

Soft Soil Brazilian Review[®]

REVISTA DO
INSTITUTO BRASILEIRO
DO SOLO MOLE.

IBSM

INSTITUTO
BRASILEIRO
DO SOLO MOLE

EDIÇÃO AMÉRICA LATINA
JULHO - AGOSTO 2025

- 3 O problema dos aterros com grande altura e a presença de solos moles.
- 14 Análise de estabilidade para um aterro a ser construído em uma ampliação rodoviária, com presença de solos moles.
- 30 A necessária estabilidade de um aterro, na margem do rio madeira, em Rondônia, que apresentava histórico de deslizamentos.

22 - Consulta

O aterro de grande altura e a necessidade da avaliação da capacidade suporte do solo com a presença de argilas moles.



Problemas Em **ATERROS** De Grande Altura?

Principalmente quando há solos moles?
Conheça **maneiras de resolver**.



PROGRAMA

3 O PROBLEMA DOS ATERROS COM GRANDE ALTURA E A PRESENÇA DE SOLOS MOLES.

14 ANÁLISE DE ESTABILIDADE PARA UM ATERRO A SER CONSTRUÍDO EM UMA AMPLIAÇÃO RODOVIÁRIA, COM PRESENÇA DE SOLOS MOLES.

22 - CONSULTA

O ATERRO DE GRANDE ALTURA E A NECESSIDADE DA AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE SUPORTE DO SOLO COM A PRESENÇA DE ARGILAS MOLES.

30 A ESTABILIDADE DE UM ATERRO NA MARGEM DO RIO MADEIRA, EM RONDÔNIA, QUE APRESENTAVA HISTÓRICO DE DESLIZAMENTOS.

EDITORIAL

A construção de aterros estradais, com grande altura, definidos com mais de 15 metros de elevação, em relação ao terreno natural, representa desafio significativo de acordo com os aspectos geotécnicos, estruturais e executivos. A magnitude das cargas impostas ao solo de fundação, os riscos de instabilidade global e local, e as exigências de desempenho funcional ao longo da vida útil da obra, exigem abordagem criteriosa de projeto e execução. A complexidade aumenta exponencialmente com a altura do aterro, especialmente em regiões com presença de solos moles, solos saturados ou condições hidrogeológicas desfavoráveis. Com este cenário, é necessário não apenas assegurar a estabilidade física da estrutura, mas também controlar os importantes processos de recalque, deslocamento lateral e poropressão. A escolha adequada dos materiais, a necessidade

quase obrigatória do melhoramento do solo com geoenrijecimento e não com colunas, onde faz-se transferência das cargas, para camadas mais profundas, além da instalação de instrumentação geotécnica para monitoramento em tempo real, são medidas indispensáveis para garantir a segurança e a funcionalidade da infraestrutura a ser construída. Esta abordagem torna-se ainda mais relevante, à crescente demanda por obras em áreas de topografia acidentada, zonas ribeirinhas ou regiões com restrições ambientais e operacionais, como na Amazônia ou no entorno de zonas urbanizadas. Deste modo, esta edição de nossa revista, propõe-se a discutir, de forma abrangente, os principais aspectos que regem o comportamento, dimensionamento, execução e controle de aterros estradais de grande porte, com ênfase em suas implicações e na boa prática da engenharia geotécnica.

Boa leitura.

SEÇÕES



ATERROS

Figura 1 – Melhoramento do solo de fundação, necessário à elevação de alto aterro, para construção de ponte sobre o rio preto, ao longo da BR - 356, em Ervália, MG.

Eng. M.Sc. Joaquim Rodrigues

O problema dos aterros com grande altura e a presença de solos moles.

Aterros com cerca de 15m de altura, apresentam particularidades técnicas que não são cobertas pelos regulamentos técnicos aplicáveis à terraplanagem rodoviária. Tornam-se mais críticos quando, ainda, houver camadas de solos moles em sua fundação. Seu processo deformativo costuma ser significativo, alterando-se ao longo do tempo, em razão de ser um maciço heterogêneo, formando estruturas transversais e longitudinais, normalmente realizadas com solos em evolução e sempre sujeitas à percolação d'água. Em um grande aterro, o recalque é ainda mais significativo quando a energia de compactação é baixa, comparando-se com a carga estática

das camadas subjacentes, evidência pouco fundamentada e quantificada na prática. O recalque diferencial no maciço do aterro pode, também, ser devido à variações no teor de umidade das camadas executadas ou a fenômenos de fluência. O peso do aterro causa, por si só, recalque significativo se a “sobreconsolidação”, estabelecida pelo processo de compactação, for menor que a carga aplicada. Aceita-se, de um modo geral, que a energia do proctor normal forneça uma “sobreconsolidação” equivalente a uma altura de 10mts de aterro, ou seja, uma tensão no solo semelhante a 200kpa, embora a avaliação da energia desenvolvida pelo ensaio do proctor normal corresponda, na realidade,

a 500kpa (Alonso,1990). Observa-se que o limite de 10 a 15mts é, precisamente, aquele além do qual mantém-se a qualificação de “grande aterro”, ao qual as normas nacionais não podem ser aplicadas diretamente. Observações de recalques, realizadas em grandes aterros construídos e monitorados posteriormente, confirmam que o recalque “imediato”, torna-se relativamente mais significativo a partir de um carregamento superior a 150 ou 200kpa, correlacionando-se, razoavelmente bem, com os obtidos no ensaio edométrico. Medições realizadas em processos de recalque diferencial (não previsível em ensaios convencionais), evidenciam que é da mesma ordem de grandeza que o recalque imediato, ao

longo do eixo da rodovia, podendo se estender por cerca de 4 anos, conforme figura ao lado, evidenciando que as deformações persistem, no mesmo local, alguns anos depois, tanto no talude quanto em sua crista, que apresentou amplitude significativamente maior (cerca de 50%) em relação ao eixo da rodovia. Ou seja, o processo do recalque reflete, necessariamente, um estado patológico do aterro, com direito à formação de fissuras de flexão ao longo de sua borda (ver edição 41 desta revista). Esta importante observação, nos obriga a ser vigilantes para o procedimento/ modo de compactação nas bordas do aterro, onde qualquer problema ou defeito constitui fator agravante para o perigoso e caro recalque diferencial, não se descartando a surgência de deformações cíclicas. A figura ao lado, apresenta o resultado do controle de recalque, efetuado ao longo da borda de um aterro com 12mts de altura, em uma rodovia construída 12 anos atrás. Além de uma amplitude relativamente importante, o gráfico ao lado também apresenta fenômeno de deformação cíclica, bem sincronizada com as estações do ano. O controle do recalque, efetuado no corpo do aterro, mostrou que sua amplitude reversível, ao longo de um ciclo, pode atingir 30mm, a uma profundidade de 2mts no talude e 10mm a uma profundidade de 4mts. Em certos locais observou-se, também, recalques significativos, associados à existência de solos muito úmidos, empregados durante sua construção, ou que se tornaram bem úmidos devido a percolação d'água mal controlada através de sua superfície, particularmente associado a má compactação, o que o tornou mais permeável. A estabilidade do solo compactado, em aterros, pode ser avaliada com base em sua geometria, conhecendo-se sua resistência cisalhante. Verifica-se que o ângulo de atrito, obtido no aterro, pode ser significativamente menor do que quando extraído do empréstimo, sendo que sua coesão depende do grau de saturação. O que se vê muito na prática de obra de aterros, é que as características mecânicas do solo argiloso empregado são, muitas vezes, deficientes, o que é agravado pela percolação d'água mal controlada.

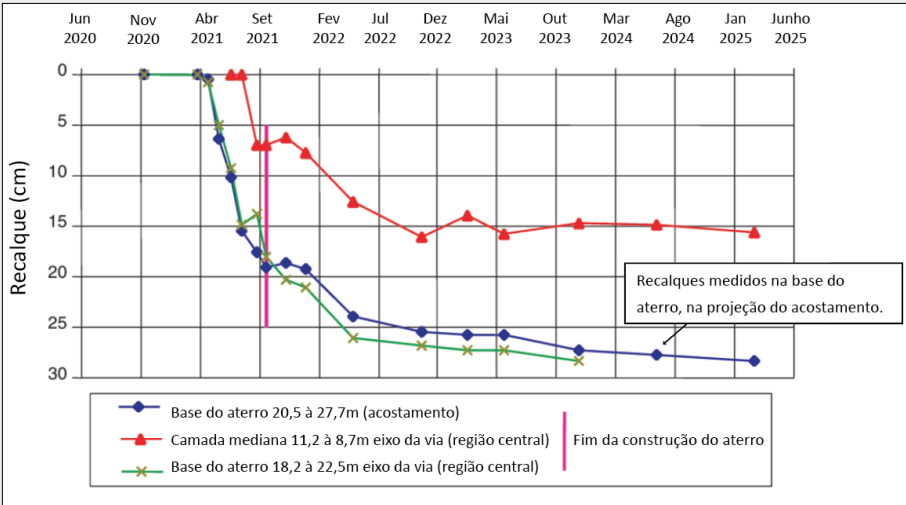


Figura 2 – Recalques por camadas, durante e após a construção de um aterro, em diferentes seções transversais.

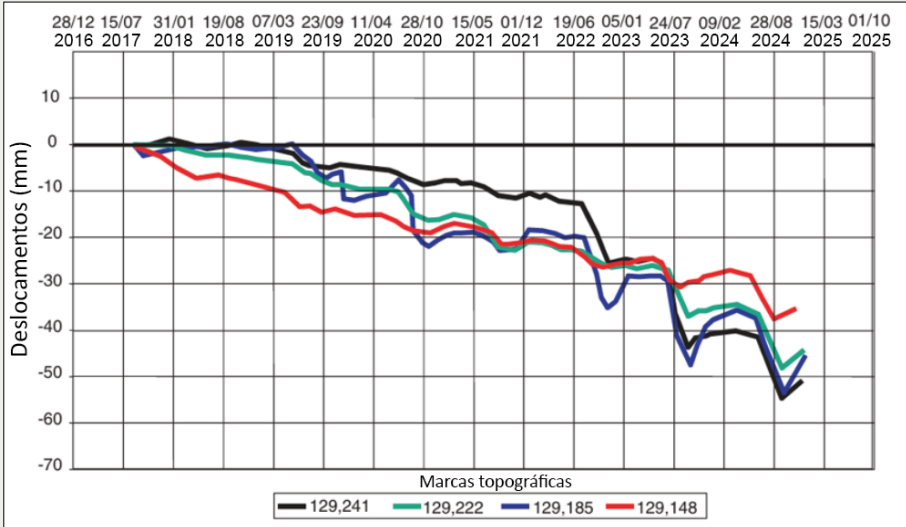


Figura 3 – Efeito das estações do ano sobre as medidas de recalque, em aterro com grande altura, notando-se flutuação anual tendo, as curvas, pequenas oscilações regulares, típicas de variações sazonais (seca, chuva) que influenciam a sucção matricial, a saturação e a rigidez do solo superficial. Fica evidente que o solo de fundação é heterogeneo e/ ou as cargas aplicadas.

As particularidades dos aterros

Aterros com cerca de 15mts de altura, deixam de ser apenas uma pilha de camadas de solo bem compactadas. Seu processo deformativo apresenta

alterações ao longo do tempo, particularmente quando há percolação d'água. Sua cadência executiva quase que, invariavelmente, excede a velocidade de controle da terraplanagem da obra e o fator manutenção deve ser muito bem considerado, o que é raro.

NORMAS BRASILEIRAS PARA ATERROS

As normas brasileiras que regem a construção de aterros, materiais utilizados e os critérios de compactação do solo estão principalmente concentrados em normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Abaixo estão as principais referências e seus pontos-chave:

1. NBR 6122:2023 – Projeto de Fundações

- Aponta os critérios geotécnicos para fundações e pode influenciar os requisitos de aterros em áreas de fundação, especialmente quanto à caracterização e melhoria de solos de apoio.

2. NBR 7180 – Determinação da massa específica in situ (método do frasco de areia)

SOLO MOLE NO SEU PROJETO?

NÃO TRABALHE COM TÉCNICAS ALTERNATIVAS OU ADAPTADAS

FAÇA MELHORAMENTO DE SOLO

MELHORAMENTO DE SOLOS MOLES É
GEOENRIJECIMENTO*

*100% TEORIA DO ADENSAMENTO DA ARGILA

facebook.com/engegraut

@engegraut

www.engegraut.com.br

VISITE NOSSO SITE: WWW.ENGEGRAUT.COM.BR

NORMAS BRASILEIRAS PARA ATERROS

- Usada para verificar grau de compactação em campo.

3. NBR 7181 – Análise granulométrica

- Classificação dos solos e adequação para uso em camadas de aterro (ex: solos argilosos, arenosos, siltosos).

4. NBR 7182 – Ensaio de compactação (Proctor Normal e Modificado)

- Define curvas de compactação e fornece o índice de compactação necessário para cada tipo de obra:
- Aterros rodoviários: $\geq 95\%$ do Proctor Modificado.
- Aterros estruturais: $\geq 98\%$ do Proctor Modificado.
- Aterros comuns: $\geq 90\%$ do Proctor Normal.

5. NBR 8681 – Ações e segurança nas estruturas

- Considera ações de empuxo de terra que impactam o projeto de contenções de aterros.

6. DNIT 181/2023 – Execução de Aterros Compactados (Especificação Técnica)

Documento fundamental para obras públicas e rodoviárias. Alguns pontos:

- Materiais aceitáveis: solos arenosos, argilosos com IP moderado, não expansivos, livres de matéria orgânica.
- Rejeitados: solos orgânicos, turfosos, lateritas friáveis, entulho ou solos com umidade acima da ótima.
- Crítérios de compactação:
- Umidade de compactação entre -2% e $+2\%$ da ótima.
- Espessura da camada solta entre 20 e 30 cm.
- Número de passadas determinado por controle tecnológico (placa de carga,

densidade in situ, CBR).

- Grau de compactação mínimo conforme projeto.

