

Soft Soil Brazilian Review

SOFT
SOIL
SCIENCE

IBSM

EDIÇÃO AMÉRICA LATINA
JULHO - AGOSTO 2026

03

Duplicação de rodovias, sobre solos moles. Por que a trajetória de tensões está mudando a forma de analisar aterros?

24

Características do recalque que ocorre na duplicação de antigas rodovias sobre solos moles.

48

O solo tem memória. A duplicação muda a trajetória de tensões e reativa o maciço consolidado. O aterro antigo responde.

38 - Consulta

Li o artigo do Jie Han, referência mundial em aterros reforçados sobre solos moles, em duplicação de rodovias. Gostaria que comentasse o artigo, juntamente com o comprometimento de trincas existentes no pavimento em decorrência de obra de duplicação.

Duplicação de Rodovias.

As deformações que não vemos, por que com solos moles, a resistência pode ser suficiente. A rigidez, não.



3 **DUPLICAÇÃO DE RODOVIAS SOBRE SOLOS MOLES. POR QUE A TRAJETÓRIA DE TENSÕES ESTÁ MUDANDO A FORMA DE ANALISAR ATERROS?**

24 **CARACTERÍSTICAS DO RECALQUE QUE OCORRE NA DUPLICAÇÃO DE ANTIGAS RODOVIAS SOBRE SOLOS MOLES.**

38- CONSULTA

LI O ARTIGO DO JIE HAN, REFERÊNCIA MUNDIAL EM ATERROS REFORÇADOS SOBRE SOLOS MOLES, PERTINENTE A UMA AMPLIAÇÃO RODOVIÁRIA. GOSTARIA QUE COMENTASSE O ARTIGO, JUNTAMENTE COM O COMPROMETIMENTO DE TRINCAS EXISTENTES NO PAVIMENTO EM DECORRÊNCIA DA OBRA DE DUPLICAÇÃO.

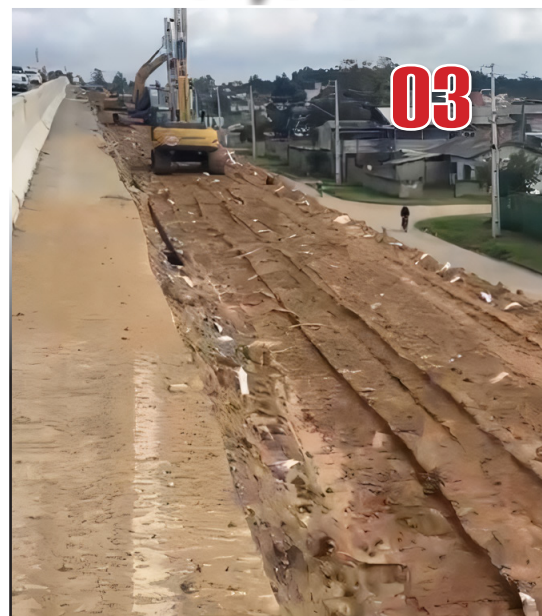
44 **O SOLO TEM MEMÓRIA. A DUPLICAÇÃO MUDA A TRAJETÓRIA DE TENSÕES E REATIVA O MACIÇO CONSOLIDADO. O ATERRO ANTIGO RESPONDE.**

Editorial

Durante muitos anos, grande parte das análises geotécnicas esteve concentrada na obtenção de fatores de segurança globais, capazes de representar a estabilidade de aterros, taludes e estruturas de contenção. Entretanto, a experiência de campo demonstra que o comportamento real do solo, principalmente do solo mole, é muito mais complexo do que um simples valor final de estabilidade. A geotecnia moderna exige compreender, não apenas o estado final da obra mas, principalmente, o caminho percorrido pelas tensões durante sua execução. Velocidade construtiva, geração de poropressão, recalque diferencial, deformabilidade da fundação e interação solo-estrutura passaram a exercer papel decisivo no desempenho da obra geotécnica. Nesta edição, reunimos três temas que convergem exatamente para essa nova visão da geotecnia aplicada. O primeiro, aborda o conceito da trajetória de tensões e a construção em etapas para solos moles, destacando como a trajetória de tensões

influencia diretamente a mobilização da resistência e a estabilidade das obras durante sua execução. O segundo tema, discute o recalque e a deformação em ampliações rodoviárias, analisando o comportamento da interface entre aterros novos e antigos, um dos maiores desafios atuais em duplicações de rodovias. Por fim, apresentamos uma abordagem voltada ao comportamento estrutural ferroviário, associada ao recalque da fundação, evidenciando a crescente necessidade da integração entre geotecnia e o desempenho estrutural da infraestrutura do transporte. Mais do que analisar rupturas, a engenharia geotécnica contemporânea precisa compreender deformações, redistribuições de tensões e a evolução progressiva do comportamento do maciço ao longo de sua construção, além de sua vida útil. É exatamente esta transição, da análise puramente estática para a compreensão evolutiva do comportamento do solo, que esta edição busca discutir.

Boa leitura.



DUPLICAÇÃO DE RODOVIAS, SOBRE SOLOS MOLES. POR QUE A TRAJETÓRIA DE TENSÕES ESTÁ MUDANDO A FORMA DE ANALISAR ATERROS?



ANÁLISE

Eng. Joaquim Rodrigues

Fig. 1 - Ampliação de rodovia sobre aterro e contenção existentes. A construção de novos aterros adjacentes, modifica progressivamente o estado de tensões do maciço, tornando fundamental a avaliação da trajetória de tensões ao longo das etapas construtivas para análise mais realista da estabilidade e das deformações.

O recente artigo do professor Cihan Öser, analisando este tema, oferece um método para elevação de aterros sobre solos moles, baseado na trajetória de tensões considerando, simultaneamente, mecanismos de ruptura por capacidade de carga e estabilidade global, além da influência das etapas construtivas sobre a resistência mobilizada do solo. Procuramos desenvolver esta interessante matéria, baseada no conceito deste professor, adaptada à realidade

de do melhoramento de solos, com CPR Grouting, (Consolidação Profunda Radial), destacando-se como este processo altera favoravelmente as trajetórias de tensões no maciço. A construção de aterros, sobre solos moles, continua sendo um dos maiores desafios da engenharia geotécnica em todo mundo. Em muitas situações, a baixa resistência não drenada, associada à elevada compressibilidade e à reduzida capacidade de dissipação das poropressões, limita significativamente

a velocidade de execução das obras. A estabilidade dessas estruturas é, tradicionalmente, analisada por métodos baseados no equilíbrio limite, onde a segurança é avaliada a partir da comparação entre esforços solicitantes e resistentes. Entretanto, a evolução da Mecânica dos Solos tem demonstrado que a compreensão das trajetórias de tensões, desenvolvida durante a construção, fornece visão mais realista do comportamento do maciço, permitindo entender como a resistência do solo

é mobilizada ao longo do processo construtivo.

O QUE É A TRAJETÓRIA DE TENSÕES?

Trata-se do caminho percorrido pela posição das tensões dentro do solo, à medida em que é submetido a carregamentos, de um aterro, uma rodovia ou de uma fundação. Em outras palavras, mostra como as tensões verticais, horizontais e as pressões da água, nos vazios do solo, evoluem ao longo do tempo, durante a aplicação do carregamento. Uma forma simples de entender este conceito, é imaginar que o solo possui um "histórico de esforços". Cada nova camada de aterro, modifica este estado interno alterando, simultaneamente, as tensões efetivas e poropressões. A trajetória das tensões permite acompanhar esta evolução, passo a passo, identificando se o solo está se aproximando da condição de ruptura ou se ainda possui capacidade para suportar novos carregamentos. No solo mole, este conceito é particularmente importante porque a resistência não depende apenas da carga final aplicada mas, também, da forma como é introduzida. Um mesmo aterro pode estar estável, quando construído em etapas sucessivas, permitindo a dissipação das poropressões e o ganho de resistência do solo mas, torna-se instável, se executado rapidamente em uma única fase.

Por esse motivo, a análise da trajetória das tensões é amplamente utilizada em projetos de aterros sobre solos moles, permitindo prever a evolução da estabilidade, do recalque e das deformações durante a construção. Trata-se, portanto, de uma ferramenta que ajuda a compreender não apenas como o solo está mas, para onde caminha em termos de comportamento mecânico.

Quando elevamos um aterro sobre uma camada de solo mole, sem qualquer tratamento prévio, o aumento das tensões totais, ocorre de forma muito mais rápida do que a dissipação das pressões neutras, geradas



Fig. 2 - Vista aérea de uma ampliação rodoviária executada sobre solo mole, ilustrando a interação entre a pista existente e a nova plataforma em execução. Nesta condição, o comportamento do maciço é fortemente influenciado pela trajetória de tensões induzida pelas etapas construtivas, tornando essencial o controle das deformações e da estabilidade global.

pela aplicação da carga. Como consequência, desenvolvem-se trajetórias de tensões que conduzem o solo rapidamente em direção à ruptura, seja por insuficiência de capacidade de carga, seja por instabilidade global do maciço. Nestes casos, o solo trabalha próximo de sua condição crítica, com elevados níveis de deformação e recalques significativos exigindo, frequentemente, a adoção de etapas construtivas lentas ou do uso de geodrenos com sobrecargas temporárias para permitir a consolidação gradual do terreno. O CPR Grouting modifica substancialmente este cenário ao promover um processo simultâneo de compressão e drenagem, com o desejado geoenrijecimento do solo mole. A cravação de geodrenos, seguido da execução dos bulbos de compressão, gera expansão radial em cada metro cúbico do solo, aumentando as tensões horizontais efetivas e reduzindo o índice de vazios do volume melhorado. Diferentemente das técnicas alternativas, cujo objetivo principal é apenas criar inclusões rígidas para transferência de carga, o CPR Grouting atua diretamente na matriz do solo, alterando seu es-

tado de tensões e suas propriedades mecânicas, antes mesmo da aplicação do carregamento definitivo. Sob o ponto de vista das trajetórias de tensões, o efeito mais importante do CPR Grouting é o deslocamento o estado inicial do solo, para a condição de maior confinamento efetivo. Este aumento da tensão horizontal, provoca expansão da superfície resistente do solo elevando, simultaneamente, sua resistência cisalhante, rigidez e a capacidade de suportar incrementos adicionais de tensão, isolando a condição de ruptura. Em termos práticos, significa que o aterro passa a ser construído sobre um solo previamente geoenrijecido, cuja trajetória de tensões permanece mais distante da envoltória de ruptura, durante todas as fases da construção.

O QUE É O MÉTODO DO ESTADO LIMITE?

O Método do Estado Limite é uma moderna filosofia utilizada para verificar a segurança e o desempenho de obras geotécnicas. Em vez de trabalhar apenas com um fator global de segurança, o método procura

CPR[®]

GROUTING

Melhorar solos moles exige precisão.

A PRECISÃO TRANSFORMA
CONHECIMENTO EM DESEMPENHO.



INVESTIGAÇÃO
GEOTÉCNICA



PRESSIOMETRIA E
ENSAIOS TOMOGRÁFICOS



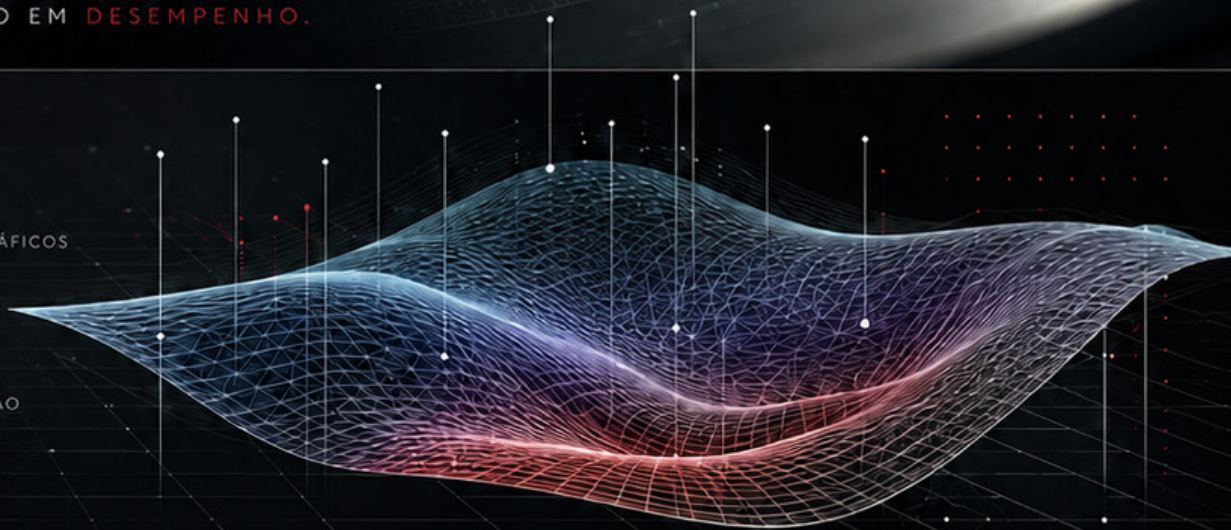
MODELAGEM
NUMÉRICA



MONITORAMENTO
E INSTRUMENTAÇÃO



EXECUÇÃO
CONTROLADA



O **CPR Grouting** integra investigação geotécnica, modelagem numérica, monitoramento e execução controlada para **transformar solos moles** em plataformas seguras para infraestrutura.



geotecnia@engegraut.com.br



[@engegraut_geotecnia](https://www.instagram.com/engegraut_geotecnia)



Engegraut Engenharia Geotécnica

identificar condições extremas, além das quais a estrutura ou o solo deixam de atender aos requisitos de segurança ou funcionalidade.

Na geotecnia, dois estados limites são particularmente importantes. O primeiro é o Estado Limite Último (ELU), associado à ruptura ou ao colapso do maciço do solo. Neste caso, verifica-se se a resistência disponível é suficiente para suportar as tensões geradas pelas cargas aplicadas. O segundo é o Estado Limite de Serviço (ELS), relacionado ao desempenho da obra durante sua vida útil, avaliando aspectos como recalque, deformação excessiva, deslocamentos e trincas que possam comprometer sua utilização. Quando aplicado a aterros sobre solo mole, o método dos estados limites permite analisar, simultaneamente, a estabilidade global do maciço e o comportamento deformacional da fundação. Assim, não basta que o aterro não rompa. É necessário também que o recalque e deslocamentos permaneçam dentro de limites aceitáveis para a operação da obra. A grande vantagem, desta abordagem, é que considera de forma mais realista o comportamento do solo ao longo da construção. Associada à análise da trajetória de tensões, permite acompanhar a evolução do carregamento, identificando a aproximação da condição crítica e definindo etapas construtivas mais seguras. Por isso, o método dos estados limites é hoje uma das bases conceituais mais importantes para o projeto e a avaliação de obras geotécnicas modernas. Enquanto a trajetória de tensões mostra o “caminho” que o solo percorre durante o carregamento, o método do estado limite define os “limites” que esse caminho não pode ultrapassar, para que a obra permaneça segura e funcional.



Fig. 3 - Melhoria do solo mole em uma duplicação de rodovia, ressaltando-se a plataforma executada no talude existente, onde entrará o novo aterro.

tensões localizadas, melhorando a uniformidade deformacional do terreno e eliminando a ocorrência de recalques diferenciais. Como resultado, a elevação do aterro ocorre com maior velocidade e segurança, reduzindo a dependência de longos períodos de espera para a consolidação do solo de fundação. A análise da trajetória de tensões também permite compreender por que o CPR Grouting apresenta desempenho diferenciado em obras

de ampliação rodoviária, ferroviária e portuária. Nestes empreendimentos, a estabilidade do aterro não depende apenas da resistência inicial do solo mas, também, da forma como a resistência evolui ao longo do tempo. Ao aumentar previamente as tensões efetivas, promovendo um ganho expressivo da resistência não drenada, o CPR Grouting cria condição para que o solo suporte incrementos sucessivos de carga, mantendo elevados fa-

Visão em corte do solo mole podendo apresentar textura e cor escura

ou cinzenta. Para torná-lo rijo faça

MELHORAMENTO DE SOLO

Solicite informações
www.softsoilbrazilianreview.com.br



Fig. 4 - Aplicação do CPR Grouting em obra de ampliação rodoviária sobre solo mole. O processo modifica o estado de tensões do maciço, favorecendo a redistribuição tridimensional das tensões, o aumento da rigidez e o controle dos deslocamentos induzidos pelo aterro.

tores de segurança, durante todo o processo construtivo. Desta forma, a aplicação dos modernos conceitos de trajetória de tensões, confirma que o melhoramento promovido pelo CPR Grouting não deve ser interpretado apenas como um mecanismo de reforço estrutural localizado, mas como modificação ampla e profunda do estado tensional do maciço, transformando o comportamento global do solo mole, elevando sua capacidade resistente, reduzindo deformações e proporcionando condição mais segura para a construção de aterros de grande porte. Sob esta perspectiva, o CPR Grouting representa tua evolução conceitual importante no tratamento de solos moles, alinhando mecanismos do melhoramento do terreno, aos princípios mais avançados da moderna mecânica dos Solos.

Características fundamentais do método proposto.

As características de um projeto de aterro, combinando o método do

estado limite com trajetória de tensões pode ser interpretado de forma muito interessante para a realidade do melhoramento de solos moles, porque descreve a visão moderna do projeto de aterros, sobre solos compressíveis, compreendendo a evolução das tensões, controlando o mecanismo de deformação e acompanhando o comportamento real da obra por meio de instrumentação. O desempenho de aterros construídos, sobre solos moles depende, fundamentalmente, dos requisitos geotécnicos da capacidade suporte da fundação e do controle do re-

calque. Quando esta condição não é adequadamente atendida, o comportamento conjunto entre aterro e solo de fundação pode evoluir para mecanismos de ruptura, que comprometem a estabilidade global da estrutura. O processo normalmente inicia-se pela compressão excessiva da camada de solo mole situada abaixo do aterro. À medida que as tensões verticais aumentam, o solo sofre deslocamentos laterais, geralmente acompanhado por recalque, que resulta tanto em ruptura da fundação quanto em instabilidade do talude do aterro. Em obras executadas sobre



Fig. 5 - O CPR Grouting durante a fase inicial para a elevação do novo aterro, promovendo-se a modificação controlada do estado de tensões do maciço com solo mole. O melhoramento aumenta progressivamente a rigidez do terreno e reduz as deformações, proporcionando condições mais seguras para a construção de aterros em duplicação de rodovias.

solo mole, a condição de curto prazo costuma ser mais crítica do que a de longo prazo. Durante a construção, a aplicação rápida do carregamento, provoca elevação da pressão neutra da água, presente nos vazios do solo. Como consequência, ocorre redução da tensão efetiva e, portanto, diminuição da resistência ao cisalhamento disponível para suportar o aterro recém-construído. É justamente neste período que se concentra o maior risco de instabilidade. O método proposto pelos autores, baseia-se no conceito do Estado Limite, que permite avaliar a altura máxima de aterro, a ser construído sob condição não drenada, buscando-se determinar a carga que o solo consegue suportar, antes que ocorra condição crítica de ruptura. Entretanto, quando a altura final do aterro ultrapassa aquela admissível para uma única etapa de construção, torna-se necessário considerar a evolução do comportamento do solo ao longo do tempo. Neste caso, a construção passa a ser executada em estágios sucessivos, permitindo que a consolidação gradual aumente a resistência do terreno entre cada fase do carregamento. Para representar adequadamente este processo, os autores introduzem o conceito da trajetória de tensões, que permite acompanhar a evolução dos estados de tensão desde o início



Fig. 6 - CPR Grouting em andamento em uma rodovia federal. A melhoria do comportamento geotécnico do maciço permite maior controle do processo de recalque e dos deslocamentos laterais, favorecendo a estabilidade da plataforma durante a execução das sucessivas etapas do alteamento.

da obra até sua conclusão, identificando-se como o solo responde às sucessivas etapas do carregamento e adensamento. O método pode ser refinado por meio de análises numéricas, como o Método dos Elementos Finitos, permitindo reproduzir, com maior precisão, o comportamento real do maciço. Um dos aspectos mais relevantes da metodologia é a integração entre a análise teórica e o monitoramento de campo. A instrumentação como piezômetros, inclinômetros, placas de recalque, marcos superficiais e estações robotizadas de monitoramento permitem comparar, continuamente, a previsão de projeto com o comportamento efetivamente observado durante a execução. Caso identifique-se diferen-

ças significativas, entre os valores previstos e os medidos em campo, os parâmetros do modelo são atualizados, possibilitando-se ajustar a estratégia construtiva em tempo real. Esta abordagem observacional aumenta significativamente a segurança da obra, reduz incertezas e permite otimizar prazos e custos sem comprometer a estabilidade do empreendimento. Sob esta ótica, o método não deve ser visto apenas como uma ferramenta de cálculo, mas como um sistema integrado de previsão, monitoramento e tomada de decisão, no qual a evolução das tensões, deformações e pressões neutras passa a orientar diretamente o cronograma executivo e o gerenciamento do risco geotécnico.

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

SOLOTEST®

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



 1.014.250 - Extrator Shelby de Bancada



 1.055.001 - Prensa de Adensamento



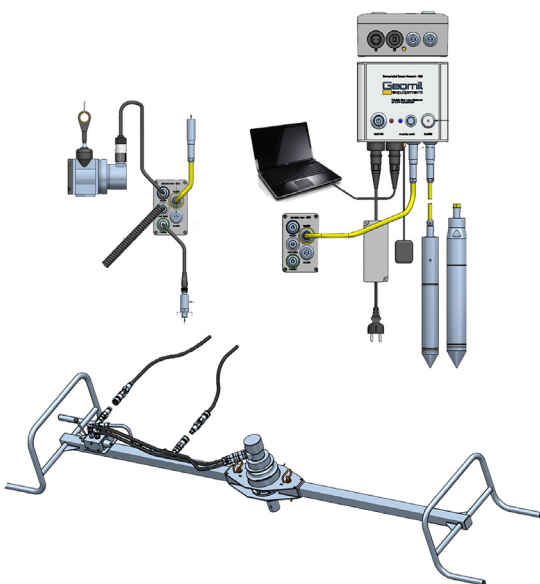
 1.022.250 - Prensa CBR / Marshall Digital Microprocessada




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



 4.100.300 - LWD "Light Wheight Deflectometer"



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



 4.100.035 - Penetrômetro Dinâmico Eletrônico para Solos Panda

Aplicação do Método Proposto. Cálculo da Estabilidade no Estado Limite Último

O primeiro atributo do método proposto, consiste na verificação da estabilidade do maciço na condição do Estado Limite Último (ELU), utilizando técnicas de análise limite, amplamente consagradas na Mecânica dos Solos. Nesta abordagem, o solo é representado como material perfeitamente plástico, ou seja, admite-se que, após atingir sua resistência máxima, continua deformando sem aumento adicional das tensões resistentes. O comportamento é descrito pela regra do fluxo associado, hipótese clássica adotada em diversos métodos de análise de estabilidade. A aplicação deste conceito, permite determinar a condição de ruptura do terreno, estabelecendo limite seguro entre estabilidade e instabilidade. Em termos práticos, o método procura identificar qual é a máxima solicitação que o maciço pode suportar antes do desenvolvimento de mecanismos de ruptura generalizada. A análise fornece, portanto, uma avaliação direta da margem de segurança existente entre as tensões atuantes e a resistência disponível do solo. Dentro desta metodologia, são utilizados limites teóricos superiores e inferiores de resistência, permitindo enquadrar a capacidade real do sistema dentro de uma faixa confiável de comportamento, reduzindo as incertezas normalmente associadas às propriedades geotécnicas, proporcionando estimativa mais robusta do fator de segurança global. No contexto do método observacional, apresentado pelos autores, a análise da estabilidade no Estado Limite Último, representa a primeira etapa do processo de tomada de decisão, garantindo que qualquer modificação executada durante a obra, permaneça dentro de condições aceitáveis de segurança estrutural e geotécnica. A partir desta verificação inicial, torna-se possível avançar para as análises de deformabilidade e mo-

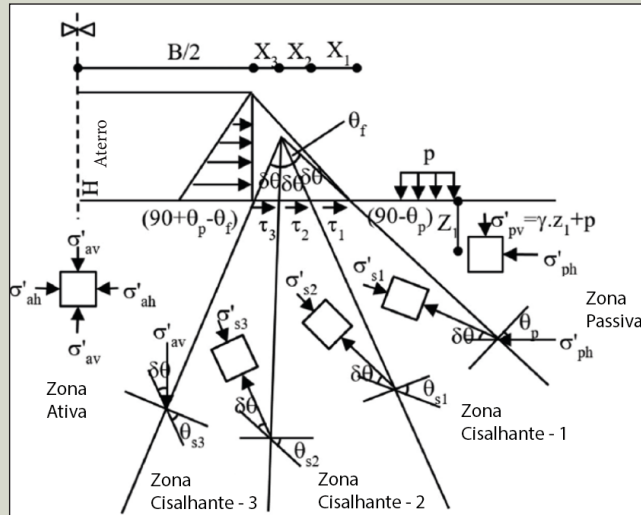


Fig. 7 - O método de estabilidade de aterros baseada no teorema do limite inferior da teoria da plasticidade, com a "trajetória das forças" dentro do aterro. Assim como o peso de uma pessoa distribui-se pelo chão ao caminhar, o peso do aterro também percorre caminhos específicos dentro do solo. Algumas regiões ficam mais comprimidas e outras são mais solicitadas ao cisalhamento. Se o solo for muito mole, essas deformações podem evoluir até provocar instabilidade. O CPR aumenta a capacidade do solo de distribuir esses esforços, reduzindo deslocamentos e tornando o aterro bem mais seguro.

