

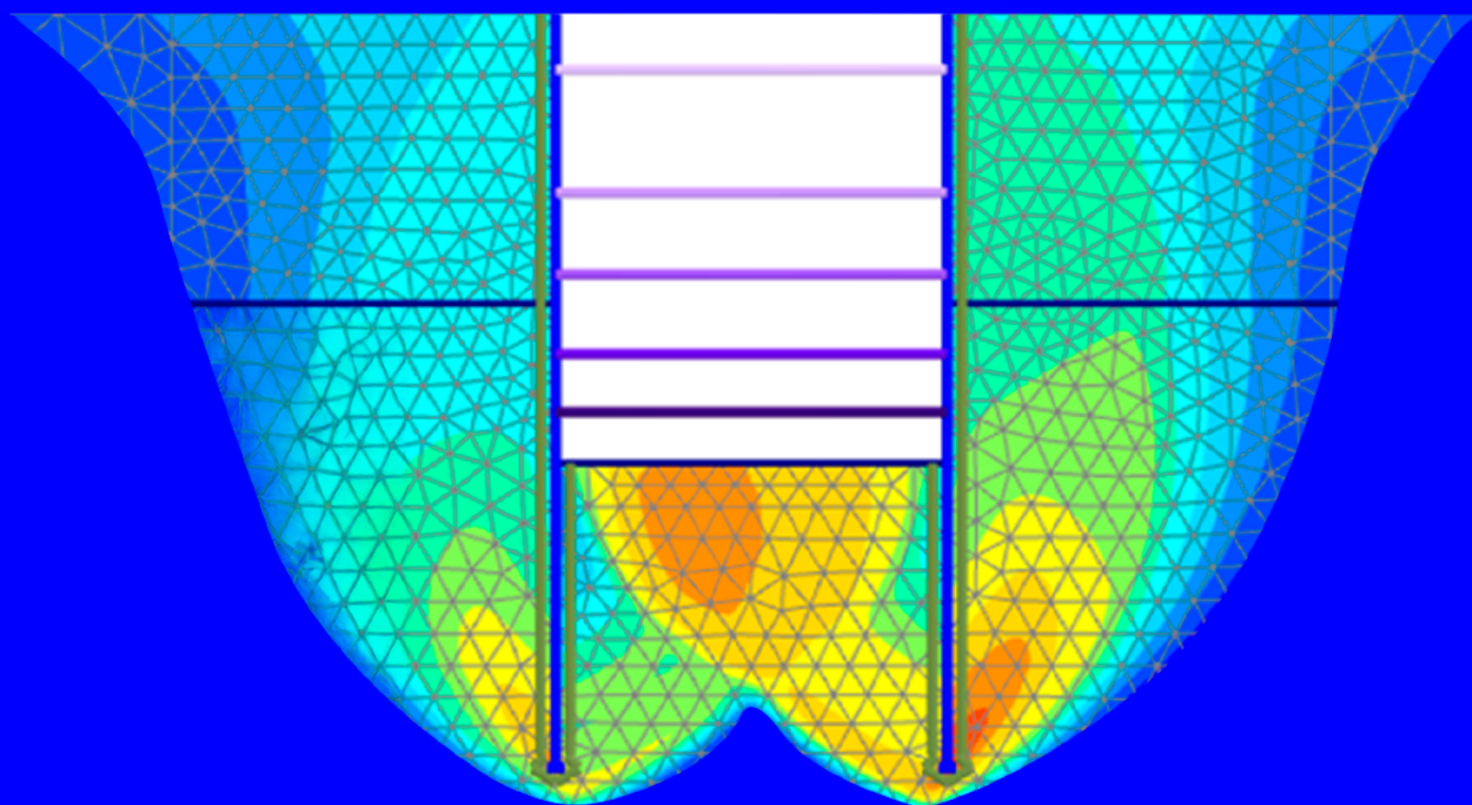
Soft Soil Brazilian Review

SOFT SOIL
SCIENCE

IBSM

EDIÇÃO AMÉRICA LATINA
MARÇO - ABRIL - 2026

- 03** Escavação profunda em solo mole. Como evitar o processo deformativo e vazamentos no sistema de contenção.
Eng. M.Sc. Joaquim Rodrigues
- 24** Poropressão e recalque na escavação profunda em solo mole.
Eng.ª Patrícia Tinoco
- 32 - Consulta**
Gostaria de saber mais sobre o melhoramento do solo, com CPR Grouting, em obras de escavação profunda, quando há presença de solos moles, comparando-o com o sistema tradicional com contenções diversas.
- 38** Escavação em solo mole. O risco não está na rutura e, sim, na deformação.
Eng. Roger Kim



Escavação em solo mole.

