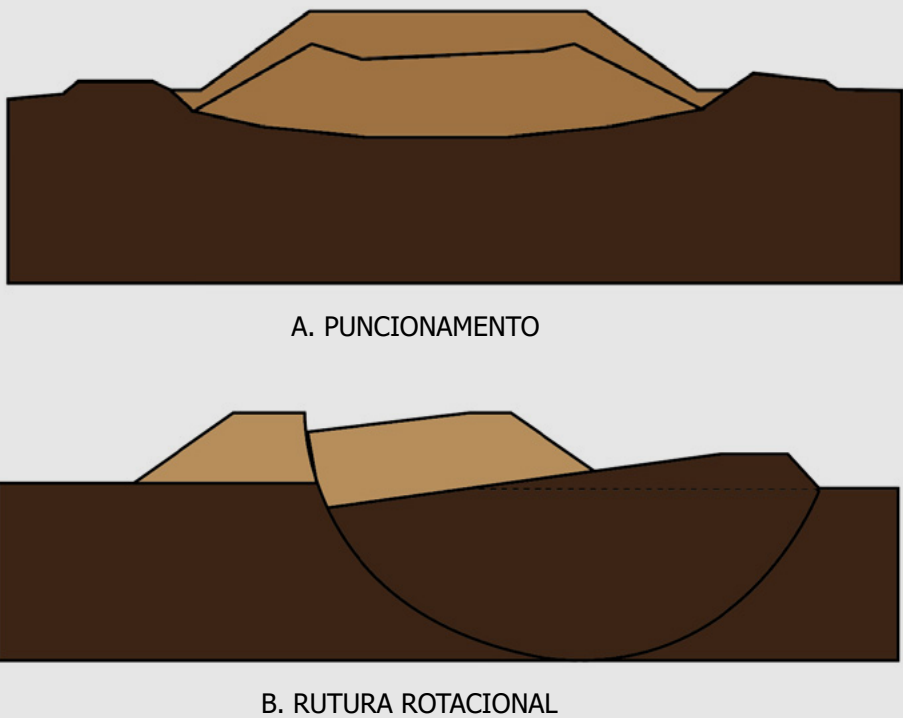


Figura 7 – Mecanismos de rutura de aterros sobre solos compressíveis.

Ou seja, promove-se a perda da capacidade de carga, devido ao cisalhamento, por punção, da camada de solo mole (todo o aterro afunda, empurrando o solo para ambos os lados). Este tipo de fragilidade ocor-

re em camadas de solo muito mole, a partir da superfície. Por outro lado, ocorre a instabilidade rotacional, de uma porção do aterro e o solo compressível, formando superfície de ruptura cilíndrica, com formação de um

alternativo ou paliativo, pode-se fazer a elevação, por etapas, baseada no aumento da resistência do solo ao longo do tempo, sob o aterro já construído, e a instalação de banquetas ou bermas laterais, para se opor ao cisalhamento por punção ou à ruptura rotacional. Trata-se de dois métodos comuns.

MÉTODOS PALIATIVOS OU ALTERNATIVOS PARA A CONSTRUÇÃO DE ATERROS SOBRE SOLOS MOLES. RISCOS E PREJUÍZOS.

Com a condição de solo mole ou muito mole, ou mesmo orgânico, onde o S_u é extremamente baixo e a razão peso próprio vs. Resistência ao cisalhamento é crítica, a adoção do antigo método de construção em etapas, com uso de bermas laterais, apresenta riscos significativos de ruturas do solo, mesmo quando aplicado com monitoramento rigoroso. A solução com aterro por etapas, depende de um “milagre geotécnico”, ca-

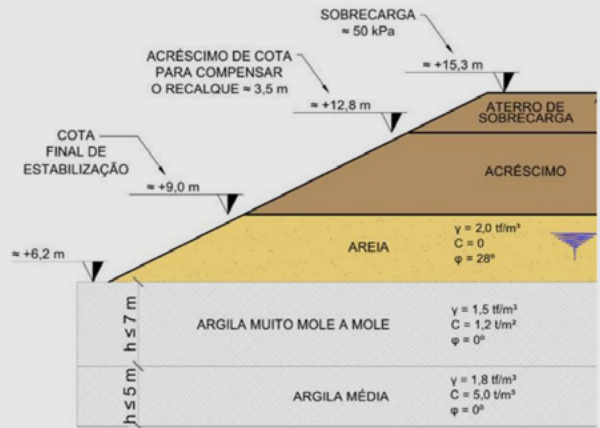


Figura 7 - Aterro construído sobre solo mole, com aplicação de sobrecarga temporária para acelerar a consolidação da argila e reduzir o recalque futuro. Ou seja, existe uma camada de argila muito mole (≈ 5 m) sobre uma argila média. Acima dela foi colocada uma camada de areia como base. O aterro final desejado é de +9,0 m. Para compensar o recalque previsto (≈3,5 m), o aterro foi elevado até +12,8 m. Além disso, foi aplicada uma sobrecarga adicional até +15,3 m, gerando ≈50 kPa extras. Esta sobrecarga será removida após a consolidação primária. O objetivo é forçar a drenagem da argila mole, aumentar sua resistência e evitar recalques após a obra. Em resumo, trata-se de um caso clássico de pré-carregamento, com sobrecarga temporária para estabilizar solo mole antes da utilização definitiva do aterro. Solução muito pouca efetiva quando há profundas camadas de solo mole. Grande possibilidade de rutura.

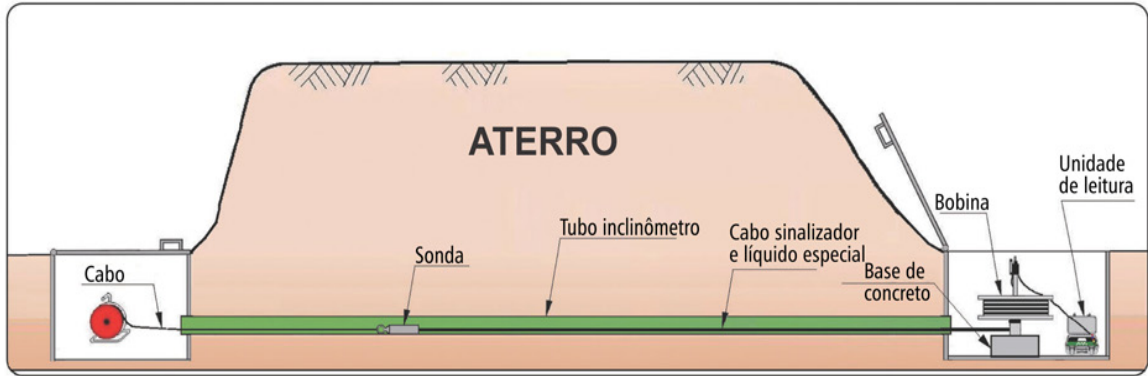
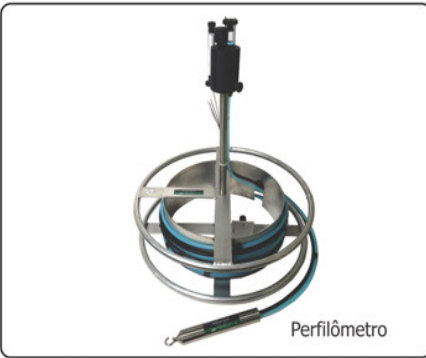
afundamento na superfície do aterro e uma protuberância na base ao lado. A maioria das ruturas é do tipo “rotacional”. Toda a instabilidade ocorre “em curto prazo”, durante a construção do aterro (ou quando escava-se junto à base do aterro). Para se avaliar a estabilidade de um aterro, sobre solo mole, torna-se necessário determinar a resistência do solo a curto prazo (coesão não drenada). A estabilidade efetiva, só pode ser obtida com o melhoramento do solo, com geoenrijecimento. De modo

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.



Instalação do Perfilômetro

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



racterizado pelo tempo. Baseia-se no pressuposto de que o solo ganhará resistência com o adensamento ao longo dos meses ou anos. Os problemas e riscos são diversos:

- Dependência total do tempo, ou seja, a velocidade do ganho da resistência pode ser muito menor do que o previsto, especialmente quando há presença de argilas orgânicas ou compressíveis extremas.
- Risco permanente de rutura rotacional, o seja, durante qualquer etapa intermediária, a relação altura/ tensão cisalhante pode ultrapassar o limite crítico, que leva à rutura súbita, fragilizando ainda mais o solo.
- Interrompe-se o sequenciamento da obra, que fica parada por longo período, sem qualquer produtividade.
- Imprevisibilidade, já que pequena variação da espessura da camada mole, torna os cálculos conservadores inviáveis e as etapas totalmente inseguras.
- Monitoramento intenso e caro, já que piezômetros, marcos superficiais, controladores de recalque, inclinômetros, ainda assim, não garantem segurança.
- Controle insuficiente sobre a evolução da poropressão, especialmente em solos sensíveis com permeabilidade mínima.
- Recalques diferenciais inevitáveis, mesmo quando ocorre adensamento parcial. A futura obra ficará, para sempre, comprometida. O solo mole continuará governando o comportamento, e a obra ficará nas mãos do acaso e do cronograma de drenagem natural.

A solução com banquetas e bermas laterais, ou seja, de “engordar o aterro” não resolve o problema, os motivos são diversos:

- A própria berma acrescenta carga ao solo mole, podendo provocar rutura antes mesmo de ajudar a estabilizar.
- Aumenta o peso total aplicado, agravando o problema fundamental.
- A área de influência profunda não é melhorada. O talude superficial fica mais estável, mas o plano crítico profundo continua governando.
- Ganha-se estabilidade superficial, mas perde-se estabilidade global.
- Enorme consumo de material, logística complicada e custo elevado, sem uma garantia efetiva.
- Dificuldades com restrições de faixa de domínio, já que bermas exigem muito espaço lateral, muitas vezes impossível em áreas urbanas, portuárias e vicinais.
- Não controla o recalque, apenas tenta evitar a rutura.

COMPORTAMENTO TÍPICO DO SOLO COMPRESSÍVEL

As normas de projeto, para aterros sobre solos moles (coeficiente de segurança global $F = 1,5$ na prática comum brasileira) permitem que as cargas suportadas, pelo solo, sejam limitadas a valores para os quais suas deformações (recalques e des-

locamentos horizontais) sejam finitas, mesmo que sejam significativas e possam durar por longos períodos. Em condição normal, o recalque ocorre em pequena escala, durante a construção do aterro, principalmente durante a fase da consolidação primária, e o restante durante a fase da compressão secundária ou fluência. O recalque imediato (durante a colocação de camadas sucessivas de aterro) geralmente desenvolve-se com um volume de solo constante, sendo acompanhado por deslocamentos horizontais de magnitude equivalente. O recalque, por consolidação primária, tende ao seu valor final seguindo uma lei exponencial. O recalque por compressão secundária aumenta logaritmicamente com o tempo. A poropressão persiste durante todo o processo de deformação do solo, inclusive durante a fase final da fluência. Este processo trifásico reinicia-se cada vez que uma nova carga é aplicada ao solo, principalmente quando o aterro é reabastecido para retornar ao seu nível teórico. O processo de “pré-carregamento” (aplicação de uma carga maior que o peso final do aterro) é uma das técnicas alternativas ou paliativas, utilizadas para tentar controlar este processo. A amplitude do recalque final é, geralmente, deduzida do ensaio de compressibilidade edométrica. O recalque total é, geralmente, de 10 a 20% maior que o recalque deduzido da curva de compressibilidade edométrica, o que

corresponde aos efeitos da fluência e dos movimentos horizontais do solo. Contudo, em solos muito heterogêneos, com camadas alternadas de areias e argilas, os ensaios realizados na parte mais argilosa dos testemunhos podem fornecer uma visão pessimista da deformabilidade e da permeabilidade do solo. Variações na poropressão do solo mole, sob aterros, acompanham o recalque por adensamento, permitindo monitorar o estado de tensões efetivas no solo e, portanto, sua resistência. Também pode ser utilizada para monitorar a estabilidade do aterro durante a construção. O recalque calculado, deve ser considerado na espessura total do aterro a ser construído, para que se atinja a especificação do projeto. Em particular, a estabilidade deve ser analisada considerando-se a espessura total do aterro, incluindo o recalque. Para o caso da construção de aterros em etapas, com recalque significativo em cada uma, a largura da plataforma do aterro em cada etapa, deverá ser considerada. Uma análise geométrica mostra que, para se obter a largura desejada do aterro, ao final da construção, cada etapa não deverá ser definida dividindo o perfil teórico do aterro em fatias horizontais mas, sim, aumentando a inclinação dos taludes ou construindo o aterro sobre uma área maior. Se esta precaução não for tomada, a plataforma final ficará muito estreita, precisando ser alargada, o que é difícil e dispendioso.