nitramento, que constituem os demais atributos do método. Sob a ótica do melhoramento do solo, esta etapa assume papel fundamental, pois permite avaliar, de forma quantitativa os ganhos de resistência produzidos pela intervenção executada. Com o CPR Grouting, o aumento da resistência ao cisalhamento e da rigidez do maciço pode ser incorporado aos modelos de estabilidade, demonstrando a evolução progressiva dos fatores de segurança, à medida que o solo é geoenrijecido. Desta forma, a análise no Estado Limite Último, não apenas verifica a segurança da obra mas, também, fornece ferramenta objetiva

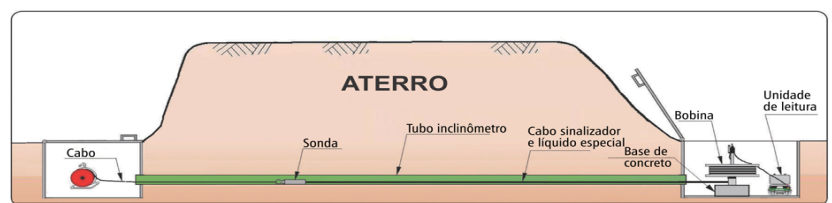
para acompanhar a eficácia do processo do melhoramento ao longo de sua execução. Dando continuidade à interpretação da metodologia proposta, os autores estabelecem que o mecanismo de ruptura, adotado para a análise da estabilidade última dos aterros, sobre solo mole, baseia-se em um sistema de múltiplos blocos rígidos, onde o maciço do solo não se deforma de maneira contínua mas, sim, por meio do deslocamento relativo dos blocos delimitados por superfícies de ruptura. As tensões atuantes são determinadas utilizando os princípios da teoria da plasticidade, pelo limite inferior, garantindo que o estado de tensões considerado, permaneça compatível com a condição de equilíbrio e a resistência do solo. O trabalho enfatiza que a correta identificação da superfície de escorregamento é um dos aspectos mais importantes no projeto de aterros sobre solos moles, pois controla diretamente o fator de segurança obtido. Diversos pesquisadores apontaram que a geometria da superfície de ruptura influencia significativamente os resultados, defendendo que superfícies circulares tendem a fornecer fatores de segurança mais elevados, enquanto outros demonstraram que, dependendo da espessura da camada do

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 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 Perfilômetro

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

Soft Soil Group

solo mole e da condição geotécnica local, a ruptura pode ocorrer tanto por superfícies circulares quanto não circulares. Com base nesta observação, o método desenvolvido procura abranger diferentes possibilidades de colapso, não restringindo a análise a um único formato geométrico. A formulação considera a possibilidade de mecanismos translacionais associados a superfícies horizontais de deslizamento dentro da camada mole, situação frequentemente observada em aterros construídos sobre depósitos espessos de argilas de baixa resistência. Com este cenário, o procedimento torna-se mais representativo do comportamento real do terreno, permitindo avaliar mecanismos de ruptura, que muitas vezes não são adequadamente capturados pelos métodos convencionais baseados exclusivamente em superfícies circulares. Sob a ótica do melhoramento do solo mole, a abordagem possui especial relevância porque a técnica do CPR Grouting altera justamente o mecanismo de ruptura do sistema. Ao aumentar a resistência não drenada e a rigidez da camada mole, os bulbos de compressão modificam a trajetória das superfícies potenciais de escorregamento, elevando os fatores de segurança e dificultando a formação de mecanismos translacionais profundos. Assim, a análise deixa de ser apenas uma verificação da resistência do solo natural, passando a representar a interação entre o solo melhorado e o aterro, refletindo de forma mais realista o ganho de estabilidade promovido pelo melhoramento geotécnico.

Mecanismo de colapso e o estado de tensões

Com o mecanismo de colapso, considerado para aterros sobre solos moles, estabelece-se as hipóteses básicas utilizadas na formulação analítica. O autor assume que a ruptura ocorre acima de uma superfície de deslizamento, localizada na camada

mais fraca da fundação. Essa hipótese é bastante compatível com o comportamento observado em aterros construídos sobre argilas muito moles, onde a resistência ao cisalhamento da camada compressível é significativamente inferior à resistência do aterro. Dentro deste modelo, o aterro e o solo de fundação são divididos em blocos rígidos interdependentes. Sob a ação do peso do aterro e das cargas aplicadas na superfície, os blocos tendem a deslocar-se uns em relação aos outros, produzindo movimentos verticais e horizontais. O carregamento imposto pelo aterro gera tensões que empurram o solo mole para baixo e, simultaneamente, para os lados, desenvolvendo zonas de compressão e de cisalhamento. Quando a resistência do solo de fundação é suficiente, essas tensões permanecem equilibradas. Entretanto, à medida que o carregamento aumenta e se aproxima da capacidade resistente do solo mole, surgem planos de cisalhamento progressivos que evoluem gradativamente até a formação de um mecanismo de ruptura global. Em outras palavras, a falha não ocorre instantaneamente, mas através da mobilização sucessiva de diferentes regiões do maciço. As figuras complementam este conceito mostrando os estados de tensão ao longo do mecanismo de colapso. A região passiva informa onde o solo é comprimido lateralmente pelo avanço do mecanismo de ruptura, onde as tensões horizontais aumentam significativamente, gerando uma resistência passiva que atua contra o deslocamento do aterro. Já as regiões cisalhantes 1 e 2 representam as zonas de cisalhamento, onde concentram-se as deformações e ocorre a mobilização da resistência ao cisalhamento do solo. Os ân-

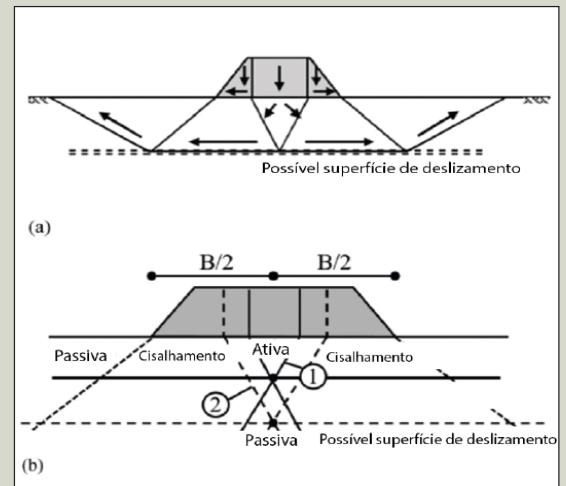


Fig. 8 - (a) Possível mecanismo de colapso; (b) Zonas de tensão para diferentes superfícies de deslizamento em um aterro. O peso do aterro empurra o solo para baixo e para os lados. Se o maciço não tiver resistência suficiente, forma-se uma faixa interna onde o solo começa a deslizar, provocando deformações, trincas e, em casos mais graves, o deslocamento do aterro. A região inferior da figura mostra como diferentes regiões do solo passam a trabalhar em compressão, cisalhamento e contenção, equilibrando essas forças até que seja otimizado o limite de estabilidade.

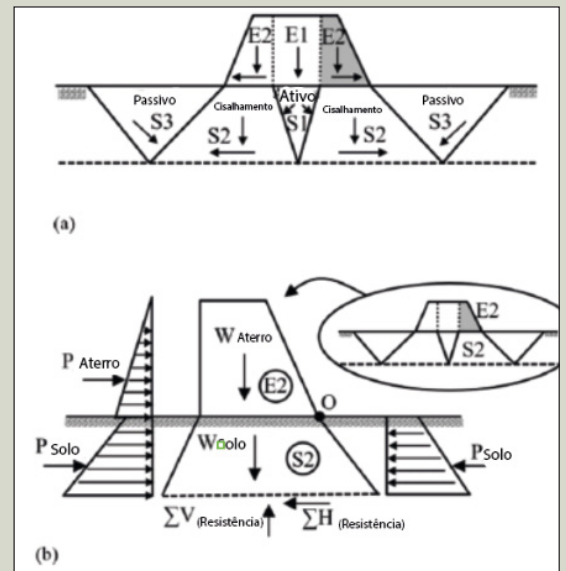


Fig. 9 - Mecanismo simplificado de colapso de um terreno sobre solo mole. (a) o aterro é dividido em blocos que representam as diferentes regiões do maciço durante a ruptura. A região central (S1) tende a se deslocar para baixo, devido ao peso do aterro (E1), enquanto as zonas laterais (S2) sofrem cisalhamento e transmitem parte dos esforços para as regiões passivas (S3), que oferecem resistência ao movimento. Esse modelo simplificado permite compreender como as tensões se distribuem no solo durante o processo de instabilização. (b) representação das forças atuantes em cada bloco do mecanismo de colapso. O peso do aterro e do solo gera esforços verticais, enquanto as pressões laterais e as resistências ao cisalhamento equilibram o sistema. A ruptura ocorre quando as forças solicitantes superam a capacidade resistente do conjunto solo-aterro.

gulos θ , na figura 7, indicam a orientação dos planos de ruptura, enquanto as tensões efetivas principais (σ'_{pv} e σ'_{ph}) definem o estado de tensões atuante em cada elemento de solo. Do ponto de vista geotécnico, esse modelo é extremamente importante, porque demonstra que a estabilidade do aterro depende diretamente da capacidade do solo mole de resistir não apenas às

tensões verticais impostas pela carga mas, também, aos deslocamentos laterais induzidos pelo carregamento. É exatamente nesse aspecto que o melhoramento, do solo com CPR Grouting (Consolidação Profunda Radial), atua de forma eficiente, pois aumenta simultaneamente a resistência ao cisalhamento, a tensão horizontal efetiva e a rigidez do maciço, reduzindo a probabilidade de desenvolvimento dessas zonas de ruptura e elevando significativamente o fator de segurança global do aterro.

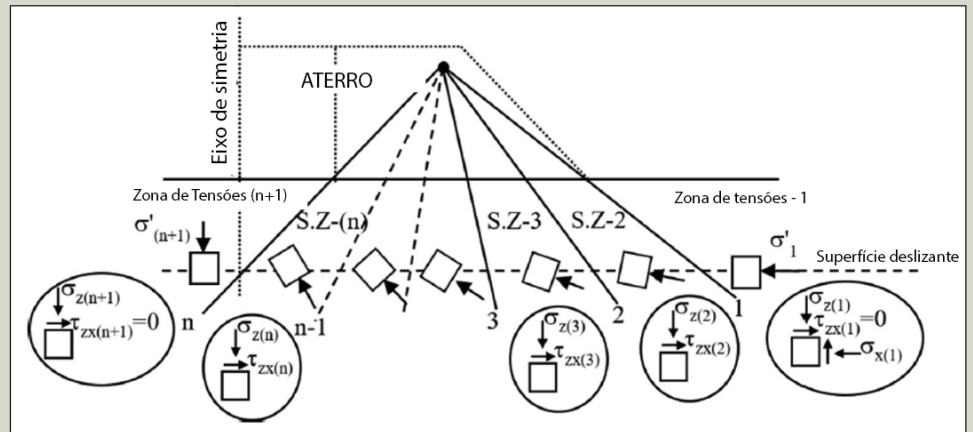
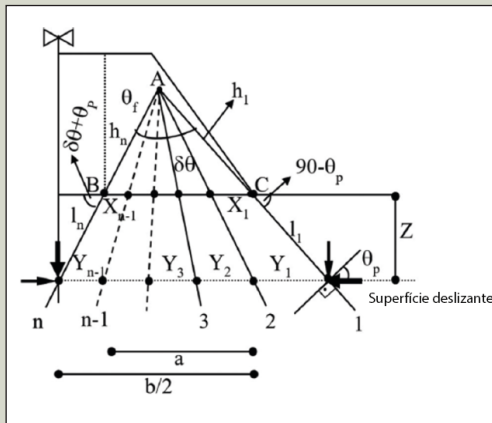


Fig. 10 - Rotação do eixo de tensões sob o aterro, informando como é feita a redistribuição. À medida que o aterro é construído, o peso aplicado ao solo altera gradualmente a direção e a intensidade das tensões em seu interior. Inicialmente, os esforços atuam predominantemente na vertical mas, com o aumento da carga, passam a se inclinar e a gerar empurrões laterais cada vez maiores. Essa redistribuição das tensões é responsável pelas deformações do terreno e, quando a resistência da argila é insuficiente, pode levar ao deslocamento lateral do solo e ao colapso do aterro.



- a : largura do leque na superfície do terreno
- b : largura da base do aterro
- Z : profundidade escolhida para a superfície de deslizamento
- n : número de discontinuidades
- $h_{i,n}$: comprimento da seção de uma discontinuidade dentro do aterro
- $l_{i,n}$: comprimento da seção de uma discontinuidade dentro do subsolo
- $X_{i,n-1}$: comprimento horizontal do leque na base do aterro
- $Y_{i,n-1}$: comprimento horizontal da base do leque no nível da superfície de deslizamento
- θ_r : ângulo do ápice do leque
- $\delta\theta$: ângulo de rotação entre as discontinuidades
- θ_p : ângulo entre a direção da tensão principal maior na zona passiva e a discontinuidade

Fig. 11 - Propriedades do mecanismo de formação do leque de discontinuidades no interior do aterro, utilizado em análises de estabilidade limite. Quando um aterro recebe peso, o solo não reage igualmente em todas as direções. Internamente, formam-se caminhos preferenciais por onde ocorrem pequenas deformações, semelhantes aos "raios" de um leque. Esses caminhos mostram como as forças se espalham pelo aterro até atingir a região onde poderá ocorrer um deslizamento. Conhecer esse comportamento ajuda a projetar aterros mais seguros e a evitar rupturas.

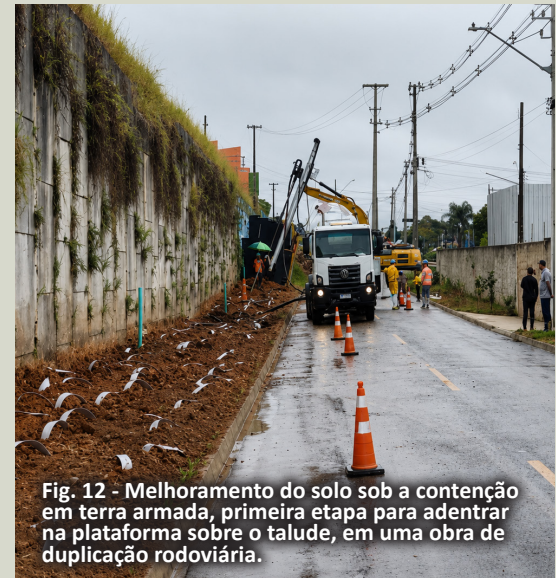


Fig. 12 - Melhoramento do solo sob a contenção em terra armada, primeira etapa para adentrar na plataforma sobre o talude, em uma obra de duplicação rodoviária.

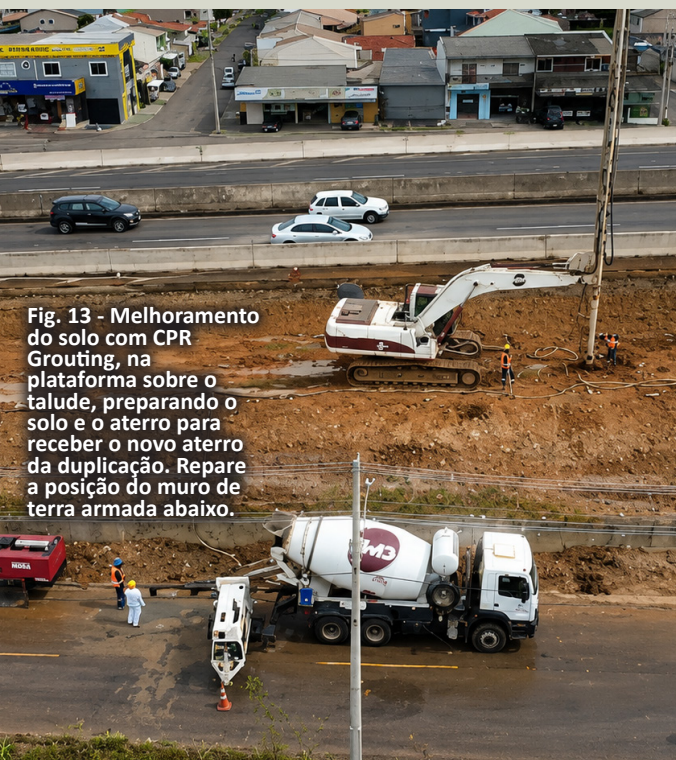


Fig. 13 - Melhoramento do solo com CPR Grouting, na plataforma sobre o talude, preparando o solo e o aterro para receber o novo aterro da duplicação. Repare a posição do muro de terra armada abaixo.

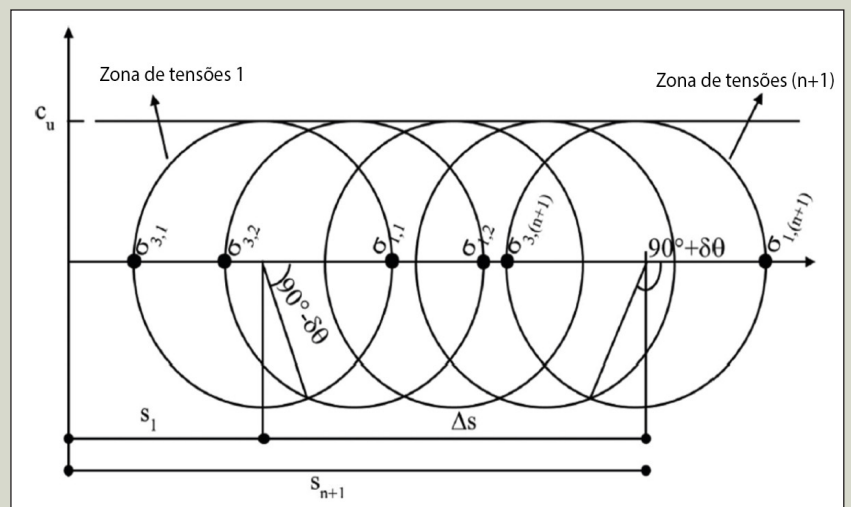


Fig. 14 - Variação das tensões através das discontinuidades nos círculos de tensão Mohr-Coulomb para carregamento drenado. Propagação das tensões no solo durante o carregamento drenado. A figura mostra que, quando o solo recebe uma carga, as tensões não ficam concentradas apenas no ponto de aplicação, espalhando-se lateralmente e em profundidade, formando zonas sucessivas de influência. Cada círculo representa uma etapa dessa redistribuição das tensões do maciço. Com o avanço do carregamento, essas camadas se sobrepõem, indicando que o solo passa a trabalhar de forma integrada. Esse comportamento é importante para entender como o solo mole reage ao melhoramento, ao adensamento e à transferência gradual dos esforços, reduzindo deformações excessivas e aumentando a estabilidade do conjunto.

PRESSIÔMETRO

Um ensaio geotécnico completo realizado no campo

Fácil de operar e 100 % viável



ROCTEST

Representante exclusivo no Brasil

+55 21 2718 3968



vendas@3geotecnologia.com

www.3geotecnologia.com

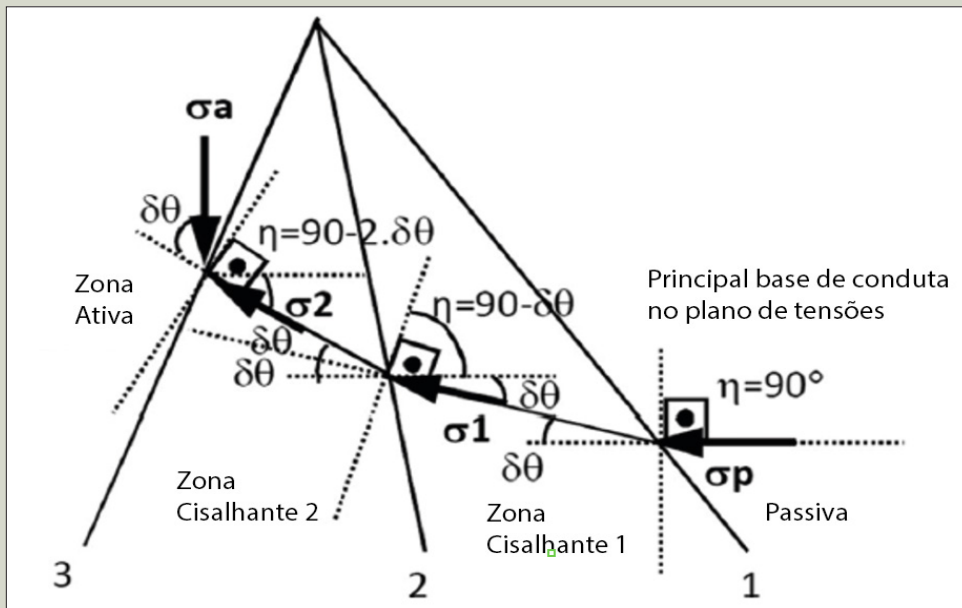


Fig. 15 -Rotação das tensões principais durante a ruptura progressiva do solo mole. A figura mostra que, quando o solo mole é solicitado por um carregamento ou por uma deformação imposta, as direções das tensões principais não permanecem fixas, girando à medida que surgem zonas cisalhantes sucessivas. A primeira zona de cisalhamento se forma na região passiva, depois a deformação progride para novas superfícies internas até atingir a zona ativa. Em linguagem simples, o solo não rompe de uma vez só. Ele vai “reorganizando” suas tensões internas, criando planos preferenciais de deslizamento. Essa rotação das tensões explica por que solos moles podem apresentar grandes deformações antes da ruptura visível, mesmo quando ainda possuem alguma resistência ao cisalhamento.

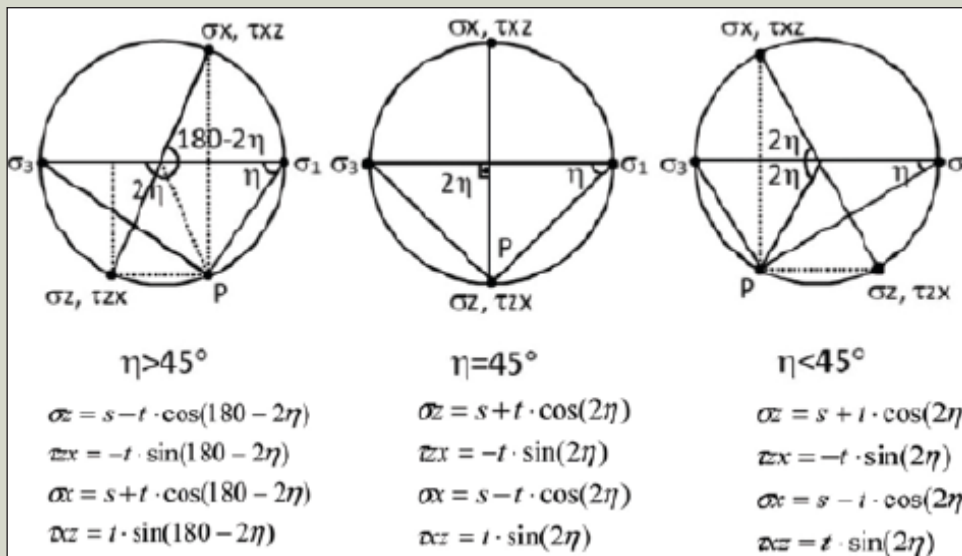


Fig. 16 -Círculos de tensões de mohr-coulomb em função da variação do ângulo h e as equações correspondentes para determinar as tensões normal e de cisalhamento. Esta figura é uma das mais importantes, pois mostra como as tensões atuam em diferentes planos do solo, conforme ocorre a rotação das tensões principais. A rotação das tensões muda completamente a forma como o solo reage aos carregamentos. À medida que o aterro é construído, a direção das maiores tensões no interior do solo altera-se continuamente. Os círculos de Mohr ilustram essa mudança de orientação e mostram que, dependendo do ângulo das tensões, variam também as tensões normais e de cisalhamento que atuam em cada plano do maciço. Essa rotação explica por que o solo mole não deforma apenas para baixo, mas também lateralmente, formando um campo de tensões que controla a estabilidade do aterro. Compreender esse mecanismo é fundamental para prever recalques, deslocamentos horizontais e o eventual início de um processo de ruptura. Esta figura prepara o leitor para a “construção da trajetória de tensões”, mostrando que a rotação das tensões é a base para a formação do chamado leque de tensões, conceito central do método apresentado.