Como evitar o processo deformativo e vazamentos no sistema de contenção.

46



Nº 46

IBSM INSTITUTO
BRASILEIRO
DO SOLO MOLE

NESTA EDIÇÃO

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

3 ESCAVAÇÃO PROFUNDA EM SOLO MOLE. COMO EVITAR O PROCESSO DEFORMATIVO E VAZAMENTOS NO SISTEMA DE CONTENÇÃO.

24 POROPRESSÃO E RECALQUE NA ESCAVAÇÃO PROFUNDA EM SOLO MOLE.

32 - CONSULTA

GOSTARIA DE SABER MAIS SOBRE O MELHORAMENTO DO SOLO, COM CPR GROUTING, EM OBRAS DE ESCAVAÇÃO PROFUNDA, QUANDO HÁ PRESENÇA DE SOLOS MOLES, COMPARANDO-O COM O SISTEMA TRADICIONAL COM CONTENÇÕES DIVERSAS.

38 ESCAVAÇÃO EM SOLO MOLE. O RISCO NÃO É NA RUTURA E, SIM, NA DEFORMAÇÃO.

EDITORIAL

Escavações profundas, em solos moles, continuam sendo um dos maiores desafios da engenharia geotécnica contemporânea. Não pela ruptura imediata, mas pelo comportamento progressivo do maciço, com a redistribuição das tensões, redução da poropressão, a variação do estado de tensões laterais e o desenvolvimento do recalque induzido. Estudos apresentados nesta edição reforçam um ponto essencial, o solo mole não falha de forma súbita e, sim, deforma-se, reorganiza-se e evolui ao longo do tempo. A investigação sobre escavações em argilas altamente sensíveis, demonstra que a geometria da escavação altera profundamente o campo de deformações e o mecanismo de distúrbio do solo. Não se trata apenas da estabilidade global, mas da resposta incremental do maciço frente à mudança do estado de tensões. Da mesma forma a análise da redução da poropressão, em escavações profundas, evidencia

que o rebaixamento induzido e a dissipação da poropressão podem gerar recalques significativos fora da área escavada, afetando estruturas vizinhas. O fenômeno é muitas vezes invisível no início, mas determinante no desempenho da obra. Ao trazer estes estudos para o contexto das obras brasileiras, reforçamos a necessidade de uma abordagem que vai além do fator de segurança convencional. Parâmetros como OCR, K_0 , rigidez inicial e evolução da resistência ao cisalhamento passam a ser centrais na análise. Monitoramento geotécnico, modelagem numérica consistente e estratégias de controle da deformabilidade deixam de ser complementos e passam a ser parte do núcleo do projeto. Esta edição convida o leitor a refletir sobre o princípio fundamental de que em solos moles, estabilidade não é apenas evitar a ruptura, é controlar a deformação.

Boa leitura.

SEÇÕES



Um guia prático para quem realmente precisa transformar o solo.

ESCAVAÇÃO PROFUNDA EM SOLO MOLE. COMO EVITAR O PROCESSO DEFORMATIVO E VAZAMENTOS NO SISTEMA DE CONTENÇÃO.