7. NBR 13292 – Execução de aterros em áreas urbanas com solos de baixa capacidade suporte

- Define critérios técnicos e ambientais, com destaque para controle da umidade, recalque diferencial e camadas de transição.

8. Normas complementares e guias técnicos:

- Manual de Terraplenagem – DNIT.
- Manual de Obras Terrestres – DER/SP.
- Orientações do IGE (Instituto de Geotecnia da Infraestrutura).

Quadro-Resumo de Aterros e seu processo de Compactação

Categoria do Aterro	Materiais Permitidos	Materiais Rejeitados	Crítério de Compactação
Aterro Rodoviário	Solos arenosos, argilosos com baixa plasticidade ($IP < 20$), sem matéria orgânica	Solos orgânicos, turfosos, expansivos, com teor de umidade excessivo.	$\geq 95\%$ do Proctor Modificado, umidade ótima $\pm 2\%$, camada compactada ~ 20 cm
Aterro Estrutural (sob fundações)	Solos arenosos ou argilosos estáveis, com controle rigoroso de qualidade e baixa compressibilidade	Solos moles, orgânicos, com IP alto (> 30), materiais contaminados	$\geq 98\%$ do Proctor Modificado, controle intensivo de umidade e camadas ≤ 20 cm
Aterro Comum / Urbanização	Solos naturais locais com controle básico, desde que não orgânicos ou expansivos	Entulhos, solos com matéria orgânica ou materiais não coesivos soltos	$\geq 90\%$ do Proctor Normal, controle visual ou pontual de umidade e densidade
Aterro em Solo de Baixa Capacidade Suporte	Solos arenosos ou mistos, podendo haver reforço com brita graduada ou geossintéticos	Solos moles saturados, turfosos, orgânicos; pode ser necessário pré-carregamento	$\geq 95\%$ do Proctor Modificado, podendo usar drenagem, geodrenos ou substituição parcial



Figura 4 - O aterro com altura de 12mts, realizado para a construção de rodovia marginal à Anhanguera (SP - 330), na altura de Campinas, em São Paulo. Houve necessidade do melhoramento do solo, já que havia presença no local de solo mole e tubulação de gás da comgás de 800mm, exigindo deformabilidade zero.

O que ocorre, na realidade, é que a precaução de nossas normas levam, implicitamente, à definição dos parâmetros considerados necessários e suficientes para garantir a qualidade do aterro no nível elementar, não oferecendo indicações sobre o projeto geral do aterro (como interações entre camadas elementares, condições de contorno em relação às ações ambientais, etc) que levem à definição da inclinação do talude do aterro, seus dispositivos de drenagem, das providências a serem tomadas para o caso de solos heterogêneos, etc. Estas últimas indicações são, geralmente, secundárias para aterros que não excedem uma altura trivial média, exatamente por que as dimensões correspondentes são, em sua maioria, deduzidas da experiência de engenheiros ou geotécnicos locais sem conhecimento consistente. Todo o quadro normativo, portanto, é considerado referência para aterros que não excedam os dez metros de altura. Antes de decidirmos atravessar um vale com um aterro, onde há presença de solos moles, dever-se-á ajustar o perfil longitudinal, de tal forma que se encontre, nos cortes que enquadram o vale, os recursos necessários para constituir os aterros, evitando ao máximo empréstimos ou distâncias de transporte proibitivas entre cortes e aterros.

A presença de solos moles

A construção de aterros sobre solos compressíveis, sem pensar em melhoramento de solos, possui ou apresenta quatro tipos específicos de problemas, o primeiro é sua estabilidade, a seguir é a questão das deformações, seguindo-se os esforços “parasitas” sobre estruturas vizinhas e a interrupção do escoamento das águas. Estas questões devem ser abordadas independentemente da altura do aterro. Solos compressíveis, quando comprimidos, apresentam baixa capacidade suporte, recalques excessivos com longo tempo, instabilidade, dificul-

dades executivas e empuxos laterais. As deformações do solo, sob o peso do aterro, estendem-se além dos limites da zona carregada na superfície, causando recalques em estruturas vizinhas existentes, mesmo em estruturas assentes sobre fundações profundas. É muito comum ter a presença de solos moles compressíveis, localizados em vales. A construção do aterro, ao longo ou através de um vale interrompe a percolação d’água durante o período de enchentes, erodindo sua base. De um modo geral, constroem-se galerias para a passagem da água. O controle destes fenômenos é o principal objetivo do geotécnico, com os cálculos do seu dimensionamento e os procedimentos executivos.



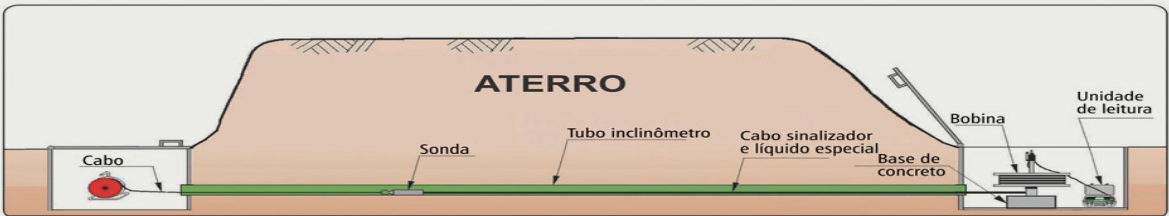
Figura 5 - Elevação de alto aterro, com contenção lateral.

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

A construção do aterro sobre solo mole

A construção de aterros, sobre solos moles compressíveis, provoca duas formas de instabilidade, conforme figuras ao lado, ou seja, por ausência de capacidade Suporte, causando processo de rutura por puncionamento nas camadas de solos moles, onde todo o aterro afunda, empurrando-o para os lados. E, também, por rutura nas faces dos taludes dos aterros, podendo ser circular ou não, sendo que em ambos os casos costuma ocorrer no “curto prazo”, ainda durante a obra de construção dos aterros, ou mesmo de elevação ao longo de suas bases, já que a coesão não drenada aumenta com o tempo, assim como o fator de segurança. Para avaliarmos a estabilidade de um aterro, sobre solos moles compressíveis, dever-se-á determinar sua resistência à curto prazo, ou seja, sua coesão não drenada. Há duas formas, muito comuns, mas arriscadas, de burlar esta perigosa instabilidade, elevando o aterro em etapas, dando tempo para que o solo aumente sua resistência, e construindo banquetas laterais, para se opor ao processo de puncionamento e/ ou a rutura da face do talude. Quanto mais impermeável for a superfície de um aterro, maior será o tempo em que surgirão problemas de instabilidade. A escolha criteriosa da geometria do aterro, evita que se rompa sob o efeito das tensões de cisalhamento, induzidas no solo de sua fundação, verificada pelo cálculo do equilíbrio, ao longo de uma provável superfície de rutura, normalmente circular.

A questão do recalque

As regras para o dimensionamento de aterros sobre solos moles (coeficiente de segurança global 1,5, na prática brasileira atual) permitem limitar as cargas que irá suportar, a valores para os quais as deformações fiquem finitas, mesmo que sejam significativas e durem longos períodos de tempo. O recalque imediato (durante o levantamento das camadas do aterro) geralmente

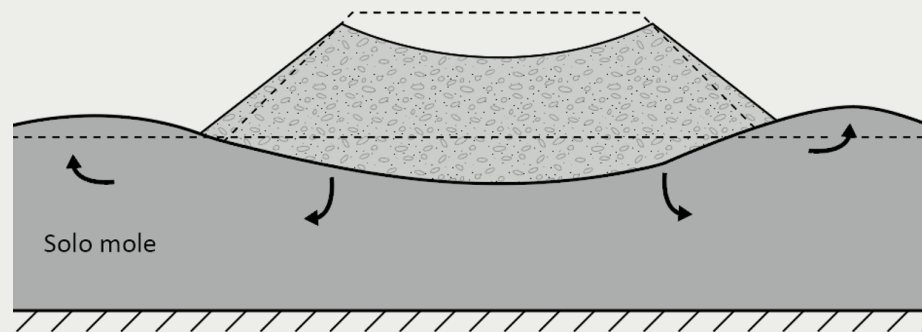


Figura 6 - Esquema representando a rutura do aterro por puncionamento.

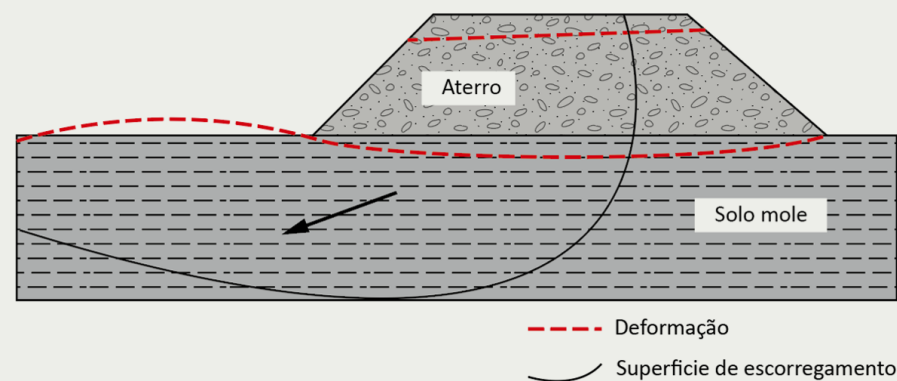


Figura 7 - Esquema representando a rutura do aterro por escorregamento rotacional.

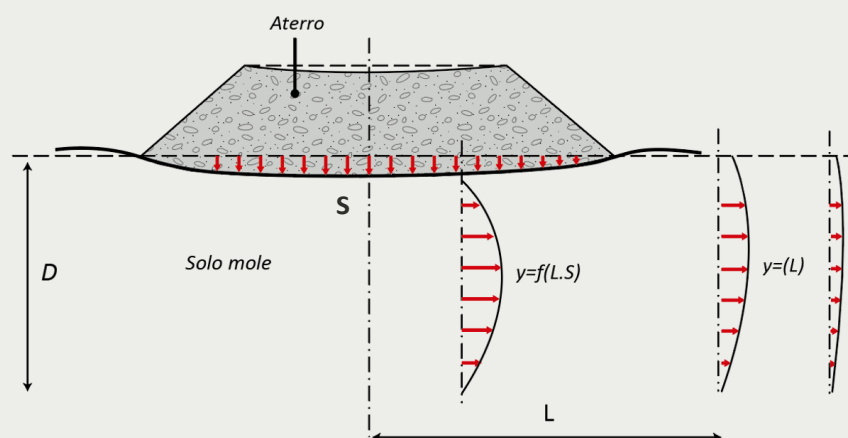


Figura 8 - Na figura, “D” é a altura do solo mole, “S” é o afundamento vertical do aterro e do solo de fundação ao longo do eixo de simetria, e $y=f(L.S)$ é o deslocamento lateral dependente da distância do recalque ao centro. A figura retrata o esquema do recalque e do deslocamento lateral do solo de fundação.

desenvolve-se em um trecho específico e de maneira constante, sendo acompanhado por deslocamentos horizontais de amplitude equivalente. Na figura acima, S, é o recalque ou afundamento sofrido tanto do aterro estradal como pelo solo de fundação, ao longo do eixo de simetria tracejado. A compressão vertical imposta ao solo, resulta em uma parábola invertida ou curva suave em forma de “U”. O maior recalque ocorre sobre o centro do aterro, onde a tensão vertical é máxima. O recalque diminui lateralmente até atingir 0. A curva do $S=f$

(x) descreve o perfil de afundamento ao longo da superfície. O resultado é:

- Adensamento ao longo do tempo, com expulsão da água dos poros do solo.
- O processo de recalque, por adensamento, pode atingir dezenas de centímetros, dependendo da profundidade das camadas moles e de suas compressibilidades.
- Gradiente de recalque, gerando problemas em estruturas construídas sobre ou próximos ao aterro (tubulações, estacas, etc.).

SOLICITE SEU WEBINAR E FIQUE POR DENTRO DE TODAS AS NOVIDADES DO MEIO GEOTÉCNICO

Conhecimento

Mantenha-se atualizado em relação às tecnologias de melhoria 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



Figura 9 - Nesta ampliação estradal, o aterro estava sendo elevado e, de repente, rutura rápida (não drenada). O motivo foi a solução com pré-carregamento, bastante limitada. O processo de rutura em um aterro estradal, acaba por fragilizar ainda mais o solo de fundação, com diminuição ainda maior de sua resistência, redução do atrito entre partículas e colapso da estrutura de seus poros, não reversível no curto prazo, o que debilita o solo remanescente. O processo de adensamento fica descontrolado, com zonas pouco adensadas, outras sem qualquer consolidação, além de um plano de rutura fragilizante intermediando. O gradiente de poropressões torna-se caótico ou desarranjado, ocorrendo aumentos súbitos, comprometendo o solo adjacente. A condição suporte do solo de fundação fica mais reduzida, ficando susceptível a cargas menores.

Na *figura 8*, o deslocamento lateral é representado pelas setas horizontais e a função $Y=f(L,S)$ é a expansão lateral do solo mole devido ao peso do aterro, que ocorre por que:

- O solo mole não possui resistência suficiente.
- O empuxo provocado pelo afundamento do aterro força o solo lateralmente.
- Provoca instabilidade, levando ao colapso por rutura global ou em cunha.