MOVIMENTOS HORIZONTAIS

A amplitude máxima dos deslocamentos horizontais, promovida pelo solo mole, sob aterros, geralmente representa 15% da amplitude do recalque. Estes deslocamentos mantêm a mesma forma, durante a fase de consolidação do solo mole, o que facilita sua previsão e controle por meio de medições com inclinômetro. A movimentação horizontal pode ser mais significativa, durante a construção do aterro (condição sem drenagem), podendo ser limitada pela melhoria da drenagem do solo. A movimentação horizontal do solo mole, sob aterros, é uma das principais causas de forças parasitas em estruturas adjacentes.

FORÇAS PARASITAS EM ESTRUTURAS VIZINHAS

O processo de recalque sob o aterro, cria forças de atrito negativo em estacas, localizadas dentro e fora de sua zona de influência, ou seja, fora da projeção do aterro. Além disso, a movimentação horizontal do solo mole, também promove forças hori-

zontais, em estacas nas proximidades da obra, devendo ser consideradas no projeto de fundações profundas, podendo ser limitadas, ou mesmo praticamente eliminadas, se o aterro for construído com antecedência suficiente. O melhoramento do solo, com geoenrijecimento, elimina este problema. Da mesma forma, a movimentação vertical e horizontal do solo mole, também pode produzir tensões adicionais em estruturas de contenção localizadas nas proximidades. Assim, a construção de aterros sobre solo mole, causa recalque na superfície do solo, até uma certa distância (dependendo da espessura do solo mole) além da base dos taludes do aterro que, geralmente, causam trincas em estruturas com fundação direta, na área de influência do aterro. Obras de duplicação de aterros, sobre solos moles, como pode se imaginar, passa a ser operação bem mais complexa, que deve ser cuidadosamente estudada. Veja edições anteriores de nossa revista.

REFERÊNCIAS

- Joaquim Rodrigues é engenheiro geotécnico M.Sc. Formado no Rio de Janeiro em 1977 e pós-graduado pela COPPE na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Diretor do Instituto Brasileiro do Solo Mole e da Engenraut Geotecnia e Engenharia, associada à ABMS e ao American Society of Civil Engineers desde 1994. Desenvolveu duas técnicas de melhoramento de solos moles, sendo motivo de patente o GEOENRIJECIMENTO, utilizada hoje em todo o Brasil.
- ÉTUDE ET RÉALISATION DES REMBLAIS SUR SOLS COMPRESSIBLES
- Remblais sur argiles molles. Leroueil S., Magnan J.-P., Tavenas F. - Paris: Technique et Documentation - Lavoisier, 342 pages. 1985.
- Remblais et fondations sur sols compressibles. Sous la direction de J.-P. Magnan - Paris: Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées - épuisé - nouvelle édition en 2001.
- Réalisation des remblais et des couches de forme - Guide technique. SETRA-LCPC - Sept. 1992.
- Indraratna, B., Sathananthan, I., Bamunawita, C. E Balasubramaniam, A.S. (2005), Theoretical and Numerical Perspectives and Field Observations for the Design and Performance Evaluation of Embankments Constructed on Soft Marine Clay, Ground Improvement - Case Histories, Elsevier, p 51 – 89.
- Janbu, N. (1963), Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests. In Proceedings of the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden, Vol. 1, pp. 19–25.
- Jewell, R.A. (1982), A limit equilibrium design method for reinforced embankments on soft foundations. In Proceedings of the 2nd International Conference on Geotextiles, Las Vegas, Vol. 4, pp. 671–676.
- Jewell, R.A. (1988), The mechanics of reinforced embankments on soft soil. Geotextiles and Geomembranes, p.237-273.
- Andrade, M. E. S. (2009), Contribuição ao estudo das argilas moles da cidade de Santos – Tese de mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- Barron, R.A. (1948), Consolidation of fine-grained soils by drain wells. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 113: 718–743.



Figura 7 - Ruptura estrutural do pavimento, por falha do subleito, com afundamento diferencial, trincas em bloco e cisalhamento longitudinal, padrão, típico da perda de suporte do solo abaixo do pavimento (solo mole, saturado ou erodido), excesso de deformação plástica, por tráfego sobre base instável e possível falta de drenagem, com bombeamento de finos. Portanto, não é um problema apenas do asfalto, é o colapso do solo de fundação, exigindo melhoramento do solo de fundação e não um simples recapeamento.

DO DIAGNÓSTICO À SOLUÇÃO. O TRATAMENTO MODERNO PARA ATERROS.



Figura 1 - Rompimento estrutural de pavimento rodoviário, por colapso do subleito, associado a alagamento/inundação. Observa-se fissuração generalizada em malha no asfalto, perda de suporte do subleito, rutura transversal com degrau estrutural, significando recalque diferencial brusco, invasão de água sobre a pista, com elevação do nível freático e/ou extravasamento lateral e desagregação das bordas, induzindo erosão interna (piping) e carreamento de finos. O diagnóstico geotécnico possível é a falha por saturação de solo mole ou arenoso mal drenado, com perda de resistência ao cisalhamento, levando ao colapso do pavimento. Pode envolver erosão regressiva, falha de bueiros/drenagem ou ruptura hidráulica do aterro. Em síntese, não é apenas dano superficial do pavimento, é a falha do maciço de fundação, exigindo intervenção geotécnica profunda (melhoramento do solo, drenagem e recomposição do aterro).

Construir aterros sobre solos moles, continua sendo um dos maiores desafios da engenharia geotécnica, principalmente pela sua frequência cada vez maior seja orgânicos e com baixíssima resistência ao cisalhamento. Sim, pelo fato de que soluções simplórias, como a elevação de aterros em etapas e pré-carregamento, onde a simples aplicação da carga, típica destes métodos tradicionais, frequentemente desencadeia mecanismos de rutura global, deformações laterais irreversíveis e recalques excessivos, que comprometem a estabilidade da obra geotécnica e a durabilidade da infraestrutura implantada. Historicamente, alternativas como a elevação de aterros em etapas, uso de bermas laterais e pré-carregamento com geodrenos, buscavam mitigar estes riscos, mas todas compartilham limitação fundamental, ao promover o aumento da resistência e da rigidez do solo mole, permanecem

do sujeitas às incertezas do comportamento geotécnico ao longo do tempo. Em obras modernas, com prazos reduzidos e maiores exigências de desempenho, estas soluções tornaram-se insuficientes e, em muitos casos, inseguras. Diante deste cenário, o melhoramento efetivo do solo mole, com a legítima consolidação da argila mole, baseada na compressão radial do solo, acompanhada de drenagem, seguindo-se um forte processo de confinamento de cada metro cúbico do solo, tem sido a abordagem definitiva para garantir a estabilidade, eliminando recalques e viabilizando o lançamento rápido de aterros de qualquer porte. Neste cenário, destaca-se, a quase 30 anos, o processo de geoenrijecimento com CPR Grouting, que redefine a forma como se trata o solo mole ao proporcionar, de maneira imediata, aumentos da resistência e da rigidez, estabelecendo homogeneidade no maciço do solo, eliminando os riscos inerentes aos métodos passivos de tratamento.

DESENVOLVENDO O PROJETO DE ATERRO SOBRE SOLOS MOLES

O levantamento necessário à elaboração do projeto é, geotécnicamente, dividido em três etapas, correspondente às fases do desenvolvimento do projeto. São eles:

- **Análise preliminar, que objetiva:**
 - Verificar a viabilidade da operação proposta.
 - Especificar limitações físicas, econômicas e ambientais que podem afetar o projeto.
 - Apresentar uma ou mais soluções técnicas, comparando-as em termos técnicos, tempo e, claro, custo.

- Os riscos associados ao projeto.
 - **A definição do projeto, que deve:**
 - Confirmar a viabilidade da solução escolhida.
 - Propor a localização da estrutura.
 - Propor detalhamento e cronograma do trabalho.
 - Estimar o custo projetado e as incertezas associadas.
 - Permitir que o cliente decida sobre a implementação do projeto, alocando os recursos necessários.
- A investigação geotécnica contribui para isso, permitindo o dimensionamento preliminar da estrutura.



Figura 2 - Rutura geotécnica por falha do subleito. As fraturas abertas e o deslocamento vertical observados na pista caracterizam rutura estrutural do pavimento, associada a recalque localizado do subleito, e não um simples defeito superficial do revestimento asfáltico. O padrão transversal da trinca, com abertura significativa e degrau vertical, indica perda súbita de capacidade suporte do solo de fundação, típica de regiões com solos moles saturados, erosão interna por deficiência de drenagem ou aterros executados sem melhoramento adequado. O colapso do pavimento, ocorre por flexão e cisalhamento da estrutura, após perda do confinamento inferior. Intervenções limitadas ao recalqueamento são ineficazes. A solução tecnicamente correta exige readequação profunda do maciço, com melhoria do solo, recomposição da drenagem e reconstituição estrutural da pista.

• **A finalização do projeto, objetivando-se:**

- Definir a especificação técnica geral e detalhada da estrutura.
- Elaborar um orçamento abrangente e detalhado.
- Preparar o processo de licitação para as construtoras. A investigação geotécnica especifica as propriedades do solo e a base para o projeto estrutural.

Esta divisão tradicional, em fases é particularmente importante para estudos geotécnicos em áreas com solos moles, onde o custo pode ser muito elevado. Cronologicamente, a investigação geotécnica inicia-se com a coleta de informações, já acessível a partir de mapas topográfico e geoló-

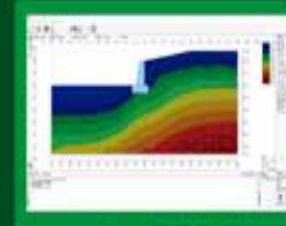
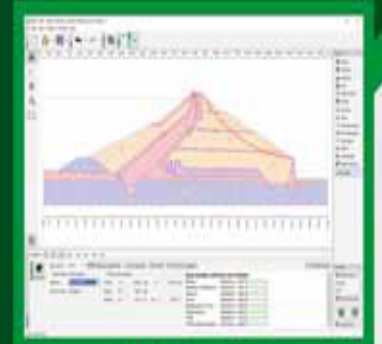
gico ou estudos geotécnicos anteriores. Este estudo preliminar, que culmina em relatório, identifica trechos de solos moles, registrando restrições em um mapa geotécnico da área em estudo. Nesta etapa, para o caso de um projeto de uma infraestrutura linear, pode-se escolher o corredor para possíveis rotas, e para o caso de um empreendimento logístico, pode posicionar sua divisão ou construção de forma otimizada. As duas fases subsequentes da investigação, utilizam os mesmos métodos e equipamentos de perfuração e ensaio, mas com menor densidade na investigação preliminar. Uma forma eficiente de organizar a investigação é dividir o percurso ou a área a ser estudada, em células elementares, cada uma contendo os mesmos ensaios e furos de sondagem, que devem ser localizados no eixo do percurso e em duas linhas com aproximadamente trinta a cinquenta metros de distancia entre si, em cada lado do eixo, para monitorar

qualquer variação lateral no solo e para poder tomar as medidas necessárias para o projeto. A densidade da investigação geotécnica não pode ser definida de forma independente da variabilidade do solo do trecho e do seu conhecimento prévio, devendo ser adaptada ao escopo do projeto e à influência dos dados geotécnicos (recalque, estabilidade) e suas incertezas no projeto e construção da estrutura. A investigação geotécnica do solo mole é, portanto, complexa, podendo ser otimizada. O bom senso deve guiar os detalhes práticos da investigação geotécnica, o que geralmente implica:

- Durante a visita ao trecho, devem ser selecionados os pontos de acesso mais práticos para os equipamentos de perfuração, o que pode afetar a regularidade da rede de investigação pré-planejada;
- As sondagens devem penetrar em toda a espessura da(s) camada(s) mole(e), e algumas devem ser continuadas até o substrato rochoso resistente subjacente, principalmente perto de estruturas existentes;
- A densidade de sondagens e ensaios será aumentada em áreas onde forem detectadas variações significativas na espessura ou na natureza do solo mole.