Equilíbrio global do mecanismo em blocos

A ideia central é que o aterro e o solo de fundação não são analisados como uma massa contínua qualquer,

mas como um sistema dividido por descontinuidades, formando blocos que tendem a se deslocar e rotacionar até atingir uma condição limite de estabilidade. Para que esse mecanismo seja considerado estável, o

conjunto precisa satisfazer, simultaneamente, as condições de equilíbrio das forças horizontais, das forças verticais e dos momentos. Ou seja, não basta verificar apenas se o peso do aterro é resistido pelo solo e, sim, também garantir que as forças internas mobilizadas ao longo das superfícies de descontinuidade e da superfície provável de ruptura sejam compatíveis com uma configuração de equilíbrio. Os parâmetros apresentados definem a geometria desse mecanismo, como a largura do leque na superfície, a largura da base do aterro, a profundidade escolhida para a superfície de escorregamento, o número de descontinuidades e os comprimentos dessas descontinuidades dentro do aterro e do subsolo. Também aparecem os ângulos que controlam a rotação entre os blocos e a orientação das tensões principais na zona passiva. Em termos práticos, o método procura representar como o carregamento do aterro se propaga para o solo mole, formando uma espécie de “leque” de tensões e deformações. A estabilidade dependerá da capacidade do solo resistir a esse arranjo de forças, sem que se forme um mecanismo progressivo de ruptura.

Construção da Trajetória de tensões. O segundo atributo do método.

Aqui introduz-se um dos conceitos mais importantes da mecânica do solo moderna, aplicada a aterros sobre solos moles, ou seja, a construção da trajetória de tensões. Quando um aterro é elevado sobre um depósito de solo mole, as tensões existentes no terreno não permanecem constantes. Cada camada de aterro adicionada modifica progressivamente o estado de tensões



SENSORES DE
RECALQUE

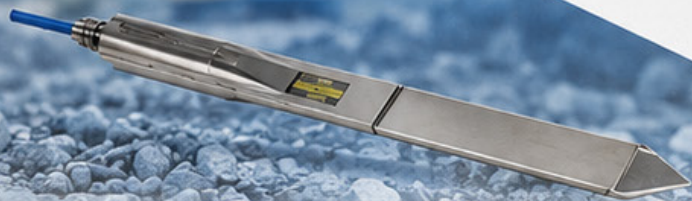


CÉLULAS DE PRESSÃO
PARA ATERROS

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



GS ENGENHARIA

GS ENGENHARIA LTDA

(41) 3402-1707

GSENGENHARIA.COM.BR



Fig. 19 - Essa foto comunica muito bem um aspecto que vem se tornando indispensável em obras geotécnicas modernas: o monitoramento instrumental em tempo real, tão importante quanto executar. Durante a construção, equipamentos de alta precisão acompanham continuamente qualquer deslocamento do terreno e das estruturas. Este controle permite confirmar que o solo está respondendo conforme o previsto em projeto, garantindo segurança, qualidade e possibilitando intervenções imediatas, caso seja detectado qualquer comportamento fora do esperado. Estações totais monitoram, com precisão milimétrica, a movimentação do terreno, do muro de contenção e do aterro durante todas as etapas da execução. As informações obtidas em campo são comparadas com as previsões do projeto, permitindo validar o desempenho do melhoramento do solo, assegurando a estabilidade da obra.

do solo. Se esses incrementos forem excessivos ou aplicados de forma inadequada, determinadas regiões da fundação podem atingir a ruptura antes mesmo da conclusão da obra, iniciando mecanismos localizados de cisalhamento que podem evoluir para um colapso global do aterro. Exatamente por isso que a construção em etapas, tornou-se uma prática consagrada em geotecnia. Entretanto, apenas dividir a carga em etapas não é suficiente. É necessário compreender como cada elemento do solo responde ao carregamento e acompanha a evolução do seu estado tensional ao longo do processo construtivo. É justamente nesse contexto que surge o conceito de trajetória de tensões. O método apresentado pelos autores permite determinar inicialmente o estado de tensões de qualquer elemento do solo em função de sua posição sob o aterro. Em seguida, para cada etapa de carregamento

e para cada fase de adensamento, calcula-se os incrementos de tensão que esse elemento experimenta. A soma sucessiva desses incrementos, gera uma trajetória que descreve o caminho percorrido pelo elemento dentro do espaço de tensões. Esta abordagem possui vantagem significativa, já que em vez de verificar apenas a condição final da fundação, torna-se possível acompanhar toda a evolução do comportamento do solo durante a construção. Assim, poder-se-á identificar, antecipada-

mente, situações em que determinado elemento esteja se aproximando da envoltória de ruptura, permitindo controlar a velocidade de execução do aterro ou limitar a altura dos adensamentos intermediários. Outro aspecto importante, destacado pelos autores, é a consideração da rotação dos eixos principais de tensões. Em aterros sobre solos moles, os esforços não aumentam apenas em magnitude, ocorrendo, também, uma alteração na direção das tensões principais, o que influencia, significativamente, a resistência ao cisalhamento e o desenvolvimento das deformações, especialmente na região próxima aos taludes. Sob a ótica da Mecânica do Solo no Estado Crítico, o comportamento tensão-deformação pode ser representado por trajetórias desenvolvidas em um espaço tridimensional definido por

- q = tensão desviadora ou tensão de cisalhamento;
- p' = tensão média efetiva;
- v = volume específico do solo.

À medida em que o aterro é construído e o adensamento ocorre, cada elemento de solo percorre um caminho dentro desse espaço tridimensional. Para facilitar a interpretação, essas trajetórias são normalmente

TRAJETÓRIA DE TENSÕES: O “GPS” DA MECÂNICA DOS SOLOS.

Em vez de analisar a resistência final do terreno, a mecânica dos solos moderna acompanha todo o caminho percorrido pelo solo durante o carregamento. Essa evolução das tensões permite prever quando ocorrerão deformações excessivas, recalques ou até ruptura, tornando projetos muito mais confiáveis, preparando o leitor para compreender, nas figuras seguintes, a rotação das tensões principais e a formação do leque de descontinuidades.

projetadas em dois planos fundamentais:

1. Plano $q - p'$, utilizado para avaliar a aproximação da condição de ruptura por cisalhamento;
2. Plano $v - p'$, utilizado para analisar os processos de compressão e adensamento.



Fig. 18 - Monitoramento piezométrico durante os trabalhos de melhoramento do solo com CPR Grouting. 30 de mai. -25,4

Em termos práticos, a metodologia transforma a análise da estabilidade de um aterro em um acompanhamento contínuo da evolução das tensões dentro da fundação, permitindo não apenas verificar se o maciço está estável mas, também, compreender como caminha em direção à estabilidade ou à ruptura ao longo de toda a construção. Para obras executadas com melhoramento do solo, com CPR Grouting, esse conceito torna-se particularmente interessante, pois a expansão radial dos bulbos modifica as trajetórias de tensões do solo mole, promovendo aumentos graduais das tensões efetivas e da resistência ao cisalhamento, antes mesmo da aplicação integral das cargas do aterro. Dessa forma, a fundação passa a percorrer trajetórias mais seguras dentro do espaço $q-p'$, afastando-se da condição de ruptura e aumentando significativamente o fator de segurança global do sistema.

Trajétoria de tensões dos elementos do solo na zona de tensões ativas.

Aqui aprofunda-se a análise das trajetórias de tensões dos elementos de solo localizados na zona ativa de carregamento, mostrando como o estado inicial de tensões influencia o comportamento do maciço durante a construção do aterro e o processo de consolidação. O autor parte do princípio de que qualquer elemento de solo possui um estado inicial de tensões que pode ser representado por uma linha de anisotropia denominada linha K, que representa o coeficiente de empuxo em repouso (K_0). Esta condição inicial reflete a história de tensões do depósito. Para solos normalmente adensados, utiliza-se a conhecida expressão de Jaky ($K_0 = 1 - \text{sen } \phi'$), enquanto para solos sobreadensados o coeficiente aumenta em função da

razão de sobreadensamento (OCR), refletindo a maior rigidez e resistência do material. A Figura 19 mostra esse comportamento no plano volume específico (v) versus logaritmo da tensão média efetiva ($\ln p'$), observando-se a presença da linha de consolidação normal, representando os estados normalmente adensado, e da linha de estado crítico, representando os estados de ruptura na condição crítica. Entre essas duas linhas encontram-se as superfícies de escoamento, delimitando a condição elástica dos estados plásticos do solo. Quando construímos um aterro, o aumento das tensões verticais efetivas faz com que os elementos do solo percorram trajetórias de tensão em direção à superfície de escoamento. Inicialmente, o comportamento é predominantemente elástico, no entanto, ao atingir a primeira superfície de plastificação, ocorre o início do adensamento ir-

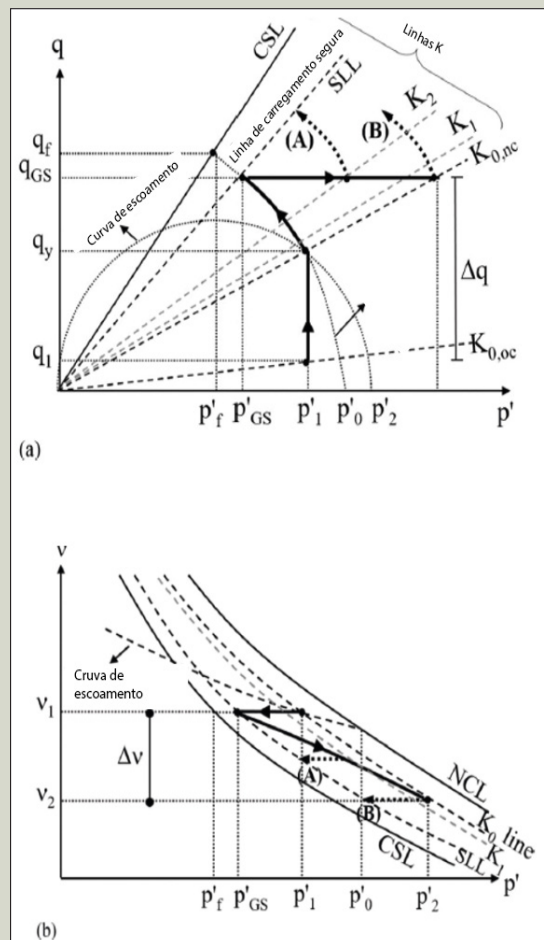


Fig. 17 -Trajetória de tensões de um elemento de solo levemente sobreadensado para carregamento não drenado e fases de consolidação drenada: a) plano $q-p'$; b) plano $v-p'$. Essa figura é muito adequada porque sintetiza um dos conceitos da mecânica dos solos moderna: a trajetória de tensões. Quando um aterro é construído sobre um solo mole, o comportamento do terreno não depende apenas do peso aplicado mas, também, da forma como as tensões se redistribuem ao longo do tempo. No primeiro instante, o carregamento ocorre praticamente sem drenagem da água existente nos vazios do solo. Nessa fase, a maior parte da carga é suportada pela pressão da água, enquanto o esqueleto mineral do solo ainda sofre pouca deformação. A medida que a água é expulsa lentamente pelos vazios, inicia-se a consolidação. A carga passa gradualmente a ser transferida para as partículas do solo, aumentando sua resistência e reduzindo sua compressibilidade. As setas apresentadas nos diagramas representam exatamente esse percurso, conhecido como trajetória de tensões, mostrando como o estado de tensões evolui desde o carregamento inicial até a condição final de equilíbrio. Compreender essa trajetória é fundamental para prever recalques, deformações laterais e a estabilidade de aterros construídos sobre argilas moles, permitindo definir estratégias de construção mais seguras e eficientes.



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.**



CHEGOU SUA
VEZ DE TER

VISÃO

MAIS PROFISSIONAL
DA GEOTECNIA
DO SOLO MOLE.



INSTITUTO
BRASILEIRO
DO SOLO MOLE

ACESSE SOFTSOILBRAZILIANGROUP.COM
E ESCOLHA A EDIÇÃO IDEAL PARA SUA PESQUISA.



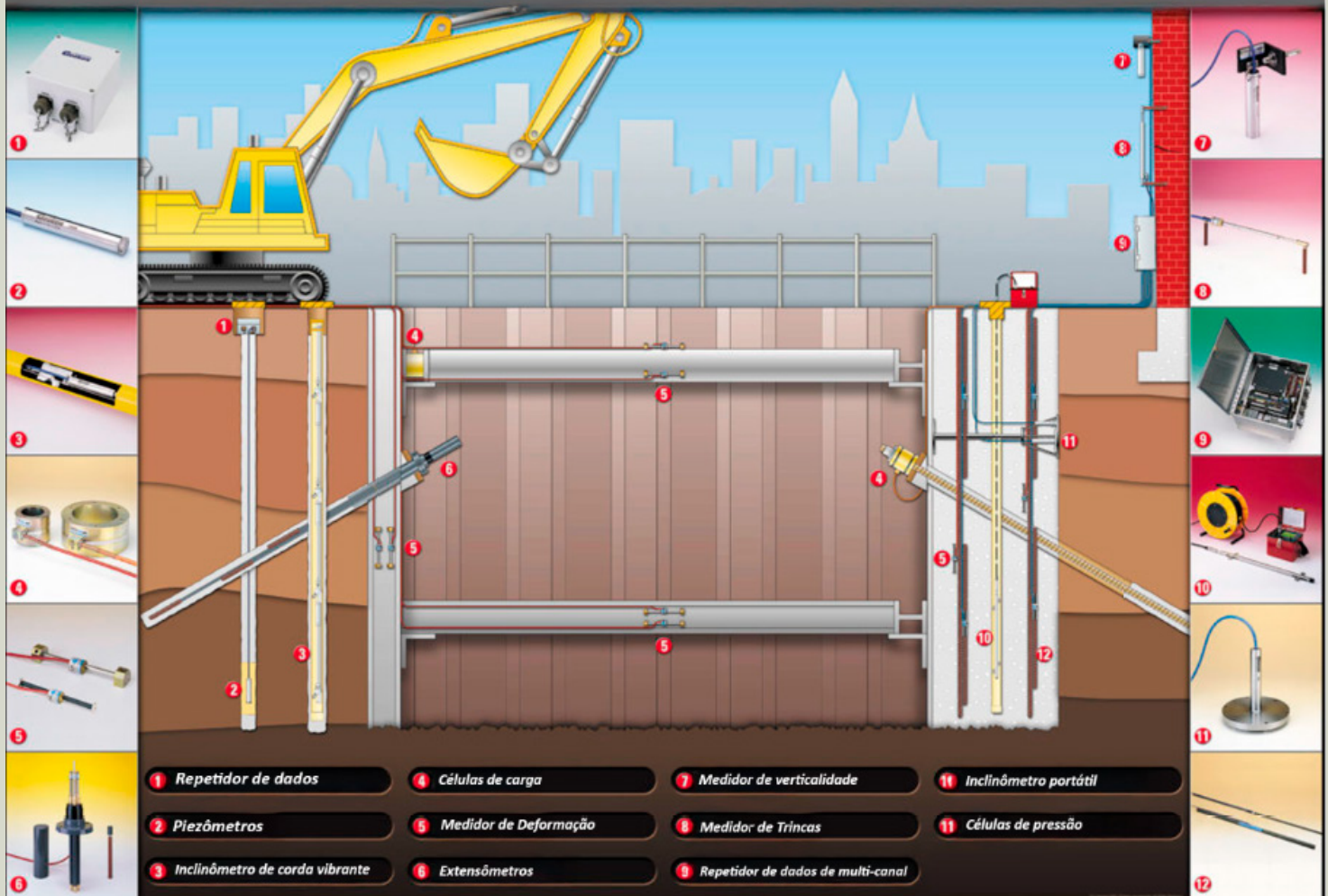
reversível e da reorganização estrutural das partículas. A partir desse ponto, a trajetória passa a seguir novos caminhos de tensões associados à dissipação das poropressões e ao aumento gradual das tensões efetivas. Os pontos identificados como A e B, representam diferentes posições do elemento de solo, ao longo desse processo evolutivo, notando-se que, à medida que a consolidação avança, o volume específico diminui, representado pela redução Δv indicada na figura. Em termos físicos, significa redução dos vazios, expulsão da

água dos poros e aumento da rigidez do maciço. Um aspecto importante, mostrado pelo autor, é que a trajetória das tensões não ocorre de forma única para todos os elementos do solo, e dependendo da profundidade e da posição, em relação ao carregamento, cada elemento seguirá um caminho distinto dentro do espaço de tensões. Esta observação é particularmente relevante em aterros sobre solos moles, onde coexistem regiões submetidas, predominantemente, à compressão vertical e outras influenciadas por deforma-

ções cisalhantes. Sob a ótica do melhoramento do solo, com CPR Grouting (Consolidação Profunda Radial), esse conceito é extremamente importante, pois a expansão radial dos bulbos gera aumento simultâneo das tensões horizontais e verticais efetivas. Em vez de o solo percorrer apenas trajetórias associadas ao carregamento superficial de um aterro, é forçado a migrar rapidamente para estados de tensão mais elevados, aproximando-se de superfícies de escoamento sucessivas e promovendo adensamento

Escavação profunda em ambiente urbano exige monitoramento extensivo para garantir estabilidade, verificando-se se estruturas próximas são afetadas. Em todo o mundo utiliza-se instrumentos GEOKON.

Monitoramento de Escavação Profunda



acelerado. Como consequência, ocorre redução do índice de vazios, aumento da tensão de pré-adensamento e ganho expressivo da resistência não drenada, produzindo-se um solo geoenrijecido antes mesmo da aplicação da carga definitiva da estrutura. Esta interpretação ajuda a compreender por que o acompanhamento das trajetórias de tensões constitui ferramenta poderosa para prever recalques, avaliar a estabilidade de aterros e quantificar a evolução do melhoramento do solo mole submetido a processos de consolidação natural ou induzida.

Trajetória de tensões de elementos de solo em zonas de tensões cisalhantes e passivas.

A análise, agora, é com a trajetória de tensões dos elementos de solo, situados nas zonas de cisalhamento e passivas sob o aterro. A ideia central é que, antes do carregamento, elementos de solo na mesma profundidade tendem a apresentar tensões iniciais semelhantes. Com a elevação do aterro, essas tensões começam a se modificar, e cada elemento passa a seguir uma trajetória própria dentro do espaço de tensões. Durante a fase do carregamento não drenado, o solo mole responde com geração de excessos de poropressão, e as tensões principais podem ser determinadas considerando essa condição. Já na fase de consolidação, a drenagem passa a controlar o comportamento à medida que o excesso de poropressão se dissipa, aumentando as tensões efetivas normais e deslocando a trajetória de tensões para a direita, representando ganho progressivo da resistência. O ângulo de resistência mobilizado não é fixo desde o início, evoluindo conforme muda o estado de tensões. Por isso, os círculos de Mohr aumentam de ta-

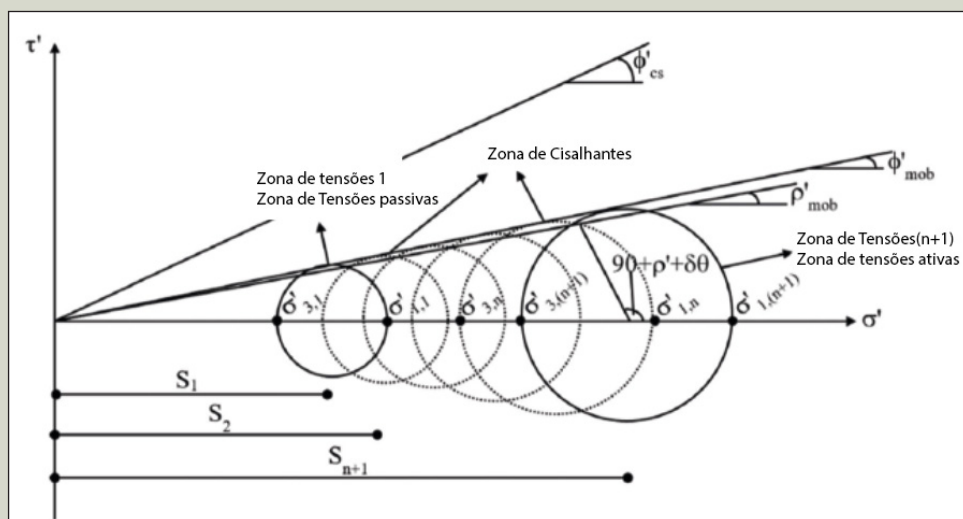


Fig. 20 -Tensões principais de elementos de solo do estado ativo em direção às zonas de tensão passiva sob condições drenadas. Evolução das tensões principais no solo durante o carregamento drenado. A figura mostra como o solo reage quando é submetido a um carregamento progressivo em condição drenada. À medida que a tensão principal maior aumenta, o estado de tensões desloca-se dentro do diagrama até atingir diferentes zonas de comportamento. Inicialmente, o solo permanece em uma zona de tensões passivas, com deformações controladas. Com o aumento do carregamento, formam-se regiões de maior solicitação, chamadas zonas de cisalhamento, onde o solo começa a se deformar com maior intensidade. Quando a trajetória de tensões se aproxima da envoltória de resistência, definida pelo ângulo de atrito interno, o solo passa a trabalhar próximo da condição de ruptura. Em termos simples, a figura representa o caminho pelo qual o solo passa desde uma condição estável até a crítica, mostrando onde surgem as regiões mais sensíveis à deformação e ao cisalhamento.

manho quando o estado de tensões caminha da condição ativa para a passiva. Em termos práticos, o método procura partir do estado ativo, conhecido ao final de uma etapa de carregamento e, a partir dele, reconstruir os estados intermediários de tensão até atingir a zona passiva, o que permite interpretar melhor como o solo mole, sob o aterro, redistribui esforços, mobiliza resistência ao cisalhamento e progride para uma condição mais estável durante o adensamento.

Verificação do aterro dimensionado.

Observa-se que a verificação da estabilidade do aterro é realizada por meio de uma combinação entre a teoria da plasticidade, no limite inferior, e os mecanismos clássicos do equilíbrio limite. Inicialmente, determina-se as tensões atuantes nas regiões críticas do maciço, conforme definido nas figuras anteriores. Em seguida, esses estados de tensões são utilizados para verificar se as con-

dições de equilíbrio e resistência do solo são satisfeitas ao longo da superfície provável de ruptura. A principal contribuição do método, é permitir que o dimensionamento do aterro seja realizado diretamente, a partir da evolução das tensões no solo, durante a construção, e não apenas por meio de um fator de segurança global obtido em uma análise convencional. Dessa forma, torna-se possível estimar tanto a altura limite de um aterro executado, em etapa única, quanto os incrementos máximos de carregamento admissíveis em aterros construídos por fases.

O QUE É O TEOREMA DO LIMITE INFERIOR DA PLASTICIDADE

Este teorema é um método utilizado na geotécnica para estimar a carga máxima que um solo pode suportar, antes de entrar em colapso. De forma simplificada, procura encontrar uma distribuição de tensões, dentro do solo, que

esteja em equilíbrio e que não ultrapasse sua resistência disponível. Se essa condição for atendida, pode-se afirmar que a estrutura ainda permanece estável. Imagine uma pilha de livros sobre uma mesa. Se conseguirmos demonstrar que a mesa suporta o peso sem exceder sua resistência, sabemos que permanecerá segura. O teorema funciona de maneira semelhante para solos, aterros e fundações. A principal característica do método é que ele fornece uma estimativa conservadora e segura da capacidade resistente do terreno. Ou seja, o valor calculado representa uma carga que, certamente, pode ser suportada pelo sistema, embora a capacidade real possa ser um pouco maior. Na análise da estabilidade de aterros sobre solos moles, o teorema é amplamente utilizado porque permite determinar um limite seguro de carregamento, identificando se o maciço permanece em equilíbrio ou se está aproximando-se da condição de ruptura. Resumindo, o Teorema do Limite Inferior responde à pergunta "Existe uma distribuição de tensões capaz de manter o solo em equilíbrio sem ultrapassar sua resistência?". Se a resposta for sim, a estrutura é considerada estável. Se não for possível encontrar essa condição, o sistema está próximo ou além da ruptura. No caso de ampliações rodoviárias ou ferroviárias, o método permite avaliar se a fundação, com camadas moles, consegue suportar os novos carregamentos impostos pelo novo aterro sem desenvolver mecanismos de ruptura. Por isso, é uma das bases teóricas utilizadas, em análises modernas por elementos finitos, para verificar a segurança global da obra durante e após a construção.

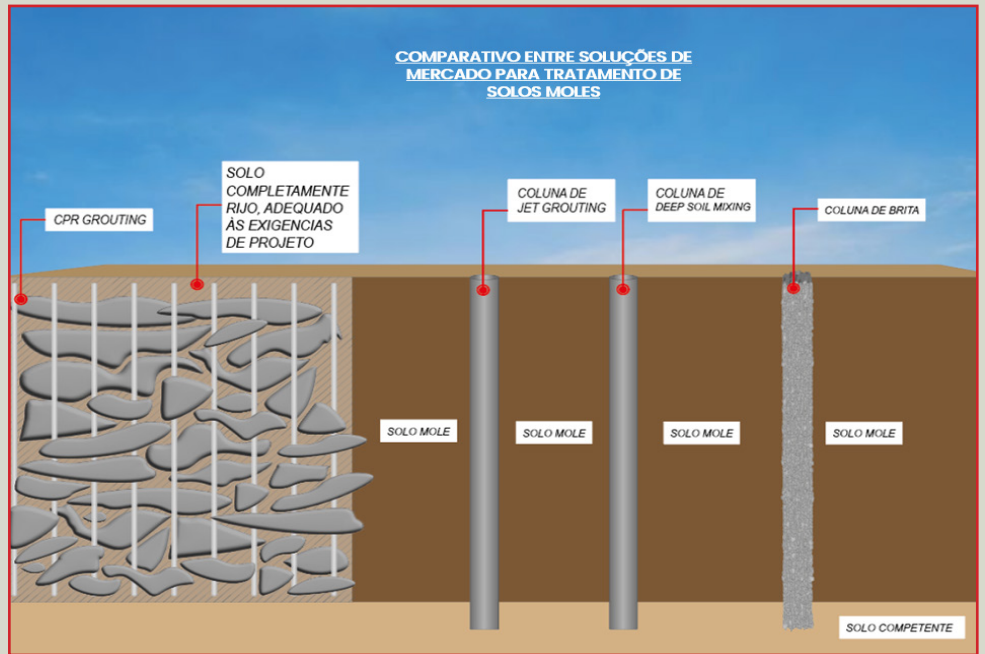


Fig. 21 - Tratamento de solos em Estradas.