Poder-se-á representar as deformações pertinentes ao recalque S e ao deslocamento lateral Y , em curvas típicas, conforme abaixo:

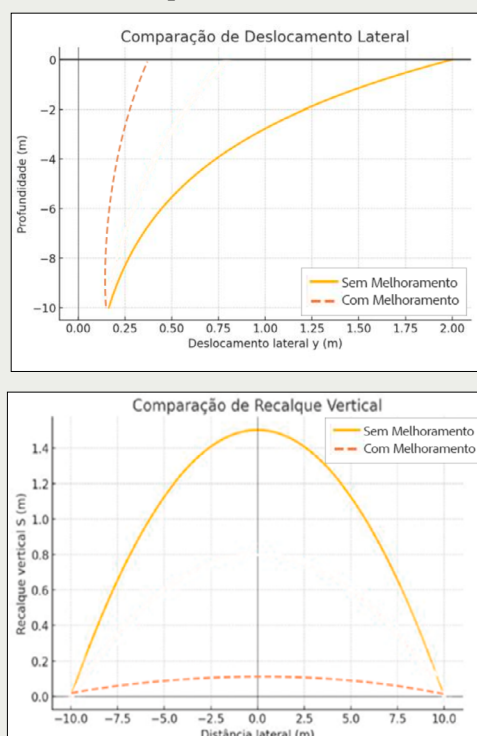


Figura 10

No gráfico do recalque, seu valor máximo é de 1,5m do cento do aterro ($x=0$) diminuindo simetricamente em direção às bordas, com perfil parabólico. Se antes de ter executado o aterro, houvesse melhoramento do solo com geoenrijecimento, o recalque seria reduzido para aproximadamente 0,10m, tendo distribuição quase que uniforme, ainda durante a obra, sem qualquer inconveniente à futura obra ou seja, o melhoramento readéqua o solo de fundação para as exigências do projeto, eliminando o recalque absoluto e os gradientes diferenciais, excluindo ou extinguindo a instabilidade e a deformabilidade. No gráfico do deslocamento lateral, visualiza-se deslocamentos horizontais expressivos perto da superfície (~2m) com diminuição progressiva ao longo da profundidade, devido ao confinamento lateral do solo. Com o melhoramento prévio do solo de fundação, deslocamento insignificantes ou próximos a zero, ao longo de toda a profundidade, devido ao aumento de sua resistência, rigidez e, principalmente, a homogeneização imposta. Todo o processo do recalque, geralmente ocorre durante a consolidação primária, que tende a seu valor final de acordo ou segundo uma lei exponencial. O restante do



Figura 11 - Cravação de geodrenos em um grande terreno com presença de profundas camadas de solos moles no Sul do País para, a seguir, receber aterro. Trata-se de uma estratégia frágil que, invariavelmente incorre em deformações futuras.

processo do recalque, ocorre durante a compressão secundária, que desenvolve-se de acordo com o logaritmo do tempo. O processo de recalque não ocorre de maneira uniforme, devido ao formato trapezoidal dos aterros e, claro, devido a heterogeneidade das camadas do solo de fundação. Distingue-se, portanto, um afundamento vertical no centro do aterro, seguido por outro afundamento vertical combinado com deslocamento lateral do solo de fundação sob o aterro. À seguir, um deslocamento lateral do solo de fundação, para fora do aterro, até uma distância diretamente relacionada à sua espessura e das camadas de solo mole. As perigosas poropressões, persistem durante todo o processo de deformação do solo mole, inclusive em sua fase final da fluência. É super importante deixar claro que, todo este processo de três fases (imediat, primário e fluência) reinicia-se

cada vez que um acréscimo de carga é imposto ao solo mole, ou seja, o aterro é “recarregado” para retornar ou recuperar seu nível teórico. O processo é cíclico e cada ciclo começa novamente quando o aterro é “recarregado”.

Forças parasitas e construções vizinhas.

A amplitude máxima dos deslocamentos laterais, submetidos à camadas de solos moles, sob aterros, geralmente representa 15% da amplitude do recalque desenvolvido, mantendo a mesma forma durante o processo de consolidação imposto, o que facilita a previsão e o controle por meio de medidas inclinométricas. Estes movimentos horizontais podem ser maiores durante a construção do aterro (condição não drenada). Poder-se-á limitá-los, melhorando-se a condição de drenagem do solo, já que são uma das principais causas de forças parasitas em estruturas vizinhas. Recalques em aterros, promovem esforços de atrito negativo e efeito Tschebotarioff em estacas, localizadas em sua zona de influência e, em certos casos, até fora. Da mesma forma, o movimento horizontal produzido, neste mesmo contexto, promove efeitos (esforços) horizontais “parasitas” sobre fundações profundas, razão pela qual devem ser considerados em seu cálculo. Esta desconsideração, próximo a estruturas estaqueadas, causam, também, forças horizontais/ transversais, nas estacas, podendo levar à rutura por flexão e/ ou a um deslocamento progressivo dos apoios, bem como à inclinação do sistema existente.

Toda esta ação de movimentos verticais e horizontais promovem, também, esforços adicionais em estruturas de contenção. Como se vê, a construção de aterros, sobre solos moles compressivos, causa profundos níveis de problemas à distâncias e profundidades dependentes da posição das camadas moles, ou seja, vão além da base do talude do aterro. Desta forma, é possível imaginar o grau de complexidade causado ao se construir e/ou se ampliar rodovias, com a presença de solos moles, como apresentado na edição 41 desta revista. Toda esta perspectiva pode ser eliminada melhorando-se o solo com geoenrijecimento.

O problema do escoamento da água.

A construção de aterros sobre solos moles compressivos, interrompe ou perturba o fluxo d'água freático, pelo fato da permeabilidade desses solos reduzir durante o processo de consolidação imposto, que resulta em recalques. Este fato influencia o gradiente hidráulico do lençol freático, causando risco de erosão na base do aterro, daí a necessidade de protegê-lo. “Soluções de melhoramento do solo” com coluna de brita, deep soil mixing e estaqueamento potencializam este processo.

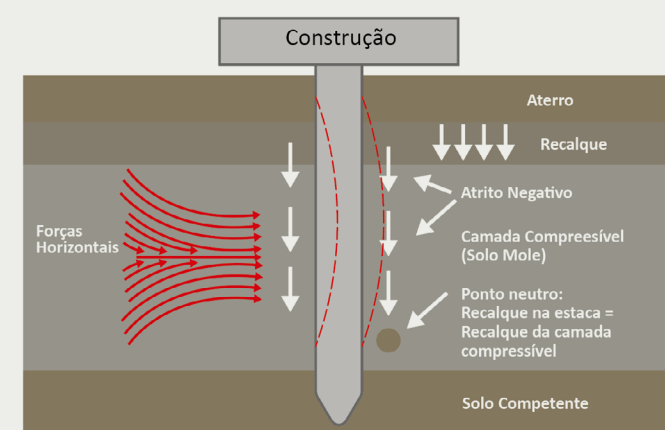


Figura 12 - Esquema do atrito negativo e de forças horizontais atuantes nas estacas, devido à movimentação do solo mole, provocada pelo peso do aterro realizado.

REFERÊNCIAS

Joaquim Rodrigues é engenheiro civil 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.

Juhaizad B.A., 2010. The modelling of lateral movement of soft soil using finite element analysis and laboratory model. Institut Pengurusan Penyelidikan, Universiti Teknologi Mara, Malaysia.

Khemissa M., Magnan J.P., Josseaume H. Étude des propriétés mécaniques de l'argile molle de Cuiche (vallée de l'Adour). Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Études et Recherches des LPC, GT 53, Paris, 1993.

Mille NATECHE Chahinez. Modélisation numérique du comportement d'un remblai autoroutier, supporté par des pieux, sur sols compressibles.

ROCTEST



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

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.



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



Figura 1 - Melhoramento do solo mole, com geoenrijecimento, para a construção de aterros de encontro, para uma ponte sobre o rio preto, na BR - 356, na entrada do município de Ervália, MG.

Análise de estabilidade de um aterro a ser executado em uma ampliação rodoviária, com presença de solos moles.

Projetos de construção de estradas estão se tornando cada vez mais complexos devido, em particular, à escassez de terrenos com boas características geotécnicas. Ao construir aterros rodoviários, na maioria das vezes é inevitável passar por regiões com solos compressíveis e de baixa resistência, o que leva a dificuldade em garantir sua estabilidade e deformabilidade, invariavelmente com alto risco. No Brasil, estes solos são bem comuns em praticamente todos os estados. Para executar estradas ou sua ampliação, existem métodos de cálculo e/ ou dimensionamentos específicos, que viabilizam a construção sobre terrenos onde há presença de argilas moles, quase sempre com melhoramento do solo, com geoenrijecimento, que readéqua o solo de fundação às exigências de projeto.

O geoenrijecimento do solo, elimina

seu potencial de deformação e de rutura, anulando as perigosas poropressões. Nesta matéria, iremos apresentar uma análise de estabilidade de um aterro de ampliação rodoviária, onde há presença de camadas de solos moles. A análise foi executada com programa Slide 2D, da Rocscience, objetivando avaliar a condição de resistência e segurança, de acordo com a imposição de soluções geotécnicas.

Conhecendo o local da ampliação rodoviária.

Trata-se de uma ampliação estradal federal no sul do país. Disponibilizou-se 8 sondagens à percussão, 2 sondagens à trado e 2 mistas,

permitindo a elaboração do perfil geológico-geotécnico do trecho em questão da rodovia federal. De um modo geral, as sondagens indicam camada superficial de aterro silto arenoso, variando de 7,0 a 10,0m de espessura, sobrejacente a uma camada de argila arenosa mole - muito mole, com espessura média de 4,0m, e NSPT variando de 1 a 5 golpes. Abaixo da argila arenosa, encontra-se argilas siltosas com resistência crescente, de acordo com a profundidade. O nível d'água encontra-se na cota 878. A Figura 2 ,à seguir, apresenta perfil obtido a partir da análise das sondagens, observando-se a conjuntura existente, com contenção

Formação em Gestão de Riscos

ALTO

MÉDIO

BAIXO

Prof. Fernando Affonso
Especialista em Riscos

Gestão de Riscos 1

CLIQUE AQUI!

Curso introdutório, necessário para refletirmos e nos questionarmos de como devemos interagir com o que nos rodeia e para transformar riscos em aliados.

Gestão de Riscos 2

CLIQUE AQUI!

Um curso prático para aquelas pessoas que tem objetivos na vida e desejam viver melhor, sem riscos. É um curso completo para preparar o aluno para ter disciplina e perseverança na sua profissão e na identificação e gestão de riscos continuamente.

Gestão de Riscos 3

CLIQUE AQUI!

Um curso avançado para aquelas pessoas que querem ir além, que gostaram do tema gestão de riscos e querem aprender a estimar probabilidade, impacto e conhece a terceira dimensão. O tempo até o impacto.

+1.5k

Alunos Treinados ao longo dos anos.

Sobre o Curso

Em um mundo dinâmico e repleto de incertezas, a capacidade de identificar, avaliar e gerenciar riscos é essencial para o sucesso de qualquer pessoa ou organização. A Formação em Gestão de Riscos foi desenvolvida para oferecer um conhecimento sólido e prático sobre estratégias de mitigação de riscos, independentemente do setor de atuação.

Composta por três cursos complementares, esta formação proporciona uma visão ampla e aplicada sobre os principais conceitos, ferramentas e metodologias utilizadas na gestão de riscos. Seja você um empreendedor, profissional de qualquer área ou alguém que deseja aprimorar sua tomada de decisões, este programa é ideal para fortalecer sua capacidade de antecipação e resposta a desafios, garantindo maior segurança e eficiência em seus projetos e negócios.

QUERO SER UM ESPECIALISTA EM
GESTÃO DE RISCOS

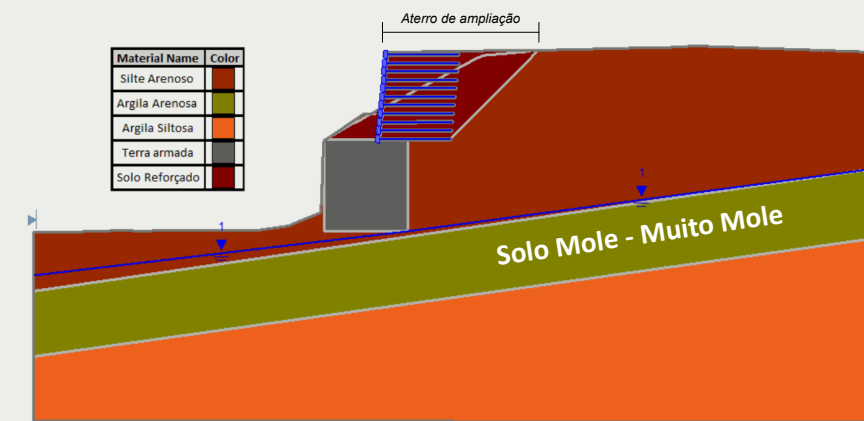


Figura 2 - Perfil Geológico Geotécnico 01 – Solução de ampliação do aterro de rodovia sem interferência no solo de fundação.

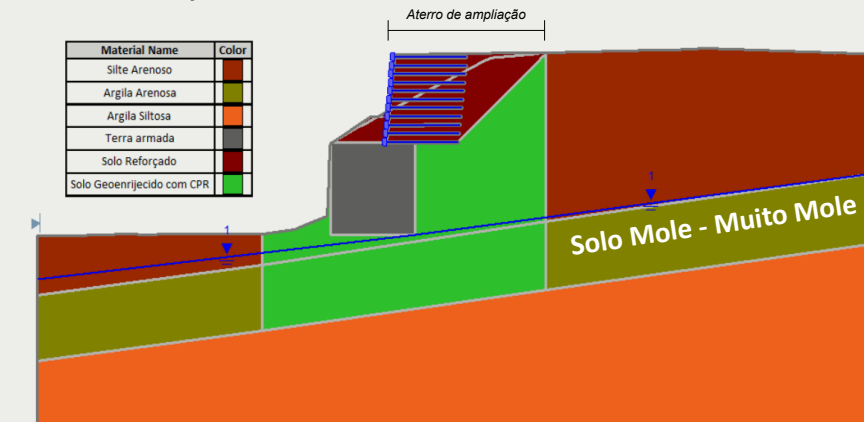


Figura 3 - Perfil Geológico Geotécnico 01 – Solução de ampliação do aterro da rodovia melhorando-se a condição do solo de fundação com geoenrijecimento.

de terra armada e a solução para ampliação da rodovia, utilizando-se aterro estruturado com geogrelha, aceitando-se o cenário existente do solo de fundação. A Figura 3, apresenta o mesmo trecho, agora melhorando-se o solo de fundação, particularmente as camadas do solo mole-muito mole com geoenrijecimento, com CPR Grouting.