A tabela ao lado relaciona a extensão do trecho com solo mole, espaçamento entre sondagens e o numero aproximado de furos. O escopo detalhado da investigação geotécnica, objetivando-se obra de aterros sobre solos moles, deve ser determinado por empresa geotécnica experiente. O objetivo final é dividir o traçado ou a área a ser desenvolvida em unidades geotécnicamente homogêneas (espessuras de camadas constantes e propriedades físicas e mecânicas homogêneas dentro de cada camada), a fim de realizar cálculos de dimensionamento em cada uma dessas zonas. Os requisitos de ensaios e sondagens

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



AVALIE GRATUITAMENTE

Solicite: comercial@solucoescad.com.br

Distribuido por:

SOLUÇÕES CAD BIM

www.solucoescad.com.br

Are you looking for a soil improvement in portuguese?

BEST SELLER

MELHORAMENTO DO SOLO MOLE E O GEOENRIJECIMENTO

Conhecendo o Solo

Avaliando o melhoramento

A engenharia dos solos argilosos moles

A engenharia dos solos argilosos

O que é o melhoramento do solo

Melhoramento do solo com geoenrijecimento

Fundação superficial

A prática do georeforço

Todas as Informações Pertinentes as Propriedades e as Técnicas de Melhoramento de Solos Moles

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

podem variar dependendo das características do projeto.

A ESCOLHA DA SOLUÇÃO PARA O TRATAMENTO DO SOLO MOLE

A escolha da solução para tratamento do solo mole, necessário a receber aterro, dependerá de:

- Tempo disponível para a execução da obra,
- Extensão das deformações toleradas após a entrega da obra,
- Restrições ambientais pertinentes ao projeto (controle ambiental, sensibilidade a vibrações, proteção das águas subterrâneas, etc.),
- Limitação orçamentária.

As soluções existentes dividem-se em três grupos de técnicas, sendo o primeiro grupo o que inclui métodos construtivos diretamente relacionado ao aterro (construção por etapas, sobrecarga, etc.). O segundo grupo consiste nas técnicas alternativas, ou mesmo paliativas, que ignoram a presença do solo mole, promovendo colunas ou estacas para ultrapassá-lo, transferindo as cargas do aterro para camadas profundas resistentes. O terceiro grupo refere-se à readequação do solo mole, transformando seus fracos parâmetros geotécnicos de resistência e rigidez em valores pré-estabelecidos. A escolha da técnica mais adequada para um projeto específico exige o envolvimento de uma empresa especializada em geotecnia do solo mole, objetivando-se um diálogo entre:

- O especialista e o projetista,
- A gerenciadora e o cliente, considerando custos, cronograma, qualidade e confiabilidade. Objetiva-se revisar as áreas de aplicação das técnicas existentes

Situação típica do trecho	Extensão considerada do trecho com solo mole (m)	Espaçamento entre seções de sondagens (m)	Nº de furos por seção transversal*	Nº aproximado de furos de sondagem
Trecho curto, aterro até ~6 m de altura, baixo risco global	200	50	3 (eixo e pés de talude)	≈ 12 furos
Trecho médio, aterro entre ~6 e 10 m, risco moderado	500	40	3 (eixo e pés de talude)	≈ 36 furos
Trecho longo ou mais crítico, aterros altos (>10 m) sobre solos muito moles	1.000	30	3 a 4**	≈ 100 a 130 furos
Zona de transição (aterro/OBRA DE ARTE, mudança brusca de espessura de solo)	Faixa local de 50 a 100	25	4 a 5***	≈ 8 a 15 furos

3 furos, sendo um no eixo do aterro e um em cada pé de talude.
** Em trechos críticos, o 4º furo pode ser posicionado entre eixo e o pé de talude, para captar melhor a variação lateral da espessura do solo mole.
*** Em zonas de transição e encontros de obras de arte (apoios de viadutos, encontros de pontes etc.), recomenda-se adensar a malha (mais furos na mesma seção) porque pequenas variações da espessura do solo mole têm grande impacto na estabilidade e no recalque diferencial.



Figura 3 - Observa-se ruptura estrutural grave no bordo da pista, com fissuração longitudinal profunda, afundamento diferencial do pavimento e erosão intensa do talude lateral. O colapso do meio-fio e da contenção indica perda total de suporte do subleito, provavelmente causado por saturação do solo por falha de drenagem (infiltração contínua), erosão regressiva do talude, solo de baixa resistência ao cisalhamento (solo mole) e ausência ou ineficiência de proteção hidráulica lateral. O padrão das trincas e o rebaixamento da pista, caracterizam um mecanismo clássico de instabilização por recalque, associado à ruptura rotacional incipiente do talude, com evolução progressiva do dano. Ou seja, há risco crítico de colapso progressivo da pista, onde a interdição imediata é tecnicamente recomendável, exigindo estabilização do talude, drenagem profunda e melhoramento do solo de fundação.

de construção de aterros sobre solos moles, examinando critérios para a escolha, considerando as limitações do projeto e os tipos de estrutura envolvida.

AS TÉCNICAS DE TRATAMENTO DO SOLO MOLE

As técnicas genericamente utilizadas para a construção de aterros sobre solos compressíveis dividem-se em 3 grupos, conforme anteriormente apresentado. A tabela abaixo, apresenta a correlação entre esses objetivos e as técnicas, lembrando que objetiva-se garantir a estabilidade do solo e limitar a deformação do aterro aos valores impostos pelo projeto. A escolha da técnica de tratamento do solo é feita comparando-se o custo da solução que atenda a uma série de critérios como:

- Viabilidade da execução da obra,
- Impacto ambiental da obra,
- Tempo disponível,
- Satisfação dos requisitos de serviço da estrutura finalizada,
- Limitação geral comum a obras públicas.
- Impacto ambiental da obra,
- Tempo disponível,
- Satisfação dos requisitos de serviço da estrutura finalizada,
- Limitação geral comum a obras públicas.

Antes de escolher a solução, torna-se necessário garantir a disponibilidade no canteiro de obras e durante o período planejado, de todos os materiais e equipamentos necessários para sua execução. Assim, além do aspecto de confiabilidade, prazo e custos, a

disponibilidade dos insumos referente a cada uma das soluções, também é fator importante. A obra deve cumprir a norma vigente relativo a:

- proteção hídrica (manutenção dos cursos d'água naturais, proteção das águas subterrâneas e cursos d'água,

- etc.);
- Armazenamento de materiais não reutilizáveis (substituição de solo mole (turfoso ou contaminado) inadequado.

AÇÃO SOBRE O SOLO DE FUNDAÇÃO	ATERRO ESTAQUEADO									
	DEEP SOIL MIXING (DSM)									
AÇÃO SOBRE O ATERRO (MELHORAR O COMPORTAMENTO DO ATERRO AO INTERAGIR COM O SOLO MOLE)	COLUMNA DE BRITA									
	GEOENRIJECIMENTO COM CPR GROUTING									
AÇÃO SOBRE O ATERRO (MELHORAR O COMPORTAMENTO DO ATERRO AO INTERAGIR COM O SOLO MOLE)	DRENOS VERTICAIS									
	SUBSTITUIÇÃO									
AÇÃO SOBRE O ATERRO (MELHORAR O COMPORTAMENTO DO ATERRO AO INTERAGIR COM O SOLO MOLE)	ATERRO LEVE									
	PRÉ-CARREGAMENTO OU SOBRECARGA TEMPORÁRIA									
AÇÃO SOBRE O ATERRO (MELHORAR O COMPORTAMENTO DO ATERRO AO INTERAGIR COM O SOLO MOLE)	BANQUETAS LATERAIS									
	CONSTRUÇÃO POR ETAPAS									
MELHORAR A ESTABILIDADE	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
ANALISAR A REDUÇÃO DO RECALQUE										
AMENISAR DESLOCAMENTOS HORIZONTAIS	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
ACCELERAR O TEMPO PARA SE OBTEN MELHORIA NA CONSOLIDAÇÃO										
PROMOVER A CONSOLIDAÇÃO COMPLETA										
PARÂMETROS DE ESTABILIDADE E DEFORMABILIDADE 100% OBTIDOS										

Tabela 1 - Efeito das técnicas de tratamento do solo mole para a construção de aterros.

TÉCNICA DE TRATAMENTO DO SOLO	CUSTO	PRAZO	TECNOLOGIA	CONFIABILIDADE (PREVISÃO)
AÇÃO SOBRE O ATERRO				
CONSTRUÇÃO POR ETAPAS	•	•••	•	•
BANQUETAS LATERAIS	••	••	•	•
PRÉ-CARREGAMENTO	•	•••	•	•
ATERRO LEVE	•••	•	••	•
GEOSINTÉTICO	••	•	••	•
AÇÃO SOBRE O SOLO DE FUNDAÇÃO				
SUBSTITUIÇÃO DO SOLO MOLE	•••	•	•	••
DRENOS VERTICAIS	•	•	•	•
COLUMNAS DE BRITA	•••	••	•	•
ATERRO ESTAQUEADO	•••	••	•	•
GEOENRIJECIMENTO COM CPR GROUTING	••	•	•••	•••
DEEP SOIL MIXING (DSM)	•••	••	•	••

Tabela 2 - As vantagens, desvantagens e incertezas das diferentes técnicas.
Legenda: • - pequeno •• - médio ••• - grande
As classificações "pequeno •", "médio ••" e "grande •••" são aproximadas e não refletem necessariamente o valor relativo das técnicas para um determinado projeto.

PIEZÔMETRO AUTOCRAVÁVEL (PWP)

A série PWP de piezômetros de corda vibrante (autocraváveis) foi projetada para medir, com precisão, a poropressão em depósitos de solos moles. Suas características são:


- ROBUSTEZ
- PRECISÃO
- CONFIABILIDADE


Representante exclusivo no Brasil: 3GEO TECNOLOGIA LTDA
+55 21 2718 3968 / vendas@3geotecnologia.com / www.3geotecnologia.com


SOLOS MOLES

Todo solo de fundação exige condição geotécnica estável e precisa, o que se traduz em um investimento praticamente isento de riscos. A presença de solos moles, com valores de SPT inferiores a 5, implica em solução geotécnica que deve ser analisada, primeiramente, com relação a sua eficiência. Melhorar solos moles exige precisão e segurança. O melhoramento do solo mole com CPR Grouting, é a melhor resposta, promovendo segurança necessária no tempo desejado. Tudo isto com monitoramento geotécnico específico, através de análises piezométrica, pressiométrica e, principalmente, tomografica, com respostas antes, durante e depois dos serviços executados.



 geotecnia.engegraut.com.br

 @engegraut_geotecnia

 Engegraut - Engenharia Geotécnica



A movimentação de terra sobre solo compressível, frequentemente, encontra-se no caminho crítico da execução do projeto. Algumas técnicas exigem períodos de espera cuja previsão não é muito precisa (construção em fases, sobrecarga temporária, drenagem vertical, coluna de brita, DSM), e essa incerteza, que diminui durante o andamento da obra, deve ser levada em consideração na escolha da solução. Além disso, algumas das técnicas exigem intervenção, em uma data específica, em um ponto do trecho que deve ser acessível, o que pode interferir na organização geral do canteiro de obras e inviabilizar a escolha da solução. Um critério essencial para a escolha da solução do tratamento do solo mole, é que a estrutura concluída atenda às especificações de seus usuários, em termos dos recalques total e diferencial. O desempenho das diferentes soluções, deve ser comparado por meio de cálculos, durante a fase de desenvolvimento do projeto. Este trabalho exige a intervenção de um especialista. A alocação do custo total da estrutura final geotécnica, entre a construção e sua operação, pode variar de uma solução para outra. O custo para atender aos requisitos de serviço deve, portanto, ser avaliado somando-se os custos da construção e da manutenção. Assim como outros canteiros de obras de terraplenagem, o canteiro de uma obra de tratamento de solo, para receber aterros, está sujeito a restrições referentes a:

- tráfego de veículos,
- área ocupada pelo canteiro,
- remoção de água e material escavado,
- impacto de jazidas e estoques de material,
- presença de estruturas existentes que devem ser preservadas durante a construção. Certas soluções construtivas podem ser excluídas para atender a essa limitação.