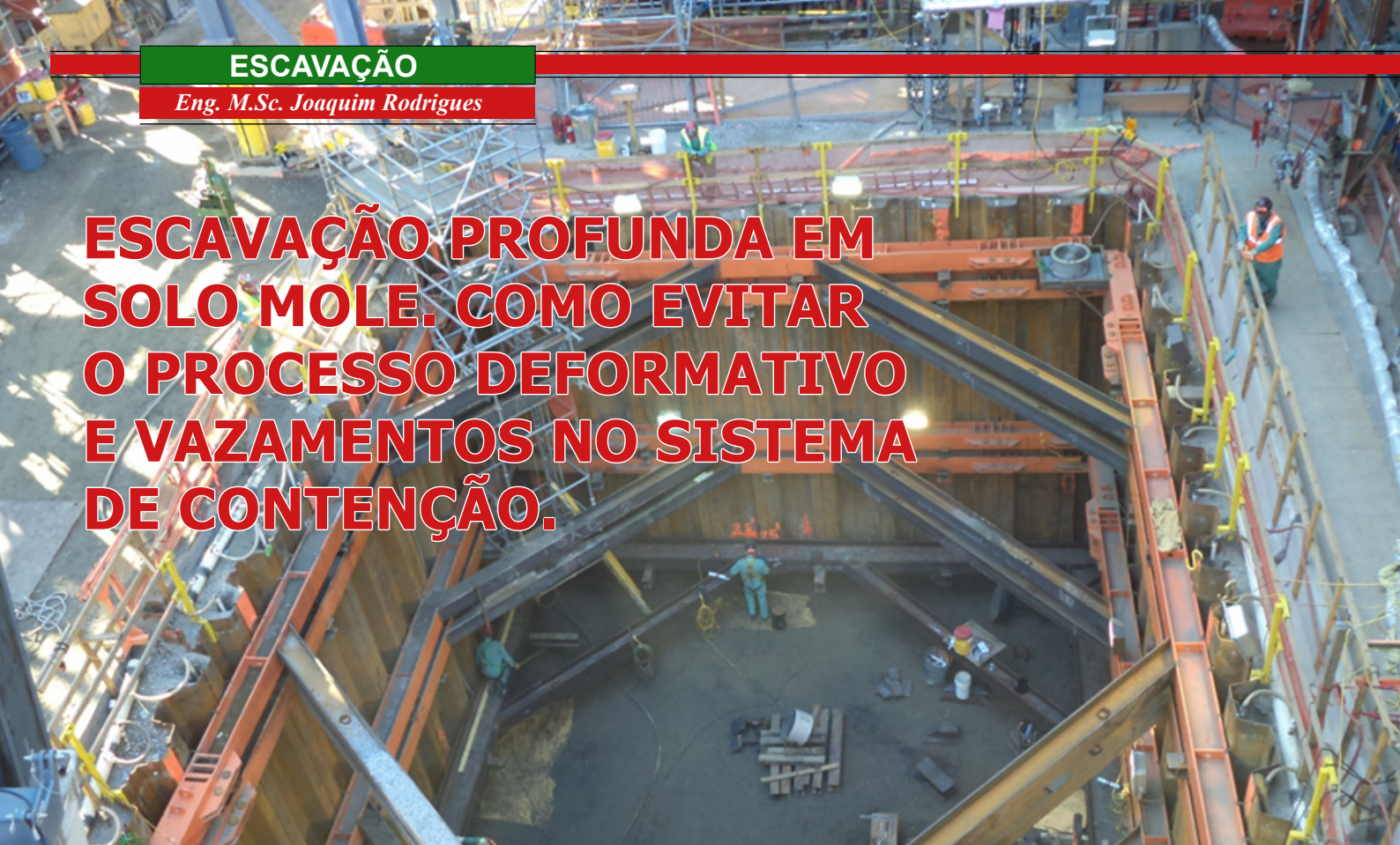


Figura 1 - Escavação profunda, em solo mole, não falha por acaso, por que submete-se ao estado inicial de tensões e a redistribuição induzida pela escavação. O processo deformativo não é apenas efeito da geometria da escavação, mas da alteração do equilíbrio tensional e da variação da poropressão desde a superfície escavada. Compreender este mecanismo é fundamental para conter consequências ou modificar previamente o comportamento do solo.