Determinação dos parâmetros geotécnicos.

Na ausência de ensaios de campo e laboratório, para a determinação dos parâmetros da resistência do solo de fundação, que compõem os perfis apresentados, elegeu-se por utilizar correlações conhecidas, disponíveis na literatura. Para obtenção do ângulo de atrito (ϕ), dos horizontes propostos, utilizou-se valores médios de NSPT e as correlações propostas por Teixeira (1996) e Godoy (1983):

Teixeira (1996): $\phi = 15^\circ + \sqrt{24 \cdot N_{SPT}}$ Equação 1

Godoy (1983): $\phi = 28^\circ + 0,4 \cdot N_{SPT}$ Equação 2

A Tabela 1, acima, reúne os valores médios de NSPT de cada horizonte e os dos ângulos de atrito estimados.

Para a análise de estabilidade, considerou-se a média entre os valores obtidos, a partir das equações apresentadas. Os pesos específicos, dos diferentes solos foram estimados em função da consistência da argila ou compactidade da areia, como indicam as Tabelas 2 e 3. A tabela 4, abaixo, reúne os parâmetros adotados na análise da estabilidade. Obteve-se os parâmetros de cálculo, representativos da terra armada, com base na literatura (Stein e Silveira, 2019). Com relação ao maciço de solo reforçado, o projeto prevê a utilização de geogrelha, com resistência à tração nominal de 50 kN/m2. Apresenta-se, à seguir, os resultados da análise da estabilidade para as duas condições propostas, onde objetivou-se avaliar a situação do trecho estradal ampliado, com aterro reforçado, com e sem melhoramento do solo de fundação, utilizando-se o software Slide 2D, da Rocscience Inc., que determina e delimita a superfície de ruptura crítica, mediante análises por equilíbrio limite. O método do equilíbrio limite, um dos métodos determinísticos mais utilizados para análises de estabilidade de taludes, adotando-se as seguintes premissas:

Horizonte	NSPT médio	Teixeira (1996)	Godoy (1983)	Valor adotado
Silte arenoso	6	27	30,4	28,7
Argila arenosa	3	23,5	29,2	23,5
Argila siltosa	15	34	34	34

Tabela 1 - Estimativa do ângulo de atrito.

NSPT	Consistência	γ (kN/m³)
< 2	Muito mole	13
3 – 5	Mole	15
6 -10	Média	17
11 -19	Rija	19
> 20	Dura	21

Tabela 2 – Peso específico de argilas.

NSPT	Compacidade	γ (kN/m³)		
		Areia seca	γ Úmida (kN/m³)	γ Saturada (kN/m³)
< 5	Fofa a Pouco compacta	16,0	18,0	19,0
5 – 8				
9 – 19	Medianamente compacta	17,0	19,0	20,0
19 – 40	Compacta a muito compacta	18,0	20,0	21,0
> 40				

Tabela 3 – Peso específico de areias

Horizonte	NSPT médio	γ (kN/m³)	ϕ (°)	c' (kPa)
Silte arenoso	6	17	28,7	3
Argila arenosa	3	15	23,5	5
Argila siltosa	15	19	34	10
Solo geoenrijecido com CPR	-	15	26	58

Tabela 4 – Parâmetros adotados na análise de estabilidade

Tipo de dano	Nível de Segurança	Critérios
Danos materiais e ambientais	Alto	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais; Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos tóxicos.
Danos materiais e ambientais	Médio	Danos materiais: Locais próximos a propriedades valor moderado; Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados.
Danos materiais e ambientais	Baixo	Danos materiais: Locais próximos a propriedades valor reduzido; Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.
Danos a vidas humanas	Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade elevada de concentração de pessoas; Ferrovias e rodovias de tráfego intenso
Danos a vidas humanas	Médio	Áreas com intensa movimentação e permanência restrita de pessoas; Ferrovias e rodovias de tráfego moderado.
Danos a vidas humanas	Baixo	Áreas com intensa movimentação e permanência eventual de pessoas; Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido.

Tabela 5 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais

- O fator de segurança, é igual para todos os pontos, ao longo da superfície de ruptura;
- O equilíbrio é calculado pelas equações da estática;
- A superfície de ruptura é arbitrária.

Geralmente, determina-se uma série de superfícies de ruptura, objetivando-se determinar a que apresenta valor mínimo do fator de segurança, denominada superfície crítica. Entre os diferentes métodos do equilíbrio limite, adotou-se o método de Morgenstern e Price (1965), em função do maior rigor teórico exigido para esta situação, estabelecendo que todas as condições de equilíbrio devem ser satisfeitas, permitindo a avaliação dos fatores de segurança das superfícies de ruptura circulares e não circulares, calculando-se o fator de segurança por meio do somatório das forças tangenciais e normais à base de uma fatia, e o somatório dos momentos em relação ao centro de cada parcela infinitesimal.

O fator de segurança admissível

A NBR 11682/2009, estabelece o critério mínimo de segurança, em função dos riscos à vida humana, ao meio ambiente e a bens materiais (Tabela 5). Os critérios de segurança norteiam a adoção do fator de segurança mínimo a ser adotado, como indica a Tabela 6. O trecho, em análise, é um talude rodoviário, consi-



Success Factors
SIG WORKSHOP



Image courtesy of Adviseurs in Bouwtechniek (ABT)

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!

Nível de segurança contra danos material e ambiental Nível de segurança contra danos a vidas humanas	Nível de segurança contra danos material e ambiental		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Tabela 6 - Fator de segurança mínimo contra deslizamentos

derado com risco médio em relação aos danos materiais e à vida humana. Desta forma, adotou-se como fator de segurança mínimo o valor 1,40.

Resultados

A Figura 4 ao lado, apresenta o resultado da análise da estabilidade, considerando a condição sem interferência no solo de fundação, aceitando-se a condição existente. Observa-se que o fator de segurança obtido é de 1,22, inferior ao admissível para taludes rodoviários. Melhorando-se o solo de fundação, atingindo-se toda a espessura da argila arenosa mole - muito mole, o fator de segurança aumenta de maneira significativa, obtendo-se 3,61 (Figura 5), evidenciando a necessidade e, também, a eficiência do geonrijecimento, que propicia ganho expressivo para a resistência do solo de fundação e, consequentemente, sua total estabilidade para a situação imposta, sem quaisquer atenuantes estranhos ao solo (como estacas, colunas, geogrelha e etc.). A Tabela 7, acima, reúne fatores de segurança obtidos na análise da estabilidade, o que sugere a necessidade do melhoramento do solo de fundação para garantia da condição da estabilidade do trecho da rodovia a ser ampliada.

Conclusão

Apresentou-se a condição para a estabilidade do talude do terreno, objetivando-se a duplicação em um trecho de uma rodovia federal no sul do país. A análise foi executada

Análise	FS obtido	FS admissível mínimo
Sem interferência	1,22	1,4
Com interferência	3,61	

Tabela 7 – Fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade

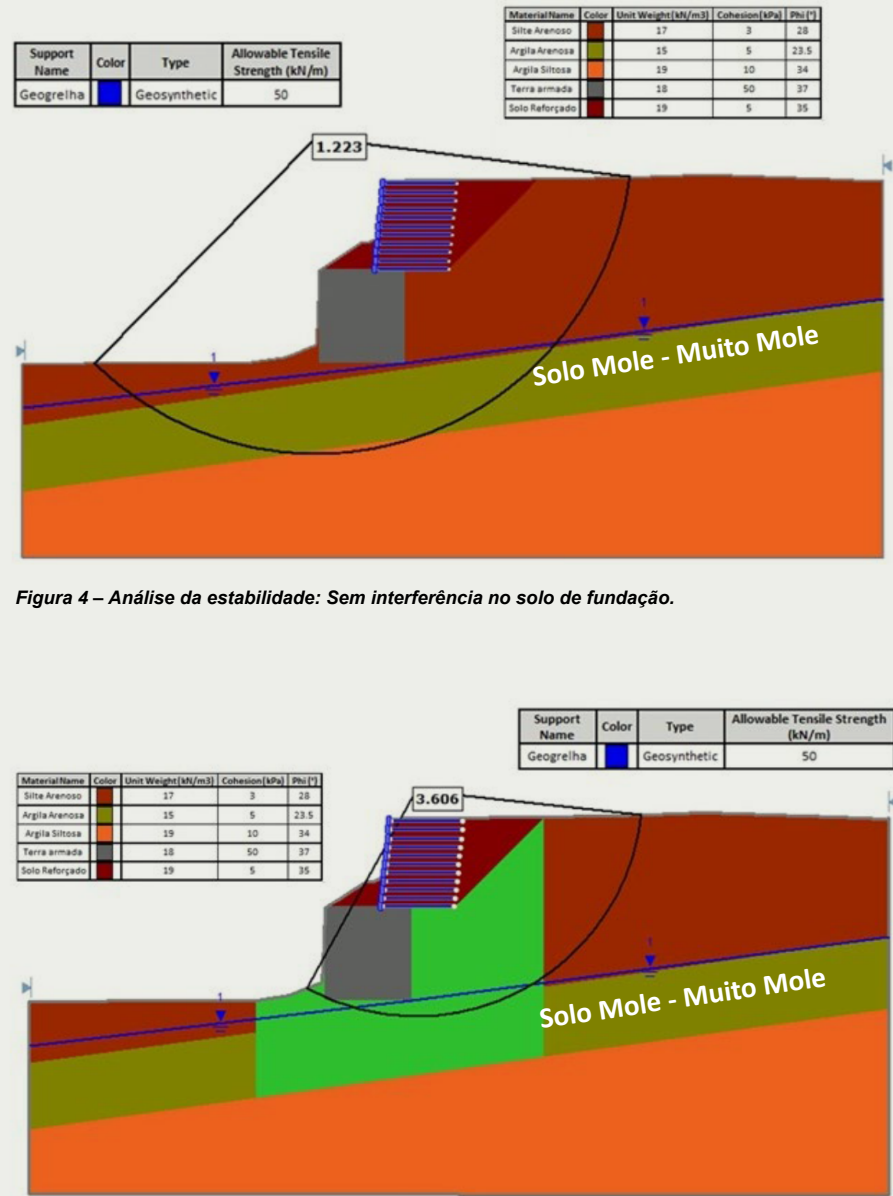


Figura 4 – Análise da estabilidade: Sem interferência no solo de fundação.

Figura 5 – Análise da estabilidade: com interferência no solo de fundação.

da com programa Slide 2D, da Rocscience, consubstanciando a avaliação do ganho de resistência e segurança após a constatação da deficiente condição do solo de fundação, para a ampliação do aterro desta rodovia, com fator de segurança inferior ao mínimo exigido ($FS_{\min} = 1,40$). Após o melhoramento do solo de fundação, readequando-o com geoenrijecimento, utilizando o CPR Grouting, o ganho de resistência tornou-se significativo, e a total estabilidade foi obtida com altos valores do Fator de Segurança.

REFERÊNCIAS

Patricia Karina Tinoco é engenheira geotécnica. Trabalha com melhoramento de solos moles.

GODOY, N. S. (1983). Estimativa da capacidade de carga de estacas a partir de resultados de penetrometro estático. Palestra. São Carlos (SP): Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

MORGERNSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, v. 15, n. 1, p. 79-93, 1965.

OLSON, S.; STARK, T. (2003). Yield strength ratio and liquefaction analysis of slopes and embankments. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(8), pp. 727-737.

TEIXEIRA, A. H. (1996). Projeto e execução de fundações. Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, SEFE, São Paulo, v.1, p. 33-50.

STEIN, N.M.B.; SILVEIRA, F.G. (2019). Utilização de Reforço Metálico em Muros de Solo Reforçado. XII Simpósio de Engenharia Geotécnica da Região Sul GEOSUL 2019 –Joinville, Santa Catarina, Brasil.

PRESSIONETRO

Um ensaio geotécnico completo realizado no campo

Fácil de operar e 100 % viável



ROCTEST

Representante exclusivo no Brasil

+55 21 2718 3968

3Geo TECNOLOGIA vendas@3geotecnologia.com www.3geotecnologia.com

Are you looking for a soil improvement in portuguese?

BEST SELLER

MELHORAMENTO DO SOLO MOLE E O GEOENRIJECIMENTO



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

O aterro de grande altura e a necessidade da avaliação da capacidade suporte do solo, com a presença de argilas moles.

Figura 1 - Elevação de alto aterro, com muro de contenção em terra armada, após o melhoramento do solo de fundação com geoenrijecimento para a construção de mais um viaduto na BR - 470, em Navegantes, Santa Catarina.

Terrenos com capacidade suporte são raros hoje em dia, o que significa presença de solos moles em praticamente todos os locais onde objetivamos construir, seja uma estrada, barragem ou edificações horizontais, caracterizadas por grandes áreas e pequenas tensões impostas. Graças a técnica de melhoramento de solos moles, com o geoenrijecimento, é possível realizar projetos horizontais em solos argilosos moles, que apresentam alta compressibilidade. A construção de aterros, com grande altura, frequentemente apresenta problemas, principalmente quando há argilas compressíveis. É notório a ausência de resistência em camadas de solos moles e, também, é óbvio a alta densidade do solo aplicado em aterros, o que gera cargas significativas, potencializando problemas de instabilidade e de deformação na futura obra, além do comprometimento de construções vizinhas. Assim, torna-se necessário

conhecer quais problemas o geotécnico encontrará de modo a conduzir, de maneira segura, seu projeto.