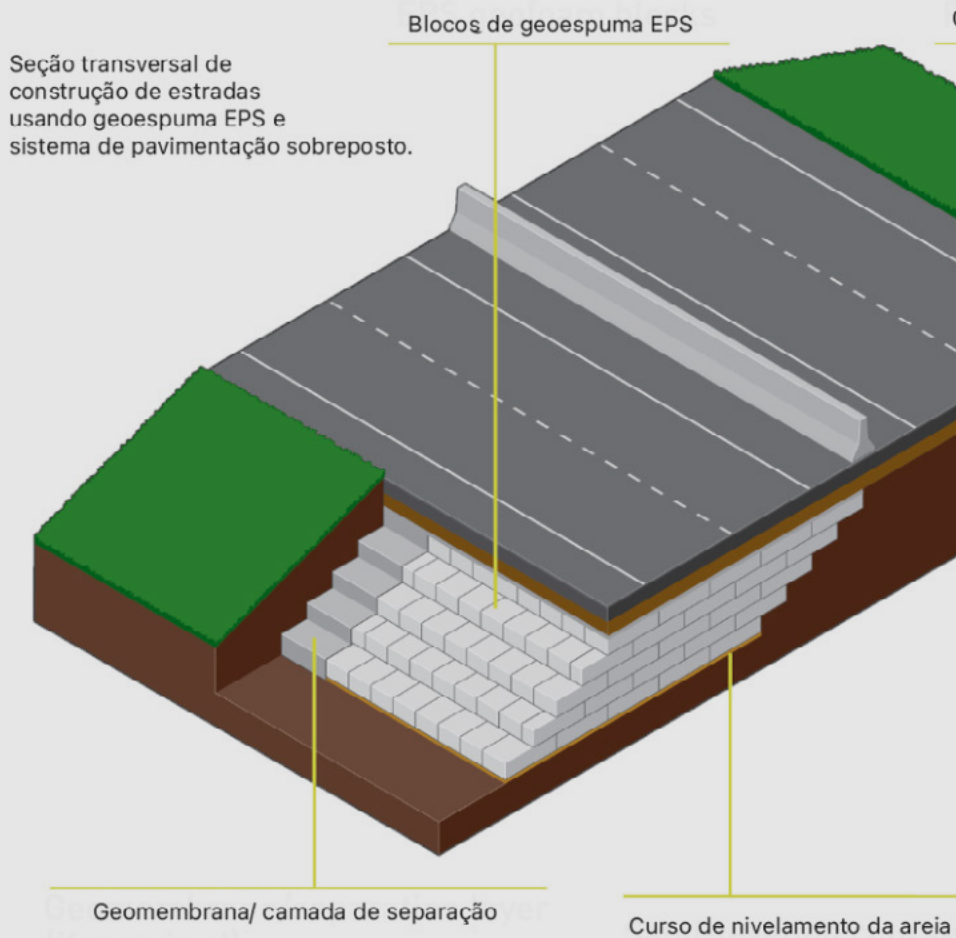


Figura 4 - Seção transversal, de via construída com blocos de EPS (poliestireno expandido), aplicados como material de alívio de carga sobre solo de baixa capacidade suporte. O sistema é composto, de baixo para cima, por subleito natural, subleito natural, geomembrana (camada de separação), blocos de EPS (material ultraleve estrutural), camada de nivelamento em areia e pavimento sobreposto (revestimento asfáltico). A função principal: substituir parte do solo ou do aterro por material extremamente leve, reduzindo drasticamente as tensões transmitidas ao subsolo mole, minimizando recalques e aumentando a estabilidade global da via. Trata-se de uma solução extremamente limitada, pois o EPS não melhora o solo, apenas reduz o carregamento. O comportamento deformacional do terreno permanece, dependente das propriedades do solo mole subjacente.

ESTRUTURAS LINEARES

O primeiro grupo de estruturas, que pode incluir aterros sobre solos compressíveis, é o de estradas e rodovias (e ferrovias), seja para trechos padrão ou trechos específicos, como acessos e travessias de passagens ou cursos d'água por meio de bueiros ou galerias de concreto armado.

TRECHOS RODOVIÁRIOS TÍPICOS

Todos os métodos construtivos relativos a aterros são possíveis. O uso de materiais leves (poliestireno, materiais celulares, etc.) é incomum devido ao seu custo e às medidas complementa-

res necessárias. Sua implementação é restrita a áreas específicas (por exemplo, aterros de acesso para uma estrutura). Entre as soluções, as mais comuns são a substituição total ou parcial da camada de solo compressível, a substituição total é limitada a 3 metros de espessura, o que pode eliminar todos os problemas de estabilidade e recalque. No caso de substituição parcial, o foco principal é lidar com a magnitude do recalque de adensamento e fluência, exatamente pelo fato de que frequentemente a profundidade das camadas de solos moles ultrapassa os três metros. A implementação de um sistema de drenagem vertical é frequentemente associada a detalhes construtivos relacionados ao corpo do aterro (construção em etapas, etc.). para se iniciar e finalizar

o processo adensamento, o CPR Grouting oferece solução eficaz em todos casos específicos, para os quais as demais soluções não são adequadas. Fica evidente, após a análise de todas as diretrizes apresentadas que a melhor solução para o tratamento de solo argiloso mole é por sua completa consolidação, o que é obtido com CPR Grouting.

ATERROS DE ACESSO

Os aterros de acesso, para qualquer estrutura, diferem das seções padrão, devido à significativa interação com o sistema de fundação existente e ao recalque diferencial. Além disso, o comprimento limitado dos aterros envolvidos, não permite o uso de soluções menos confiáveis. A interação do aterro de acesso com a fundação profunda, pode ser limitada pela construção do aterro, antes da fundação da estrutura (com ou sem medidas adicionais para acelerar a consolidação do solo compressível). Pelo aumento da estabilidade do aterro (uso de bermas laterais, substituição de solo inadequado, aterros leves, CPR Grouting). A séria questão, pertinente ao recalque diferencial, é induzir o máximo possível do recalque total previsto antes da conclusão da construção. Apenas uma solução que permite eliminar a amplitude do recalque

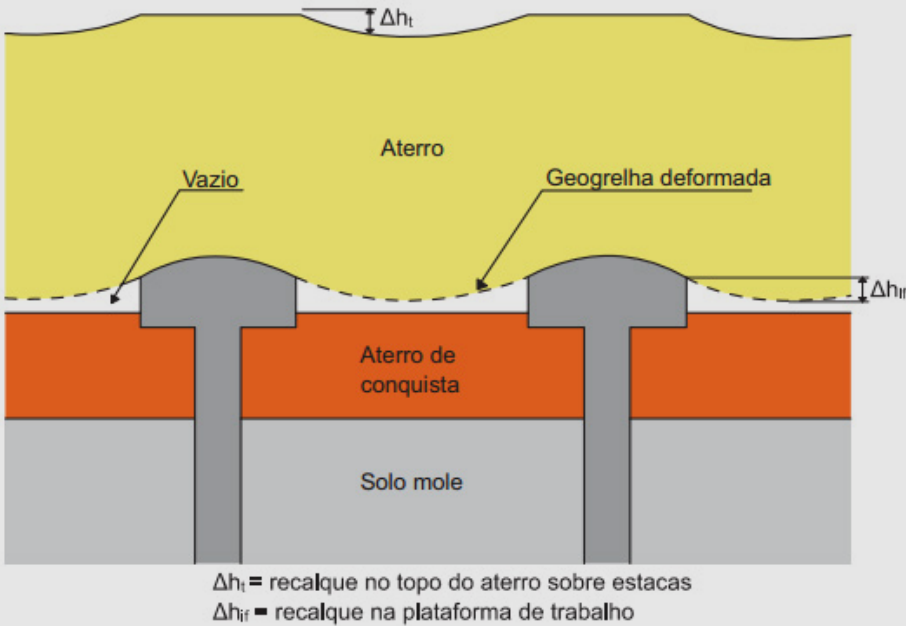


Figura 5 - Aterro estaqueado ou aterro construído sobre solo mole, apoiado parcialmente em estacas, com a presença de geogrelha na base do aterro, responsável por promover o efeito de arqueamento das tensões. As estacas transferem parte das cargas do aterro diretamente para camadas mais profundas. O solo mole, entre as estacas, sofre maiores deformações verticais. O arqueamento faz com que as tensões concentrem-se nas cabeças das estacas, reduzindo a carga transmitida ao solo mole. A geogrelha deformada atua como elemento de tração, redistribuindo esforços e limitando o recalque diferencial. Os termos indicados Δh_t é o recalque no topo do aterro sobre as estacas. Δh_r é o recalque na plataforma de trabalho.

total, com a aceleração do processo de recalque (Tabela 1) pode ser utilizada. A escolha entre essas soluções depende, na prática, da espessura do solo mole e do nível de qualidade exigido do recalque total e, particularmente, o diferencial, o que irá impactar a qualidade da obra futura. O comprimento de um aterro rodoviário, para que seja considerado como “aterro de acesso” a

uma estrutura dependerá das espessuras do aterro e do solo compressível. É comum definir esse comprimento como o dobro da distância vertical entre a superfície do aterro e a base do solo mole. A transição entre o “ponto rígido” (estrutura) e o aterro regular deve, portanto, ser garantida ao longo desse comprimento do aterro de acesso.

Medidor Portátil do Perfil de Recalques

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

Aplicações:

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

Instalação do medidor do perfil de recalques

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

Soft Soil Group



Figura 6 - Perigosa solução provisória, dependente da capacidade suporte do solo de fundação. Sem melhoramento do solo de fundação, o sistema permanece vulnerável a recalques excessivos, instabilidade do talude e perda de desempenho estrutural, ao longo do tempo. É, portanto, um aterro rodoviário lateral, implantado junto a uma área com solo natural muito pouco resistente, com vegetação preservada e uso de enrocamento/pedraplenagem na base, para “simular” estabilidade inicial. Na realidade, observa-se um talude construído com material grosseiro (rachão/brita graduada), atuando como camada de “reforço” e drenagem. Há ausência de estrutura de contenção rígida, indicando que a estabilidade depende essencialmente do peso próprio e do atrito interno do material. Evidentemente, já há presença de recalque diferencial e uma estabilidade global em andamento, já que há presença de solo mole subjacente. Aonde há a tela de tapume, é uma região crítica de transição, onde podem ocorrer trincas, deformações e perda de confinamento lateral. A inclinação (levantamento) da vegetação é, tecnicamente, um forte indício do início do movimento de massa, por ruptura progressiva, com indícios de empuxo Lateral induzido pelo aterro lançado, transmitido ao solo mole subjacente. Há sinais de cisalhamento incipiente na interface solo natural x faixa de influência do aterro, além de deformação lateral lenta (creep) antecedendo a ruptura global, com perda do confinamento lateral do maciço natural, fazendo a vegetação tombar no sentido do deslocamento. Em resumo, caracteriza-se uma fase pré-ruptura, ainda antes da formação de uma superfície de deslizamento bem definida, exatamente o estágio mais perigoso, porque a ruptura pode evoluir de forma súbita a partir deste ponto.



Figura 7 - Observa-se início de instabilidade no bordo externo da pista, com escavação recente e perda de confinamento lateral do maciço. O talude de corte, em solo aparentemente argiloso e parcialmente saturado, apresenta geometria desfavorável, com inclinação elevada e ausência de estrutura de contenção. A proximidade imediata da pista com o pé do talude instabilizado, associada à falta de drenagem superficial visível, indica risco real de ruptura progressiva, principalmente sob ação de chuvas. A sinalização de emergência reforça a condição de risco operacional, com possibilidade de recalque na borda da pista e perda de segurança viária. O mecanismo provável é a ruptura por cisalhamento rotacional superficial, induzida por desconfinamento, umidade e baixa resistência ao cisalhamento do solo.

ATERRO EM CONTATO COM A ÁGUA

Alguns aterros rodoviários ou ferroviários estão em contato com rios, canais ou lagos, seja de forma permanente ou intermitente, podendo servir como diques de contenção de água ou, apenas, serem circundados para aterros utilizados como diques. A escolha de um material impermeável ou impermeabilização superficial torna-se necessária. Do ponto de vista do método construtivo, em áreas de solo mole, não é aconselhável colocar uma camada de drenagem sob toda a largura do aterro (camadas de drenagem parciais são possíveis, desde que nunca se conectem) e usar sistemas de drenagem do solo de fundação que possam criar caminhos preferenciais de fluxo. Para aterros cercados por água, a utilização de materiais leves deve ser completamente eliminada, de modo a evitar os efeitos da flutuabilidade no corpo do aterro, em caso de submersão parcial ou total.