Em todo o Brasil, torna-se cada vez maior a importância de projetos de obras subterrâneas, à medida que cresce a infraestrutura do transporte subterrâneo nas cidades, envolvendo escavações profundas e com formatos irregulares, invariavelmente com a presença de solos moles. Ao se projetar sistemas de contenção, para essas escavações, observa-se insuficiência nos métodos analíticos devido, principalmente, à complexidade do cálculo envolvido, com distribuição instável das pressões do solo e a concentração de tensões na estrutura suporte. Assim, é de suma importância entender todos os fatores influenciadores do processo deformativo que se impõe, principalmente, em escavações com formatos irregulares. Estudos pertinentes a este assunto, mostram que variações nos parâmetros geotécnicos do solo influenciam, de maneira significativa, as forças internas atuantes na estrutura de contenção da escavação. O modelo de

mohr-colulomb é pouco adequado para representar pequenas deformações induzidas pela escavação. Ou seja, para esta condição, o M-C pode até prever processos de rutura, mas não representa adequadamente deformações em solos moles. Por outro lado, o chamado “efeito escala”, que refere-se a influência da dimensão e da geometria global da escavação, em especial à relação comprimento-largura, relaciona o comportamento deformacional do solo ao da estrutura de contenção, ou seja, escavações mais extensas não apresentam comportamento proporcional ou linear quando comparadas a escavações menores, mesmo com condição geotécnica semelhante. Em resumo, fica evidente que a resposta do solo passa a ser governada não apenas pelos parâmetros resistentes mas, principalmente, pela rigidez global do solo envolvido. Neste contexto, a solução do melhoramento do solo, utilizando-se o geoenrijecimento com CPR Grouting, torna-se particularmente eficaz, pois atua na eliminação da deformabilidade em escala maciça, desfazendo os efeitos associados ao

aumento das dimensões da escavação, proporcionando controle absoluto do natural processo deformativo. A redistribuição das tensões, a redução das tensões efetivas devido ao rebaixamento do lençol freático e a ocorrência de vazamentos localizados tendem a provocar perturbações significativas no solo adjacente, resultando em deslocamentos excessivos da estrutura de contenção, aumento do risco de instabilidade global e impactos diretos sobre edificações vizinhas. Esta matéria evidencia que os efeitos combinados da escavação, rebaixamento d’água e percolação local produzem deformações muito superiores àquelas associadas à ações isoladas, confirmando o caráter fortemente acoplado desses mecanismos em solos moles sensíveis. Em especial, observa-se que a perda da rigidez e da resistência do solo, exercem papel determinante no aumento dos deslocamentos horizontais das paredes diafragma e no comportamento deformacional do maciço. Com este cenário, o melhoramento do solo, com CPR Grouting tem sido uma alternativa técnica altamente favorável para mitigação desses efeitos

adversos. Diferentemente de soluções convencionais, que atuam predominantemente como elementos estruturais de contenção, o CPR promove o melhoramento do solo in situ, aumentando sua rigidez, resistência ao cisalhamento e a capacidade de confinamento. O processo de compressão do solo, via expansão radial, induzido pela formação dos bulbos, com bombeamento do grout, gera estado de pré-adensamento e de tensões favoráveis no solo mole reduzindo, de forma significativa, as deformações induzidas pela escavação e pelo rebaixamento do lençol freático. Além de contribuir para a redução dos deslocamentos horizontais das paredes de contenção, o CPR Grouting atua como barreira hidráulica complementar, diminuindo/ eliminando a permeabilidade do maciço tratado e controlando vazamentos localizados que, conforme demonstrado neste estudo, são fontes importantes de perturbação do solo. Assim, a adoção do CPR não apenas melhora o desempenho estrutural da escavação mas, também, reduz os efeitos cumulativos de distúrbios múltiplos, aumentando a segurança

global da obra e a confiabilidade do comportamento previsto em projeto. Em síntese, frente aos mecanismos da deformação e aos distúrbios evidenciados, o melhoramento do solo, tem se apresentado como solução tecnicamente consistente, especialmente adequada para escavações irregulares em solos moles, ao atuar diretamente na causa do problema, ou seja, o comportamento do solo, e não apenas em seus efeitos estruturais. Em regiões de solos moles, escavações com formatos irregulares podem facilmente perturbar a argila subjacente, causando alterações nas propriedades do solo e, conseqüentemente, deformações significativas na estrutura de contenção, podendo comprometer tanto a estabilidade da escavação quanto do entorno. Tomando como base uma obra de escavação profunda em região de solo mole, realizou-se simulações numéricas com o Midas GTS, para analisar a deformação geral do poço de fundação. O estudo investigou os efeitos do rebaixamento do lençol freático, da escavação e de infiltrações locais, com a perturbação do solo ao redor e nas deformações resultantes no poço