O solo argiloso mole

Estes solos são caracterizados por sua natureza argilosa, contendo conteúdo significativo de fibras de matéria orgânica e um alto teor de água, superior a 100%, tornando-o saturado, o que promove baixa resistência ao cisalhamento e alta capacidade deformativa, traduzindo-se em deformações e ruturas. Ou seja, quando recebem cargas de aterro, deformam-se ou rompem. A fase líquida, deste solo de fundação, desempenha papel crucial no processo deformativo imposto, uma vez que é responsável por sua natureza diferencial. Sua complexidade líquida é explicada por sua estrutura mineralógica em “folha” e sua superfície, permitindo que as moléculas d’água sejam adsorvidas, fornecendo ligações entre seus grãos, estabelecendo alterações na estrutura do solo, na medida em que varia o conteúdo d’água,

comprometendo sua resistência mecânica. As importantíssimas características da amplitude e da velocidade do processo deformativo imposto ao solo, dependerá do tipo e da combinação das camadas de argila mole encontradas no terreno de fundação, mais especificamente sua combinação mineral de alumínio hidratado, silicatos, quartzo, feldspatos, carbonatos, óxidos e matéria orgânica, tendo uma resistência cisalhante frequentemente inferior a 25kPa. De um modo geral, estabelece-se que um solo é argiloso mole quando sua resistência cisalhante situa-se entre 25kPa e 50kPa, e muito mole quando for inferior a 25kPa. Insistimos com estas particularidades, exatamente por que, nestes últimos 40 anos, devido ao natural desenvolvimento econômico e social, houve verdadeira explosão de obras de aterros estradais, invariavelmente sobre solos moles. Muito se aprendeu e se desenvolveu.

A questão do aterro de grande altura

Para viabilizar aterros de grande altura, com mais de 10mts, torna-se essencial estruturar suas diretrizes, abrangendo o risco geotécnico, os critérios para projeto, execução e monitoramento.

O risco geotécnico direto

- **Capacidade suporte do solo de fundação**

A presença de argilas moles ou solos não consolidados não suportam tensões elevadas. Sua insignificante capacidade de carga admissível, limita a tensão vertical a ser aplicada que, fácil e rapidamente ultrapassa a resistência não drenada do solo mole, ocorrendo rutura e ou recalques excessivos, com consequências diversas.

- **Recalque diferencial e total elevados**

O processo deformativo, que ocorre tanto no corpo do aterro, como no solo de fundação, cresce com o aumento da sua altura, causando trincas no pavimento, danos estruturais nas contenções e até perda de nivelamento.

- **Rutura por instabilidade global**

Aterros com altura elevada tem fatores de segurança mais exigentes contra escorregamentos, principalmente em taludes íngremes. A carga vertical no aterro, aumenta a tensão efetiva no solo, que não responde de forma homogênea, devido a sua limitada rigidez e a alta compressibilidade, ocorrendo recalques diferenciais entre a região central do aterro e as bordas dos taludes ou entre sua base e as zonas intermediárias do solo, resultando em curvaturas na base do aterro ou nas estruturas que suportam (contenções, etc.), causando fissuras longitudinais na

superfície, empenamento em estruturas rígidas apoiadas, trincas e distorções no corpo do aterro. Por continuidade, há infiltração d’água, aumento da poropressão e a redução sistemática da resistência cisalhante do solo, remetendo-o a um (possível) colapso progressivo. Os fatores de segurança recomendados são $FS > 1,3$ para longo prazo e $FS > 1,5$ para condições críticas ou provisórias. A modelagem típica é com o equilíbrio limite (Morgens-temprice ou Bishop) ou com elementos finitos com modelos constitutivos não lineares para solos moles.

- **Pressão lateral em estruturas vizinhas**

A presença de muros, tubos, aduelas ou galerias enterradas podem sofrer colapso ou deformações plásticas por pressão de empuxo excessivo. Aterros altos geram grande empuxo lateral, tornando necessário incluir ten-

sões horizontais induzidas por carregamento vertical em solos saturados (condição K_0).

Comportamento hidráulico e a drenagem

A intensa carga vertical, do alto aterro, gera excessos de poropressão em seu maciço e no solo de fundação, reduzindo sua resistência e comprometendo o adensamento primário atuante. A utilização de piezômetros de corda vibrante é obrigatório. Altos aterros reivindicam drenagem vertical e horizontal bem dimensionados, de modo a evitar fenômenos de sifonamento, erosão interna e por piping, proveniente de gradientes hidráulicos internos. A concentração de grandes escoamentos provoca erosão superficial com ranhuras profundas.

A necessidade do melhoramento do solo de fundação

A presença de solos de fundação com camadas heterogêneas e rigidez diferenciada, para não falar sobre incapacidade suporte, é crítico para garantir indeformabilidade e estabilidade ao aterro. O objetivo do melhoramento efetivo do solo, com geonijecimento é, acima de tudo, promover sua homogeneização, com parâmetros que atendam ao projeto, ou seja, o aumento da capacidade suporte, finalizar o processo de consolidação nas camadas heterogêneas, aumentando a rigidez e reduzindo, ao extremo, a deformabilidade e a instabilidade. A utilização de técnicas de reforço do solo, via transferência de cargas para camadas competentes profundas é inespecífico, pois mantém o solo mole ao redor das colunas e estacas, antevendo um recalque residual perigoso para a obra. Não é, efetivamente, uma solução e sim um paliativo, já que apenas alivia, atenua ou diminui a intensidade do problema, não resolvendo-o completamente.

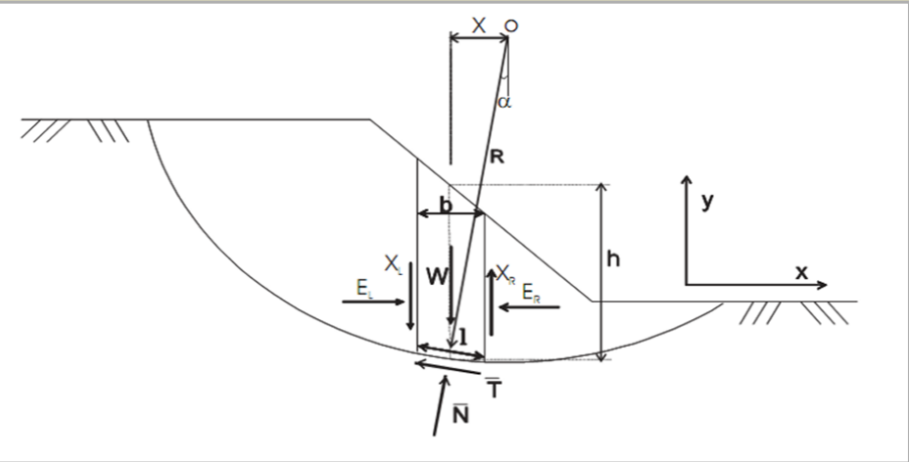


Figura 2 - Esquema representando um corte na seção do talude do aterro

A necessária análise da estabilidade do aterro

Movimentos impostos à solos de fundação, são fenômenos que podem atingir grandes proporções, causando danos consideráveis. A execução de aterros de grande altura, com presença de solos moles, exige estudo de sua deformabilidade e estabilidade, tornando-se necessário complementar estes estudos com o melhoramento do solo com geonijecimento. A análise de sua estabilidade objetiva prevenir ruturas, por escorregamento dos taludes do aterro, através do estudo dos estados limites relacionados à estabilidade do solo e a limitação de sua deformação. Estes estados limites apresentam-se pela perda do equilíbrio geral do maciço do solo, sua movimentação excessiva, bem como danos em sua estrutura ou da estrada. A análise é realizada, geralmente, utilizando-se os seguintes métodos:

Métodos do equilíbrio limite

Estes métodos baseiam-se, principalmente, no estudo das fatias, cujo princípio básico é o corte virtual da massa, localizada acima da linha de rutura, ficando cada uma submetida ao seu próprio peso, sobrecargas, bem como as forças de contato entre elas, conforme figura acima.

As forças que atuam na seção, da figura acima, podem ser representadas da seguinte maneira:

- W – Peso total da fatia com largura b e altura h.
- N, T - Componentes normal e tangencial da força que atua na base da fatia.
- X, E - Componentes vertical e horizontal das forças entre as fatias.



Figura 3 - Aterros de grande altura exigem solo de fundação homogeneizado com melhoramento do solo, de modo a se evitar recalques. O controle das deformações é obrigatório.

- b - Espessura da fatia ($b=L \cdot \cos \alpha$).
- α - ângulo que a base da fatia faz com a horizontal.
- R - Raio do círculo de rutura com centro o.
- L - Comprimento do plano de deslizamento da fatia.
- X - Braço de alavanca do peso do solo.

A dificuldade, com estes métodos, é encontrar simultaneamente:

- A superfície crítica
- As tensões normal e tangencial ao longo dessa superfície
- O fator de segurança (no critério de rutura) com base nas equações de equilíbrio.

Existem muitos métodos, no entanto, os mais conhecidos são o de Fellenius (1927), Bishop (1954), Jambu (1956), Morganstern et price (1965) e o método das perturbações (1974).

Métodos dos elementos finitos

Este método, diferentemente do anterior, não considera o fator de segurança. Caracteriza-se por discretizar o plano vertical do talude, em elementos qualificados pelo comportamento elastoplástico e com propriedades físicas variáveis no espaço. Portanto, avalia-se as tensões e as deformações nos nós dos elementos. Para seu cálculo, existem diversos softwares especializados em modelagem geotécnica, como o Plaxis, Oasys e o Crisp. Há, também, o método das características das tensões, que trata apenas com superfícies planas.

O que precisamos saber do fator de segurança

A estabilidade de um aterro é, geralmente, estimada utilizando-se um fator de segurança, FS, definido pela razão entre o momento, em torno de um ponto fixo, da resultante das forças resistentes ao deslizamento e as



Figura 4 - Elevação de aterro estradal de encontro de um novo viaduto em Gaspar, SC. Foi realizado melhoramento do solo prévio.

forças que o causam. O FS é o estado de rutura. Diferentes definições do FS são apresentadas abaixo.

$$F_s = \frac{\text{Resistência cisalhante do solo}}{\text{Resistência cisalhante necessária ao equilíbrio}}$$

Nº	Definição	Fórmula	Comentário
1	Relação de tensões	$F_s = \frac{\tau_{max}}{\tau}$	Método da rutura
2	Relação de forças	$F_s = \frac{Er}{Em}$	Direção do deslocamento
3	Relação de movimentos	$F_s = \frac{Mr}{Mm}$	Rotação
4	Parâmetro reduzido	$P = \frac{P}{F}$	Consulte por exemplo os eurocódigos

Tabela 1 - Diferentes definições de um fator de segurança.

Fator de segurança	Estado do talude
< 1	Instável
1	Estabilidade limite
[1 - 1,25]	Segurança contestável
[1,25 - 1,4]	Segurança satisfatória para obras
>1,4	Segurança satisfatória

Tabela 2 - Equilíbrio do talude do aterro em função dos valores teóricos do fator de segurança.

A análise da estabilidade consiste, portanto, em se encontrar a superfície de rutura mais desfavorável, considerando-se os valores dos FSs. A condição de estabilidade do aterro, pode ser avaliada conforme apresentado na tabela acima. Em condições normais, Fellenius propõe um limite igual a $F_s = 1,25$, enquanto Bishop $F_s = 1,5$.

A necessária análise do recalque do aterro

Construir aterros, sobre camadas de solos moles, causa compressão no solo de fundação, que entra em trabalho de consolidação, perde água e deforma, causando recalques, que acaba por afetar o comportamento da futura obra, incidindo em sua performance, custo e manutenção. A ordem de valores, caso não se analise profundamente o projeto, pode chegar ao impensável, razão pela qual torna-se necessário e até obrigatório fazer uma previsão correta da amplitude e da velocidade do processo de consolidação/ recalque. Não esquecer que o processo de consolidação de argilas saturadas é extremamente lento e, consequentemente, função do tempo. Ou seja, o recalque total, S_T , é tempo dependente, e pode ser decomposto em vários termos, cada um ligado a fenômenos diferentes:

$$S_t = S_I + S_C + S_{fe} + S_{lat}$$

Onde:

S_I – É o recalque imediato, caracterizado pela compressão do ar contido nos vazios, assumindo um comportamento elástico linear isotrópico a volume constante ($v=0,5$).

S_C – É o processo de consolidação primário, caracterizado pela compressão e expulsão da água contida nos vazios, chamado de recalque primário, obtido pelo valor do recalque no teste com o edômetro, em laboratório.

S_{fe} – A compressão secundária, que gera o recalque devido ao processo de fluência.

S_{lat} – É o processo de recalque, provocado por movimentos laterais do solo, ao longo do tempo. Os principais métodos que permitem calcular estes recalques são os métodos pressiométrico, edométrico e numérico (com elementos finitos ou diferenças finitas, utilizando-se o Plaxis, Flac, Ansys, etc.).

A modificação ou a readequação das características do solo mole de fundação (melhoramento do solo).

Antes de se pensar em modificar as características das camadas de solos moles, presentes na região da futura obra, poder-se-á analisar a substituição por solo mais resistente e menos deformável, de acordo com um processo de compactação, em camadas. O fato é, que cada vez mais torna-se caro, restritivo e impraticável, particularmente em relação ao meio ambiente. A seguir, pode-se partir para

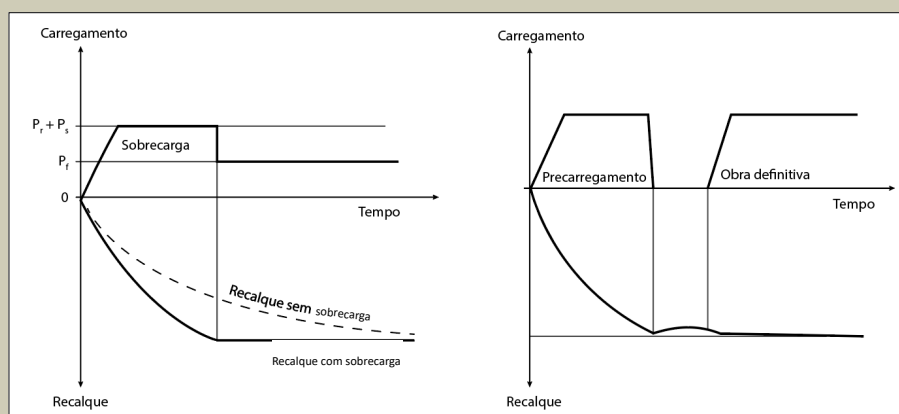


Figura 5 - Princípio do pré-carregamento.