ATERROS SOBRE BUEIROS OU GALERIAS DE CONCRETO ARMADO

A presença de um espaço vazio dentro ou sob o aterro reduz a carga apli-

cada ao solo de fundação, considerando-se bueiros ou galerias de concreto armado. Recalques diferenciais ocorrem localmente e devem ser levados em consideração durante a fase de projeto. Além disso, como em toda a estrutura colocada sob um aterro, torna-se necessário controlar a interação entre a galeria ou o bueiro de concreto e o aterro (qualidade da compactação, recalques diferenciais e transferência de cargas). O recalque diferencial, da galeria ao longo de seu comprimento (transversalmente ao aterro), também deve ser considerado. Todas as soluções apresentadas são aplicáveis, mas a escolha e o seu dimensionamento deve ser confiado a uma empresa especializada em solos moles.

PLATAFORMAS INDUSTRIAIS E PORTUÁRIAS

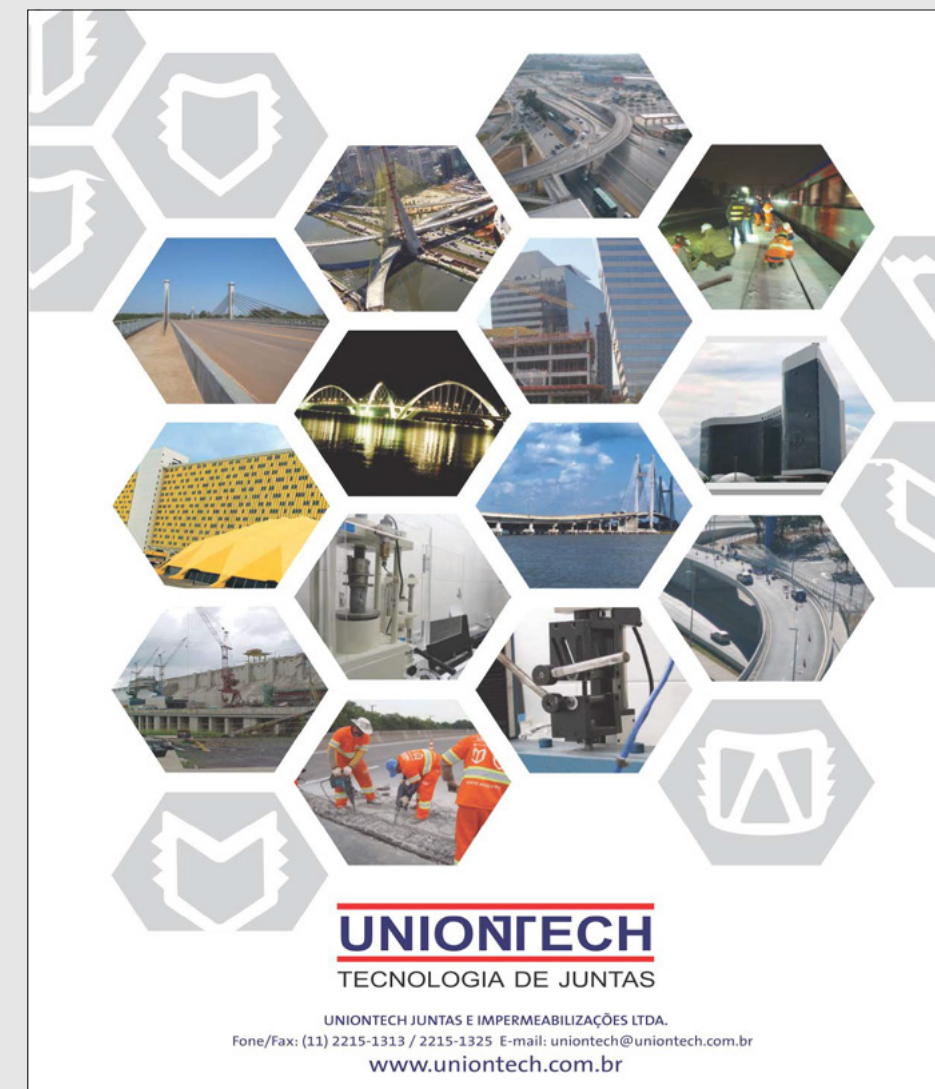
O segundo grupo de estruturas, que podem incluir aterros sobre solos moles é o de plataformas pertinente a um aterro, geralmente destinadas a empreendimentos urbanos, sejam comerciais, industriais ou portuários. Cargas localizadas significativas podem ser aplicadas a esses aterros (armazenamento de contêineres, rodovias, tanques de armazenamento de água ou combustíveis). As técnicas de preparação do solo mole mais comuns para este tipo de estrutura, são as mesmas das estruturas lineares, ou seja, construção faseada, com sobrecarga temporária quando o recalque precisa ser limitado após a entrega da obra, e com drenos verticais quando a consolidação do solo precisa ser acelerada. A substituição total ou parcial do solo compressível se for o caso, também pode ajudar a resolver localmente problemas de recalque ou estabilidade, particularmente em áreas de solos siltosos ou orgânicos pouco mole. A ausência total de recalques é pela total consolidação do solo mole, orgânico ou não, com a solução do CPR Grouting. Em edifícios industriais, o recalque posterior à entrega da obra, como o recalque

diferencial deve ser completamente eliminado com a total consolidação do solo mole, o que elimina qualquer deformação posterior. Para tanques de armazenamento, o aterro costuma ser fino e as cargas transmitidas relativamente baixas, mas a exigência operacional, em

relação ao recalque (médio e diferencial) costuma ser rigorosa, devendo-se ter cuidado especial no projeto e na execução da construção do aterro. Finalmente, o recalque deve ser considerado no projeto das conexões das tubulações entre os tanques e os elementos externos.

REFERÊNCIAS

- Patricia Karina Tinoco é engenheira geotécnica. Trabalha com melhoramento de solos moles.
- ÉTUDE ET RÉALISATION DES REMBLAIS SUR SOLS COMPRESSIBLES
- Remblais sur argiles molles. Leroueil S., Magnan J.-P., Tavenas F - Paris: Technique et Documentation - Lavoisier, 342 pages. 1985.
- Remblais et fondations sur sols compressibles. Sous la direction de J.-P. Magnan - Paris: Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées - épuisé - nouvelle édition en 2001.
- Réalisation des remblais et des couches de forme - Guide technique. SETRA-LCPC - Sept. 1992. ang: Boyang Xia; Haizuo Zhou. Settlement characteristics and evaluation approach of embankment widening over soft clay.
- Mayne, P.W., and Kulhawy, F.H. 1982. Ko - OCR Relationships in Soil. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 108(6): 851-872. American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/AJGEB6.0001306.
- El Kamash, W., and Han, J. 2014. Displacements of column-supported embankments over soft clay after widening considering soil consolidation and column layout: Numerical analysis. Soils and Foundations, 54(6): 1054-1069. doi:10.1016/j.sandf. 2014.11.002.
- Hansbo, S. (1979), Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricate Drains. Foundation Engineering, 12 (5), pp. 16-25.
- Batista, N. A. (2007), Influência da rigidez do reforço em aterros sobre solos moles – Tese de mestrado – Instituto de tecnologia da Aeronáutica – São José dos Campos.
- Bedeschi, M. V. R. (2004), Recalques em aterro instrumentado construído sobre depósito muito mole com drenos verticais na Barra da Tijuca, Tese de mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.



HÁ DIRETRIZES PARA ESCOLHER, JUSTIFICAR E EXECUTAR A PREPARAÇÃO DO SOLO PARA RECEBER ATERROS?

Figura 1 - Processo de rutura por instabilização associado à movimentação do maciço de solo por trás e por baixo da contenção em terra armada, com reflexos diretos no pavimento adjacente. Rutura súbita, promovendo deslocamento pavimento em direção à contenção, com perdas da capacidade suporte do solo de fundação. A construção, em terra armada, aparentemente ficou íntegra, indicando que o problema não ocorreu ali e sim no solo que o sustenta ou confina. A interpretação geotécnica mais provável é o recalque e a fluência de solo mole e do solo mal compactado atrás da contenção, possivelmente agravado por presença de nível freático elevado ou drenagem ineficiente, empuxos não adequadamente aliviados, execução sobre solo mole. A terra armada funciona como um elemento rígido, enquanto o solo de fundação sofre deformações, gera trincas, degraus e o colapso da obra. Faltou o melhoramento do solo para adequar as cargas ao solo original de fundação.

A crescente quantidade de obras rodoviárias e ferroviárias, executadas sobre solos moles, invariavelmente submete-se a problemas de recalques e deslocamentos laterais, com enormes prejuízos. Desde 2018, com o lançamento do estudo “melhoramento do solo mole e o geoenrijecimento”, introduziu-se três ideias centrais, objetivando-se corrigir este vício construtivo.

1. A gravidade dos problemas decorrentes dos solos compressíveis, especialmente em obras rodoviárias.
2. A necessidade de metodologia específica, porque soluções triviais falham diante das defor-

mações pós-construção.

3. A mudança de paradigma, colocando o estudo prévio do comportamento do solo mole, como etapa obrigatória para segurança e desempenho do aterro e da futura obra.

O preâmbulo deste estudo marca uma posição clara, ou seja, a construção de aterros sobre solos moles é uma das atividades geotécnicas da maior responsabilidade, exatamente porque o comportamento deformável desses solos desafia tanto a segurança quanto a durabilidade das obras de infraestrutura. Solos compressíveis são amplamente distribuídos em áreas de várzea, planícies aluviais e zonas encharcadas, onde a deformabilidade natural excede aquilo

que uma obra rodoviária típica é capaz de suportar, e que respondem de forma lenta, não linear e frequentemente imprevisível quando carregados por grandes aterros.

O risco histórico da abordagem simplificada

Durante décadas, muitos aterros foram executados com base em soluções empíricas, assumindo-se que o solo “eventualmente se acomodaria”. Essa postura resultou em enormes problemas:

- recalques diferenciais severos,
- danos precoces ao pavimento,
- rupturas globais ou por rotacionamento,
- intervenções corretivas custosas e recorrentes.

A experiência com solos moles, mostra o limite dessa abordagem, e que confiar na “tolerância do solo” é, na prática, aceitar um risco sistêmico.

A necessidade de prever o comportamento e não apenas reagir a ele

O ponto central deste estudo é a defesa para uma mudança de mentalidade, melhor dizendo, a obra não deve se adaptar ao solo depois do dano, deve ser preparado para receber a obra. Para isso, procura-se destacar três pilares principais.

- identificação dos mecanismos de compressão primária e secundária,



Figura 2 - Colapso total da plataforma da rodovia, em um trecho de transição sobre obra de arte, resultado típico de erosão interna (piping) e da lavagem do material de fundação. A saturação intensa do aterro, combinada com drenagem insuficiente, provoca a retirada progressiva do solo sob o pavimento, reduzindo a resistência ao cisalhamento até a ruptura súbita. O padrão do dano, com pavimento fraturado, guarda-corpos deslocados e exposição de solo argiloso mole, confirma a perda completa da condição suporte vertical e lateral, com instabilização hidráulica do maciço e abatimento imediato da pista. Esta ocorrência ilustra a vulnerabilidade de aterros não tratados, sobretudo quando não há melhoramento do solo, barreiras hidráulicas ou redundância de drenagem, reforçando a necessidade de soluções geotécnicas preventivas e monitoramento contínuo em regiões sujeitas a chuvas intensas.

- avaliação da permeabilidade,
- medições da resistência não drenada e anisotropias,
- definição das pressões admissíveis e ciclagens do carregamento.

- análises da estabilidade,
- e definição dos limites críticos da altura do aterro.

E, por último, Escolha criteriosa da solução, que deverá equilibrar:

- segurança do solo como fundação,
- controle do recalque,
- rapidez construtiva,
- custo de implantação,
- impacto ambiental.