de fundação. O resultado mostra que escavações irregulares apresentam características espaciais de deformação distintas, com o efeito de “arqueamento” da estrutura de contenção, diminuindo o deslocamento horizontal da parede diafragma. O rebaixamento do lençol freático causa maior perturbação no solo superficial, próximo à escavação, com menos efeito no solo profundo. A redistribuição das tensões, provocada pela escavação, afeta consideravelmente o solo acima da base da escavação e o que se encontra na região de embutimento da estrutura suporte. Infiltrações para dentro da escavação, perturbam principalmente o solo ao redor do ponto de vazamento. Além disso, o enfraquecimento inevitável dos parâmetros do solo, impacta fortemente na deformação da cavidade escavada. A perturbação combinada (rebaixamento, escavação e vazamento) geram deslocamentos 32%, 45% e 58% maiores em comparação a fatores isolados, confirmando a relevância dos efeitos do acoplamento multifatorial. No estudo das deformações, em escavações, com a ocorrência da perturbação do solo ao

Figura 2 - Escavações rompem o equilíbrio do maciço. O processo deformativo é apenas a manifestação viável desse equilíbrio. No solo mole, a redistribuição das tensões e a dissipação da poropressão controlam o padrão deformativo muito antes da mobilização da resistência última.



redor, particularmente quando há argila mole altamente sensível, os fatores críticos envolvem elevada compressibilidade, baixa resistência e suas propriedades reológicas. O melhoramento do solo, com sua readequação, apresenta estratégias sustentáveis para sua modificação, de modo a melhorar seu desempenho mecânico, trazendo referências importantes para evitar seu amolgamento. Ao contrário dos estudos sobre ruptura frágil, em materiais semelhantes à rocha, os mecanismos de propagação de fissuras oferecem subsídios teóricos para compreender o processo do dano progressivo em argilas moles. A simulação numérica de peridinâmica, baseada em estados, mostrou vantagens únicas ao analisar a distribuição das tensões em 3D em escavações irregulares. Evidenciou-se, também, correlações entre padrões de deformação da estrutura de contenção e a distribuição da pressão passiva, por meio de ensaios de pressão no solo. A questão da percolação d'água em uma escavação é, também, fator crucial para a sua segurança, já que este processo não apenas causa erosão e danos na estrutura de apoio mas, também, perturba o solo ao redor, reduzindo sua resistência. Analisando-se diferentes cenários complexos de infiltração na caixa de uma escavação, concluiu-se que a infiltração leva ao aumento repentino do deslocamento horizontal, das paredes diafragma, e ao recalque no terreno circundante. O grau do impacto varia conforme o local da infiltração, o que exige mais investigação. Assim, para o caso de percolação d'água em uma caixa de escavação, envolvendo camadas arenosas e aquíferos profundos, avalia-se a perturbação do solo causado pelo processo infiltrante, constatando-se a redução significativa dos parâmetros da resistência (c , ϕ). Para tanto, realizou-se simulações numéricas do processo construtivo, considerando a variação da poropressão e a redistribuição das tensões entorno da escavação. A análise avaliou os efeitos da perturbação no solo adjacente causados pela escavação, selecionando-se diversos pontos a partir da reanálise do monitoramento de campo e das características das tensões na estrutura de contenção. Assim, analisou-se o impacto da perturbação do solo na deformação da caixa da escavação, sob diferentes condições de infiltração.