O FENÔMENO DO SIFONAMENTO EM UM ALTO ATERRO RODOVIÁRIO.

O fenômeno do sifonamento, em um alto aterro rodoviário, é um processo que ocorre quando a água é transportada através de material poroso, como os solos que compõem o aterro, o que pode levar a problemas de estabilidade e performance do aterro.

Sifonamento refere-se ao movimento da água, sob pressão, que ocorre em situações onde há diferenças na carga hidrostática entre dois pontos em um aterro, geralmente acontecendo quando um lençol freático ou camada de água, sob pressão, forma-se em um ponto mais elevado do aterro. Pode ser influenciado por vários fatores, como a inclinação do aterro, características do solo e a presença de água. Este fenômeno ocorre por fases:

1. Formação de um Lençol Freático. Quando a água acumula-se no aterro, especialmente durante períodos de chuvas intensas ou com alta umidade,

sobrecarga temporária, o que consiste em cravar geodrenos e aplicar uma sobrecarga temporária igual a carga final PF, possivelmente acrescida de uma sobrecarga PS, de acordo com a figura abaixo produzindo-se, desta maneira, um rápido desenvolvimento do recalque imediato e parte do primário do processo de consolidação. Desta maneira, descarta-se o recalque imediato e diminui-se a deformação final devido à totalidade do recalque primário, que é muito extenso e demorado. O período necessário para a execução desta técnica varia de meses

satura a base do aterro e cria um lençol freático.

2. Pressão Intersticial. À medida que o nível da água aumenta, a pressão intersticial nos vazios do solo aumenta, também, gerando pressão que atua no sentido do escoamento da água, em direção a áreas de menor pressão.

3. Formação de Sifões. Se a geometria do aterro permitir, a água flui por um "sifão" natural, onde a água move-se de uma de maior pressão para outra área de menor pressão, passando por outras camadas. Este movimento é acelerado em solos mais permeáveis.

4. Instabilidade do Solo. O sifonamento causa a erosão do solo do aterro, levando à remoção de suas partículas e, consequentemente, à instabilidade estrutural. Este processo resulta na formação de fissuras ou até mesmo na ruptura do aterro. Suas implicações são apresentadas abaixo:

O FENÔMENO DO SIFONAMENTO EM UM ALTO ATERRO RODOVIÁRIO.

- Risco de Colapso. Se não for controlado, o sifonamento leva a deslizamentos ou colapsos em partes do aterro, criando riscos para a rodovia e seus usuários.

- Monitoramento e Controle. Para evitar que o sifonamento comprometa a integridade do aterro, deve-se implementar técnicas de drenagem, como drenos superficiais ou sub-superficiais, que ajudam a controlar o nível d'água e a pressão intersticial.

- Projetos rodoviários. Nestes projetos, torna-se essencial considerar a

dinâmica do sifonamento, durante o processo de construção e a operação do aterro, incluindo a análise geotécnica do solo e a implementação de medidas para uma drenagem eficiente.

O sifonamento em altos aterros rodoviários é um fenômeno importante, que deve ser cuidadosamente considerado no planejamento e na manutenção da infraestrutura. Sua compreensão ajuda o projetista a dimensionar aterros mais seguros e estáveis, minimizando riscos associados e garantindo a segurança da estrutura rodoviária.

a anos, implicando em sua instrumentação com piezômetros, para se acompanhar o excesso e a dissipação da poropressão, além de placas de recalque. A sobrecarga, deve, obviamente, ser compatível com as condições de estabilidade do aterro, o que raramente é feito. Esta técnica só é possível quando a altura crítica é significativamente superior à altura de projeto. Sua eficiência é extremamente limitada, por todos os motivos relacionados e, principalmente, pelo fato de que as tensões de compressão, impostas pela sobrecarga temporária, não chegam além dos 5 ou 7 metros de profundidade, o que

compromete o processo de consolidação na argila mole, considerando-se que a maioria dos projetos estradais apresentam camadas de solos moles bem mais profundas. O método de geodrenos à vácuo, que funciona através da aplicação de pressão negativa, que procura remover a água do solo, utilizando-se sobrecarga ou não, é bastante limitada já que tem na quase impermeabilidade da argila mole seu principal inconveniente, o que restringe ou limita o poder de sucção nos geodrenos. O método de coluna de brita, que procura transferir as cargas do aterro para camadas profundas de solos resistentes, através de colunas de brita é pouco eficiente em razão da perma-

nência do solo mole em torno das colunas e sua própria instabilidade, devido ao processo deformativo a que se submetem pela falta de rigidez, e à flexão transversal, devido a compressão axial imposta. O método do Deep Soil Mixing, da mesma forma pela permanência do solo mole em torno das colunas. O melhoramento efetivo do solo com CPR Grouting, consiste em entrar com parâmetros do solo e do projeto, a ser executado, em programa de elementos finitos específico. O programa oferece todas as diretrizes executivas, tanto da consolidação quanto da rigidez, a serem impostas para cada projeto. De um modo geral, trata-se da cravação de malha de geodrenos, intercalada com malha de furos, onde executam-se as verticais com bulbos de compressão, com geogROUT, via expansão de cavidades, de baixo para cima, escalonadamente, a partir do solo resistente, para cada metro de profundidade, especialmente ajustado para cada camada de solo mole, através de curva granulométrica formulada pelo programa, com areias, siltes e aglomerantes da própria região, além de aditivos, de modo a promover a consolidação do solo e, ao mesmo tempo, impor níveis de rigidez bem superiores às exigências de projeto.



Figura 6 - Elevação de outro aterro de encontro, na BR-470, para um viaduto próximo a Itajaí, SC, após o melhoramento do solo de fundação.

A comparação entre os métodos de reforço com a do melhoramento do solo mole, para receber aterros estradais, pode ser feita através de uma representação clássica da tensão versus recalque normalizados, o que permite comparar diferentes soluções, objetivando-se a condição para a obra. A coordenada horizontal q/S_u , em kPa, é a tensão normalizada pela resistência cisalhante não drenada, representando a rigidez aparente do sistema, ou seja, quanto maior, menor o recalque para uma mesma carga. A coordenada vertical, δ/H , é o recalque normalizado, ou seja, a razão entre o recalque vertical total, δ , e a altura do aterro H , permitindo comparar recalques em diferentes geometrias. Quanto mais para baixo, maior o recalque relativo. O valor ~ 3 representa o comportamento de um

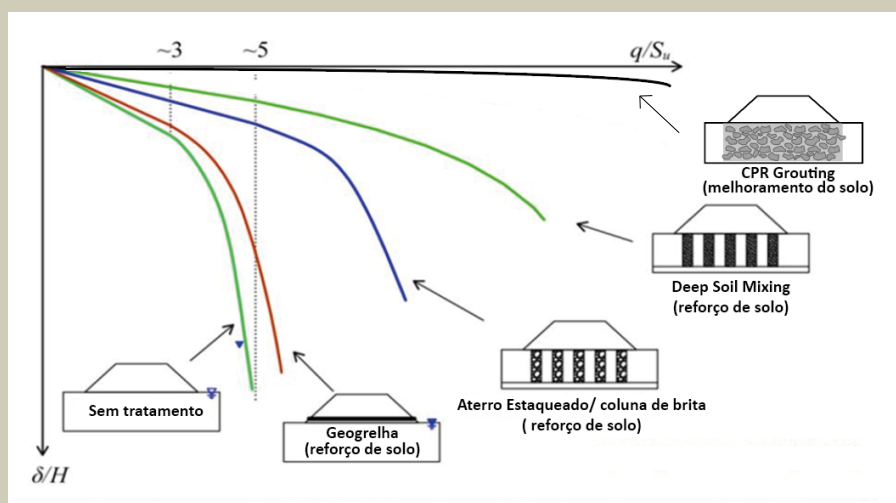


Figura 7 - Comparação entre soluções para solos moles.

solo de fundação de um aterro sem qualquer tratamento, ou seja, com deformações altas e crescentes para cargas pequenas. O valor ~ 5 representa um comportamento de um sistema solo/ aterro, já com alguma rigidez.

A opção por reforço do solo com geogrelha, aterro estaqueado, coluna de brita e deep soil mixing implica em recalque residual que pode comprometer a obra, na medida em que o solo mole permanece.

REFERÊNCIAS

Guide technique, 2000 : Etude et réalisation des remblais sur sols compressibles, Ministère de l'équipement des transports et du logement. L.C.P.C., S.E.T.R.A. France.

Juhaizad B.A., 2010. The modelling of lateral movement of soft soil using finite element analysis and laboratory model. Institut Pengurusan Penyelidikan, Universiti Teknologi Mara, Malaysia.

Khemissa M., Magnan J.P., Josseume H. Étude des propriétés mécaniques de l'argile molle de Cuiche (vallée de l'Adour). Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Études et Recherches des LPC, GT 53, Paris, 1993.

“Meu conhecimento sobre solos moles mudou completamente após a leitura do livro”

Eng.ª Thaissa Lisboa



Escaneie o QR Code e solicite agora mesmo!



SENSORES DE RECALQUE



CÉLULAS DE PRESSÃO PARA ATERROS

GEOKON

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

A necessária estabilidade de um aterro, na margem do Rio Madeira, em Rondônia, que apresentava histórico de deslizamentos.

Esta análise procurou evidenciar a condição de instabilidade de um talude fluvial, pertinente a uma área portuária, situada em Porto Velho, Rondônia, devido ao histórico recorrente de deslizamentos nesta região desta capital onde, invariavelmente, há perdas patrimoniais significativas.

Figura 1 - Talude fluvial, na capital Porto Velho, RO, submetido a problemas de deformabilidade e instabilidade devido à presença de solos moles, aos efeitos de cheia e vazante do rio Madeira que, em 6 meses varia cerca de 15m de altura, além do forte processo erosivo em suas margens.

Figura 2 - Talude com histórico de recalques e ruturas devido às condições do solo, do rio e do clima amazônico.

A análise da estabilidade de taludes de aterros é uma etapa essencial em projetos geotécnicos, em áreas com solos complexos, como é o caso desta região amazônica, precisamente Porto Velho, RO, onde a alta pluviosidade, os níveis freáticos elevados, a presença de solos argilosos com baixa resistência e a periódica elevação e vazante do rio Madeira, que varia 15m em apenas 6 meses, tornando o risco de instabilidade uma realidade concreta. Nos meses de setembro, outubro e novembro, início do inverno amazônico ocorrem, rotineiramente, ruturas de taludes, com danos à infraestrutura e processos de erosão descontrolados. O Rio Madeira impõe variações cíclicas do nível d'água, com cheias e vazantes, acarretando modificações no regime das poropressões no solo mole subjacente. Desta forma, a análise da estabilidade permite avaliar o comportamento do aterro frente a este cenário crítico. Com relação as justificativas de projeto, poder-se-á verificar se o talude do aterro apresenta segurança, definindo-se melhor sua inclinação, verificar a necessidade de melhoramento do solo de fundação, determinando-se o adequado fator de segurança a diferentes hipóteses (estática, pseudoestática com chuvas e na vazante máxima). A justificativa de instrumentação e monitoramento, também é uma necessidade, devido a complexidade geotécnica da região amazônica, tornando imprescindível a utilização de piezômetros

e inclinômetros, afim de acompanhar a resposta do talude do aterro talude e, principalmente, validar o modelo numérico.

Análise do local

Trata-se de uma área portuária, já submetida a processo de rutura a cerca de 10 anos atrás, perdendo uma faixa do pátio, com cerca de 10m paralela ao rio, com deslizamento plano-circular. A condição suporte do pavimento, do estreito pátio do porto, apresenta grandes vazios sob a



Figura 3 - Taludes íngremes com sinais de ruturas.

laje de concreto armado, provocados pela frequente lixiviação da condição de cheia e vazante do Rio Madeira, conforme figuras 5 a seguir. Seu talude apresenta inclinação variável, com sinais de pequenos deslizamentos que, devido a sua apertada geo-

Are you looking for a soil improvement in portuguese?

BEST SELLER MELHORAMENTO DO SOLO MOLE E O GEOENRIJECIMENTO



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

PRESSIÔMETRO

Um ensaio geotécnico completo realizado no campo

Fácil de operar e 100 % viável



ROCTEST

Representante exclusivo no Brasil

+55 21 2718 3968

3Geo
TECNOLOGIA

vendas@3geotecnologia.com

www.3geotecnologia.com

metria, propriedades do solo, regime hídrico e o forte efeito erosivo do Rio Madeira, torna-o essencialmente dinâmico. A condição atual do Rio Madeira, com vazantes cada vez mais severas, impõe desníveis da ordem de 17mts de altura entre o pátio do porto e o menor nível do rio aumentando, drasticamente, o risco de deslizamentos do talude. Na condição de vazante máxima, a ação erosiva da água do Rio Madeira reduz, também, o pé do talude tornando sua inclinação mais íngreme e com mais risco de deslizamento. Esta área portuária possui valor histórico cultural em Porto Velho, Rondônia.

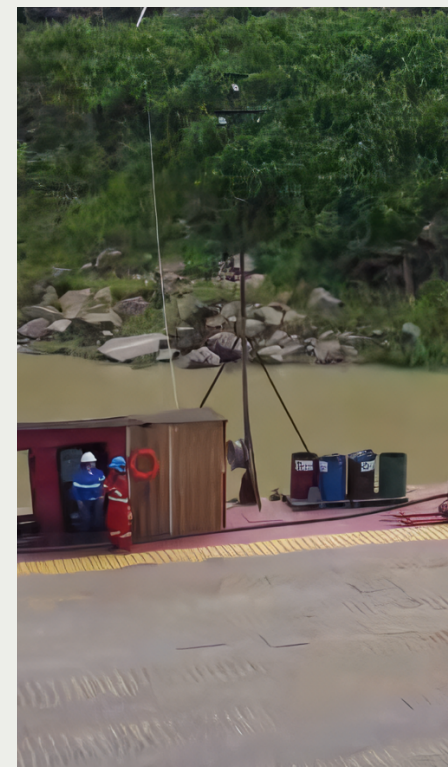


Figura 4 - Vegetação escondendo o real perfil do talude, com sinais de deslizamentos.