Todas estas diretrizes iniciais tem como finalidade guiar a decisão técnica, fornecendo ao geotécnico, material para escolher, justificar e executar o método adequado para receber seu aterro sobre solos compressíveis. Não há uma solução universal, e sim um conjunto de abordagens que devem ser escolhidas, a partir do comportamento esperado do solo mole, com três direções:

- com técnicas que privilegiam o aterro,
- com técnicas que ignoram o solo mole e apoiam o carregamento

A previsão do recalque e da estabilidade, entendendo que não existe solução segura sem previsão numérica:

- modelos de adensamento,



Figura 3 - Aterro e talude em formação, com solo avermelhado (provavelmente solo residual laterítico), apoiado sobre um terreno natural sem evidências visíveis de preparo prévio adequado da fundação. Observa-se a ausência de preparo do subleito, não observando-se escavação do solo superficial, regularização, nem qualquer tratamento prévio do terreno natural, indicando que o aterro pode estar sendo lançado diretamente sobre solo de baixa rigidez, muitas vezes orgânico, coluvionar ou altamente deformável. Observa-se contato direto aterro-solo natural, sendo este contato direto um dos principais gatilhos para recalques totais elevados e diferenciais ao longo do eixo, com perda de desempenho do pavimento no curto e médio prazo. Observa-se um talude íngreme e solo ainda “solto”. O aspecto do talude indica solo recém-lançado, ainda sem ganho de resistência, o que aumenta o risco de instabilidade superficial, favorecendo erosão regressiva e surgimento de trincas de tração no coroamento. Ausência de sistemas de drenagem visíveis, não observando-se longitudinais, drenos de pé de talude ou colchão drenante, o que é crítico em solos finos e tropicais, altamente sensíveis à variação de umidade. A implicação é que sem a readequação do solo de fundação, este tipo de solução tende a apresentar recalques excessivos e não uniformes, necessidade precoce de manutenção, risco de instabilidade global do aterro, especialmente em períodos chuvosos, e perda de capacidade estrutural do pavimento. Dependendo da investigação geotécnica seria recomendável promover o melhoramento do solo de fundação com geonrijecimento.

- em profundidade,
- e com a técnica que readéqua o solo.

Visão norte americana e francesa sobre o aterro sobre solos moles. A evolução a partir dos anos 2000.

Nestes quase 30 anos de atividades, a engenharia geotécnica avançou enormemente no entendimento do soft soil. Na prática brasileira, especialmente nos estados do Rio de Janeiro, Pernambuco e Santa Catarina, com extensas áreas de turfas e argilas orgânicas, consolidou-se uma visão mais pragmática, orientada pelo desempenho e pelo controle ativo do risco. O primeiro conceito moderno é que o soft soils não é um obstáculo à construção e sim trata-se de um sistema exequível. Ou seja, o solo mole deixa de ser tratado como um problema para se evitar, passando a ser componente com comportamento previsível, quando corretamente caracterizado e melhorado. A experiência americana a partir dos anos 2000, baseia-se nas lições aprendidas em regiões críticas, incorporando **três cenários**:

1º CENÁRIO

Tem como fundo o Soft clay do Golfo do México, especificamente o Texas, Louisiana, Mississippi e o Alabama, com argilas muito moles, saturadas e com forte compressibilidade secundária. A concepção atual é a de nunca carregar o solo mole “nu”, sempre restabelecer a rigidez, a permeabilidade e a resistência antes do aterro, prevendo long-term settlements com abordagem probabilística.

2º CENÁRIO

Tem como fundo os siltes orgânicos, da Florida e da Georgia, com sistemas em brejos e banhados extremamente frágeis, tendo comportamento quase fibroso. A diretriz normativa norte americana estabelece que se o aterro induz deslocamentos horizontais, não controláveis, o solo deve ser melhorado efetivamente antes.

3º CENÁRIO

Tem como fundo as argilas moles do Noroeste, especificamente Washington, Oregon e o Minnesota, com baixa permeabilidade, e longos tempos de adensamento. A prática atual é que a obra deve considerar explicitamente a fase “50-year performance”.

A ruptura do paradigma clássico europeu

Enquanto a concepção francesa, a partir dos anos 2000 enfatizava o controle do adensamento ao longo da construção e pós-construção, a abordagem americana atual faz uma ruptura conceitual importante, onde a prioridade não é apenas controlar recalques, mas controlar deslocamentos horizontais. Mas, por que? Exatamente pela experiência do FHWA, que mostrou que a maior parte dos problemas graves, como a ruptura de taludes, desaprumo de estacas, deformação de obras vizinhas, decorre não do recalque vertical, mas do cisalhamento lateral, induzido pelo aterro, mesmo com baixas tensões atuando. Assim, para o meio técnico americano, o pré-carregamento raramente é suficiente quando há:

- estruturas vizinhas,
- tubulações sensíveis,
- tráfego em operação,
- risco de deslocamento lateral.



Figura 4 - ruptura progressiva do aterro rodoviário, associada à instabilidade do solo de fundação, observando-se trincas longitudinais e transversais no pavimento, indicando perda de suporte e deformações excessivas. Degráu e abatimento diferencial da pista, típico de recalque não uniforme. Ruptura do bordo externo do aterro, sugerindo cisalhamento do solo mole subjacente. Índícios de ação da água (infiltração e possível elevação de poropressão), reduzindo a resistência ao cisalhamento. O guarda-corpo acompanha a deformação, confirmando que não se trata apenas de falha superficial do revestimento, mas de falha global do maciço.

Esta filosofia é mais moderna e muito mais conservadora. A concepção atual do preambulo das normativas do Federal Highway Administration, FHWA, e do United States Army Corps of Engineers, USACE pode ser sintetizada em **quatro princípios fundamentais**:



O Soft soil não admite improviso, devendo-se analisá-los com:

- SPT com empresa reconhecida especializada.
- Tomografia com imagem (ondas) e pressimétrica.
- ensaios de laboratório,
- instrumentação prévia (piezômetros + inclinômetros) antes do aterro (se necessário).

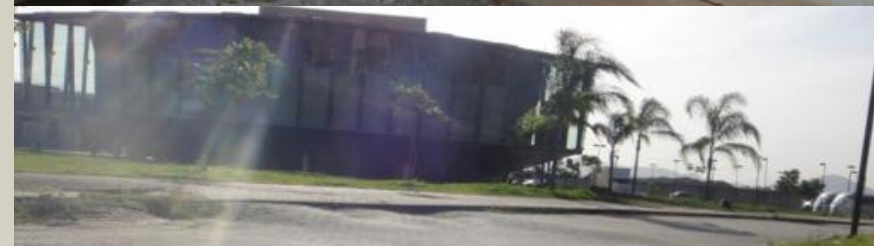


Figura 5 - Na sequência das 3 fotos acima, a manifestação observada de fraturamento nos elementos estruturais de concreto e o afundamento do pavimento, caracterizam um quadro típico de recalque diferencial, por deficiência de capacidade suporte do solo em um empreendimento tipicamente horizontal. O problema está associado à presença de solo compressível, aterro subsequente e drenagem superficial ineficiente, que aceleram o processo de perda de resistência. A consequência direta é a transferência das deformações do solo para a infraestrutura criada, gerando danos progressivos, perda de funcionalidade e risco à estabilidade. Em resumo, subestimou-se a complexidade do solo mole.

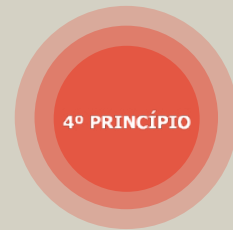


O solo deve ser preparado antes e não durante a obra. O FHWA renuncia a postura antiga do "vamos observar o comportamento do solo", introduzindo a atual orientação/ normatização do melhorar primeiro e elevar o aterro a seguir, com objetivo de não apenas cessar o processo de recalque, mas estabelecer o "Engineered Ground", elevando a qualidade das obras geotécnicas sobre solos moles.



O solo mole "melhorado" passa a ser um solo composto, cujo comportamento é redefinido com:

- alta rigidez inicial,
- baixo índice de vazios,
- grande ganho tensional,
- anisotropia extraordinariamente favorável,
- e resposta notavelmente previsível.



A solução deve ser compatível com vida útil ≥ 50 anos, observando-se que o foco é o desempenho de longo prazo, com níveis deformativos insignificantes. Os deslocamentos laterais residuais tornam-se inaceitáveis quando ultrapassam:

- 1% da altura do terreno (FHWA recomendação geral),

- 25–50 mm próximos a estruturas.

Por isso os americanos privilegiam o solo melhorado em vez de solo "esperado".

REFERÊNCIAS

- Remblais routiers sur sols compressibles - Étude et construction - G.Pilot, D. Chaput, D. Queyroi -1988 Diffusé par la Documentation française - Éditeur: Ministère de la coopération et du développement.
- Davis, E.H. and Booker, J.R. (1973). The effect of increasing strength with depth on the bearing capacity of clays. Geotechnique, Vol.23, No.4, 551-563
- Fuertes Ampero., M. V. (2012), Análise numérica e analítica de aterros reforçados sobre solos moles com uma camada superficial de areia, -- Tese demonstrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 173 p., 2012.
- Futai, M. M., (2010), Considerações sobre a Influência do adensamento secundário e do uso de reforços em aterros sobre solos moles, Tese de livre docência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Hansbo, S. (1979), Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricate Drains. Foundation Engineering, 12 (5), pp. 16-25.
- Biot, M. A., 1941, "General theory of three-dimensional consolidation". Journal of Applied Physics. Nr 12. pp. 155-164.
- Brinkgreve, R.B.J. Finite Element Code for Soil and Rock Analyses. PLAXIS - 2D user's manual. Rotterdam, Netherlands, Balkema, 2002.



Figura 6 - Pavimento rodoviário com deformação longitudinal, evidenciada pelo deslocamento e ondulação da faixa de sinalização no sentido do tráfego pesado (caminhões). Do ponto de vista geotécnico e estrutural, o quadro é típico de recalque diferencial progressivo, concentrado na trilha de roda. Baixa capacidade de suporte do subleito, frequentemente associada a solos moles ou solos mal compactados. Deformação permanente (rutting) do conjunto pavimento-fundação, e não apenas da camada asfáltica. Efeito cumulativo de cargas repetidas, especialmente de veículos pesados, acelerando a plastificação do solo subjacente. Portanto, o problema não é superficial. A simples restauração do revestimento asfáltico tende a falhar, pois a origem está na fundação do pavimento. O caso indica a necessidade de reavaliação geotécnica do subleito, eventual melhoramento de solo e só, então, a recomposição estrutural do pavimento. Esse tipo de manifestação é clássico em rodovias implantadas sobre solos compressíveis sem tratamento adequado.

SOLICITE SEU WEBINAR

E FIQUE POR DENTRO DE TODAS AS NOVIDADES DO MEIO GEOTÉCNICO

Conhecimento
Mantenha-se atualizado em relação às tecnologias de melhoramento de solos moles

Comodidade
Acesse a nossa plataforma de ensino à distância, em seu tablet, computador ou smartphone.

Feedback
Tire todas as dúvidas com profissionais do mercado, gratuitamente.

Solicite seu Webinar através do número (21)99359-9105
Para mais informações, acesse: softsoilgroup.com.br
Ou envie um e-mail para: atendimento@softsoilgroup.com.br

CHEGOU SUA
VEZ DE TER

VISÃO

MAIS PROFISSIONAL
DA GEOTECNIA
DO SOLO MOLE.

:: NOTÍCIAS EM TEMPO REAL;

:: ANÁLISES EM PROFUNDIDADES;

:: CONSENSO DE OPINIÕES SOBRE SOLUÇÕES;

:: GRÁFICOS E FERRAMENTAS ANALÍTICAS

Os principais dados e informações, antes disponíveis apenas por especialistas, agora estão abertos pra você também tomar as melhores decisões na hora de projetar e fazer negócios. Em um só lugar, um serviço completo com a chancela da instituição especialista em melhoramento de Solos moles, com quase 50 anos de experiência.



iBSM INSTITUTO
BRASILEIRO
DO SOLO MOLE

ACESSE [SOFTSOILBRAZILIANGROUP.COM](https://softsoilbraziliangroup.com) E ESCOLHA
A EDIÇÃO IDEAL PARA SUA PESQUISA.



LIMITAÇÕES DAS TÉCNICAS TRIVIAIS E A SOLUÇÃO SEGURA.



Figura 1 - Fundo de trecho, com drenagem natural, e deposição de profundas camadas de solo mole ao longo da BR-265, perto de Passos em Minas Gerais. Necessidade de melhoramento do solo para receber altos aterros.