Soluções de mercado: Melhoramento efetivo do solo é o CPR Grouting. Com transferência de carga com colunas: Colunas de brita/ Deep soil mixing/ Jet Grouting, elementos verticais no solo para "bypassar" o solo mole. Estas técnicas criam elementos estruturais no solo para transferência de carga, mantendo o solo mole ao redor, promovendo recalques diferenciais, pela desproporção de rigidez e movimentação de excessos de poropressão. Adicionalmente, perdem a eficiência e tornam-se limitadas, em solos muito moles, heterogêneos ou profundos. Máximo de 50% de eficiência.

Para validar a metodologia, o autor associa a análise da estabilidade ao conceito da trajetória de tensões, permitindo acompanhar a evolução do estado tensional do solo mole, à medida que novas camadas de aterro são levantadas. Essa abordagem é particularmente importante porque o solo mole apresenta resistência dependente do histórico de carregamento e do excesso de poropressão gerado durante a construção. O método foi, então, aplicado a um conhecido aterro experimental, sobre uma sequência de camadas, constituída por crosta superficial argilosa, argila sobreadensada e duas camadas de argila muito mole. O aterro possuía aproximadamente 2,3 m de altura e largura de plataforma de 8,75 m, sendo monitorado extensivamente durante sua execução. Os resultados obtidos mostraram que a metodologia foi capaz de reproduzir adequadamente o comportamento observado em campo, fornecendo previsões consistentes para as alturas críticas de construção e para os

limites de estabilidade durante as etapas sucessivas de carregamento. Sob o ponto de vista geotécnico moderno, a grande vantagem dessa metodologia é integrar, em uma única análise, três aspectos fundamentais do comportamento dos solos moles. O primeiro é a distribuição real das tensões induzidas pelo aterro, seguido da evolução da resistência ao cisalhamento ao longo da trajetória de tensões e a verificação do mecanismo potencial de ruptura, o que representa um avanço significativo em relação aos métodos tradicionais do equilíbrio limite que, frequentemente, utilizam valores fixos da resistência e não consideram explicitamente a evolução do estado tensional durante a construção. Para aplicações práticas, em obras de melhoramento de solos, com CPR Grouting, a filosofia do método é particularmente interessante porque permite avaliar não apenas o aumento da resistência promovido pelo melhoramento mas, também, a forma como as tensões são redistribuídas no maciço, du-

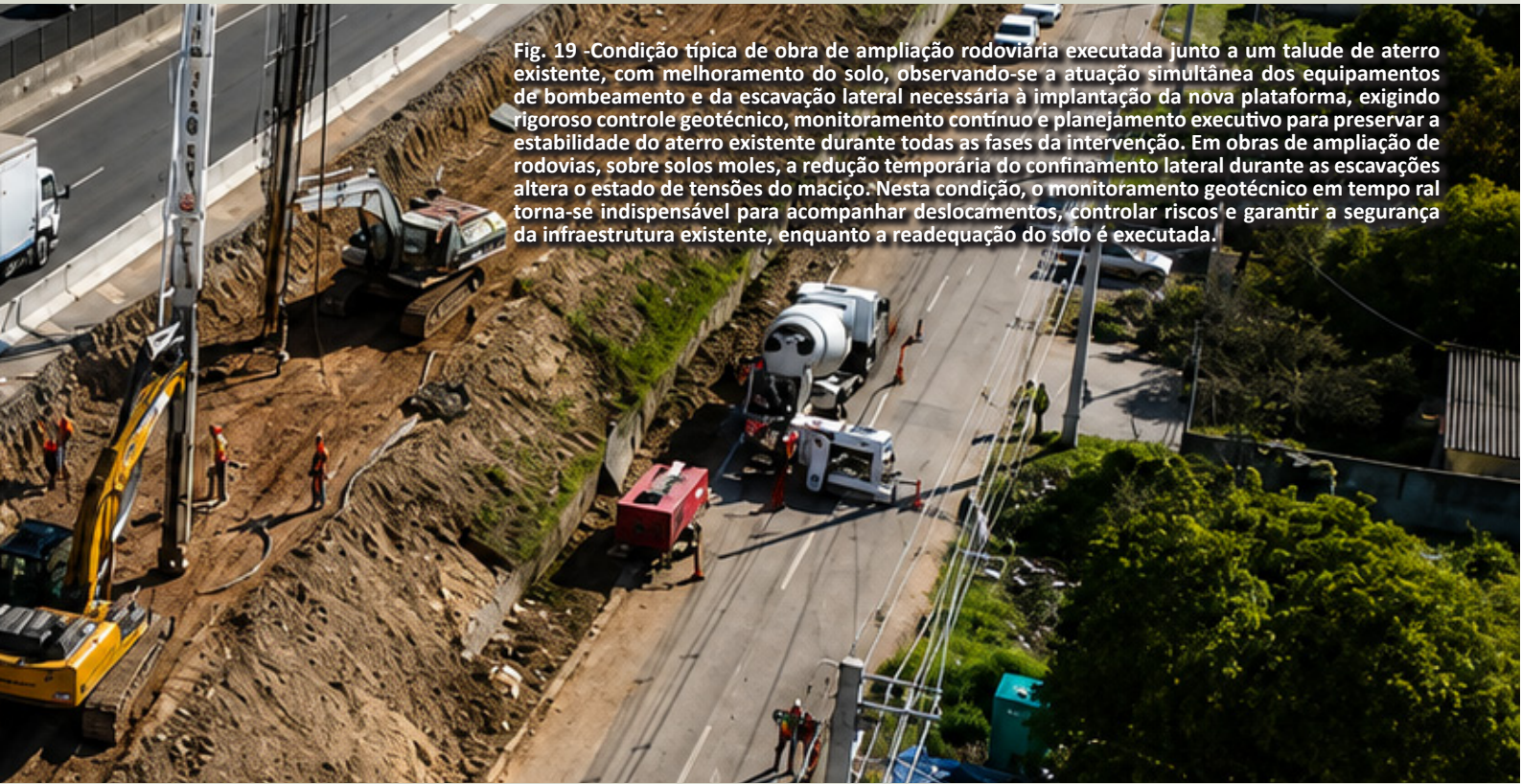


Fig. 19 -Condição típica de obra de ampliação rodoviária executada junto a um talude de aterro existente, com melhoramento do solo, observando-se a atuação simultânea dos equipamentos de bombeamento e da escavação lateral necessária à implantação da nova plataforma, exigindo rigoroso controle geotécnico, monitoramento contínuo e planejamento executivo para preservar a estabilidade do aterro existente durante todas as fases da intervenção. Em obras de ampliação de rodovias, sobre solos moles, a redução temporária do confinamento lateral durante as escavações altera o estado de tensões do maciço. Nesta condição, o monitoramento geotécnico em tempo real torna-se indispensável para acompanhar deslocamentos, controlar riscos e garantir a segurança da infraestrutura existente, enquanto a readequação do solo é executada.


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!

rante cada fase de execução. Assim, torna-se possível definir alturas de aterro mais seguras, controlar deformações e recalques e estabelecer critérios de monitoramento geotécnico baseados na evolução real do comportamento do solo em campo.

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.
- Cinioglu, S. F., Unal, G., and Togrol, E. (1999). "A plastic stability solution for embankment design." Geotechnical engineering for transportation infrastructure, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1263–1268.
- Drucker, D. C., Prager, W., and Greenberg, H. J. (1952). "Extended limit design theorems for continuous media." Q. Appl. Math., 9(4), 381–389.
- Cihan Öser, Ph.D.1; and S. Feyza Cinioglu, Ph.D., M.ASCE2. Embankment Design Method Combining Limit-State Approach with Stress-Path Application
- Duncan, J. M., Navin, M., and Wolff, T. F. (2003). "Discussion of 'probabilistic slope stability analysis for practice.'"

CARACTERÍSTICAS DO RECALQUE QUE OCORRE NA DUPLICAÇÃO DE ANTIGAS RODOVIAS SOBRE SOLOS MOLES.

Fig. 1 - Obra de duplicação rodoviária com presença de limitação lateral com contenção em terra armada. O melhoramento do solo, com CPR Grouting e o inerfente monitoramento geotécnico e a melhor solução.

ANÁLISE**Eng. Thomas Kim**

O crescimento do tráfego rodoviário tem levado, em todo o mundo, à necessidade de ampliação e modernização de rodovias construídas, há décadas, sob critérios de projeto muito diferentes dos atuais. Em muitos casos, a solução adotada consiste em elevar o greide da pista existente, ampliar sua plataforma ou executar simultaneamente ambas as intervenções. Embora essas obras pareçam simples, do ponto de vista geométrico, seu comportamento geotécnico pode se tornar extremamente complexo, quando

executadas sobre fundações constituídas por solos moles. Um dos principais problemas, relaciona-se ao fato de que a plataforma antiga, e a nova ampliação, apresentam histórias de carregamento completamente distintas. Enquanto o aterro e o solo de fundação já tenham passado por décadas de consolidação, dissipação de poropressões e ganho gradual de resistência, a nova faixa implantada, ao lado, introduz carregamento recente, sobre um solo ainda não consolidado. Como consequência, surgem diferenças significativas de recalque entre as duas estruturas, gerando deformações que, frequen-

temente, manifestam-se na forma de trincas longitudinais, degraus no pavimento e desconforto aos usuários. Buscando compreender esse fenômeno, os pesquisadores Keke Li, Wenyuan Xu e Liang Yang desenvolveram um estudo numérico, baseado em elementos finitos, para avaliar o comportamento deformacional de rodovias ampliadas e elevadas sobre fundações moles. O trabalho comparou diferentes cenários de construção, incluindo a execução de uma rodovia duplicada, a ampliação lateral de uma rodovia existente e a combinação entre ampliação e elevação de uma platafor-



ma original. O resultado demonstra que o comportamento do recalque não depende apenas da magnitude do carregamento aplicado mas, principalmente, da sequência construtiva utilizada. Quando a rodovia é inicialmente ampliada e, posteriormente, elevada, ocorre interação complexa entre as tensões induzidas no aterro antigo e aquelas geradas na nova faixa executada. O processo de deformação torna-se progressivo e variável ao longo do tempo, produzindo distribuição de recalques muito diferente daquele observado em uma rodovia construída integralmente de uma única vez. Outro aspecto importante observado pelos

autores, foi o desenvolvimento de deslocamentos horizontais significativos no pé do talude, diretamente associados à redistribuição das tensões no solo mole, com tendência a aumentar à medida que a plataforma

é ampliada. Em determinadas situações, os deslocamentos horizontais podem atingir magnitudes comparáveis às deformações verticais, tornando-se um fator crítico para a estabilidade global do aterro.

POR QUE DUPLICAR RODOVIAS GERA RECALQUES DIFERENCIAIS?

Quando uma rodovia antiga é ampliada, coexistem duas fundações com comportamentos distintos:

- Na faixa antiga, o solo já consolidado ao longo de vários anos.
- Na faixa nova o solo ainda sujeito à consolidação primária e secundária.
- O resultado são recalques diferentes entre as duas estruturas.
- Como consequência há o surgimento de trincas longitudinais na região de encontro entre as pistas.

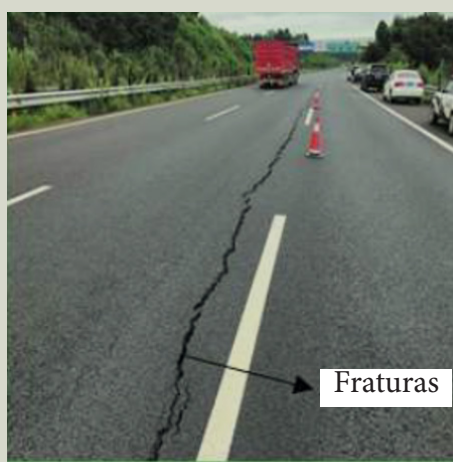
Este fenômeno é um dos principais problemas geotécnicos observados em ampliações rodoviárias e ferroviárias executadas sobre solos moles, em todo o mundo.

Os resultados numéricos mostram ainda que, após quinze anos de operação, uma rodovia construída por etapas apresenta recalques substancialmente maiores do que uma rodovia executada integralmente em uma única fase. Essa diferença evidencia que o histórico de carregamento do solo exerce papel fundamental no comportamento de longo prazo da infraestrutura. A conclusão mais importante do estudo é que obras de ampliação rodoviária, sobre solos moles, não podem ser analisadas apenas sob a ótica da capacidade suporte. A compatibilização do recalque, entre a estrutura existente e a nova ampliação, passa a ser fator predominante para garantir o desempenho do pavimento ao longo da vida útil da rodovia. Desta forma, a técnica de melhoramento do solo e os métodos de monitoramento geotécnico, tornam-se ferramentas indispensáveis para reduzir deformações diferenciais e preservar a integridade da infraestrutura.

Método dos Elementos Finitos na análise dos recalques induzidos pela ampliação rodoviária

Destaca-se, ainda, que o recalque diferencial, entre a plataforma antiga e a nova faixa de ampliação, é um fenômeno extremamente complexo, influenciado simultaneamente por diversos fatores, como as características do solo de fundação, o grau de adensamento já alcançado pela base da pista existente, a qualidade do subleito do novo aterro, a espessura das camadas construtivas

e a condição de drenagem. Devido à dificuldade de integrar todos estes parâmetros, em formulações analíticas convencionais, adotou-se uma modelagem numérica pelo Método dos Elementos Finitos, utilizando-se o software ABAQUS.



(a)



(b)

Figure 2. Rutura no pavimento logo após a ampliação rodoviária. (a) Trincas longitudinais no pavimento; (b) Instabilidade e sua consequência: rutura no pavimento e seu subleito.

A escolha desta ferramenta baseou-se em estudos anteriores, que demonstraram boa correlação entre resultados simulados e medições de campo em projetos de ampliação rodoviária. Pesquisas realizadas em ampliações rodoviárias recentes,

mostraram que os deslocamentos vertical e horizontal, observados ao longo do tempo, podiam ser reproduzidos com boa precisão com modelos numéricos. Desta forma, a análise computacional tornou-se uma ferramenta confiável, para prever o comportamento deformacional de plataformas rodoviárias durante e após uma ampliação. O trabalho parte da premissa de que quando uma rodovia, originalmente construída com quatro faixas, é ampliada para oito surgem, inevitavelmente, diferenças de comportamento entre a estrutura existente e a nova adicionada. A plataforma antiga normalmente já passou por anos de consolidação sob o peso do aterro e do tráfego, enquanto a nova plataforma inicia sua vida útil praticamente sem histórico de carregamento. Como consequência, o processo de recalque na nova faixa, tende a ser significativamente maior nos primeiros anos de operação. Esta diferença de recalque gera tensões de tração na estrutura do pavimento, exatamente na região de transição entre o aterro antigo e o novo. À medida que o recalque diferencial aumenta, essas tensões também crescem progressivamente, provocando fissuras longitudinais, abertura de juntas, deformações superficiais e, em situações mais severas, a deterioração prematura do pavimento. Observa-se, ainda, que o problema pode ser agravado quando a execução da ampliação, não contempla uma adequada readequação do solo de fundação. Se a compactação do novo aterro for insuficiente ou se o solo mole subjacente permanece sem readequação, a nova plataforma apresentará instabilidade e deformações excessivas, desde os primeiros estágios de utilização. Em outras palavras, a ampliação rodoviária não representa apenas uma questão geométrica

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



Fig. 3 - Geralmente não há qualquer informação sobre a condição do muro de contenção, o que exige o melhoramento do solo em sua fundação.

01/06/2026, 09:26
-25.475953 -49.198091
Curitiba, PR

de aumento de largura mas, principalmente, um problema geotécnico relacionado à compatibilização de deformações entre duas estruturas com históricos completamente diferentes de carregamento. Para investigar este comportamento, definiu-se, inicialmente, uma condição de referência denominada Plano A, representando uma rodovia nova, de oito faixas, construída integralmente em uma única etapa, com largura aproximada de 42 metros e altura de aterro de 8 metros. Este cenário serve como padrão comparativo para avaliar os efeitos da ampliação rodoviária. A partir desta condição, analisou-se duas outras alternativas de ampliação. No Plano B, parte-se de uma rodovia existente de quatro faixas, com aproximadamente 28 metros de largura e aterro com 8 metros de altura, ampliando-se lateralmente para formar uma rodovia de oito faixas. Neste caso, o aterro antigo já está consolidado, enquanto as faixas adicionadas apresentam comportamento deformacional distinto, criando uma interface crítica para o surgimento de recalques diferenciais. No Plano C, a rodovia original possui a mesma largura de 28 metros, porém com novo aterro de

apenas 4 metros de altura. A ampliação envolve, simultaneamente, o aumento da largura e a elevação da cota do aterro de 4 para 8 metros, o que tende a produzir um comportamento ainda mais complexo, pois além das diferenças de consolidação, entre as partes antiga e nova, ocorre também um incremento significativo de tensões devido ao aumento da altura do aterro. Sob o ponto de vista geotécnico, esta comparação entre os três cenários é extremamente relevante, pois permite compreender como diferentes estratégias de ampliação influenciam a magnitude do recalque

diferencial e os mecanismos de dano ao pavimento. Para obras sobre solos moles, como ocorre frequentemente em ampliações rodoviárias e ferroviárias brasileiras, o resultado reforça a importância da necessária técnica de melhoramento do solo, capaz de eliminar a diferença de rigidez entre as estruturas nova e a existente. Neste contexto, o método do geoenrijecimento, com CPR Grouting, apresenta potencial para erradicar o gradiente de deformação, suprimindo a geração de trincas longitudinais, aumentando significativamente, a vida útil do pavimento ampliado.

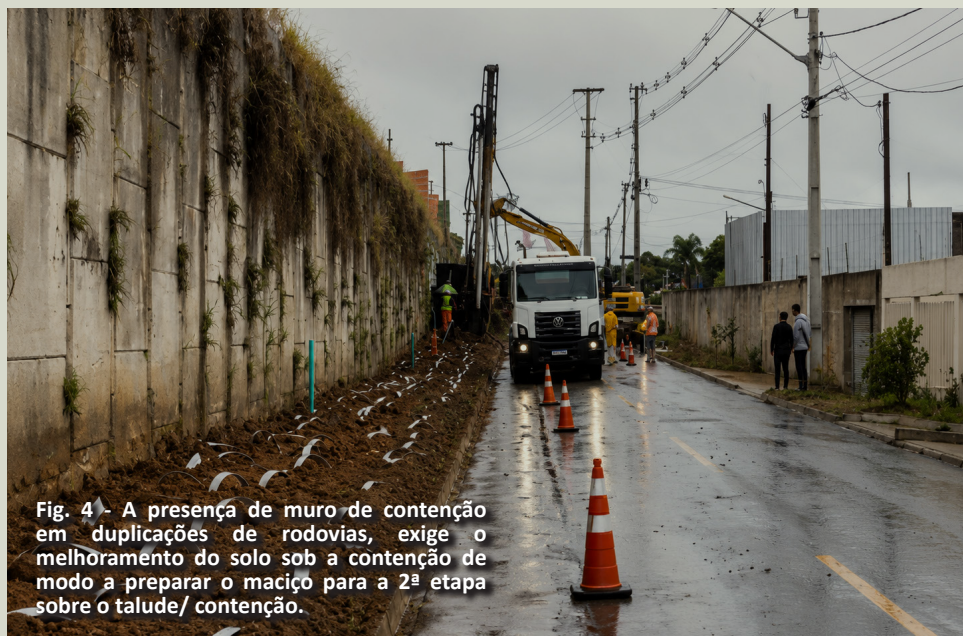


Fig. 4 - A presença de muro de contenção em duplicações de rodovias, exige o melhoramento do solo sob a contenção de modo a preparar o maciço para a 2ª etapa sobre o talude/ contenção.

O modelo constitutivo dos materiais, parâmetros adotados e simulação construtiva

Considera-se que o comportamento do aterro, do subleito antigo, do novo subleito e das camadas de fundação, deve ser representado por modelos constitutivos, capazes de reproduzir a resposta tensão-deformação dos diferentes materiais. Para simplificar a análise, as camadas de solo são assumidas como meios homogêneos contínuos e isotrópicos, com contato perfeito entre elas, sem deslizamento ou separação entre os aterros antigo e o novo, durante o processo de deformação. A fundação é composta por duas camadas principais, sendo uma superior de argila orgânica ou muito mole, com baixa permeabilidade e alta compressibilidade, e uma camada inferior de argila siltosa. O aterro possui 8 m de altura, apoiado sobre colchão drenante de areia com 0,5 m de espessura. O nível d'água é considerado próximo da superfície, cerca de 1,5 m abaixo da base do aterro, o que reforça a condição de solo saturado e a importância da análise acoplada entre deformações e dissipação de poropressões. Para solos mais granulares, adota-se o modelo elasto-

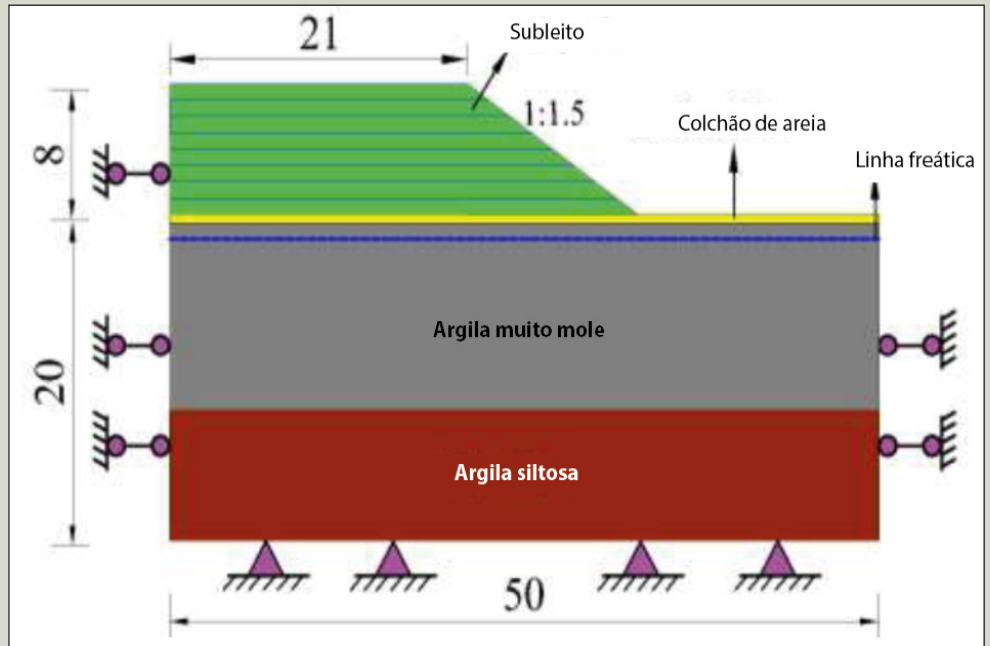


Figura 5. Plano A.

Tipo de material	Y2 (Kn/m ³)	C (Kpa)	0 (°)	E (kPa)	u (kPa)	β (°)	K	ψ (°)
Aterro	18,30	29,30	36,50	20,00	0,40	0,40	28,70	28,70
Argila muito mole	17,60	8,00	24,00	2500,00	0,35	0,35	35,30	35,30

Tabela 1. Parâmetros do modelo D-P.

Aterro		Argila muito mole	
$\sigma_1 - \sigma_3$ (KPa)	ϵ_p	$\sigma_1 - \sigma_3$ (KPa)	ϵ_p
170.1	0.000	57.04	0.000
649.9	0.035	102.359	0.0082
740.3	0.050	177.59	0.024
801.4	0.073	282.18	0.056
848.0	0.091	/	/

Observação: este indicativo na tabela “/”, significa que não há parâmetro correspondente.

Tabela 2. Parâmetros de endurecimento (hardening) do modelo D-P (Drucker-Prager).