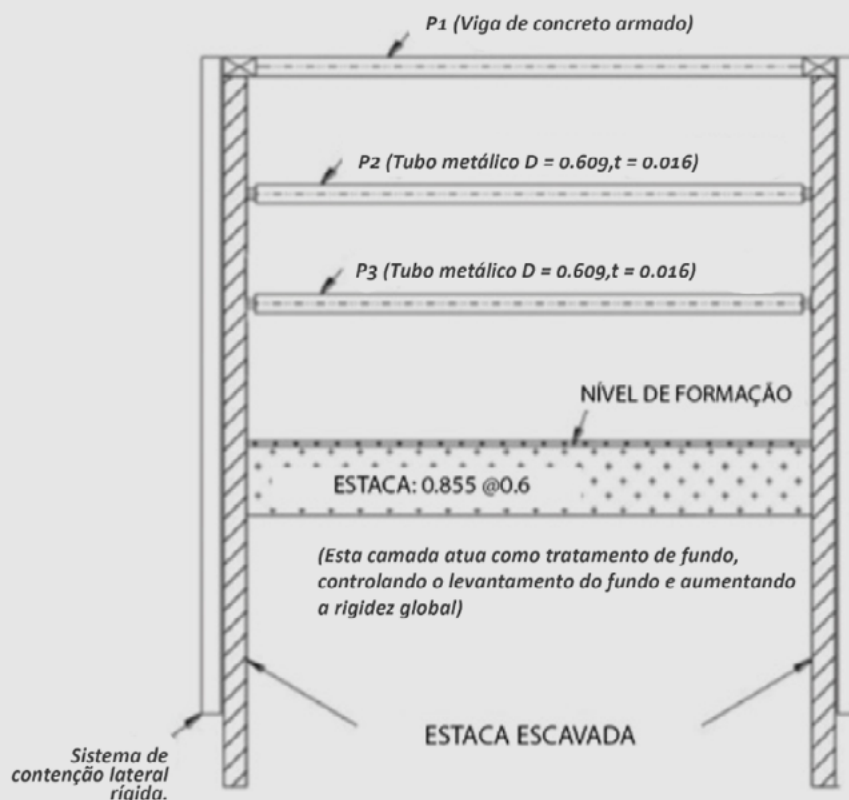


Figura 3 – Diagrama esquemático da seção de uma escavação, onde P1, P2 e P3 reduzem o momento fletor na parede, diminuem deslocamentos horizontais e controlam a redistribuição das tensões.