A presença de solos moles continua sendo um dos maiores desafios para obras de infraestrutura no Brasil e no mundo. De rodovias à plataformas industriais, passando por pátios logísticos, portuários, ferroviários e obras urbanas, a combinação de baixos parâmetros de resistência, elevada compressibilidade e longos tempos de consolidação frequentemente, colocam em risco o desempenho e a segurança dos futuros aterros. Ao longo das últimas três décadas, diversas soluções vêm sendo aplicadas, algumas baseadas em ajustes geométricos do aterro, outras apoiadas em elementos estruturais, que ignoram o comportamento do solo mole e a técnica que promove sua readequação efetiva, através da modificação de suas propriedades geomecânicas. Procuramos apresentar, nesta matéria, uma análise crítica e comparativa

destes três grandes grupos de soluções, que compõe este universo geotécnico, com informações atualizadas baseadas no dia a dia que acontece em nossas estradas e nas do mundo, através de uma análise crítica e comparativa. O primeiro grupo reúne as técnicas tradicionais, que atuam principalmente no corpo do aterro, como bermas laterais, construção faseada e sobrecarga temporária. Embora amplamente difundidas, são métodos que dependem do tempo, apresentam comportamento imprevisível e, frequentemente, conduzem a riscos elevados de ruptura ao longo da execução. O segundo grupo inclui as alternativas que, simplesmente, contornam o problema, utilizando colunas, estacas ou inclusões rígidas como se o solo mole pudesse ser ignorado. São soluções que criam um apoio estrutural, sem intervir na causa fundamental do problema que é o comportamento extremamente deformável e compressível do subsolo. Por

fim, o terceiro grupo aborda a técnica, que representa a verdadeira evolução no tratamento do solo mole, com seu melhoramento efetivo, como tecnologia capaz de readequar o solo in situ, elevando sua resistência não drenada, sua rigidez e sua capacidade suporte por meio do mecanismo geotécnico da consolidação da argila mole. Esta solução, o geoenrijecimento com CPR Grouting, permite transformar o solo, inicialmente frágil, em um terreno capaz de receber aterros, cargas e obras pesadas com segurança, previsibilidade e ausência de recalque diferencial, já que atua em cada metro cúbico. Ao comparar esses três caminhos, evidencia-se que a maneira como se encara o solo mole determina o êxito da obra. Privilegiar apenas o aterro ou substituir o solo por elementos estruturais pode funcionar pontualmente mas, raramente, constitui a escolha ideal. A solução perfeita nasce quando o solo é compreendido, efetivamente melho-

rado para desempenhar sua função de suportar a infraestrutura com desempenho e segurança.

a execução e forte imprevisibilidade, já que o comportamento do solo mole permanece praticamente inalterado. A seguir, descrevem-se as principais alternativas deste grupo.

1º GRUPO

As soluções tradicionais para o tratamento de solos moles, frequentemente, concentram seus esforços no corpo do aterro, e não no solo de fundação. São métodos baseados em ajustes geométricos, aumento gradual de cargas ou sobrecargas provisórias, todos com um elemento comum, a dependência do tempo e da capacidade natural do solo mole de adensar e ganhar resistência. Embora amplamente utilizadas, estas técnicas apresentam limitações importantes, riscos elevados durante

A CONSTRUÇÃO POR ETAPAS

A construção por etapas é uma das soluções mais antigas e difundidas para tratamento de solos moles, visando a contenção de aterros. O conceito central é simples, limitando a altura do aterro em cada fase, permitindo que o solo mole desenvolva alguma resistência, ao longo do tempo, por adensamento e dissipação da poropressão. Somente após esta “recuperação” parcial da resistência, é que a etapa seguinte pode ser executada, atrelada a intenso monitoramento geotécnico. Embora

pareça conservadora, esta técnica possui limitações significativas:

- Longos prazos, dependentes do processo de consolidação do solo;
- Risco elevado, durante a execução, pois o ganho de resistência não é uniforme nem previsível, o que significa frequentes rupturas do solo, que torna-o menos resistente.
- Alto grau de incerteza, na previsão de quando a próxima etapa pode ser iniciada, agravado pelo quadro da existência de camadas de solos moles profundos.
- Possibilidade de ruptura progressiva, já que o fator de segurança é frequentemente mínimo ao início de cada fase.

Figura 2 - Análise piezométrica necessária a avaliação do solo após o melhoramento obtendo-se sua nova resistência e rigidez.



Assim, trata-se da solução que confia no complexo quadro de parâmetros geotécnicos do solo mole, sem efetivamente melhorá-lo.

SOBRECARGA TEMPORÁRIA / PRÉ-CARREGAMENTO

O pré-carregamento consiste em aplicar uma sobrecarga adicional ao aterro, acima da carga final de projeto, objetivando-se acelerar o adensamento, gerando recalque antecipado. Ao fim do processo, a sobrecarga é removida e, teoricamente, o solo estaria mais rígido e menos compressível. Na prática, porém, o método apresenta serias dificuldades, como a exigência de grandes volumes de solos, dificultando a logística da obra, o que se traduz em custos. Provoca deformações elevadas no solo, com alto risco de instabilidade global. Baseia-se em modelagens de adensamento repleto de incertezas, como os coeficientes de compressão, tempo de drenagem,

comportamento secundário, etc. frequentemente gera recalques residuais, mesmo após longos períodos de carregamento. Os exemplos estão em inúmeros trechos de rodovias federais, com presença de ondulações e distorções. Costuma paralisar o cronograma da obra durante meses ou anos. A utilização de drenos verticais reduz o tempo necessário, mas não elimina os riscos e as incertezas inerentes ao método, pois ainda é o solo mole que precisa “fazer o trabalho”.

BERMAS LATERAIS OU DE ESTABILIDADE, BANQUETAS

Bermas laterais são larguras adicionais ao aterro, dispostas lateralmente ao seu corpo principal, objetivando melhorar a estabilidade global, reduzindo tensões cisalhantes no contato aterro-solo mole. Sua eficiência restringe-se a aspectos geométricos, já que não aumentam a re-

sistência do solo mole, não reduzem sua compressibilidade, não controlam o recalque diferencial, apenas redistribuem os esforços, diminuindo o risco de rutura circular ou rotacional. Por depender unicamente da geometria e do peso próprio do aterro, as bermas tendem a produzir ocupação maior da faixa de domínio, custos elevados de terraplanagem e, principalmente, nenhuma intervenção real no solo mole. As técnicas deste grupo têm, em comum, o fato de agir sobre o aterro, e não sobre o solo mole, confiando no tempo, na dissipação da poropressão e em ajustes geométricos para evitar a ruptura, nada modificando os parâmetros de resistência e rigidez do solo, que permanecem frágeis e imprevisíveis. Em trechos críticos, próximos a estruturas existentes ou com prazos rígidos, esta solução tende a ser lenta, arriscada, e pouco confiável e, no final das contas, muito cara.



SENSORES DE RECALQUE



CÉLULAS DE PRESSÃO PARA ATERROS

GEO KON

TRUSTED MEASUREMENTS®

EQUIPAMENTOS GEOTÉCNICOS



CÉLULAS DE PRESSÃO CRAVÁVEIS NO TERRENO



PIEZÔMETROS

A Geokon é líder mundial em automação e instrumentação geotécnica para monitoramento de solos

REPRESENTANTE EXCLUSIVO NO BRASIL



G5 ENGENHARIA LTDA
TEL: (41) 3402-1707
G5ENGENHARIA.COM.BR

2º GRUPO

SOLUÇÕES COM COLUNAS E ESTACAS, QUE IGNORAM O SOLO MOLE, E FAZEM A TRANSFERÊNCIA DAS CARGAS PARA CAMADAS RESISTENTES PROFUNDAS.

Este segundo grupo reúne técnicas que, em vez de enfrentar o problema do solo mole, optam por contorná-lo estruturalmente. A premissa é simples, se o solo é mole, então basta atravessá-lo com colunas, estacas ou inclusões rígidas que se apoiem em camadas profundas mais resistentes. O aterro passa a ser, parcialmente, suportado por esses elementos estruturais, aliviando o solo mole das tensões diretas. Embora eficazes, em determinadas situações, essas soluções não promovem qualquer readaptação do solo mole, permanecendo compressível, sensível a deformações, com baixo módulo e suscetível

vel a recalques diferenciais entre colunas/ estacas. A seguir, apresentam-se as principais técnicas desse grupo.

COLUNAS DE BRITA

Colunas de brita são executadas por vibração ou compactação, criando colunas muito pouco rígidas, atravessando o solo mole, objetivando

aumentar a capacidade suporte para o aterro, por transferência de cargas, tentando diminuir o forte processo de recalque. Na realidade, colunas de brita trabalham, essencialmente, por efeito de arco com o aterro, o que significa que uma fração significativa da carga continua sendo transmitida ao solo mole. Para solos muito moles, com baixa resistência não drenada e alta plasticidade, seu desempenho é pouco significativo e o risco de colapso ou flambagem da coluna aumenta consideravelmente.

O ARQUEAMENTO DO ATERRO EM RELAÇÃO AO SISTEMA DE TRATAMENTO COM COLUNAS

Trata-se do mecanismo pelo qual o aterro, ao sofrer deformações diferenciais, transfere parte das tensões verticais para as colunas/ estacas. Esse fenômeno ocorre porque o solo granular compactado do aterro, apresenta coesão aparente, ângulo de atrito elevado e capacidade de redistribuir tensões, criando uma espécie de "ponte" de esforços entre as colunas. A consequência direta é que parte da carga do aterro deixa de atuar diretamente sobre o solo mole, sendo desviada para as colunas mais rígidas. O processo de arqueamento é progressivo, e ocorre à medida que as primeiras deformações diferenciais surgem, entre as colunas de brita e o solo mole, ocorrendo, primeiramente, uma etapa de deformação inicial, onde o aterro começa a deformar, recalando predominantemente entre as colunas que, por sua vez, recalcam menos, por serem pouco mais rígidos. Em uma segunda etapa, há formação das superfícies inclinadas de rutura, onde a diferença deformativa gera tensões inclinadas, geralmente com ângulo de

Figura 4 - Melhoramento do solo com cravação de geodrenos em um fundo de vale ao longo da BR-265, em Passos, Minas Gerais, para o posterior formação das verticais com os bulbos de grout para compressão radial do solo, adensando-o e confinando-o.



solotest.com.br

GERAL & LABORATÓRIO

45° + Ø/2, onde o Ø é o ângulo de atrito do solo do aterro. Em uma terceira etapa há o desenvolvimento de “pontos de tensões”, onde o solo granular passa a se apoiar lateralmente nas colunas, estabelecendo-se zonas arqueadas, que se redirecionam parte das cargas verticais para as colunas, semelhante a uma ponte de concreto que desvia as cargas para seus apoios laterais. Apartir daí, o arqueamento tende a se equilibrar, quando as deformações diferenciais tornam-se menores e as tensões se distribuem conforme a rigidez relativa entre aterro e colunas. Apartir daí, o aterro passa a carregar mais as colunas, esperando que pouco se deformem, reduzindo o carregamento sobre o solo mole. As consequências do arqueamento são a redução das tensões, que atuam no solo mole, entre as colunas. Percebe-se, portanto, que o arqueamento é motivo principal ou fundamental, pelo qual colunas de brita servem como “solução” como método de tratamento parcial, já que o solo mole deixa de receber, integralmente, o carregamento do aterro, recebendo apenas uma parte. As colunas, então, passam a receber uma proporção crescente do carregamento, sugerindo maiores tensões laterais e atração de cargas em direção as colunas. Com mecanismo tão complexo e frágil, costuma-se utilizar geogrelha para ajudar no processo de arqueamento, instalando-a na base do aterro, de modo a gerar membrana tensionada, provocando atenuar o recalque diferencial que se desenvolve. Observa-se, na prática que, mesmo com o arqueamento, há recalques entre colunas, que dependem fundamentalmente do espaçamento entre eles, diâmetro e a condição do solo mole. Ou seja, para solos muito moles haverá, certamente, maiores recalques, tornando o método pouco eficiente. Como interpretação geotécnica final, o arqueamento é a espinha dorsal do método, ou seja, não é a coluna isoladamente que suporta o aterro, é a interação coluna-aterro, por meio dele que redistribui as tensões impostas pelo aterro.