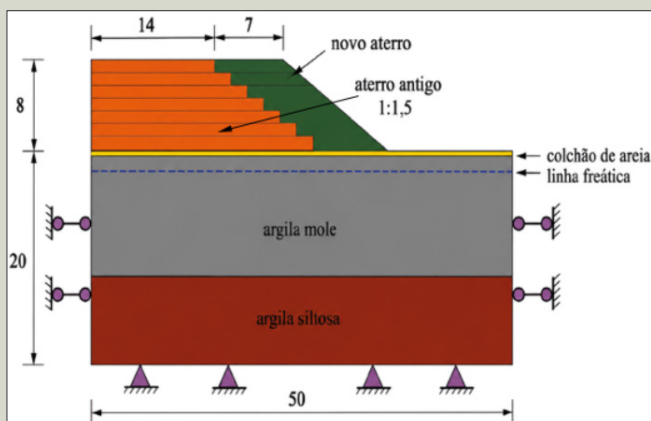


Figura 6. Plano B.

plástico de Drucker-Prager, enquanto que para a argila siltosa é utilizado o modelo Cam-Clay modificado, mais adequado para representar o comportamento não linear, compressível e dependente do adensamento típico do solo fino saturado. Esta escolha é importante porque o recalque não depende apenas do peso do aterro mas, também, da trajetória de tensões, da geração de poropressões e

da velocidade da dissipação da água intersticial. Na etapa seguinte, define-se a condição de contorno e o procedimento construtivo. As laterais do modelo são restritas horizontalmente, enquanto a base é restrita tanto na direção vertical quanto horizontal. A construção do aterro é simulada por etapas, com lançamento em camadas sucessivas de 1 m de espessura. Cada camada corresponde a um intervalo de construção de 30 dias, permitindo representar o carregamento gradual do solo e a evolução progressiva das tensões, deformações e poropressões. Este ponto é essencial para a interpre-

tação geotécnica do problema, já que a ampliação rodoviária ou ferroviária não é tratada como um carregamento instantâneo mas, como um processo construtivo evolutivo. Primeiro é executado o aterro antigo, depois ocorre a ampliação lateral com o novo aterro e, finalmente, as camadas superiores completam a seção até que o novo e o antigo subleito atinjam a mesma cota. Desta forma, o modelo permite avaliar a interação entre o recalque já desenvolvido, pela estrutura existente, e o adicional induzido pela ampliação. A malha de elementos finitos, apresentada em seguida, mostra justamente essa discretização do problema. O refinamento maior ocorre na região do aterro e da interface entre o antigo e o novo subleito, onde concentram-se os maiores gradientes de tensão e deformação. É nesta zona, que tende a surgir o recalque diferencial, responsável por trincas longitudinais, distorções no pavimento e perda de desempenho da

Tipo de material	γ_d (Kn/m ³)	C (Kpa)	ϕ (°)	K	u	λ	M	L (N/m ²)	β	K	e_1
Argila siltosa	17,80	22,40	31,60	0,02	0,31	0,07	1,27	0,00	1,00	1,00	1,02

Tabela 3. Parâmetros do modelo D-P.

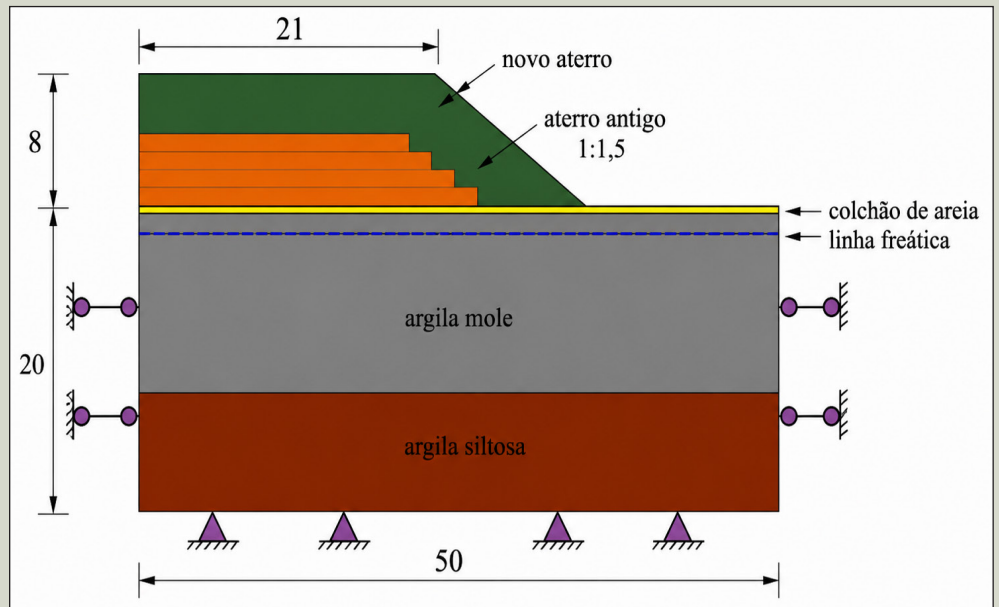


Figura 7. Plano C.

plataforma ampliada. Esta parte dos resultados é particularmente interessante porque mostra que, independentemente da forma construtiva adotada para a ampliação da plata-

forma (Planos A, B ou C), o comportamento global do recalque apresenta tendência muito semelhante. O que muda é a forma como as deformações se distribuem ao longo do

Material Tipo	γ_d (KN/m ³)	E (KPa)	μ	D (m)
sand	20	50	0.3	0.5

Tabela 4. Parâmetros do modelo de colchão de areia.

Antes que a estrutura se mova, os dados já sabem.

A instrumentação geotécnica transforma dados em segurança, permitindo acompanhar em tempo real o comportamento das contenções, do maciço e das estruturas vizinhas.

ANTECIPA RISCOS
Decisões mais seguras.

MONITORAMENTO
contínuo e confiável.

DADOS QUE GERAM VALOR
Valida projetos.
Proteja investimentos.

TRUSTED MEASUREMENTS.
SMARTER DECISIONS.

SOLUÇÕES AVANÇADAS PARA
MONITORAMENTO GEOTÉCNICO

MONITORAR HOJE.
DECIDIR MELHOR AMANHÃ.

Formação em Gestão de Riscos

ALTO

MÉDIO

BAIXO



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.

Prof. Fernando Affonso
Especialista em Riscos

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

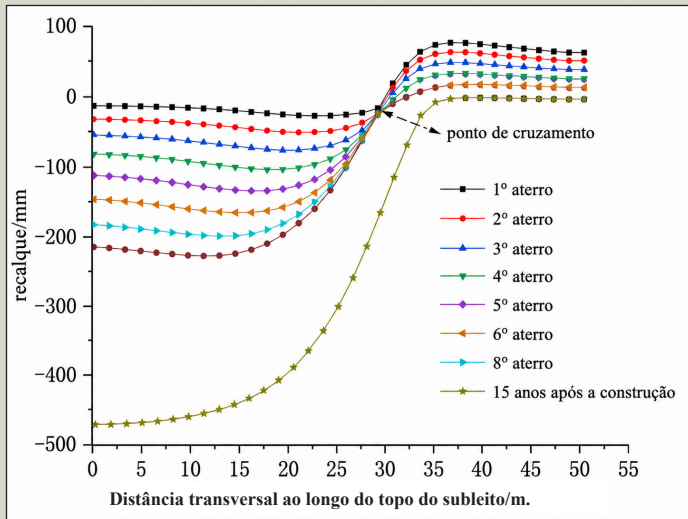


Figura 8. Plano A: curva de recalque total no solo de fundação.

tempo e da largura do aterro. No Plano A, observa-se que o recalque total da fundação assume forma em “S”. Durante as primeiras etapas de execução do aterro, o ponto de máximo recalque não se encontra exatamente no centro da plataforma existente. À medida que novas camadas são lançadas, as tensões redistribuem-se progressivamente no interior do maciço, e o ponto de maior deformação migra para a região central da estrada. Após a con-

clusão da oitava camada do aterro, o recalque máximo já está praticamente concentrado no eixo da plataforma. O processo continua durante o período de consolidação e, quinze anos após a construção, o recalque máximo atinge aproximadamente 469 mm.

Esse comportamento demonstra que o carregamento progressivo promove reorganização contínua das tensões efetivas no solo mole, fazendo com que a bacia de recalques torne-se cada vez mais uniforme. No Plano B, o mecanismo é um pouco diferente. A interação entre o aterro existente e a nova ampliação produz, inicialmente, um ligeiro levantamento da fundação sob a plataforma antiga. A ação do novo carregamento lateral, provoca redistribuição de tensões que influencia diretamente a resposta da estrutura antiga. Entre os

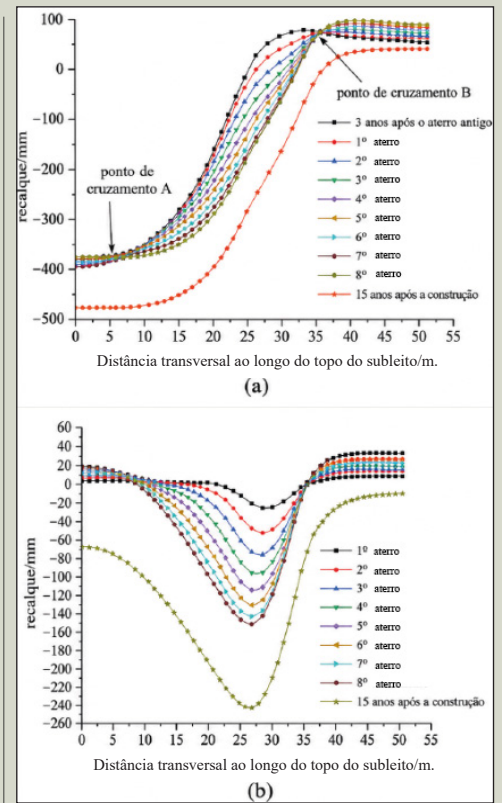


Figura 9. Plano B: recalque no solo de fundação. (a) Curva de recalque total no solo de fundação; (b) recalque da fundação devido a ampliação.

dois pontos de transição da plataforma, desenvolve-se uma região sujeita, simultaneamente, ao carregamento do novo aterro e ao abatimento progressivo da fundação. Com o passar dos anos, o recalque máximo alcança aproximadamente 476 mm. Quando analisa-se apenas a parcela do recalque provocada pela ampliação, observa-se uma bacia em forma de “V”, cujo ponto de máxima deformação coincide com o centro de gravidade do novo

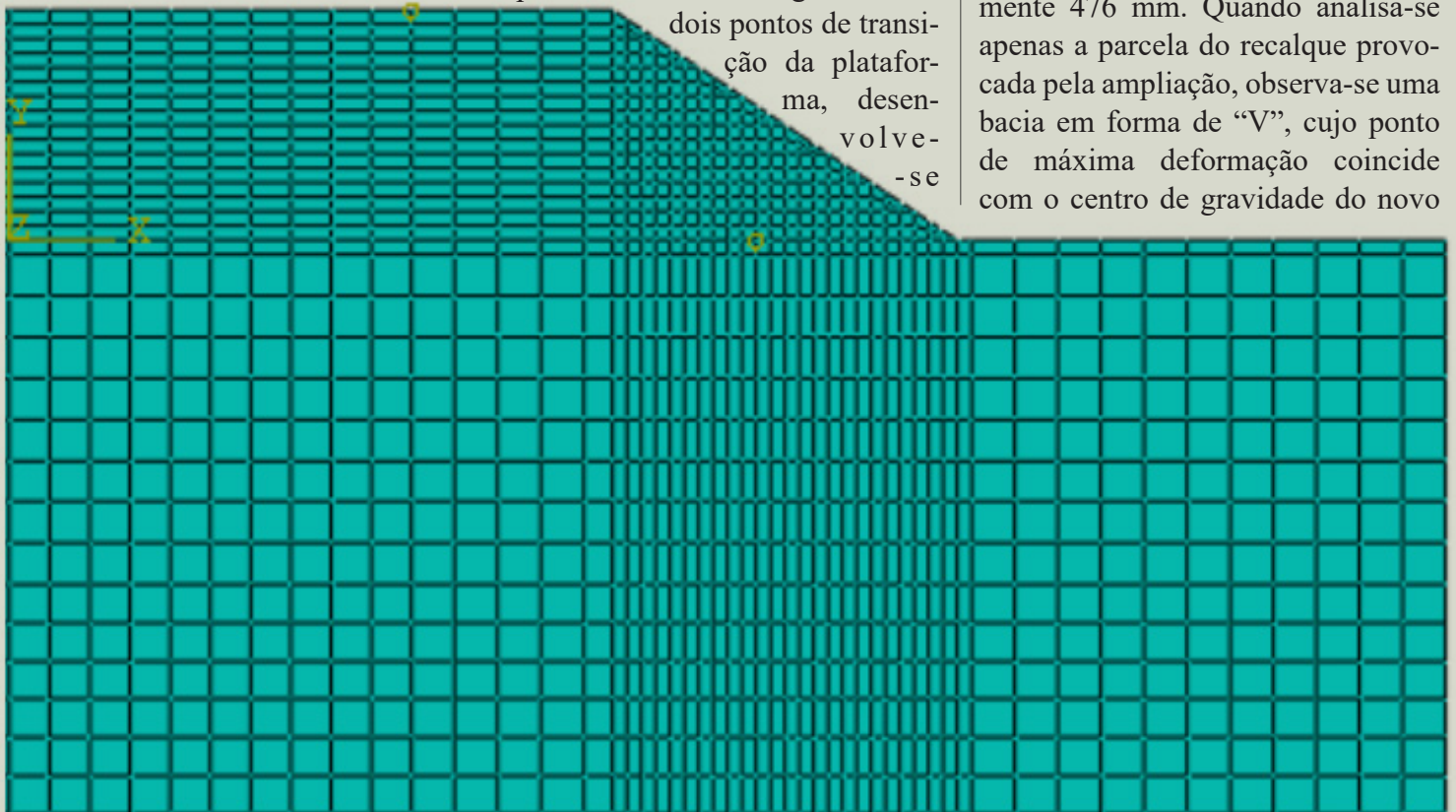


Figura 10. Diagrama da malha de elementos finitos do subleito.

aterro. Embora o recalque continue aumentando, à medida que novas camadas são executadas, a taxa de crescimento torna-se cada vez menor, indicando que o sistema caminha gradualmente para condição de estabilização. O Plano C apresenta um comportamento ainda mais complexo. Durante a ampliação da plataforma, o carregamento do novo aterro influencia diretamente a fundação da estrada existente produzindo, inicialmente, elevação localizada na região central da plataforma antiga. Entretanto, à medida que o aterro é concluído, prevalece o efeito do carregamento adicional e toda a superfície da fundação passa a sofrer abatimentos progressivos. A evolução temporal dos recalques, torna-se mais dinâmica, com deslocamentos significativos do ponto de máxima deformação, ao longo da seção transversal. Após quinze anos de consolidação, o recalque máximo alcança cerca de 476 mm, valor praticamente idêntico ao observado no Plano B. Quando consideramos apenas a contribuição da ampliação, verifica-se

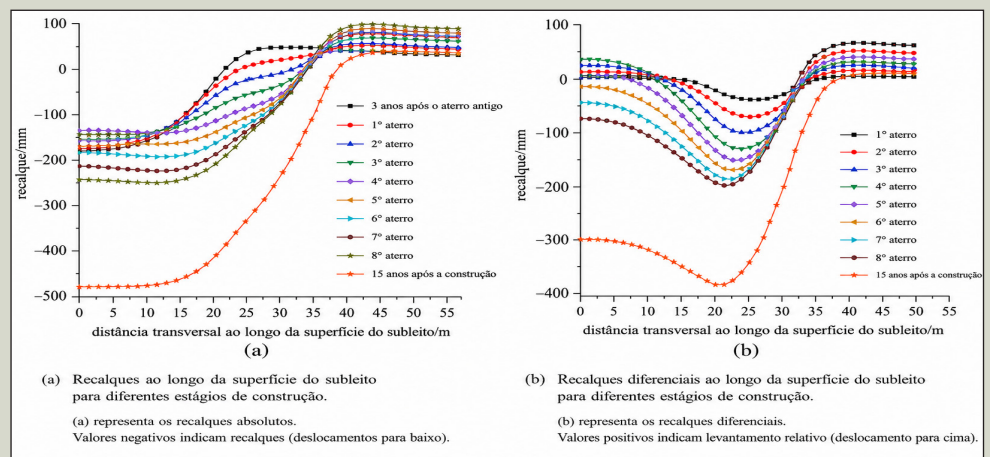


Figura 11. Plano C: recalque da superfície da fundação. (a) Curva de recalque total do solo de fundação; (b) recalque da fundação devido a duplicação.

que o recalque, máximo chega a aproximadamente 349 mm, deslocando-se gradualmente para a região mais próxima da plataforma existente. Na figura 9, apresenta-se a comparação final entre os três métodos construtivos que, apesar das diferenças observadas, durante as etapas intermediárias de execução, os resultados mostram que o comportamento final da fundação é surpreendentemente semelhante. Na região central da estrada existente, o Plano A apresenta recalques ligeiramente menores que os Planos B e C. Entretanto, a partir de aproximadamente 18 metros do eixo da ro-

dovia, as três curvas começam a convergir rapidamente. Na região do pé do talude, as curvas praticamente se sobrepõem, indicando que o método construtivo adotado exerce influência limitada sobre o recalque final da fundação. Para obras de ampliação rodoviária ou ferroviária, sobre solos moles, essa conclusão possui grande relevância prática, demonstrando que pequenas variações no método executivo podem alterar a distribuição temporária das deformações, mas não necessariamente modificam, de forma significativa, o recalque final do sistema. O aspecto



Fig. 12 - O melhoramento do solo, com CPR, sobre uma plataforma executada sobre o talude de uma rodovia.

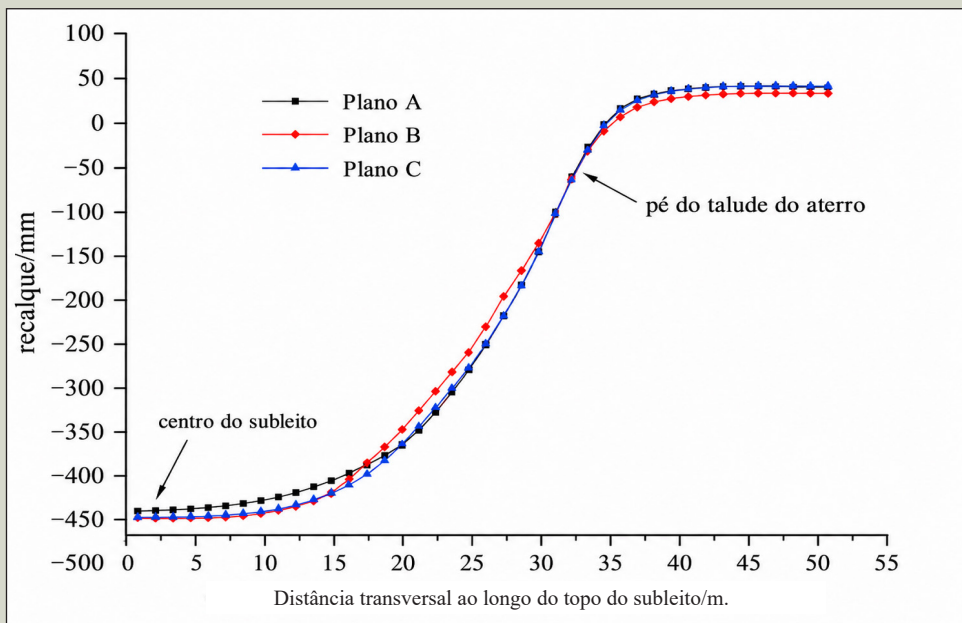


Figura 13. Recalque total da superfície do solo de fundação para três condições de análise.

mais importante continua sendo o controle da consolidação do solo mole, e da redistribuição das tensões induzidas pelo novo aterro, fatores que governam o desempenho de longo prazo da plataforma ampliada. Sob a ótica do melhoramento do solo, com CPR Grouting, essa constatação é extremamente importante, pois mostra que o problema fundamental não está apenas na geometria da ampliação mas, principalmente, na baixa rigidez e na elevada compressibilidade da fundação. Ao promover o geoenrijecimento do solo mole antes ou durante a ampliação, o CPR Grouting reduz, significativamente, a profundidade da bacia de recalques, limita a migração do ponto de deformação máxima e aumenta a compatibilidade de deformações entre a pista existente e a nova faixa implantada, mitigando justamente os mecanismos observados nas Figuras 8 a 13. Os resultados apresentados nas Figuras 14, 15, 16, 17, 20 e 21 permitem compreender, de forma bastante clara, o mecanismo de deformação que ocorre quando uma plataforma ferroviária ou rodoviária é ampliada lateralmente sobre fundações compressíveis. Os resultados

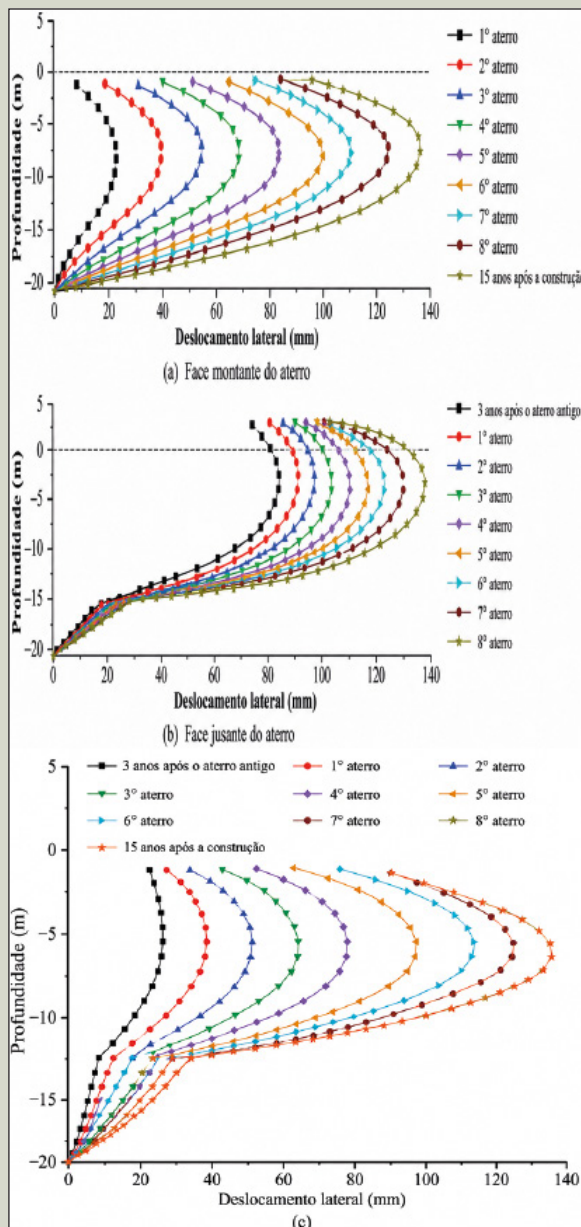


Figura 14. Deslocamento horizontal do pé do talude do novo aterro. (a) Plano A; (b) Plano B; (c) Plano C.

do deslocamento lateral mostram que, durante a construção das sucessivas camadas de aterro da ampliação, ocorre empuxo progressivo da fundação mole para os lados. No pé do novo aterro, o deslocamento horizontal aumenta continuamente à medida que novas camadas são executadas, atingindo seus valores máximos ao final da construção. A zona mais crítica situa-se aproximadamente entre 4 e 8 metros de profundidade, onde desenvolve-se uma espécie de “bulbo de deslocamento lateral” responsável pela redistribuição das tensões dentro da fundação mole. Após a conclusão da obra, inicia-se um processo gradual de adensamento, fazendo com que parte desses deslocamentos horizontais seja reduzido ao longo dos anos. Entretanto, mesmo após quinze anos, permanecem deformações residuais significativas. A comparação entre os três arranjos construtivos demonstra que o Plano B, apresenta os menores deslocamentos laterais no pé do novo aterro, enquanto os Planos A e C produzem respostas muito semelhantes. Após quinze anos, o deslocamento máximo observado permanece da ordem de 114 a 121 mm, evidenciando que o efeito da ampliação continua influenciando a fundação por um período extremamente longo, demonstrando que o comportamento da fundação não é controlado apenas pela fase construtiva mas, principalmente, pelos mecanismos de consolidação secundária e redistribuição das tensões que se prolongam durante décadas.



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!**

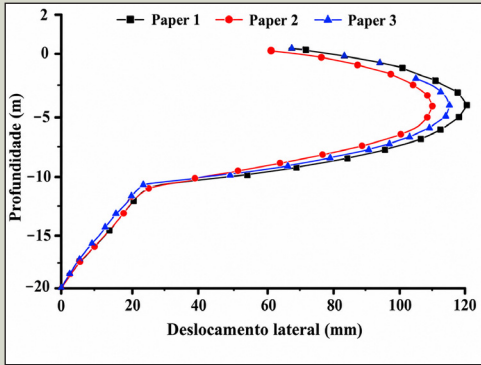


Figura 15. Deslocamento horizontal do pé do talude do novo aterro nos três planos analisados, após 15 anos.

Quando se analisa o pé do talude da plataforma antiga, observa-se um comportamento igualmente interessante. Durante a construção da ampliação, a fundação originalmente carregada, sofre tendência de deslocamento para o interior do aterro existente, porque a nova carga aplicada ao lado, modifica completamente o estado de tensões previamente estabilizado. O resultado é a interação entre a plataforma antiga e a nova, produzindo um mecanismo de deformação conjunto. Mesmo após quinze anos, permanecem deslocamentos laterais expressivos na região da interface, demonstrando que a ampliação passa a funcionar como um único sistema estrutural apoiado sobre uma fundação contínua. Os resultados do recalque na superfície são ainda mais reveladores. Imediatamente após a construção, o recalque apresenta distribuição relativamente uniforme, com valores da ordem de 30 a 35 mm. Entretanto, com a evolução do adensamento, o recalque aumenta progressivamente e passa a se concentrar na região de ligação entre o aterro antigo e o novo.