Figura 5 - Grandes vazios sob o pavimento do porto, impõe condição de instabilidade particularmente na beira do pátio.

A condição geotécnica do talude do porto

O programa de investigação geotécnica do solo, constou de 05 sondagens à percussão, permitindo a obtenção das características geotécnicas do solo, como os estados de consistên-

cia, espessura dos horizontes, medida dos golpes por penetração (NSPT) e profundidade do nível d'água. A figura, abaixo, apresenta a situação da área portuária, a localização das sondagens e, a Tabela 1 a seguir, reúne as profundidades do nível d'água.



Figura 6 - Vista superior da área portuária, evidenciando sua estreita plataforma, motivada por ruturas anteriores.

ENGEGRAUT

Duplicação da BR-470

Área Portuária de Manaus

INCONFUNDÍVEL

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

CUSTO-BENEFÍCIO

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

GEOENRIJECIMENTO

100% melhoramento de solos tecnologia exclusiva ENGEGRAUT.

Os dois cortes geotécnicos, à seguir, apresentam 2 seções transversais desta área portuária, com perfis definidos a partir das sondagens executadas. Ressalta-se, que nas imagens, o nível d'água encontra-se mais elevado devido ao mês de janeiro, não retratando a época de vazante máxima, que corresponde ao mês de julho. Para esta condição, submetido às fortes chuvas do inverno amazônico, o talude com grande altura, encontra-se saturado, submetido a perigosos excessos de poropressão.

Análise de estabilidade do talude fluvial pelo método C-φ (coesão e ângulo de atrito).

Trata-se de uma robusta análise de estabilidade de talude, amplamente utilizada para verificar a segurança de importantes taludes de áreas portuárias, com geometrias complicadas e solos complexos, gerando resultados visuais claros. Seu objetivo principal é reduzir os parâmetros da resistência do solo (parâmetros c e φ), até que seu fator de segurança (FS) atinja o valor 1, ou seja, chegue ao equilíbrio limite, ocorrendo o deslizamento do talude. O programa utilizado realiza a análise limite e identifica a superfície crítica do deslizamento. Se o FS for maior que 1, o talude é estável. Se o FS for igual a 1, o talude portuário está em seu limite. Agora, se o FS for menor que 1, o talude encontra-se completamente instável e propenso à rutura, a medida em que a vazante do rio se pronuncia. A análise da estabilidade, pelo método c-φ, permite identificar o fator de segurança de forma precisa, considerando diferentes geometrias do talude e a condição do solo de fundação. A abordagem deste método, é amplamente aceita em análises de estabilidade em todo o mundo, utilizando programa de elementos finitos PLAXIS, para a obtenção do SRF (Safety Reduction Factor) ou fator de redução da segurança.

Discriminação	Lâmina D'água	Prof. Investigada (m)
SPT 01	0	20,45
SPT 02	-7	20,45
SPT 03	-7	20,45
SPT 04	-7	20,45
SPT 05	0	20,45
TOTAL		102,25

Tabela 1 – Profundidades do nível d'água

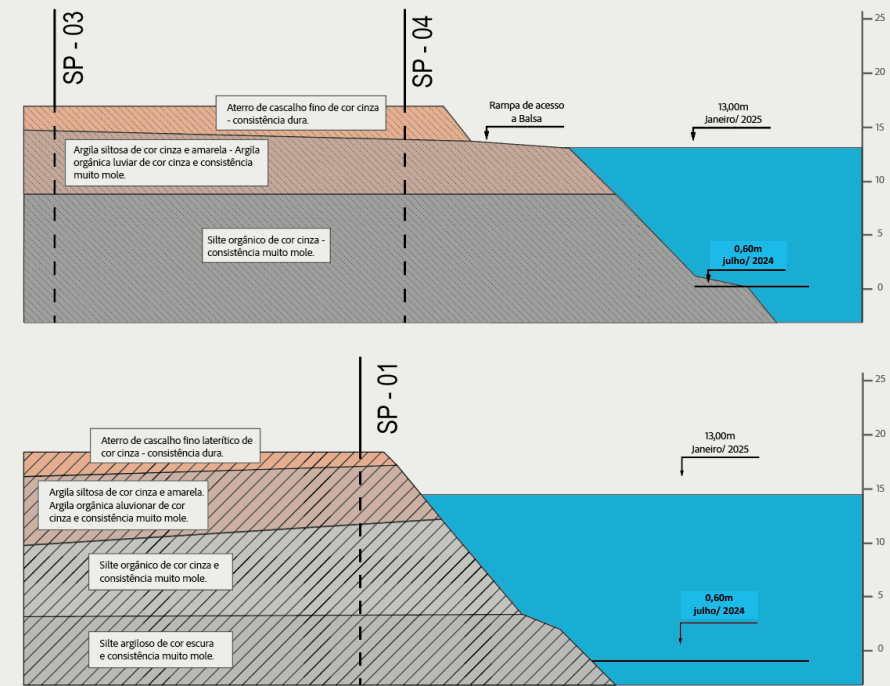


Figura 7 – Seção transversal da área do porto, evidenciando inclinação íngreme e variável. Reparar a vazante de julho de 2024 com apenas 0,60m, impondo uma altura no talude de 17m, em relação ao pátio.

Horizonte	NSPT médio	Ângulo de Atrito (φ')		
		Teixeira (1996)	Godoy (1983)	Valor adotado
Aterro Cascalho	44	47,5	45,6	47
Argila Siltosa	2,6	22,9	29,0	26
Silte Argiloso	1	19,9	28,4	24

Tabela 2 – Estimativa do Ângulo de Atrito:

Determinação dos parâmetros geotécnicos

Na ausência de ensaios de campo e laboratório, para a determinação dos parâmetros da resistência do solo, que compõem os perfis apresentados na figura 7 anterior, optou-se por estimá-los a partir de correlações consagradas, disponíveis na literatura. Para obtenção do ângulo de atrito (φ'), dos horizontes propostos, utilizou-se os valores médios do NSPT e as correlações propostas por Teixeira (1996) e Godoy (1983):

Teixeira (1996): $\phi = 15^\circ + \sqrt{24 \cdot N_{SPT}}$ Equação 1

Godoy (1983): $\phi = 28^\circ + 0,4 \cdot N_{SPT}$ Equação 2

As Tabelas 2 e 3 reúnem os valores médios do NSPT, de cada horizonte, e os valores dos ângulos de atrito estimados. Na análise numérica, considerou-se uma média entre os valores obtidos, a partir das equações apresentadas acima. Estimou-se o parâmetro da deformabilidade (E), a partir da formulação empírica de Alonso (2016), expressa por:

$E = 2,9 \cdot N_{SPT} + 2,7 \text{ (MPa)}$ Equação 3



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



1.014.250 - Extrator Shelby de Bancada



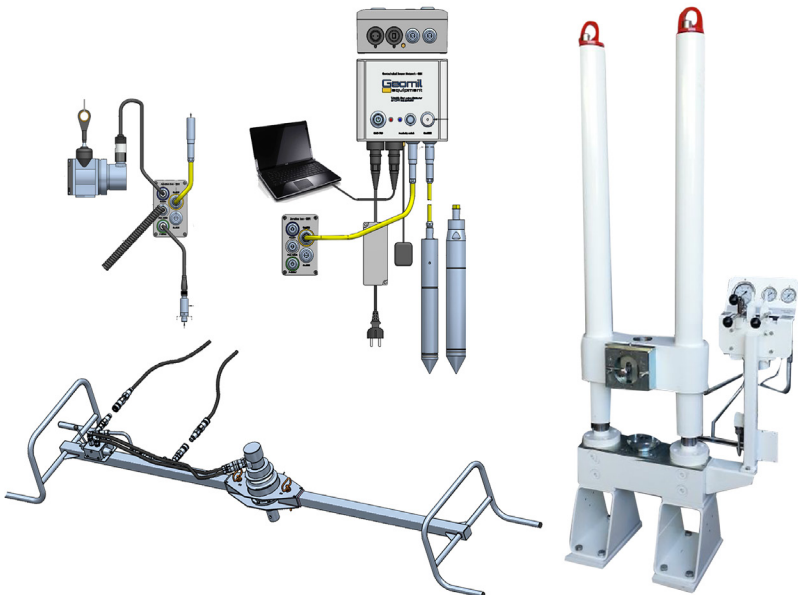
1.055.001 - Prensa de Adensamento



1.022.250 - Prensa CBR / Marshall Digital Microprocessada



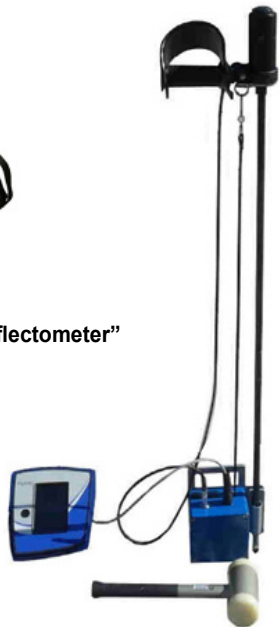
4.100.030 - Medidor de Densidade de Solo Não Nuclear (SDG)



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



4.100.300 - LWD "Light Wheigh Deflectometer"



4.100.035 - Penetrômetro Dinâmico Eletrônico para Solos Panda



Horizonte	NSPT médio	γ (KN/m³)	ϕ' (°)	c' (kPa)	E (MPa)
Aterro Cascalho	44	21,0	47,0	10,0	130,0
Argila Siltosa	2,6	15,0	26,0	8,0	10,0
Silte Argiloso	1	19,9	24,0	10,0	6,0

Tabela 3 – Parâmetros adotados nas análises numéricas Seção 1

Horizonte	NSPT médio	γ (KN/m³)	ϕ' (°)	c' (kPa)	E (MPa)
Aterro Cascalho	21,8	21,0	37,0	10,0	66,0
Argila Siltosa	5,4	15,0	28,0	8,0	18,0
Silte Argiloso	1,1	19,0	24,0	10,0	6,0

Tabela 4 – Parâmetros adotados nas análises numéricas Seção 2

Análise Numérica

Esta análise objetivou avaliar a estabilidade do talude fluvial desta área portuária, a partir do Método dos Elementos Finitos, utilizando-se o software RS2, da Rocscience Inc., que determina o valor do SRF (Strength Reduction Factor), e a região das máximas deformações que ocorrerão, definindo-se uma superfície potencial de ruptura crítica, seguido de deslizamento do talude. O solo, que compõem o perfil geotécnico do local, foi representado pelo

modelo constitutivo Mohr Coulomb, que faz parte da categoria dos modelos elastoplásticos. O princípio básico da elastoplasticidade, estabelece que as deformações são decompostas nas parcelas elástica e plástica. No comportamento elástico, as deformações são recuperadas, ou seja, são reversíveis, enquanto na plasticidade associa-se um desenvolvimento de deformações irreversíveis. Este modelo constitutivo, adota o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, perfeitamente plástico, empregado para representar a ruptura do solo, consi-

derando-se a hipótese de que comporta-se de maneira linear-elástico, até atingir sua ruptura, definida pela envoltória de Mohr-Coulomb (Figura 9). A Tabela 5 apresenta os parâmetros necessários ao modelo Mohr Coulomb, definidos no Item anterior, apresentados nas Tabela 3 e 4. Destaca-se, no modelo Mohr Coulomb, que o solo atinge sua ruptura sem a ocorrência de endurecimento, aumento da resistência após o escoamento, amolecimento, ou queda de resistência com aumento das deformações.

A superfície de plastificação, fixa, comprova que não ocorre endurecimento do solo devido à fase plástica.

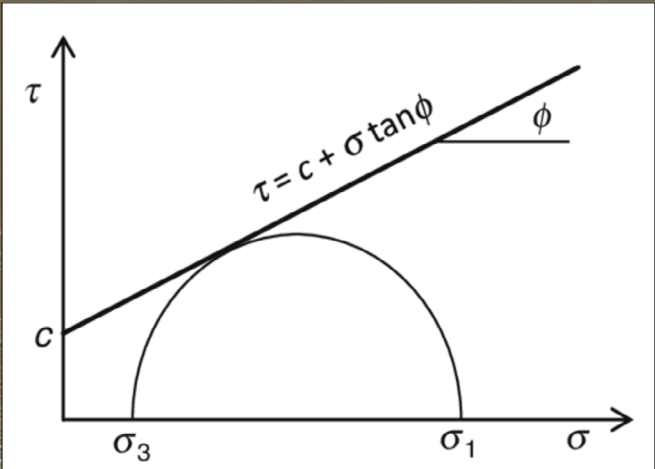


Figura 9 – Comportamento tensão vs deformação: Modelo Mohr Coulomb.

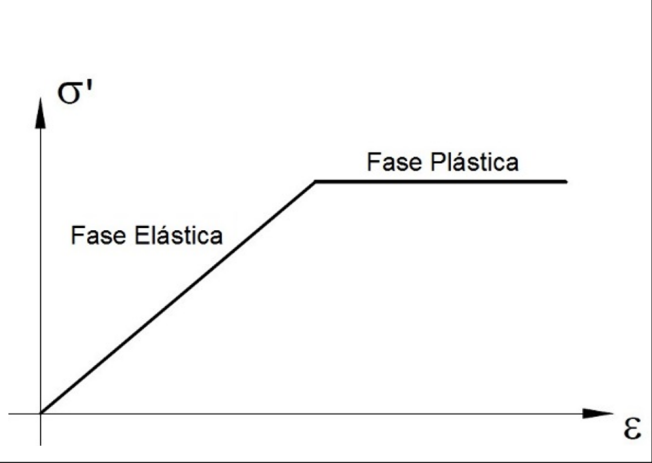


Figura 10 - Relação Tensão vs. Deformação- Modelo Mohr Coulomb.