COLUNAS DE SOLO-CIMENTO (DEEP SOIL MIXING)

Colunas de solo cimento ou DSM, é uma mistura mecânica com equipamentos de grande porte e energia elevada, combinando o solo existente com cimento ou aglomerantes, objetivando criar colunas de material estabilizado, com elevada resistência, capazes de transferir parte do carregamento para camadas subjacentes mais firmes. Embora apresente controle tecnológico do material injetado no solo, as colunas formadas não interagem com o solo mole ao redor, gerando transições rígidas, propensas a recalques diferenciais. Portanto, a presença de solo mole, ao redor das colunas, gera problemas futuros.

JET GROUTING

A formação das colunas de Jet Grouting, utiliza jatos de alta pressão, para destruir e retrabalhar o solo, misturando-o com calda de cimento e formando colunas de solo-cimento de geometria variável, promovendo o solo mole ao redor, a semelhança do DSM. Ou seja, propõe-se atenuar o processo de recalque, no solo mole, formando colunas que se apoiam em camadas resistentes profundas, transferindo as cargas. Trata-se de solução cara, nada específica para tratamento de solos moles. As técnicas deste grupo têm um denominador comum, ou seja, não modificam o solo mole, criando estruturas profundas que des-

viam a carga para camadas resistentes, como se o solo mole não existisse. Trata-se, portanto, de soluções paliativas para tratamento de solos moles, sujeitas ao inconveniente problema do recalque.

ATERRO ESTAQUEADO

O aterro estaqueado, consiste em apoiar o aterro diretamente sobre estacas profundas, muitas vezes associadas a geogrelha, que redistribuem parte das cargas. O solo mole, ao redor, ignorado, funcionando apenas como meio envolvente, o que é crítico pois promoverá processos de recalque diferencial. Em relação as soluções as soluções anteriores, apresenta boa previsão do comportamento estrutural, já que são estacas propriamente e não colunas. Seus principais problemas, além do recalque inevitável, é o custo altíssimo, a elevada rigidez que gera transições críticas. Em resumo, é uma solução estrutural e não geotécnica.

3º GRUPO

O terceiro grupo de soluções, representa uma mudança definitiva na abordagem frente aos demais métodos de tratamento de solos moles. Em vez de tentar conviver com o solo mole (grupo 1) ou desviá-lo com colunas e estacas que transferem carga para camadas profundas (grupo 2), aqui busca-se readequar ou transformar o próprio solo mole em um meio resistente e rígido. A técnica que sintetiza este conceito é o Geoenrijecimento com CPR Grouting (Consolidação Profunda Radial), originalmente concebido para elevar a rigidez, a resistência não drenada e o módulo de deformabilidade do solo argiloso mole, por meio de um processo de compressão radial controlada, através da formação de bulbos de grout, via expansão de cavidades, que modifica o estado de



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



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

PLAXIS: Simulating Soil Lab Tests

www.bentley.com

Dear User,

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

The agenda for the one-hour session encompasses:

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

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

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

tensões do solo no entorno. Enquanto as técnicas triviais, com colunas (brita, DSM, jet) criam elementos verticais pouco ou mais resistentes, o CPR Grouting atua em cada metro cúbico do solo, formando um composto densificado e adensado, com comportamento mecânico superior. A consolidação radial, gerada por cada bulbo, modifica completamente estrutura do maciço, reduzindo o índice de vazios, aumentando a sucção efetiva local e produzindo melhora significativa nos parâmetros geotécnicos, sobretudo na rigidez (E_{so}), na resistência não drenada (S_u) e nas tensões efetivas horizontais (σ'_h). trata-se de uma solução, com mais de 30 anos de mercado, enquanto que as do grupo 2 com cerca de 40 anos. O geoenrijecimento, com CPR Grouting é uma solução especificamente delineada para solos argilosos moles, que não apenas considera sua presença, mas reformula seu comportamento. O resultado é um maciço capaz de sustentar aterros altos, eliminar recalques diferenciais, permitir obras próximas a estruturas sensíveis, produzindo níveis de desempenho que não seriam obtidos com pré-carregamento, etapas construtivas ou técnicas paliativas, como as do grupo 2. No livro “melhoramento do solo e o geoenrijecimento” é possível entender todos os tópicos pertinentes a solos argilosos moles e conhecer cada mecanismo de atuação do CPR Grouting, como a introdução de geodrenos, a expansão de cavidade, a formação dos bulbos de compressão, o ganho de resistência do solo composto, o aumento de rigidez e a estabilização/ indeformabilidade global obtida pelo processo.

MECANISMOS
GEOTÉCNICOS DO CPR
GROUTING

O CPR Grouting baseia-se na cravação inicial de geodrenos, em malha triangular específica, seguindo da execução sequencial verticais com a formação de bulbos de compressão, ao longo da profundidade, pelo bombeamento de geograut seco (85% areia, 10% saibro, 5% cimento) em meio inicialmente muito deformável.

O processo de bombeamento do geograut, para a formação de cada bulbo, é realizado com pressão e volume controlados, de acordo com os níveis de resistência e rigidez desejados, em cada metro cúbico do solo mole; produzindo o solo composto desejado. Seis mecanismos principais são a expansão de cavidade e o adensamento radial, onde cada bulbo atua como um pistão radial, comprimindo o solo ao redor. O efeito é imediato, com o aumento das tensões horizontais efetivas (σ'_h), modificando por completo o equilíbrio inicial do solo mole. Segue-se a redução drástica do índice de vazios, devido à expansão radial, que produz um adensamento forçado, simulando o efeito de pré-



Figura 5 - Execução de aterro de sobrecarga com compactação superficial por rolo pé-de-carneiro. Sobre solos compressíveis ou moles, a solução apresenta limitações importantes, como carregamento não controlado sobre solo mole, onde o aterro aumenta rapidamente as tensões verticais, podendo levar o solo mole a estados próximos ou acima da ruptura, sem ganho proporcional de resistência. Promove Recalques excessivos e de longa duração, já que a consolidação ocorre lentamente, gerando recalques totais elevados e, principalmente, recalques diferenciais, que comprometem o desempenho do pavimento. Promove risco de instabilidade global, pois o aumento da carga pode induzir rupturas por cisalhamento, escorregamentos laterais e deformações progressivas do aterro. Gera compactação apenas superficial, pois a ação do rolo é limitada às camadas superiores do aterro, não melhorando o solo mole subjacente, que permanece fraco e altamente deformável. Causa dependência de tempo e grandes volumes de material, já que a sobrecarga exige longos períodos de espera para dissipação de poropressões e grandes volumes de solo, impactando custo, prazo e logística. Em resumo, o aterro de sobrecarga atua como uma solução passiva, baseada apenas no peso adicional, com baixo controle geotécnico. Em solos moles, tende a gerar recalques elevados, instabilidade e incertezas de desempenho, tornando-se tecnicamente inferior a métodos de melhoramento ativo do solo, que aumentam resistência e rigidez do maciço tratado. O resultado são rodovias com altos e baixos, tornando-as perigosas.

-consolidação. Mas, diferentemente do pré-carregamento, a consolidação não depende do tempo e, sim, praticamente instantânea, gerada no momento da formação do bulbo de geograut, que faz o solo drenar para cerca de 6 a 8 geodrenos posicionados ao redor de cada bulbo. Forma-se, com esta estratégia, um maciço de solo composto extremamente adequado ao projeto especificado. Nada comparado à colunas de brita, DSM, Jet Grouting ou estaqueamento. O resultado é o aumento da rigidez (E_{60}), com a elevação das tensões efetivas, consequência do processo de consolidação imposto. Por outro lado, há o aumento da resistência não drenada, estabelecendo níveis de confinamento extremamente rígidos, com aumentos superiores a

500%. O processo de confinamento do solo comprimido e adensado é tão intenso que, de acordo com dezenas de obras instrumentadas, a compressão secundária deixa de existir. O processo de instrumentação também mostra os excessos de poropressão que ocorrem, seguindo-se a rápida e total dissipação, neutralizando qualquer surgência de recalque futuro. Alguns parâmetros geotécnicos beneficiados, pertinente ao rígido processo de melhoramento do solo imposto são os seguintes:

- Aumento do S_u (resistência não drenada)
- Aumento significativo do E_{so} (rigidez deformacional)
- Elevação de K_0 e σ'_h (estado de tensões horizontais)
- Aumento da pré-consolidação aparente (σ'_p)
- Eliminação da compressibilidade (mv)
- Eliminação dos recalques primário e secundário
- Homogeneização do módulo ao longo do volume de solo melhorado

Não se criam elementos verticais pouco ou muito resistentes mas, sim, impõe-se a missão do próprio solo suporte as cargas pre-estabelecidas, com fatores de segurança extremamente elevados. O solo mole deixa de ser o problema e passa a ser a própria solução. Abaixo uma planilha comparativa.

Critério	Colunas/Estacas (Grupo 2)	CPR Grouting (Grupo 3)
Atua no solo mole?	Não. By-pass.	Sim, transforma o solo.
Mecanismo principal	Transferência de carga	Compressão, consolidação e confinamento do solo.
Rigidez pós-tratamento	Limitada ao elemento	Elevada pelo maciço criado
Controle de recalques	Insuficiente	Muito elevado
Homogeneização do módulo	Bem baixa	Altíssima
Risco de ponta rígida	Significativo	Inexistente
Aplicação próxima a estruturas sensíveis	Limitada	Excelente
Custo/benefício	Baixo benefício técnico operacional	Elevado benefício técnico-operacional

REFERÊNCIAS

Roger Kim é engenheiro geotécnico especializado em melhoramento de solos moles.

Remblais et fondations sur sols compressibles. Sous la direction de J.-P. Magnan - Paris: Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées - épuisé - nouvelle édition en 2001.

Réalisation des remblais et des couches de forme - Guide technique. SETRA-LCPC - Sept. 1992.

Li, A.L and Rowe, R. K, (2001), Combined effects of reinforcement and prefabricated vertical drains on embankment performance Can. Geotech J38, 1266-1282.

Lima, B. T. (2007), Modelagem Numérica da Construção de Aterro Instrumentado na Baixa da Fluminense – Tese de mestrado – Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Magnan, J. P e Deroy, J. M. (1980), Analyse graphique des Tassement Observés Sons ler Ouvrager, Bull-Liaison Laboratoire des Ponts e Chausés, 109, set-out,Paris, pp 9-21.

Massad, F., (1999), Baixada Santista: Implicações da Historia Geológica no Projeto de Fundações. Conferencia Pacheco Silva, Solos e Rocha, vol. 22(1), 3-49.

Matar, M. and Salençon, L (1977), Capacité portante a une semelle filante sur sol purement coherent d'épaisseur limitée et de cohesion variable avec la profondeur, Annales de l'Institute Technique du Batiment et des Travaux Publics, Suplément n°352, serie: Sol et Fondations, Vol. 143, p 95-107.

Mesri, G. (1975), New Design Procedure for Stability of Soft Clays. Discussion, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 101, GT4:pp. 409 412.

Moraes, C. M. (2002), Aterros reforçados sobre solos moles – análise numérica e analítica - Tese de mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

Oliveira, H. M. Comportamento de aterros reforçados sobre solos moles levados á ruptura. 2006. 495p. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

Oliveira, H. M., Ehrlich, M., Almeida, M. S. S., Embankments over soft clay deposits: the contribution of basal reinforcement and surface sand layer to stability. ASCE, 260-240.

Palmeira, E. M. (1992), Manual de estabilização e reforço de aterros sobre solos moles utilizando geotêxteis, Convenio Rhodia-UNB n. 082.82058, Brasília, DF.



AMOSTRADOR PARA SOLOS TURFOSOS



Este é um dos kits para amostragem de solos turfosos.

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



O **Instituto Brasileiro do Solo Mole (IBSM)** te ajuda a entender sobre solos moles.

Melhorar solos moles exige conhecimentos geotécnicos práticos e teorias sofisticadas. Cada obra é um caso específico que exige solução diferenciada.



PARCEIROS



Bentley
Institute
Preferred Training Partner

SOLOTEST

GEOKON

TRUSTED MEASUREMENT.

SOLUÇÕES CAD BIM

AB
MS

Leica
Geosystems



TROGERTEC

ENGEGRAUT
ENGENHARIA ESTRUCTURAL

ROCTEST