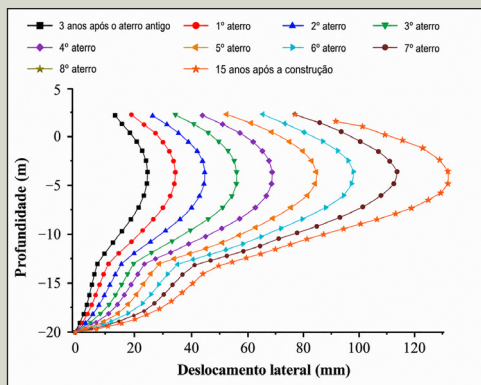


Figura 16. Plano C: deslocamento horizontal do pé do talude do aterro existente.

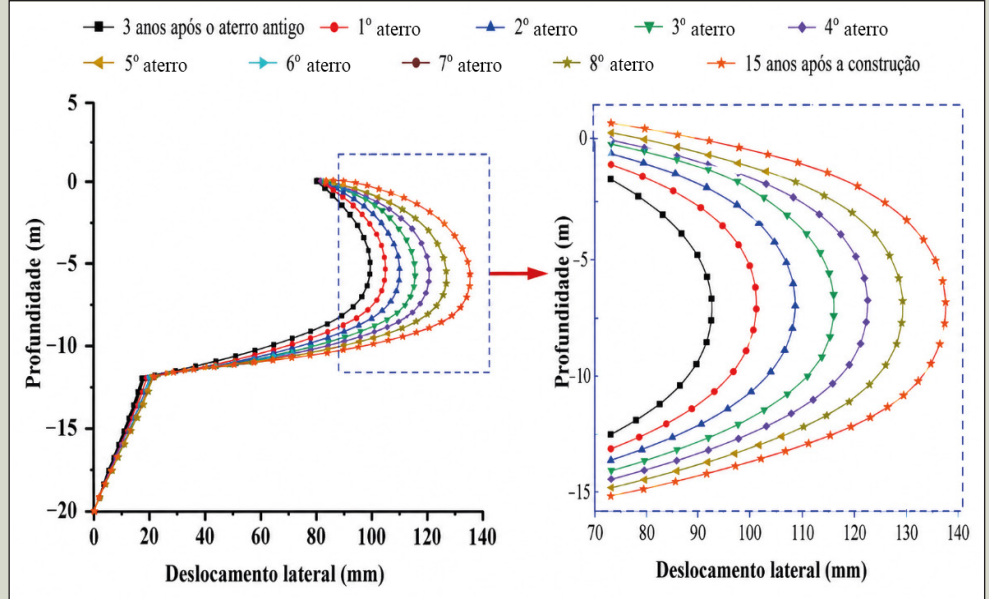


Figura 17. Plano B: deslocamento horizontal do pé do talude do aterro antigo.

Após quinze anos, o recalque máximo alcança aproximadamente 235 mm no Plano A e quase 300 mm no Plano C, confirmando que a região de junção, entre as duas plataformas, constitui o ponto mais vulnerável de todo o sistema. A Figura 15 evidencia, de forma muito clara, a evolução temporal desse fenômeno. Durante os primeiros anos, o recalque aumenta rapidamente em toda a seção transversal. Com o passar do tempo, entretanto, a concentração de deformações torna-se cada vez mais intensa, exatamente na interface entre o aterro existente e a ampliação. Essa concentração de recalques produz o chamado recalque de conexão,

caracterizado pela combinação simultânea do recalque vertical diferencial e o deslocamento horizontal na mesma região. Do ponto de vista geotécnico, essa é provavelmente a principal conclusão do trabalho. O problema não está apenas no recalque absoluto do novo aterro, mas na incompatibilidade de deformações entre a estrutura antiga, que já se encontra parcialmente adensada, e a nova estrutura, que inicia um novo ciclo de carregamento. Essa diferença de rigidez e de histórico de tensões gera uma zona crítica na interface, responsável pelo aparecimento de deformações diferen-



Fig. 18 - Melhoramento do solo com CPR Grouting, em uma duplicação rodoviária.

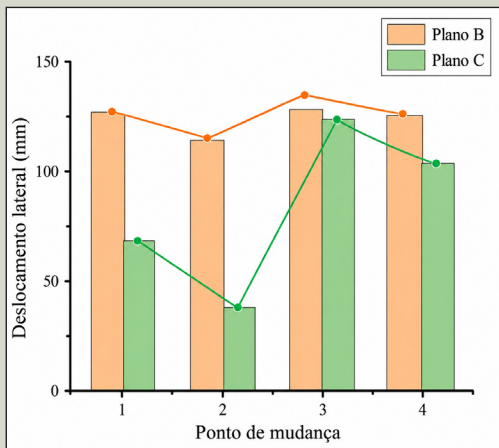


Figura 19. Variação do deslocamento lateral máximo do pé do talude do aterro existente.

ciais, perda de geometria da via, necessidade frequente de manutenção e, em casos extremos, comprometimento da segurança operacional. Sob a ótica do melhoramento do solo, o desenvolvimento do estudo reforça o conceito extremamente importante de que, não basta tratar apenas a faixa correspondente à ampliação. É necessário promover a compatibilização de rigidez entre o solo existente e o solo que receberá a nova carga. Caso contrário, o sistema continuará desenvolvendo recalques diferenciais ao longo dos anos, mesmo que a estabilidade global seja satisfatória. É exatamente nesse ponto que o geoenrijecimento, com CPR Grouting (Consolidação Profunda Radial), pode ser enquadrado como solução preventiva ao promover, simultaneamente, o aumento da resistência não drenada, da rigidez e das tensões horizontais no maciço, reduzindo deslocamentos laterais, durante a construção, e acelerando a

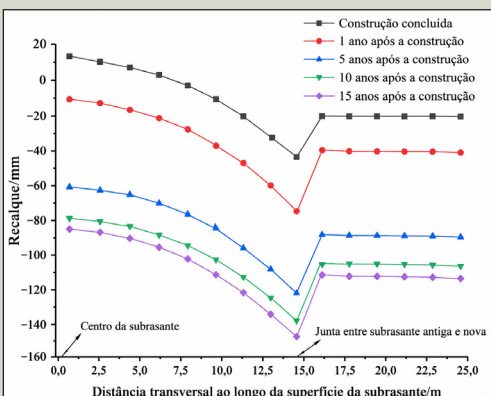


Figura 20. Variação do recalque na superfície superior do aterro em diferentes períodos de tempo devido à duplicação.

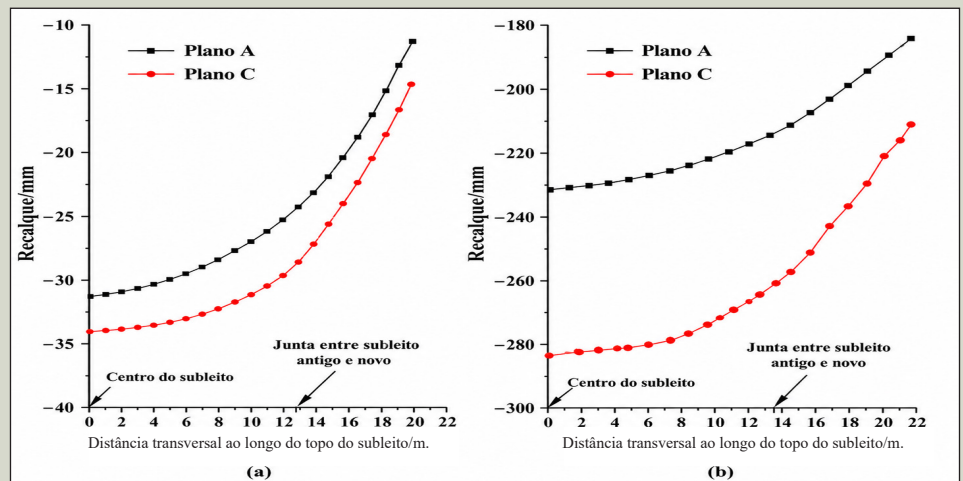


Figura 21. Comparação dos recalques da superfície do aterro nos Planos A e C. (a) Recalque imediatamente após a construção; (b) recalque após 15 anos de serviço.

estabilização do recalque. Mais importante ainda, permite tratar não apenas a área da ampliação mas, também, uma faixa da plataforma existente, criando uma transição gradual de rigidez entre os dois aterros. Dessa forma, o mecanismo do recalque de conexão, tende a ser significativamente reduzido, diminuindo a necessidade de futuras intervenções de manutenção e aumentando a vida útil da infraestrutura. A

ampliação de rodovias e ferrovias, sobre solos moles, não é apenas um problema de estabilidade e, sim, de compatibilidade deformacional entre estruturas com diferentes históricos de carregamento. O sucesso da obra depende da capacidade de controlar, simultaneamente, recalques diferenciais e deslocamentos laterais, especialmente na interface entre o aterro existente e a ampliação.

REFERÊNCIAS

- Thomas Kim é engenheiro geotecnico. Trabalha com melhoramento de solos moles.
- Jiang, X.; Geng, J.Y.; Qiu, Y.J. Comparison of mechanical behavior of Expressway subgrade widening on soft soil ground with high groundwater table. *J. China Foreign Highw.* 2013, 33, 18–23.
- Allersma, H.G.B.; Ravenswaay, L.; Vos, E. Investigation of Road Widening on Soft Soils Using a Small Centrifuge; National Academy Press: Washington, DC, USA, 1994.
- Jia, B.X.; Liu, F.P.; Zhao, L.; Zhou, L.L.; Li, Z.Y. Factor analysis of differential settlement of new and old subgrade caused by highway reconstruction and expansion. *J. Safety Environ.* 2020, 20, 67–72.
- Jia, N.; Chen, R.P.; Chen, T.M.; Xu, L.X.; Yang, S.H. Theoretical analysis and measurement for widening project of Hang-Yong Expressway. *Chin. J. Geotech. Eng.* 2004, 6, 755–760.
- Zhang, J.H. Research on Deformation Behavior and Differential Settlement Limitation of Expressway Widening Oil Soft Soil Foundation; Southeast University: NanJing, China, 2006.
- Zhen, F. Study on Differential Settlement and Control. Technology of Subgrade in Expressway Widening Project; Chang'an University: Xian, China, 2007.
- Keke Li, Wenyan Xu * and Liang Yang. Deformation Characteristics of Raising, Widening of Old Roadway on Soft Soil Foundation.
- Pu, Y.S. Study on allowable differential settlement control standard of new and old subgrade. *Highw. Automot. Appl.* 2019, 3, 97–101.
- Lu, X.F. Study on Differential Settlement Mechanism and Control. Standard of Widening Subgrade of Changyu Expressway; Harbin Institute of Technology: Haerbing, China, 2019.
- Zhang, S. Study on Differential Settlement Characteristics and Control. Standards of Subgrade Widening of Yan'an North. Transit. Line; Chang'an University: Xian, China, 2019.
- Wan, Z. Research on Control. Criterion of Subgrade Settlement on Expressway Widening; Chongqing Jiaotong University: Chongqing, China, 2017.
- Yu, J.R.; Cheng, X.Q.; Li, F.; Huang, Y.F. Study on settlement characteristics and influencing

LI O ARTIGO DO JIE HAN, REFERÊNCIA MUNDIAL EM ATERROS REFORÇADOS SOBRE SOLOS MOLES, PERTINENTE A UMA AMPLIAÇÃO RODOVIÁRIA. GOSTARIA QUE COMENTASSE O ARTIGO, JUNTAMENTE COM O COMPROMETIMENTO DE TRINCAS EXISTENTES NO PAVIMENTO EM DECORRÊNCIA DA OBRA DE DUPLICAÇÃO.

Em ampliações rodoviárias e ferroviárias, executadas sobre solos moles, o maior desafio geotécnico não está apenas na construção da nova faixa mas, principalmente, na integração entre a estrutura existente e a sua ampliação. Enquanto o aterro original já passou por anos ou até décadas de consolidação, acomodação e ganho de resistência, o novo aterro inicia sua vida útil em uma condição completamente diferente, ainda sujeito a recalques e deformações decorrentes do processo natural de adensamento do solo de fundação. Essa diferença de comportamento cria uma situação crítica para projetistas e construtores. Embora visualmente a rodovia ou a ferrovia pareça uma única plataforma, do ponto de vista geotécnico existem duas estruturas com níveis distintos de rigidez e deformabilidade. De um lado, encontra-se o aterro antigo, já estabilizado e praticamente sem movimentação significativa. Do outro, o aterro recém-construído, que

transfere tensões ao subsolo, provocando a dissipação gradual das poropressões geradas durante sua implantação. O resultado dessa incompatibilidade de comportamento é o surgimento de recalques diferenciais ao longo da região de transição entre as duas estruturas. À medida que o novo aterro continua se deformando e o aterro antigo permanece praticamente estável, surgem distorções na superfície

de rolamento, trincas longitudinais, degraus na pista e deformações progressivas que comprometem tanto o desempenho estrutural quanto o conforto dos usuários. O problema torna-se ainda mais relevante, quando a ampliação é executada sobre depósitos espessos de argilas moles, turfas ou solos orgânicos, materiais caracterizados por elevada compressibilidade e baixa resistência ao cisalhamento. Nesses casos, o recalque pode persistir durante vários anos após a conclusão da obra, exigindo constantes intervenções de manutenção e elevando significativamente o custo operacional da infraestrutura. As edições anteriores da SSB, pertinentes à esta série, mostraram que o comportamento do recalque, em ampliações, não depende apenas da magnitude das cargas aplicadas mas, também, da forma como as tensões se redistribuem no interior do maciço e do mecanismo de deformação desenvolvido na fundação. Estudos numéricos e observações de campo, demonstram que a



Fig. 1 - Melhoramento do solo de fundação, com CPR Grouting em obra de duplicação rodoviária.

 Análise de Estabilidade

 Escavações e Contenções

 Muros e Gabiões

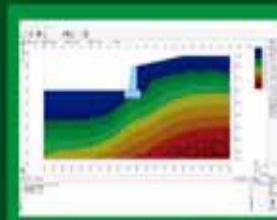
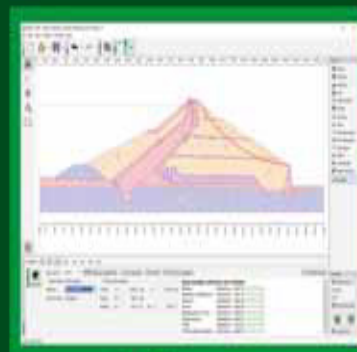
 Recalque

 Sondagens de Solo

 Túneis e Poços

 Estudos geológicos

 Muros e Gabiões



AVALIE GRATUITAMENTE

Solicite: comercial@solucoescaad.com.br

Distribuido por:

SOLUÇÕES CAD
BIM

www.solucoescaad.com.br



região de encontro entre o aterro antigo e o novo passa a funcionar como uma zona de concentração de deformações, onde surgem gradientes de deslocamento capazes de gerar danos progressivos à plataforma. Desta forma, o verdadeiro objetivo de qualquer solução geotécnica, para ampliações sobre solos moles, não é simplesmente reduzir recalques. A estratégia correta consiste em fazer com que o aterro existente, e o ampliado, trabalhem como uma única estrutura geotécnica, apresentando rigidez compatível e comportamento deformacional semelhante ao longo do tempo. Somente quando esta compatibilização é alcançada, torna-se possível minimizar os recalques diferenciais, evitar a formação de trincas e proporcionar uma plataforma estável, segura e confortável para os usuários durante toda a vida útil da obra.

Por que surge o recalque diferencial?

Quando um aterro antigo já consolidado é ampliado lateralmente, o novo aterro passa a recalcar enquanto o antigo permanece praticamente estável. Essa diferença de movimentação gera uma “quebra de rigidez” na interface entre as duas estruturas. É justamente nessa região que surgem trincas longitudinais, degraus na pista e deformações que exigem manutenção frequente. O sucesso de uma ampliação depende da capacidade de reduzir essa diferen-



Fig. 2 - Melhoria do solo de fundação, com CPR Grouting, em uma obra de duplicação rodoviária.

ça de comportamento entre o aterro existente e o novo aterro.

O que mostra o estudo do Jie Han

O recente estudo desenvolvido por Jie Han, sobre deslocamentos de aterros sobre solos moles, após a ampliação, utilizou modelagem numérica avançada para analisar o comportamento de aterros construídos sobre solos moles, reforçados com colunas, especialmente em situações de ampliação de rodovias e ferrovias. O objetivo foi compreender por que, quando são adotadas técnicas de reforço do terreno, com colunas, continuam ocorrendo recalques diferenciais na região de transição entre o aterro antigo e o novo. Os resultados demonstraram que o desempenho da fundação não depende exclusivamente da resistência do solo ou da capacidade de carga das colunas instaladas. Na realidade, o comportamento do recalque é influenciado por um conjunto de fatores que atuam simultaneamente, incluindo a posição das colunas dentro da fundação, o histórico de consolidação do

aterro existente e a forma como as tensões são transferidas entre o aterro, as colunas e o solo mole subjacente. As simulações mostraram que o aterro antigo já passou por um longo processo de adensamento ao longo dos anos, encontrando-se mais rígido e menos deformável do que o aterro recém-construído. Quando uma nova faixa é adicionada lateralmente, cria-se uma condição de desequilíbrio, pois o solo sob a ampliação ainda inicia um processo de consolidação que já ocorreu anteriormente sob a plataforma existente. Essa diferença de comportamento gera deslocamentos verticais distintos e favorece o aparecimento de recalques diferenciais na região de encontro entre as duas estruturas. Um dos aspectos mais importantes observados pelos autores, foi que a simples instalação uniforme de colunas ao longo de toda a área não produz necessariamente os melhores resultados. As análises indicaram que as colunas posicionadas na região de transição, entre o aterro antigo e o novo, apresentam contribuição muito mais significativa para a redução dos deslocamentos diferenciais



solotest.com.br



**GERAL
& LABORATÓRIO**

do que as instaladas em regiões mais afastadas da interface. Em outras palavras, o local onde o reforço é executado pode ser mais importante do que a quantidade total de colunas empregadas. Os resultados também evidenciaram que a transferência de carga desempenha papel fundamental no comportamento da fundação. Dependendo da rigidez relativa entre as colunas, o solo mole e o aterro, as tensões podem concentrar-se em determinadas regiões, produzindo deformações localizadas. Quando essa redistribuição de tensões não é adequadamente controlada, surgem zonas de recalque diferencial que comprometem o conforto, a durabilidade e a segurança da infraestrutura. Em outras palavras, o estudo de Jie Han demonstra que o principal desafio, em obras de ampliações rodoviárias e ferroviárias, não é apenas aumentar a capacidade suporte do terreno, mas garantir que o aterro antigo e o novo trabalhem de forma integrada. A região de junção entre as duas estruturas é o ponto mais crítico do sistema e, por isso, deve receber atenção especial. Foi justamente nessa região, que o autor verificou os maiores benefícios da utilização estratégica das colunas de reforço, reduzindo significativamente os recalques diferenciais e melhorando o desempenho global da plataforma. Entretanto, a eficiência do sistema está diretamente ligada ao espaçamento, à rigidez das colunas e à capacidade de transferência de carga entre o solo e os elementos de reforço. Nas soluções tradicionais, com colunas de brita, colunas de concreto vibro-

compactado ou deep mixing, parte considerável da carga é transferida para os elementos executados no interior do solo, formando um sistema composto solo-coluna. Nesses casos, o desempenho depende da capacidade das colunas absorverem tensões e limitarem deformações da massa de solo adjacente. Já no processo do geoenrijecimento, com o CPR Grouting, a estratégia é distinta. Em vez de simplesmente criar elementos estruturais, para suportar cargas, busca-se promover a consolidação de todo o maciço, com um aumento generalizado da sua resistência e rigidez, entre os bulbos executados. O resultado é a participação integral do próprio terreno na sustentação das cargas aplicadas.

A vantagem do melhoramento do solo atuando diretamente na região crítica da transição

Os resultados obtidos por Jie Han demonstram que a região de transição, entre o aterro existente e a ampliação, constitui o ponto mais crítico do sistema em termos de recalques diferenciais. Os modelos numéricos apresentados, evidenciam que a maior concentração de deformação ocorrem exatamente nessa faixa, onde existe mudança abrupta de rigidez entre as estruturas antiga e a nova. Consequentemente, qualquer solução capaz de aumentar a rigidez do solo, nessa

Colunas de Brita ou Melhoramento do Solo?

Embora, frequentemente, enquadradas na mesma categoria de tratamento geotécnico, colunas de brita e o CPR Grouting atuam por mecanismos completamente diferentes.

Colunas de Brita	CPR Grouting
Colunas transferem parte da carga para camadas profundas resistentes.	Aumentam a capacidade resistente do próprio solo, homogeneizando-o.
Dependem da estabilidade lateral do solo mole.	Promovem confinamento de cada metro cúbico do solo.
Funcionam precariamente como drenos verticais.	Produzem a consolidação de toda a argila mole, comprimindo e drenando-a.
Podem sofrer expansão lateral ou o popular embarrigamento.	Produzem confinamento lateral do aterro.
Melhoram parcialmente a rigidez global, apenas na região das colunas.	Elevam significativamente a rigidez de todo o maciço.
Não se aplica para profundidades maiores que 10 m.	Adequados para cargas elevadas e controle rigoroso de recalques. Não há limitação de profundidade.

região, e promover uma transição mais gradual das deformações tende a reduzir significativamente o recalque diferencial observado em campo. As soluções analisadas na literatura internacional, normalmente utilizam colunas de brita, deep mixing ou estacas rígidas. Embora apresentem diferenças construtivas importantes, todas compartilham o mesmo objetivo geotécnico fundamental, de tentar aumentar a rigidez da fundação na zona de transição e redistribuir as tensões induzidas pelo aterro ampliado. O melhoramento efetivo do solo, com CPR Grouting, segue esse mesmo princípio, porém acrescenta verdadeiramente mecanismos de melhoria que não são contemplados pelas técnicas convencionais com formação de colunas. Durante a execução, a expansão radial dos bulbos promove compressão controlada do solo mole circundante, gerando aumento progressivo da resistência não drenada e do módulo de deformação do maciço melhorado. Paralelamente, ocorre a redução dos índices de vazios e a aceleração do processo de dissipação das poropressões, fatores diretamente relacionados ao ganho de estabilidade e à eliminação do recalque futuro. Diferentemente dessas soluções com colunas, que atuam predominantemente como elementos de transferência de carga, o CPR Grouting promove o geoenrijecimento do próprio solo, localizado entre as verticais executadas, significando que não apenas os elementos introduzidos passam a apresentar elevada resistência mas, também, a massa de solo adjacente sofre processo de consolidação induzida, resultando em uma fundação homogê-

nea, eliminando a susceptibilidade da formação de deformações diferenciais. Sob a ótica dos resultados apresentados por Jie Han, essa característica torna-se particularmente relevante. Se o problema principal, está concentrado na faixa de transição, entre o aterro existente e a ampliação, a solução ideal deve atuar exatamente nessa região, elevando sua rigidez e reduzindo as diferenças de deformabilidade entre os dois segmentos da plataforma. Neste contexto, o CPR Grouting apresenta extrema vantagem ao combinar reforço estrutural, consolidação acelerada e geoenrijecimento do solo mole adjacente em uma única intervenção. Os modelos numéricos apresentados por Jie Han, demonstram que a transição entre o aterro existente e a ampliação é a origem dos principais recalques diferenciais obser-

vados nesse tipo de obra. Torna-se necessário, portanto, promover o aumento global da rigidez da fundação, atacando diretamente a origem do problema identificado pelo autor. Os resultados, apresentados por Jie Han, confirmam que a simples ampliação da plataforma, sobre solos moles, inevitavelmente cria zonas de incompatibilidade de deformações entre o aterro existente e o novo aterro. A utilização de colunas de reforço reduz mas não elimina este problema, já o melhoramento tem demonstrado que a solução mais eficiente não é apenas transferir cargas para elementos estruturais, inseridos no terreno, mas aumentar a capacidade resistente do próprio solo de fundação. Sob esta ótica, o CPR Grouting, representa uma mudança conceitual importante, pois trata a origem do problema geotécnico em vez de apenas efeitos estruturais.

GEOKON
TRUSTED MEASUREMENTS
EQUIPAMENTOS GEOTÉCNICOS

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



O moderníssimo inclinômetro M6180, 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. Conseqüentemente, seu custo tornou-se muito atrativo. O modelo M6180 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

O pavimento muda de comportamento antes mesmo da nova pista duplicada ficar pronta.

Durante a obra de duplicação de rodovias, a escavação ao lado da plataforma existente provoca um fenômeno pouco percebido, porém extremamente importante que é o desconfinamento lateral do aterro e da fundação. Enquanto a plataforma original permaneceu confinada durante anos, a retirada do terreno vizinho altera o estado de tensões do maciço, que passa a sofrer pequenos deslocamentos horizontais em direção à escavação e o subleito perde parte do apoio lateral que contribuía para sua estabilidade. Esses deslocamentos costumam ser de pequena magnitude, muitas vezes imperceptíveis visualmente. Entretanto, são suficientes para modificar a distribuição de deformações nas camadas granulares da base e subbase, assim como na camada asfáltica. O primeiro sintoma normalmente não é recalque e, sim, o aparecimento ou a reativação de trincas existentes, que permaneciam estáveis durante anos, e que começam a se abrir lentamente, principalmente junto ao bordo da faixa próxima. Quando esse processo coincide com períodos chuvosos, a situação torna-se muito mais crítica, pois a água infiltra pelas fissuras abertas, reduzindo a sucção do solo, elevando a umidade das camadas de fundação e diminuindo significativamente sua rigidez. Forma-se então um ciclo de deterioração acelerada:



Fig. 3 - O desconfinamento lateral efetuado no subleito estradal (pavimento e talude) incidem sobre o comportamento de trincas que existem no pavimento.