O Software geotécnico RS2, calcula o fator de segurança pelo método SRM - Strength Reduction Method, reduzindo progressivamente os parâmetros da resistência do solo (c' e f'), dividindo-os por fatores de redução crescentes, até que a ruptura ocorra. O fator de segurança é considerado, então, como o menor fator de redução (SRF) para provocar a ruptura. No contexto da simulação numérica, com elementos finitos, a não convergência do problema é considerada como indício de ruptura, possuindo vantagens de não exigir suposições em relação ao formato da superfície de ruptura, nem ao campo de tensões provocado. No modelo Mohr Coulomb, os parâmetros reduzidos são a coesão efetiva (c') e a tangente do ângulo de atrito efetivo ($\tan \phi'$). Realiza-se, então, a avaliação da existência de um mecanismo de ruptura, através da observação do campo de deformações máximas existentes. As figuras 11 e 12, apresentam as geometrias adotadas na análise numérica. As malhas de elementos finitos estão apresentadas na Figura 13 (990 elementos triangulares e 2113 nós) e na Figura 14 (1034 elementos triangulares e 2201 nós). A condição de contorno consistiu na restrição dos deslocamentos horizontais nas laterais e no impedimento dos deslocamentos verticais, na base do modelo.

Parâmetros	Descrição
γ_{nat}	Peso específico natural
c'	Coesão efetiva
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo
E	Módulo de Young
ν	Coefficiente de Poisson

Tabela 5 – Parâmetros do solo: Modelo Mohr Coulomb

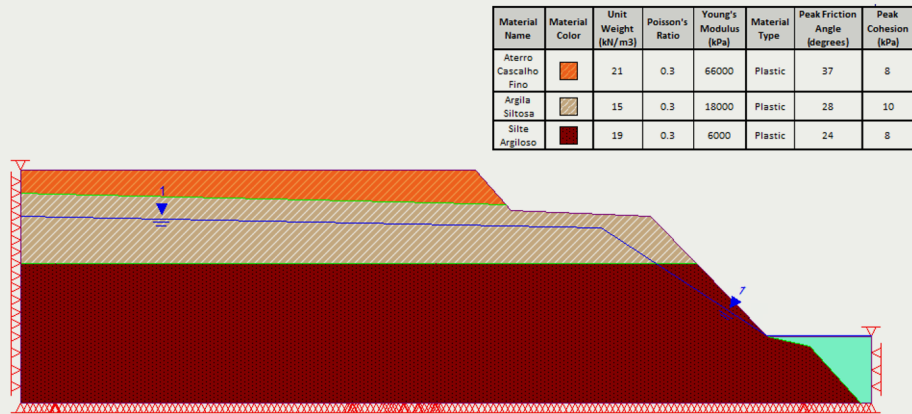


Figura 11 – Geometria do talude na análise numérica na Seção 1.

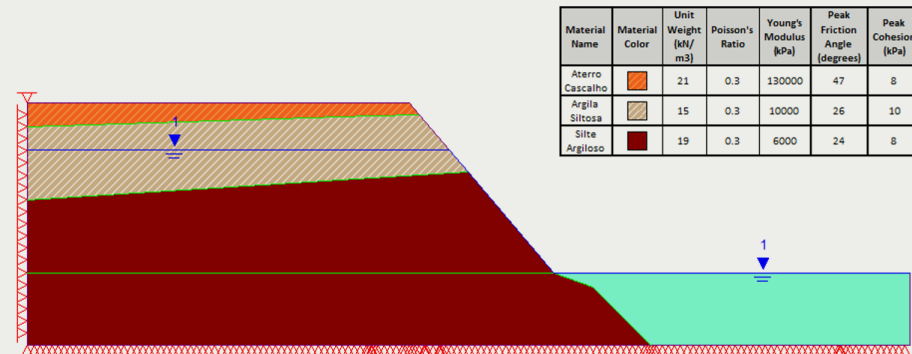


Figura 12 – Geometria do talude na análise numérica na Seção 2.

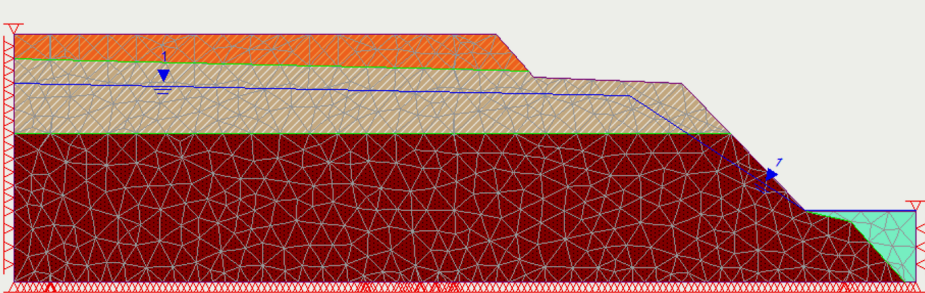


Figura 13 – Malha de elementos finitos (MEF) na seção 1.

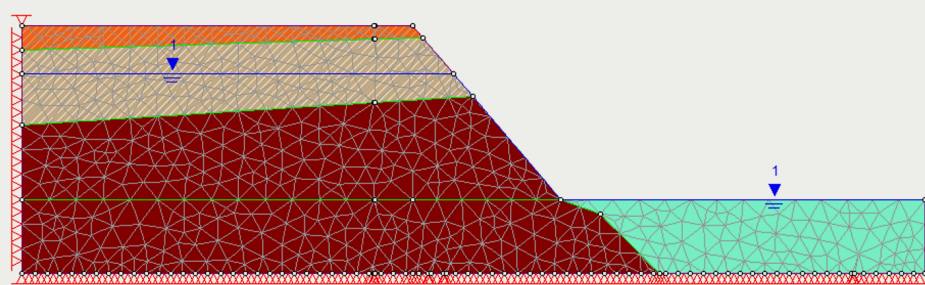


Figura 14 – Malha de elementos finitos (MEF) na seção 2.

Resultados

A análise numérica considerou um rebaixamento do nível d'água equivalente a 15 m, em função das últimas vazantes, que evidenciam um leito de rio cada vez mais seco. Na figura 15, apresenta-se o resultado da análise numérica, executada na Seção 1, com as regiões de máxima deformação do solo, observando-se o desenvolvimento de uma superfície de ruptura, caracterizada por um resultado de SRF igual a 0,85, significando que com o rebaixamento de 15 m, a condição de segurança normatizada não é atendida, tornando-se necessário a adoção de medidas para aumentar rapidamente a segurança do talude. A figura 16 apresenta o resultado da análise numérica executada, dando como resultado um SRF = 0,77, indicando que a condição de segurança também encontra-se comprometida, necessitando correção imediata. A Tabela 9 reúne os fatores de segurança obtidos na análise da estabilidade, indicando a necessidade de melhoramento do solo do talude, de modo a garantir a condição de estabilidade no período crítico da vazante do Rio Madeira.

Conclusão

O resultado desta análise geotécnica, pertinente à estabilidade do solo do talude desta área portuária, em Porto Velho, RO, deixa evidente que a(s)

próxima(s) vazante(s) do Rio Madeira poderá acarretar deslizamentos, de forma mais grave que na vez anterior, devido a condição do solo do talude, a estreita área de trabalho existente hoje, e ao estado de instabilidade do pavimento do pátio. O talude portuário não atendeu ao critério normativo de estabilidade, oferecendo SRFs iguais a 0,85 e 0,77, para as Seções 1 e 2, respectivamente. A condição de instabilidade é agravada pela existência de grandes vazios sob a laje, que compõe o pavimento do pátio do Porto, decorrentes das últimas vazantes. O desmoronamento de uma parte do pavimento, durante a próxima vazante do Rio Madeira, poderá servir de gatilho para o início de um gran-

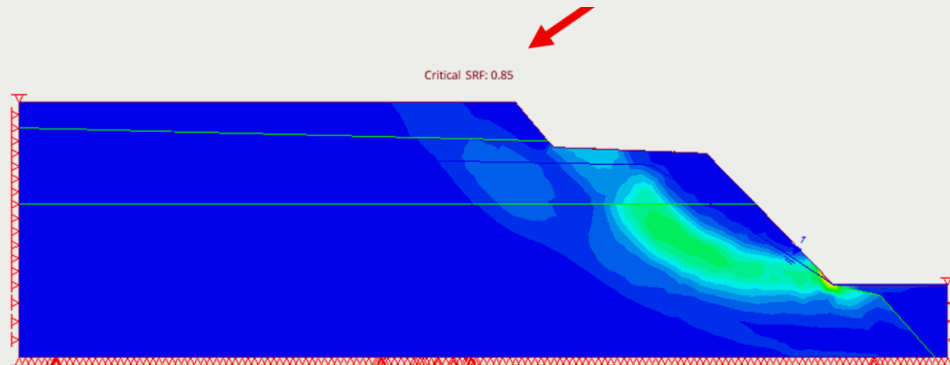


Figura 15 – Máxima deformação do solo portuário na Seção 1 – SRF = 0,85.

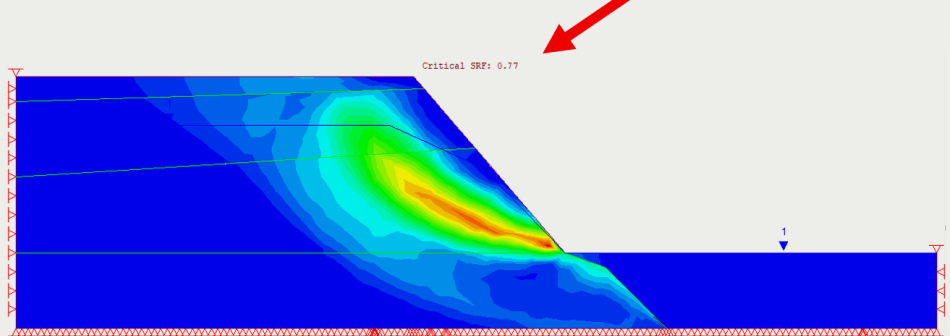


Figura 16 – Máxima deformação do solo portuário na Seção 2 – SRF = 0,77.

Análise	SRF	Conclusão
Seção 1	0,85	Não atende aos critérios normativos de segurança
Seção 2	0,77	

Tabela 6 – Fatores de segurança obtidos na análise de estabilidade

GEOKON

TRUSTED MEASUREMENTS®
EQUIPAMENTOS GEOTÉCNICOS

Conheça nosso moderníssimo inclinômetro M6180 que possibilita automação e leitura em tempo real

O moderníssimo inclinômetro M 6180, caracteriza-se por segmentos individuais, mecanicamente conectados com juntas estilo "bola-soquete", interligadas eletricamente com conectores à prova d'água em um único cabo, tornando o conjunto extremamente leve e compacto, o que torna fácil e rápida sua instalação. Consequentemente, seu custo tornou-se muito atrativo. O modelo M 6180 juntamente com nosso sistema de compartilhamento de dados, sem fio, da série GeoNet torna-se, portanto, a solução mais moderna de monitoramento para deslocamentos horizontais.

Conheça hoje mesmo esta moderníssima tecnologia (com preço atrativo)

Representante exclusivo no Brasil: G5 Engenharia LTDA
Contato: (41) 3402-1707 / cotacao@g5engenharia.com.br / g5engenharia.com.br

REFERÊNCIAS

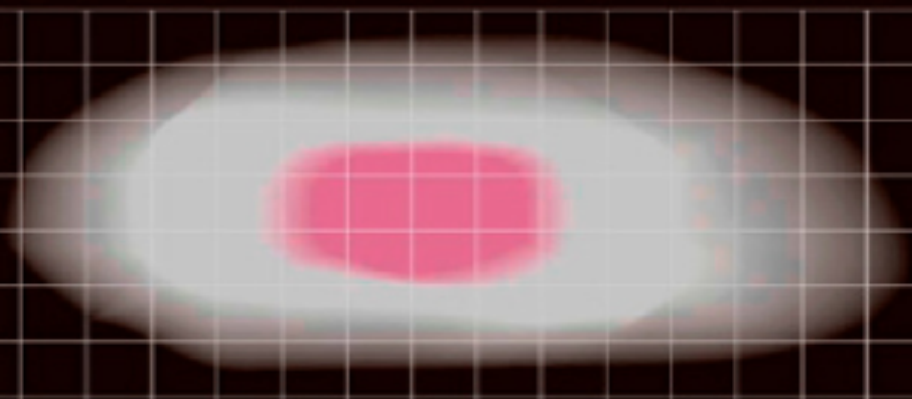
Thomas Kim é engenheiro geotécnico especializado em melhoramento de solos moles.

Godoy, N. S. (1983). Estimativa da capacidade de carga de estacas a partir de resultados de penetrômetro estático. Palestra. São Carlos (SP): Escola de Engenharia de São Carlos – USP.

Teixeira, A. H. (1996). Projeto e execução de fundações. Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, SEFE, São Paulo, v.1, p. 33-50.

Matsui, T. and San, K.C. (1992). Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique. Soils and Foundations 32(1): 59-70.

contaminação de solo?



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

Confie em quem tem experiência.



www.engegraut.com.br



SSBI SOFT SOIL BRAZILIAN INSTITUTE

O SOFT SOIL BRAZILIAN INSTITUTE ajuda você a entender solos mole

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

softsoilbrazilianinstitute.com.br

PARCEIROS



SOFT SOIL BRAZILIAN INSTITUTE

Rua Correia de Araújo, 12-
Barra da Tijuca
Rio de Janeiro/ RJ- Brasil-
CEP 22611-070
Tel: (21) 3851-6218

EDIÇÃO

DIRETOR EDITORIAL
M.Sc. Joaquim Rodrigues

DIRETORES ADJUNTOS

Engº Thomas Rodrigues
Engº Roger Kim
Engª Patrícia Tinoco

PUBLICIDADE, ASSINATURA

Cleide Ferreira

EDITOR DE ARTE

Victor Peres

REPRINTS EDITORIAIS

Mariana Tati

FALE CONOSCO

softsoilgroup.com.br
@engegraut
(21) 3154-3250
atendimento@softsoilbrazilianinstitute.com.br