- desconfinamento lateral;
- abertura de fissuras;
- infiltração d'água;
- perda de suporte do subleito;
- aumento das deformações;
- propagação das trincas;
- surgimento de recalques diferenciais e degradação prematura do pavimento.

Em muitos casos, a patologia das trincas existentes é atribuída exclusivamente às chuvas ou ao envelhecimento do revestimento asfáltico. Na realidade, a chuva frequentemente atua apenas como um agente acelerador de um processo iniciado pela alteração do estado de tensões provocada pela obra. Algumas medidas reduzem significativamente o risco de deterioração do pavimento durante a duplicação:

- executar o melhoramento do solo antes do desconfinamento sempre que possível;
- reduzir o tempo em que a plataforma permanece lateral-

mente exposta;

- selar imediatamente fissuras existentes;
- controlar rigorosamente a drenagem superficial e profunda;
- monitorar deslocamentos horizontais e recalques durante toda a execução;
- evitar sobrecargas junto ao bordo da pista existente;
- restabelecer rapidamente o confinamento lateral da plataforma.

Quanto menor o período entre a escavação e a recomposição do confinamento, menor tende a ser a evolução desta patologia. O fator desencadeador costuma ser o desconfinamento lateral provocado pela própria obra. A água apenas acelera um mecanismo de deformação que já havia sido iniciado. Em obras de duplicação de rodovias, sobre solos moles, o principal problema não é a resistência do solo, mas a alteração do estado de tensões e o consequente aumento das deformações, que acabam se refletindo também no

comportamento do pavimento existente.

Medidas para reduzir a evolução das patologias

Quanto menor o período entre a escavação e a recomposição do confinamento, menor tende a ser a evolução desta patologia. O fator desencadeador costuma ser o desconfinamento lateral provocado pela própria obra. A água apenas acelera um mecanismo de deformação que já havia sido iniciado. Em obras de duplicação de rodovias, sobre solos moles, o principal problema não é a resistência do solo, mas a alteração do estado de tensões e o consequente aumento das deformações, que acabam se refletindo também no comportamento do pavi-



Fig. 4 - O problema nem sempre está na readequação do maciço. Em muitas ampliações rodoviárias, o simples desconfinamento lateral provocado pelas escavações modifica o equilíbrio de tensões do pavimento existente, favorecendo a abertura de trincas já existentes. Com a chegada das chuvas, a infiltração de água acelera a deterioração do revestimento e da base, tornando indispensáveis medidas preventivas imediatas, como o calafetamento das fissuras e a proteção temporária das bordas da escavação.

mento existente. Uma vez iniciado o desconfinamento lateral da plataforma existente, o objetivo passa a ser impedir que pequenas

fissuras evoluam para um processo generalizado de degradação do pavimento. As ações mais eficazes são:

1. Calafetar imediatamente as trincas existentes

Toda fissura observada durante a obra deve ser selada o mais cedo possível. O calafetamento impede a infiltração de água para as camadas inferiores, reduzindo a perda de suporte do subleito e retardando a propagação das trincas.

2. Executar barreiras laterais provisórias contra a infiltração

Durante a fase de escavação, é recomendável implantar barreiras laterais, canaletas provisórias, lonas impermeáveis ou outros dispositivos que impeçam que a água de chuva penetre na interface entre a pista existente e a frente de ampliação. Essa medida reduz significativamente a saturação do aterro e da fundação.



Fig. 5 - Durante a ampliação da rodovia, o desconfinamento lateral altera o estado de tensões do pavimento existente. O resultado pode ser a abertura de trincas e a rápida evolução de patologias, exigindo monitoramento e medidas preventivas, como o selamento das fissuras e a proteção das bordas da escavação.

3. Garantir drenagem eficiente durante toda a obra

A água nunca deve permanecer acumulada junto ao bordo da plataforma. Valetas provisórias, bombeamento e limpeza constante dos dispositivos de drenagem são fundamentais para preservar a capacidade de suporte das camadas do pavimento.

4. Reduzir o tempo de exposição ao desconfinamento

Quanto maior o intervalo entre a escavação lateral e a recomposição do aterro ou da nova plataforma, maior será a probabilidade de evolução das deformações. O cronograma executivo deve buscar minimizar esse período.

5. Controlar cargas próximas ao bordo da pista

Equipamentos pesados, estoques de materiais e circulação intensa de caminhões junto ao limite da pista existente aumentam as tensões e favorecem deslocamentos laterais adicionais. Sempre que possível, essas cargas devem ser mantidas afastadas da borda da escavação.

6. Instrumentar e monitorar a plataforma

Leituras periódicas de recalques, deslocamentos horizontais e abertura de fissuras permitem identificar precocemente qualquer aceleração das deformações, possibilitando intervenções antes que ocorram danos significativos.

7. Executar o melhoramento do solo antes do avanço da ampliação

Sempre que viável, o melhoramento do solo, como CPR Grouting, deve ser executado previamente ao desconfinamento. Ao aumentar a rigidez do maciço e reduzir sua deformabilidade, o CPR limita os deslocamentos laterais, preserva o confinamento da plataforma existente e reduz significativamente o risco de surgimento ou agravamento desta patologia de pavimento. Na maioria das ampliações rodoviárias, a abertura das trincas não ocorre por deficiência do revestimento asfáltico, mas pela alteração das condições geotécnicas de apoio durante a obra. Medidas simples — como calafetamento precoce, drenagem provisória eficiente, barreiras contra infiltração e redução do tempo de desconfinamento — podem evitar a evolução de pequenas fissuras para patologias de alto custo de recuperação.

As trincas quase que, invariavelmente, não são consequência do melhoramento do solo

É comum que o aparecimento ou a intensificação de trincas existentes no pavimento coincida com a execução dos serviços de melhoramento do solo. Essa coincidência temporal, entretanto, não significa necessariamente que o tratamento tenha provocado as patologias. Na maioria das ampliações rodoviárias e ferroviárias, as fissuras decorrem da combinação de fatores

que já atuam desde o início da obra:

- desconfinamento lateral da plataforma existente;
- redistribuição das tensões no aterro e no solo de fundação;
- deformações progressivas do maciço;
- abertura de trincas preexistentes;
- infiltração d'água pelas fissuras;
- redução da rigidez do subleito e aceleração das deformações.

O tratamento geotécnico é frequentemente executado quando esse processo já está em andamento. Assim, o surgimento de novas trincas ou a evolução das existentes pode ocorrer simultaneamente à intervenção, mas isso não caracteriza, por si só, uma relação de causa e efeito. Quando o melhoramento é corretamente projetado e executado, sua função é justamente reduzir deformações do maciço, aumentar sua rigidez e estabilizar a plataforma, contribuindo para limitar a progressão das patologias, e não para agravá-las. Na engenharia geotécnica, correlação temporal não é prova de causalidade. Antes de atribuir danos ao tratamento do solo, é indispensável analisar a sequência construtiva, o estado prévio do pavimento, as condições de drenagem, a evolução das deformações e os dados de instrumentação da obra.

REFERÊNCIAS

- Cinioglu, S. F., Unal, G., and Togrol, E. (1999). "A plastic stability solution for embankment design." *Geotechnical engineering for transportation infrastructure*, Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1263–1268.
- Drucker, D. C., Prager, W., and Greenberg, H. J. (1952). "Extended limit design theorems for continuous media." *Q. Appl. Math.*, 9(4), 381–389.
- Cihan Öser, Ph.D.1; and S. Feyza Cinioglu, Ph.D., M.ASCE2. *Embankment Design Method Combining Limit-State Approach with Stress-Path Application*
- Weng, X.; Zhu, H.H.; Chen, J.; Liang, D.; Shi, B.; Zhang, C.C. *Experimental investigation of pavement behavior after embankment widening using a fiber optic sensor network. Struct. Health Monit.* 2015, 14, 46–56.



Leica Geosystems introduces 3D machine control solution for compact excavators and backhoes with swing boom

The Leica iCON iXE3 3D excavator machine control solutions will be available for smaller excavators with swing boom, providing an easy-to-use solution on one unified software and hardware platform.

(Heerbrugg, Switzerland, 2021) Leica Geosystems, part of Hexagon, today announced to extend the Leica MCI one-for-all software platform by offering its 3D machine control solution for compact excavators and backhoes with swing boom.

Contractors rely on efficient workflows for applications such as trenching for footings, grading ditches or digging out basements. As such, demand for technology-enabled compact equipment is rapidly growing. Whenever applications require a consistent grade and sustained slope, 3D machine control solutions from Leica Geosystems excel on the job.

Leveraging the Leica MCI – a unified

platform for software and hardware – means compact equipment benefits from flexible dataflows, easy-to-use interfaces and increased productivity so operators can focus on the job. Operators also have the flexibility to use the MCI's portable control panel across multiple machines and benefit from the cloud-based collaboration platform Leica ConX, to share and report as-built documentation with office and field stakeholders.

LEICA GEOSYSTEMS

Contact us

Communications Team

Leica Geosystems AG

CH-9435 Heerbrugg

Switzerland

media@leica-geosystems.com

Fig 1 - Exemplo típico de ampliação de uma infraestrutura ferroviária. Embora a nova plataforma seja construída externamente à via existente, o aumento das tensões no solo de fundação pode provocar interação entre os bulbos de tensões das duas estruturas. Esse mecanismo, conhecido como recalque de conexão, explica por que recalques podem ocorrer mesmo sem intervenção direta sob a ferrovia existente, constituindo um dos principais desafios geotécnicos em obras de duplicação ferroviária.

O SOLO TEM MEMÓRIA. A DUPLICAÇÃO MUDA A TRAJETÓRIA DE TENSÕES E REATIVA O MACIÇO CONSOLIDADO. O ATERRO ANTIGO RESPONDE.



Fig 2 - O recalque de conexão.

ANÁLISE

Eng.^a Patricia Tinoco

Ampliar ferrovias existentes, é um dos maiores desafios geotécnicos enfrentados atualmente por projetistas e construtores. Na maioria dos casos, a necessidade de aumentar a capacidade ferroviária exige a construção de novas linhas adjacentes a aterros já consolidados e em operação há décadas. Embora a solução apresente vantagens econômicas e operacionais evidentes, introduz um fenômeno geotécnico complexo, frequentemente subestimado que é a interação entre o recalque induzido pelo novo carregamento e o recalque existente no antigo

aterro. O estudo, desenvolvido por pesquisadores do Korea Railroad Research Institute, demonstra que a simples ampliação lateral de um aterro, não produz apenas deformações na nova plataforma construída mas, também, gera processo de transferência de tensões, capaz de provocar recalque de conexão na estrutura original. Quando um novo aterro é executado ao lado de uma estrutura existente, o peso adicional aplicado ao terreno, provoca aumento das tensões verticais no subleito. Parte dessas tensões é absorvida pelo solo de fundação, sob a nova plataforma, originando o recalque natural, associado ao adensamento e

à deformação do terreno. Entretanto, outra parcela das tensões propaga-se lateralmente, através do maciço de fundação, atingindo a região localizada sob o aterro existente. Como consequência, uma zona do terreno que já havia passado por um longo processo de consolidação, volta a ser solicitada, desenvolvendo deformações adicionais. Surge então uma combinação de dois mecanismos distintos de recalque, o provocado pela ampliação e o induzido, na estrutura antiga, pela redistribuição das tensões. Este comportamento é particularmente importante em obras ferroviárias, onde pequenas deformações diferenciais podem



comprometer o alinhamento geométrico da via permanente, afetando a segurança operacional. Contudo, o mesmo fenômeno ocorre em ampliações rodoviárias, especialmente em regiões com solo mole, onde a construção de novas pistas, ao lado de plataformas existentes, desencadeia deslocamentos horizontais e verticais capazes de produzir trincas longitudinais no pavimento, degraus entre faixas de rolamento e recalques diferenciais ao longo da interface entre o aterro antigo e o novo. Do ponto de vista mecânico, o processo pode ser interpretado como uma sobreposição de trajetórias de tensões. Inicialmente, o solo sob o aterro existente encontra-se em equilíbrio, após anos de consolidação. A introdução de um novo carregamento lateral, modifica o campo de tensões originalmente estabilizado deslocando, novamente, o estado tensional do terreno, produzindo deformações adicionais não apenas

na região imediatamente carregada mas, também, em volumes de solo localizados sob a estrutura antiga. Quanto maior a espessura da camada compressível e quanto mais próximo estiver o novo aterro da plataforma existente, maior tende a ser a magnitude desse recalque induzido. Outro aspecto relevante, destacado pelo estudo coreano, é que a maior

parte deste recalque de conexão, ocorre durante a fase de construção da ampliação e no período inicial da estabilização do aterro, significando que os deslocamentos mais significativos tendem a ocorrer logo após a execução do aterro e durante o processo de dissipação das pressões neutras, geradas pelo novo carregamento. Após essa fase inicial, ob-

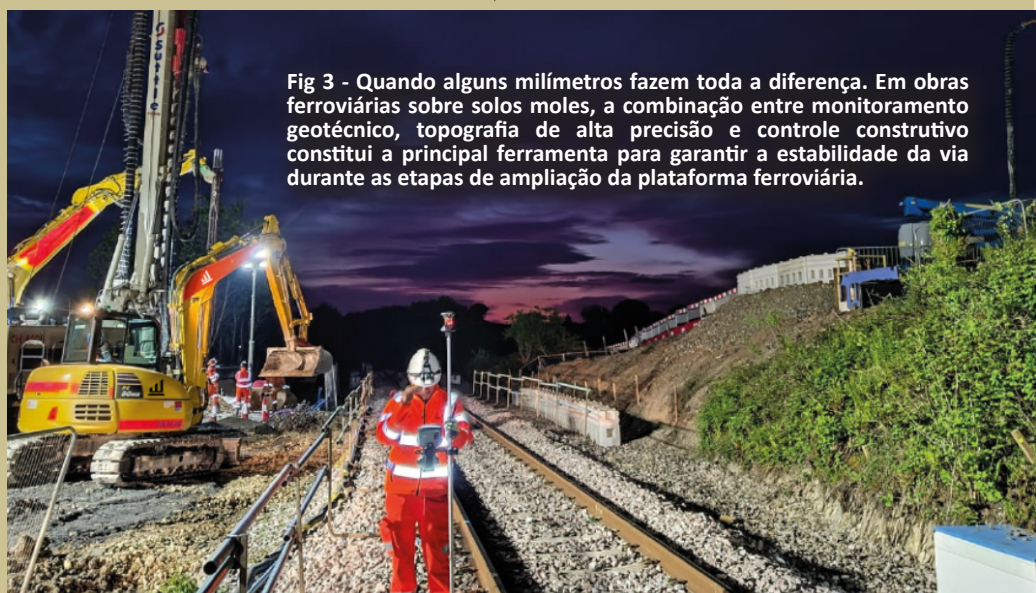


Fig 3 - Quando alguns milímetros fazem toda a diferença. Em obras ferroviárias sobre solos moles, a combinação entre monitoramento geotécnico, topografia de alta precisão e controle construtivo constitui a principal ferramenta para garantir a estabilidade da via durante as etapas de ampliação da plataforma ferroviária.

serva-se tendência de estabilização relativamente rápida, desde que o terreno apresente condições adequadas de drenagem e capacidade suporte. Em ampliações rodoviárias modernas, especialmente em corredores logísticos e concessões rodoviárias, este fenômeno assume importância crescente. Muitas rodovias brasileiras foram, originalmente, implantadas sobre solos moles e hoje necessitam de duplicações, terceiras faixas ou ampliação de acostamentos. Nesta situação, o simples lançamento de aterro, ao lado da plataforma existente, costuma resultar em deslocamentos incompatíveis com os critérios de desempenho exigidos atualmente. O problema torna-se ainda mais crítico quando existem estruturas sensíveis próximas, como muros de terra armada, obras de contenção, pontes, viadutos ou sistemas de drenagem enterrados. A compreensão da conjugação, entre o recalque natural e o de conexão, conduz à necessidade de soluções de melhoramento do solo, capazes de atuar simultaneamente na nova plataforma e na estrutura existente. Técnicas alternativas como geodrenos, colunas de brita, inclusões rígidas e aterros estacoados podem ser empregadas para

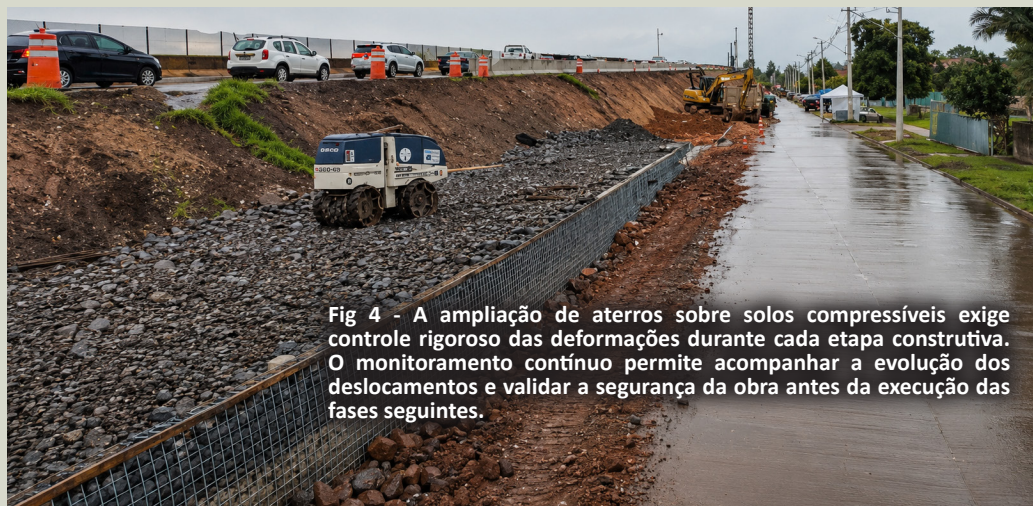


Fig 4 - A ampliação de aterros sobre solos compressíveis exige controle rigoroso das deformações durante cada etapa construtiva. O monitoramento contínuo permite acompanhar a evolução dos deslocamentos e validar a segurança da obra antes da execução das fases seguintes.

reduzir ou atenuar estes recalques. O melhoramento efetivo do solo, com CPR Grouting (Consolidação Profunda Radial), promove o aumento da rigidez do maciço através da expansão radial controlada do solo produzindo, simultaneamente, seu adensamento, o incremento da resistência ao cisalhamento e elevação do módulo de deformabilidade. Ao aumentar a rigidez da fundação reduz-se, não apenas o recalque sob a ampliação mas, também, a propagação das tensões para a região sob o aterro existente, minimizando o desenvolvimento do recalque de conexão. A experiência internacional demonstra que a ampliação de rodovias e ferrovias não deve ser analisada, apenas,

sob a ótica da estabilidade global do aterro ou da capacidade suporte do terreno. É fundamental compreender, que a construção de uma nova plataforma, modifica todo o estado tensional do sistema solo-aterramento, reativando deformações em estruturas consideradas estabilizadas há muitos anos. Desta forma, o sucesso de uma obra de ampliação depende da correta avaliação da interação entre o novo recalque natural e o induzido do antigo aterro, permitindo que soluções geotécnicas sejam dimensionadas não apenas para suportar novas cargas mas, também, preservar a integridade e a funcionalidade de estruturas existentes ao longo da vida útil do empreendimento.

Os melhores empreendimentos raramente escolhem os melhores terrenos.


Quando a localização é indispensável, o solo não pode ser uma limitação.

O CPR Grouting transforma terrenos problemáticos em ativos estratégicos para implantação de empreendimentos logísticos, industriais, portuários e rodoviários.

CONSOLIDA. VIABILIZA. TRANSFORMA.



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

 www.engegraut.com.br

Uma nova visão sobre *solos moles.*

O livro que está redefinindo
o entendimento do melhoramento
de solos no Brasil.

CONHECIMENTO
QUE TRANSFORMA
O FUTURO DE OBRAS
GEOTÉCNICAS.



SOLICITE AGORA



MELHORAMENTO DO SOLO MOLE E O GEOENRIJECIMENTO

Joaquim Rodrigues



JOAQUIM RODRIGUES
ENGENHEIRO GEOTÉCNICO



TÉCNICA, EXPERIÊNCIA
E INOVAÇÃO
A SERVIÇO DA GEOTECNIA.

A ampliação de aterros ferroviários e rodoviários sobre solos compressíveis, apresenta desafio adicional que, na maioria das vezes, não recebe a devida atenção durante a fase do projeto, ou seja, o fenômeno do recalque de conexão. Conforme ilustrado, na Figura 2, a execução de um novo aterro, ao lado de uma estrutura existente, provoca redistribuição de tensões no subsolo, significando que o peso próprio do novo maciço gera acréscimos de tensões verticais e horizontais, que não se limitam à sua área de implantação influenciando, também, o terreno sob o aterro já consolidado. Como consequência, surgem deformações diferenciais na interface entre as duas estruturas, normalmente comprometendo a geometria da plataforma e o desempenho operacional da via. Buscando minimizar esses efeitos, surgiram sistemas de reforço capazes de ampliar plataformas, sem exigir grandes áreas adicionais de desapropriação. Uma das soluções é o sistema de reforço do subleito de rodovias, RSR, conforme figura 5 a seguir. O método consiste na construção de um maciço, reforçado com geogrelha associada a malhas de barras soldadas, formando uma estrutura capaz de controlar deformações e aumentar a estabilidade global do aterro. Diferentemente dos sistemas convencionais de contenção, o RSR permite que o aterro passe inicialmente por um período de estabilização, durante o qual ocorrem os principais deslocamentos do maciço. Somente após a convergência dessas deformações é executada a face rígida da contenção, integrando-se ao conjunto reforçado, o que reduz significativamente os esforços induzidos na estrutura frontal e melhora o desempenho em serviço. O emprego de geogrelhas curtas, normalmente com comprimento equivalente a cerca de 35% da altura do

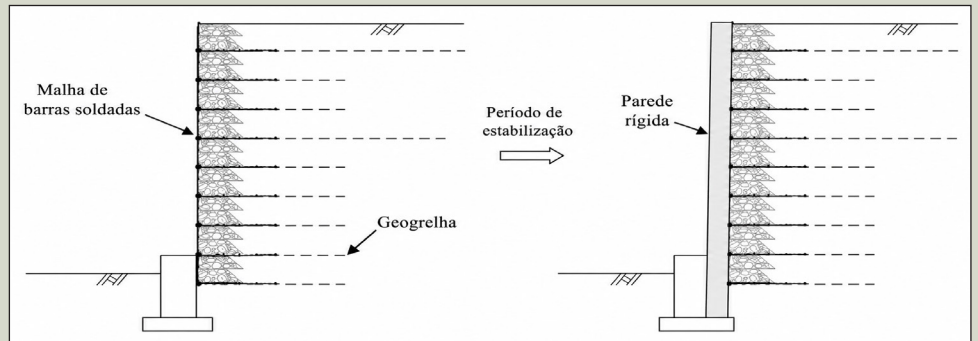


Figura 5. Esquema conceitual do RSR.

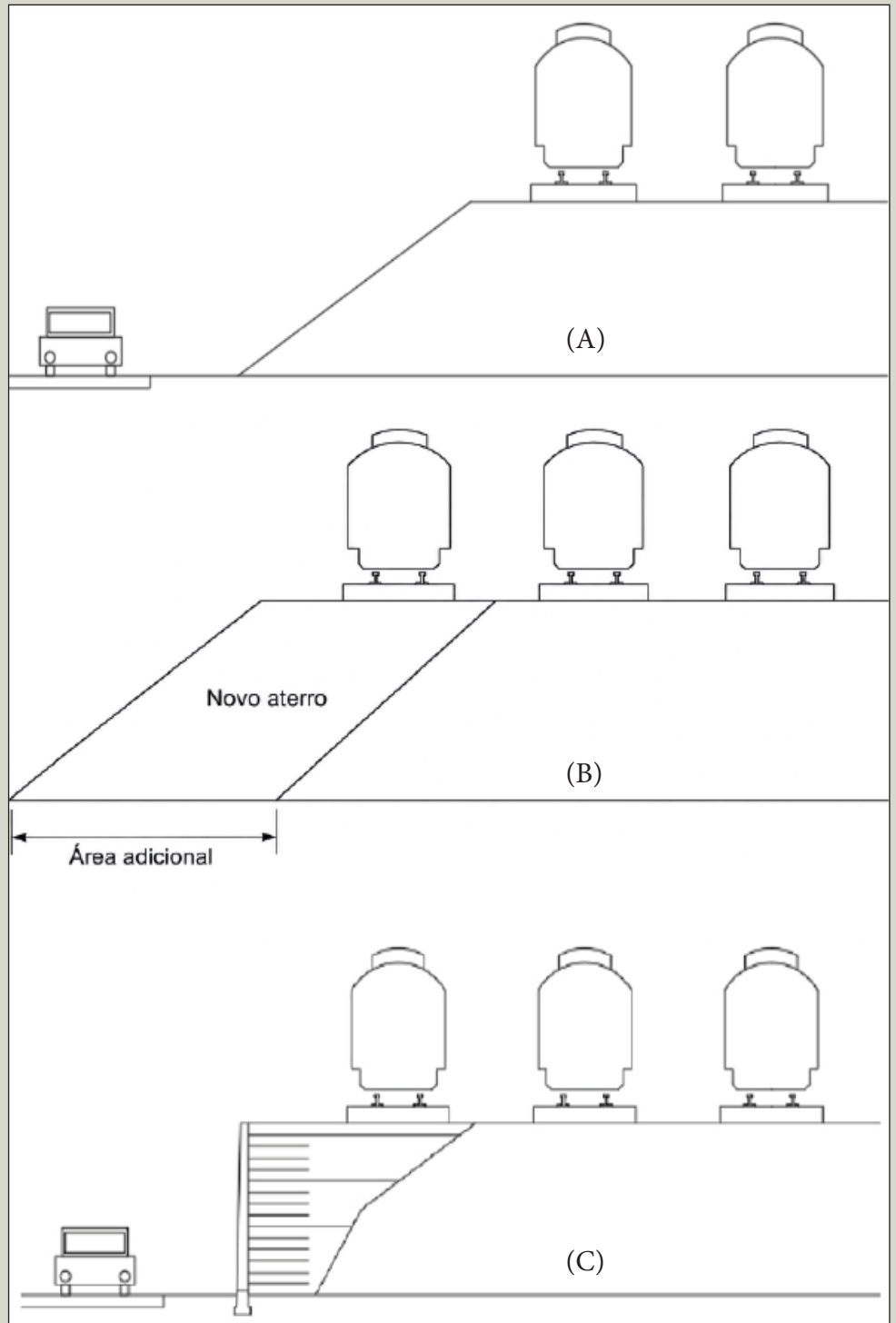


Figura 6. Diferenças na ampliação do aterro conforme o método empregado: (a) Aterro ferroviário; (b) Ampliação com aterro padrão; (c) Ampliação com RSR.



Fig 7 - Melhoramento do solo de fundação com CPR Grouting, necessário a uma duplicação. Monitoramento da pressão de bombeamento.

aterro, permite ainda uma solução compacta e economicamente interessante para locais onde existe limitação de espaço lateral. A Figura 6 (A, B e C) apresenta uma aplicação típica do conceito, demonstrando a ampliação de uma plataforma ferroviária existente, por meio de um aterro reforçado lateralmente. Sua principal vantagem é possibilitar ao ampliação da infraestrutura sem a necessidade de extensas intervenções na faixa de domínio, reduzindo volumes de aterro, custos de desapropriação e impactos ambientais. Além disso, o sistema contribui para o controle do recalque diferencial entre a plataforma antiga e a nova estrutura, fundamental para garantir a segurança e a durabilidade da ferrovia. Quando a ampliação é executada sobre solo mole, entretanto, o controle do recalque continua sendo um fator decisivo para o sucesso da obra. Neste caso, o melhoramento do terreno, com CPR Grouting (Consolidação Profunda Radial), atua de forma complementar ao sistema RSR, promovendo aumento da resistência e da rigidez do solo de fundação, reduzindo deformações e acelerando a estabilização do maciço. A combinação entre reforço estrutural do aterro e melhoramento geotécnico da fundação representa tendência moderna para obras de ampliação ferroviária e rodoviária em áreas de elevada compressibilidade.

Ampliação do aterro com o RSR

Para a aplicação do RSR, na ampliação de aterros ferroviários existentes, destacando-se uma situação muito semelhante ao problema clássico das ampliações rodoviárias e ferroviárias, a nova estrutura precisa ser construída lateralmente a um aterro antigo, já consolidado, sem disponibilidade de faixa adicional e sem interromper a operação da linha principal. O ponto central é que o aterro existente de bases fer-

roviárias operam há muitos anos e, portanto, apresentam um estado de deformação e consolidação muito diferente daquele da nova ampliação. Ao executar a ampliação, com RSR, cria-se uma estrutura reforçada lateralmente, tipicamente, com cerca de 7,5 m de altura e 40 m de extensão, permitindo alargar o aterro entre 10 e 12 m, viabilizando a obra em uma condição confinada, junto à ferrovia existente e à via lateral. O perfil geotécnico típico é uma fundação relativamente heterogênea, com uma camada superficial de aterro e areia siltosa muito fofa a fofa, seguida por argila siltosa mole a média, depois cascalho arenoso mais resistente e, em maior profundidade, solo residual mais competente. Esta estratigrafia é importante, porque indica que o recalque não depende apenas da carga nova mas, também, da diferença de rigidez entre o aterro antigo, a nova ampliação e o solo de fundação.

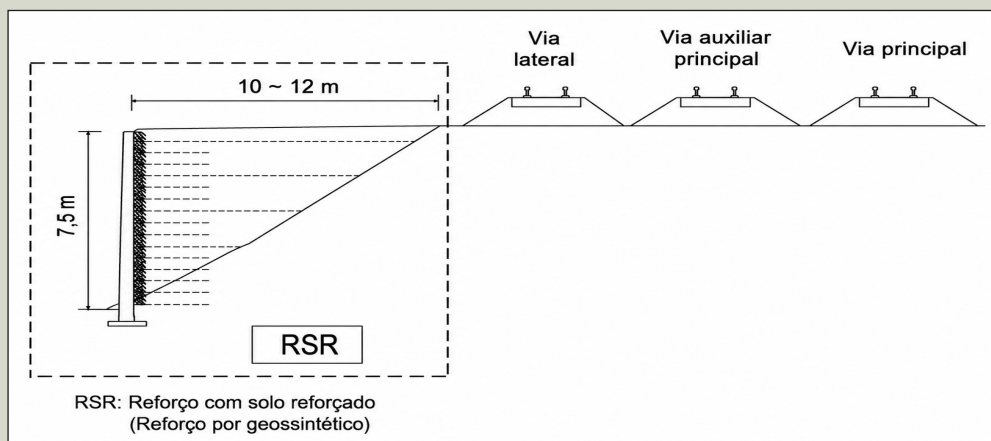


Figura 8. Vista em seção na aplicação do RSR.

O que acontece sob a superfície define o sucesso da obra.

O Perfilômetro fornece medições precisas de recalques e deslocamentos em aterros, barragens, reservatórios, rodovias e fundações, permitindo decisões mais seguras ao longo de toda a vida útil da obra.

MONITORAR HOJE.
DECIDIR MELHOR. CONSTRUIR O FUTURO.

PRECISÃO

INTELIGÊNCIA

SEGURANÇA

Soft Soil Group

Conheça nossas soluções de monitoramento geotécnico.
www.softsoilgroup.com.br

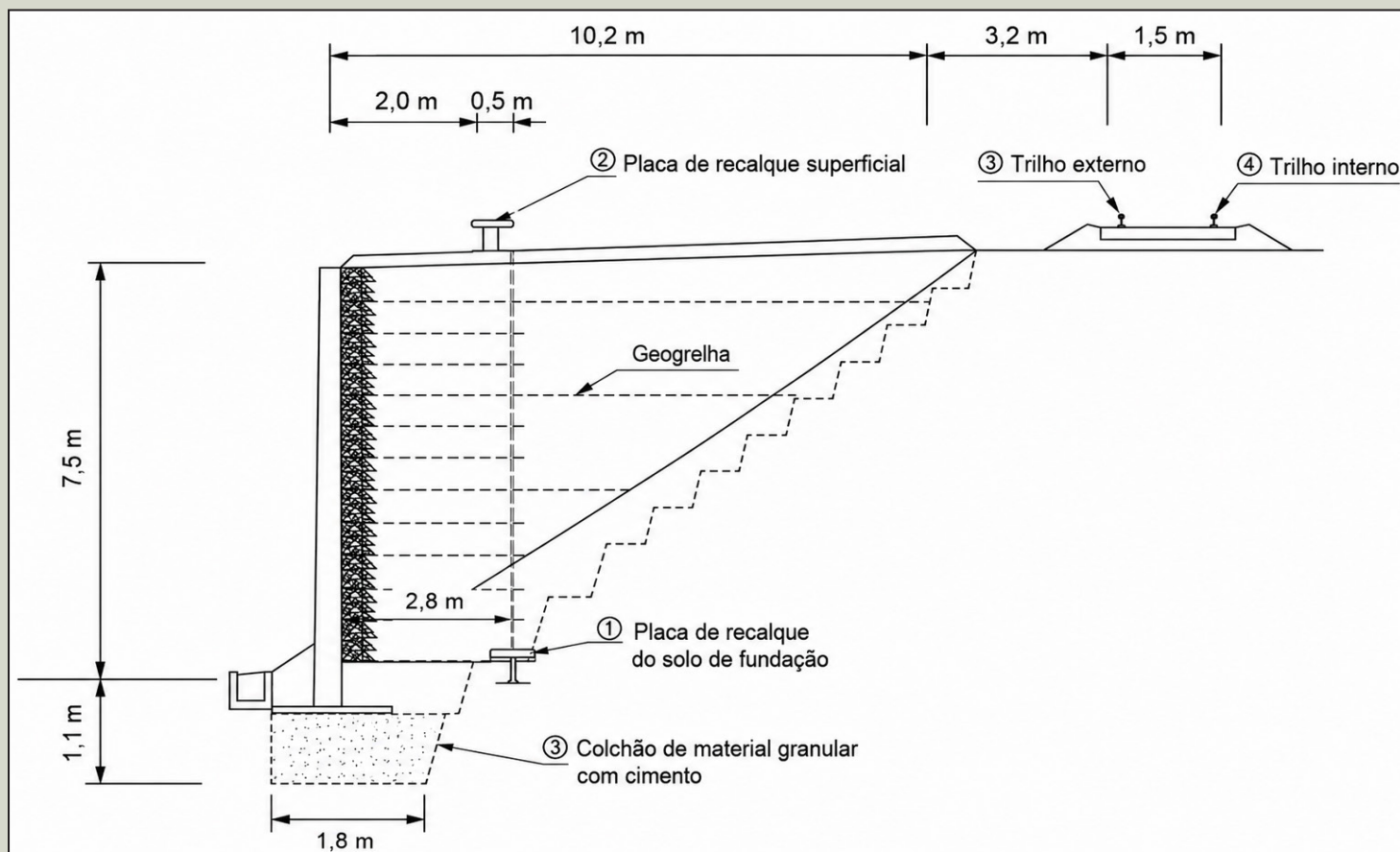


Figura 9. Seção da estrutura RSR e o ponto de medição.

Profundidade (m)	Espessura (m)	Descrição das camadas	NSPT
0-1,80	1,8	Camada de aterro Camada de solo muito mole	3/30 - 7/30
1,80-3,50	1,7	Camada sedimentar Argila siltosa mole à média	5/30 - 8/30
3,50-5,70	2,2	Camada sedimentar Areia fina média a rija	21/30 - 31/30
5,70-23,50	17,8	Areia fofa a rígida	14/30 - 50/30

Tabela 1 - Condição do solo.

A interpretação mais relevante é que o recalque de conexão não representa apenas um recalque vertical simples e, sim, correspondente ao encaixe deformacional entre dois corpos com histórias geotécnicas diferentes, quer dizer, o aterro antigo, já estabilizado, e o novo, ainda sujeito a deformações. Quando a ampliação é rigidamente associada à estrutura existente, o novo maciço tende a recalcar e mobilizar

deslocamentos que afetam a borda do aterro antigo, gerando deformações diferenciais, rotação local e esforços adicionais na zona de contato. Fica claro, portanto, que em ampliações de infraestrutura linear, o projeto não deve tratar o aterro novo como uma obra isolada. A segurança depende da compatibilização entre o solo melhorado, o aterro existente, a faixa de transição e o comportamento de longo prazo. É



Figura 10. Detalhes construtivos do RSR.

exatamente nessa interface que surgem os recalques diferenciais mais críticos.

SOLO MOLE NO SEU PROJETO?

NÃO ESCOLHA TÉCNICAS
ALTERNATIVAS OU
ADAPTADAS PARA
SOLOS MOLES.



FAÇA
**MELHORAMENTO
DO SOLO**

MELHORAMENTO DE SOLOS MOLES É
CPR GROUTING

* 100% TEORIA DA CONSOLIDAÇÃO



TECNOLOGIA PATENTEADA
UTILIZADA EM TODO BRASIL HÁ
MAIS DE 30 ANOS.



MAIS SEGURANÇA
PARA O SEU PROJETO



DESEMPENHO GEOTÉCNICO
SUPERIOR E DURADOURO



VISITE NOSSO SITE:
WWW.ENGEGRAUT.COM.BR



facebook.com/engegraut



[@engegraut](https://www.instagram.com/engegraut)



www.engegraut.com.br

Analizando o RSR

Esta análise é interessante porque quantifica aquilo que apresentou-se anteriormente, ou seja, a ampliação ferroviária produz dois recalques distintos e simultâneos, o recalque natural da fundação e o recalque de conexão, nos trilhos existentes. As figuras 11 e 12 mostram a avaliação do recalque. As medições foram realizadas tanto no terreno de fundação, quanto na superfície do aterro ampliado e nos trilhos da via existente, ou seja, ao longo de uma mesma vertical, instalou-se placas de recalque, medindo simultaneamente o recalque no solo de fundação, no aterro e na base/ trilhos. Observa-se que os maiores recalques ocorreram exatamente nas regiões submetidas diretamente ao peso da nova ampliação. O solo de fundação sofreu cerca de 32,5 mm de recalque, enquanto que o aterro teve sua parcela de recalque que, somado com a do solo de fundação deu 58,5 mm. Essa diferença evidencia o comportamento deformacional típico

de aterros sobre solos compressíveis, onde a deformação acumulada na estrutura do aterro soma-se ao recalque do solo de fundação. Entretanto, o aspecto mais relevante para a operação ferroviária foi o comportamento dos trilhos existentes. O recalque de conexão medido nos trilhos é significativamente menor, variando entre aproximadamente 6,9 mm e 9,5 mm. Mesmo sendo inferior ao recalque global da fundação, esses deslocamentos são extremamente importantes porque afetam diretamente a geometria da via férrea e, conseqüentemente, a segurança operacional. Observou-se que o maior recalque ocorreu na região situada próxima ao centro de gravidade da ampliação, aproximadamente a 20 metros do ponto de referência adotado, onde a influência da nova carga foi mais intensa, produzindo deslocamentos verticais superiores aos observados nas extremidades do trecho monitorado. Um aspecto particularmente interessante é que o recalque do trilho corresponde apenas a cerca de 15% a 28% do medido no terreno natu-

ral e entre 9% e 16% do recalque observado na superfície do aterro, demonstrando que parte significativa das deformações, geradas pela ampliação, foi absorvida pelo próprio sistema aterro-fundação antes de atingir a estrutura ferroviária existente. Mesmo assim, destaca-se que a magnitude desse recalque permanece inferior a 10 mm, valor compatível com o limite de manutenção adotado por ferrovias. Em outras palavras, embora a ampliação tenha provocado deformações mensuráveis, a estabilidade operacional da via existente foi preservada.

Relação com ampliações rodoviárias

Para a ampliação de rodovias, o fenômeno é praticamente o mesmo. O novo aterro gera sobrecarga lateral que induz deformações no maciço existente. A diferença é que, enquanto na ferrovia o efeito aparece como alteração da geometria dos trilhos, na rodovia manifesta-se sob a forma de:

- recalque diferencial entre pista antiga e a nova;
- surgimento de degraus longitudinais;
- trincas de reflexão no pavimento;
- deformações no acostamento;
- deslocamentos em muros de terra armada e contenções.

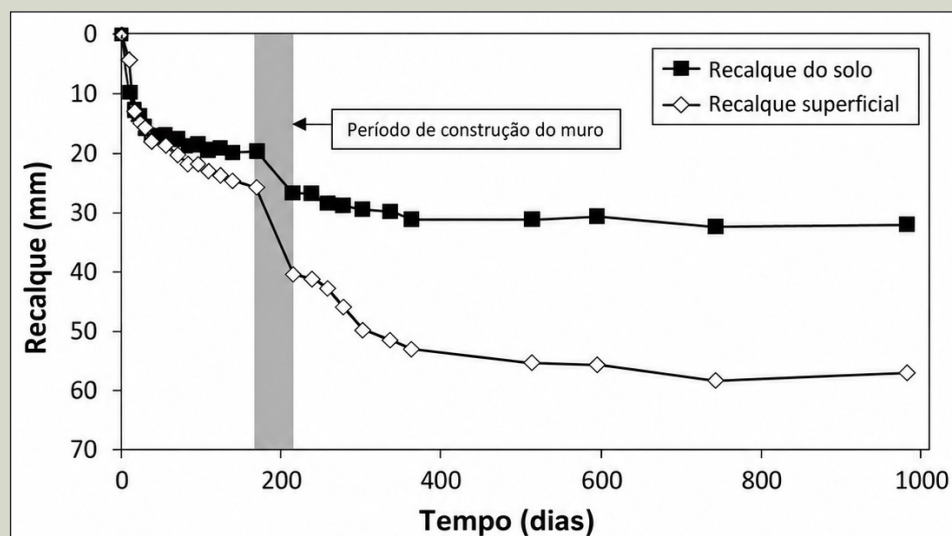


Figura 11 – Recalques da fundação e da superfície. Grande parte do recalque ocorreu nos primeiros 300 dias. Durante o período de construção do muro de contenção ocorre uma aceleração das deformações. Após aproximadamente 400 dias, o recalque tende à estabilização. O recalque no topo do aterro é quase o dobro do medido no solo de fundação.

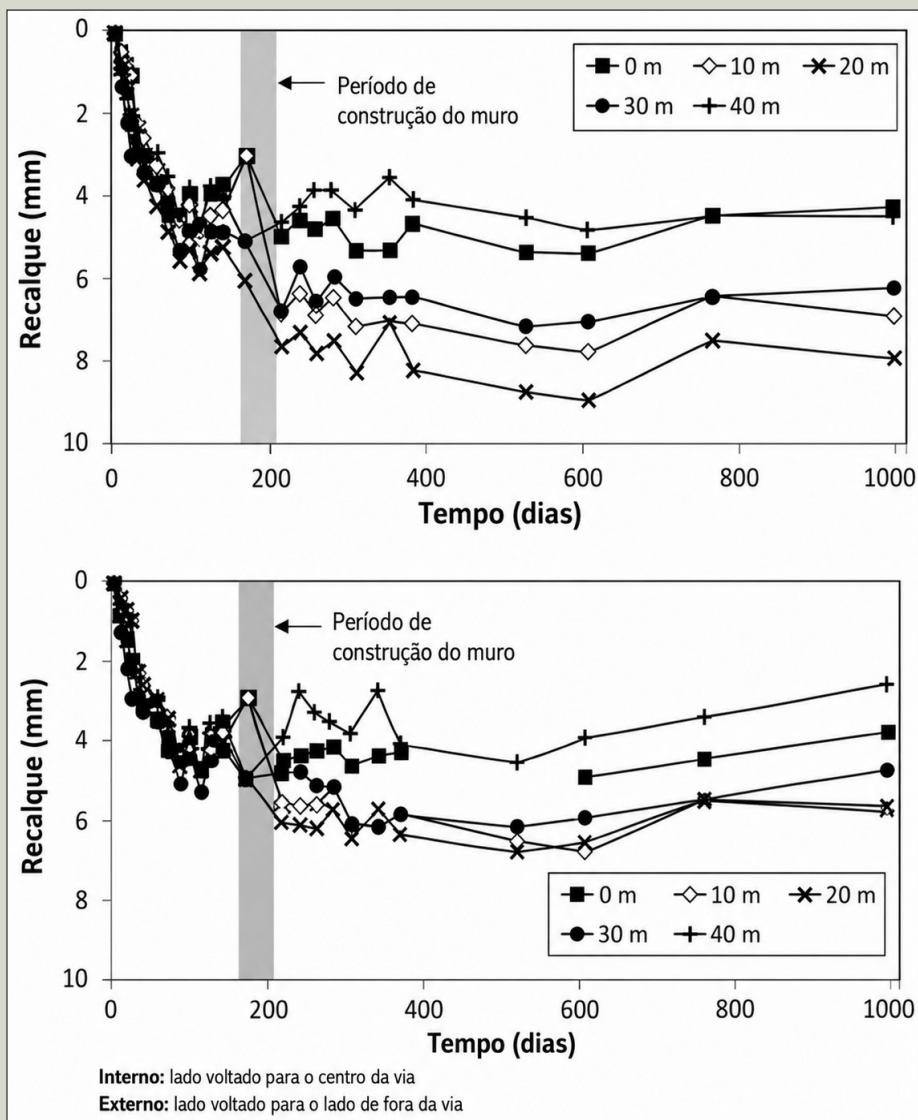


Figura 12. Recalques do terreno e da superfície: (a) Trilho externo; (b) Trilho interno. O maior recalque concentra-se na região central da ampliação (20 m). As posições de 0 m e 40 m apresentam os menores deslocamentos. Após o término da construção, o recalque continua evoluindo lentamente até atingir estabilidade. Todos os valores permanecem abaixo de aproximadamente 10 mm.

É justamente nesse ponto que a técnica do melhoramento do solo, o CPR Grouting (Consolidação Profunda Radial), atua preventivamente. Ao aumentar a rigidez da fundação e reduzir a compressibilidade do solo mole, antes da execução da ampliação, diminui-se a transferência de deformações para a plataforma existente, reduzindo significativamente o recalque de conexão entre as duas estruturas. Essa conclusão reforça a ideia central de que o problema principal, em ampliações, não é apenas o recalque total da nova obra mas, sim, o di-

ferencial induzido na estrutura original. É esse mecanismo que determina o desempenho de longo prazo de ferrovias, rodovias e aterros de ampliação executados sobre solos compressíveis.

REFERÊNCIAS

- Patricia Karina Tinoco é engenheira geotécnica. Trabalha com melhoramento de solos moles.
- Yang, L.; Xu, W.; Li, K. Analysis of influencing factors on settlement of widened subgrade based on differences in working conditions. *Int. J. Comput. Methods Exp. Meas.* 2022, 10, 117–130. [CrossRef]
- Miao, L.; Wang, F.; Han, J.; Lv, W. Benefits of geosynthetic reinforcement in widening of embankments subjected to foundation differential settlement. *Geosynth. Int.* 2014, 21, 321–332.
- Weng, X.; Zhu, H.H.; Chen, J.; Liang, D.; Shi, B.; Zhang, C.C. Experimental investigation of pavement behavior after embankment widening using a fiber optic sensor network. *Struct. Health Monit.* 2015, 14, 46–56.
- Dae Sang Kim, Ungjin Kim * and Young Kon Park. Interlocking Settlement Induced by Widening Subgrade of Railway Line
- Suzuki, M.; Koyama, A.; Kochi, Y.; Urabe, T. Interface shear strength between geosynthetic clay liner and covering soil on the embankment of an irrigation pond and stability evaluation of its widened sections. *Soils Found.* 2017, 57, 301–314.
- El Kamash, W.; Han, J.; Asce, F. Displacements of column-supported embankments over soft clay after widening considering soil consolidation and column layout: Numerical analysis. *Soils Found.* 2014, 54, 1054–1069.
- Özer, A.T. Laboratory study on the use of EPS-block geofilm for embankment widening. *Geosynth. Int.* 2016, 23, 71–85.
- Shi, X.; Huang, J.; Su, Q. Experimental and numerical analyses of lightweight foamed concrete as filler for widening embankment.
- *Constr. Build. Mater.* 2020, 250, 118897.
- Zhao, M.; Liu, C.; El-Korchi, T.; Song, H.; Tao, M. Performance of geogrid-reinforced and PTC pile-supported embankment in a highway widening project over soft soils. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 2019, 145, 06019014.

O PROBLEMA NÃO É A RESISTÊNCIA.
O PROBLEMA É A DEFORMABILIDADE.

O solo não precisa ser substituído.
Ele pode ser transformado.

O melhoramento do solo reduz deformações, aumenta a rigidez e viabiliza empreendimentos onde antes existiam limitações geotécnicas.

SOLO MOLE
INSTÁVEL E DEFORMÁVEL

SOLO MELHORADO
ESTÁVEL E CONFIÁVEL

CONHEÇA AS SOLUÇÕES
DE MELHORAMENTO DE SOLOS.

Soft Soil Group

Saiba mais em
www.softsoilbrazilianreview.com.br



iBSM

INSTITUTO
BRASILEIRO
DO SOLO MOLE

Instituto Brasileiro do Solo Mole

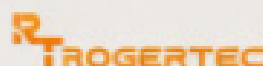
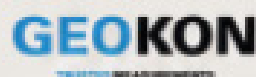
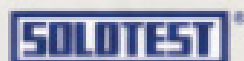
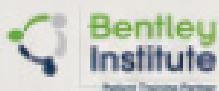
CONHECIMENTO GEOTÉCNICO

APLICADO AOS DESAFIOS DO SOLO MOLE

O Instituto Brasileiro do Solo Mole reúne conhecimento técnico, experiência prática e inovação para apoiar profissionais e empresas na compreensão e solução dos desafios geotécnicos associados aos solos moles.



PARCEIROS



www.ibsm.org.br