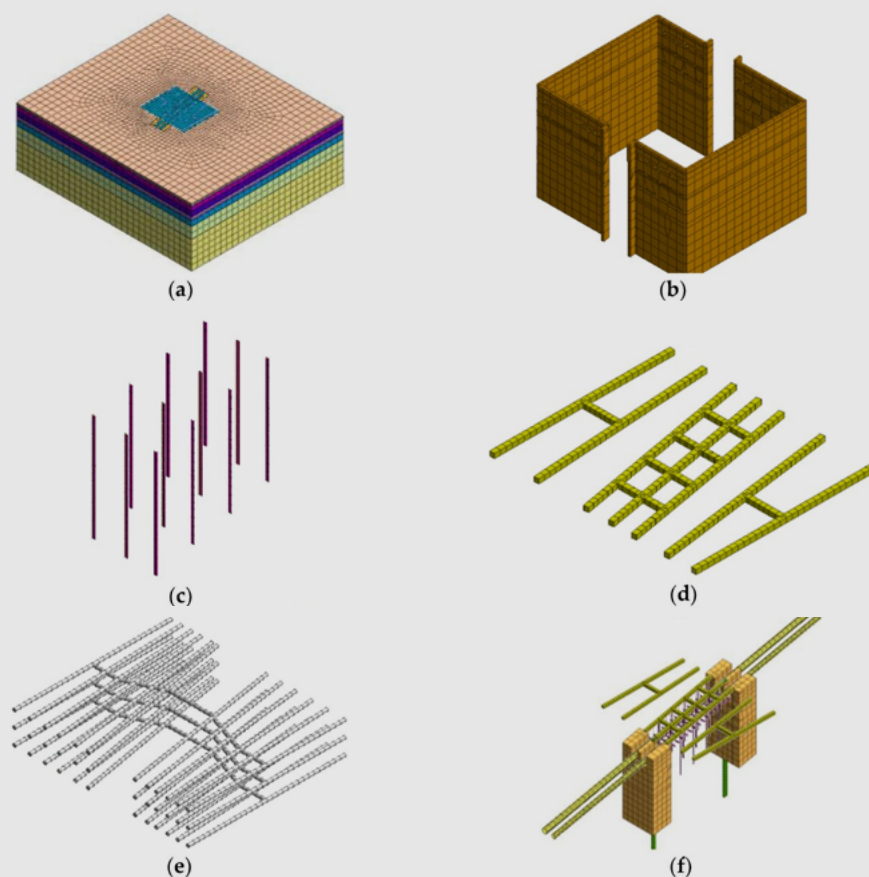


Figura 6 - São os elementos da contenção, normalmente estacas, paredes diafragma e cortinas, responsáveis por conter o solo lateralmente, trabalhando principalmente à flexão. A) É o modelo do maciço original, representando o estado inicial do solo sem escavação, ocorrendo a estratificação, malha de elementos finitos, onde a área central indica a futura escavação. B) É a geometria da escavação não simétrica com paredes verticais. C) São elementos verticais estruturais de contenção, como estacas, paredes diafragma e cortinas. D) Sistema de travamento horizontal, como tirantes, escoras e estruturas internas de contenção. E) Integração estrutural evidenciando uma malha com elementos de contenção, tirantes, escoras e a interação solo-estrutura. F) É o modelo final da escavação com o solo, estruturas de contenção e o sistema suporte interno, representando a situação final de cálculo.

O projeto

A caixa da escavação apresenta um segmento retangular com 23 m de comprimento e 15 m de largura, além de uma seção curva com largura máxima de 30 m. A profundidade da escavação foi de 13 m, e o formato geral da caixa é próximo a um arco, característico de uma escavação irregular, conforme seção apresentada na Figura 3, que ilustra a escavação profunda, em solo mole, estabilizada por estacas escavadas periféricas, escoramento interno em múltiplos níveis (viga de coroamento em concreto e escoras metálicas tubulares) e o melhoramento do solo. O sistema atua de forma integrada para conter deslocamentos laterais do maciço, reduzir esforços na contenção por meio do escoramento e aumentar a rigidez e resistência do fundo da escavação, mitigando recalque e instabilidade típicas do solo mole. O desempenho global é fortemente dependente da rigidez do solo melhorado, evidenciando o efeito de escala, ou seja, quanto maior o volume de solo geoenrijecido, menor a deformação da interação solo-estrutura, princípio diretamente associado ao conceito do CPR Grouting. Devido às limitações do entorno, o sistema de rebaixamento utiliza pontos de extração dentro da caixa, com espaçamento de 9 m entre pontos. Os parâmetros do solo, onde foi realizada a caixa de escavação estão descritos na Tabela 1. Os níveis da água subterrânea medidos em campo variaram de 0,7 a 1,3 m abaixo da superfície. Dentro da faixa da profundidade da escavação, há uma camada de 12 m de espessura de argila siltosa, com alta compressibilidade, com tendência a sofrer deformações acentuadas durante a escavação. Esse solo apresenta elevado teor de umidade e baixa permeabilidade, o que dificulta a drenagem do poço da escavação. Além disso, a característica tixotrópica da argila siltosa faz com que sua resistência diminua consideravelmente após o distúrbio causado pela escavação, em relação aos valores previstos em projeto. Estas propriedades tornaram o projeto e a execução da escavação ainda mais difícil.

Número da camada do solo	Nome	Parâmetro	Espessura	Peso específico	Módulo de elasticidade	Coesão	Ângulo de atrito
		Unidade	m	kNm	Mpa	kPa	°
1	Solo de aterro		2	17,5	8	12	13
2	Areia siltosa		12	17,7	4	17,5	11
3	Silte Argiloso com areia		3	18	11	18,2	13
4	Areia siltosa		13	18,9	16	19,1	5

Tabela 1 - Principais parâmetros do solo.

Simulação do processo de-formativo durante a escavação.

A simulação e a análise foram realizadas utilizando o software de elementos finitos Midas GTS NX, com base nas sondagens. O modelo do solo adota o critério de Mohr-Coulomb modificado, com parâmetros obtidos na investigação geológica, conforme apresentado na Tabela 2. Para facilitar o cálculo, as estacas foram representadas por paredes diafragma equivalentes, com espessura efetiva de 0,8 m e módulo de elasticidade de 25 GPa. No modelo, a parede diafragma é simulada como elemento de placa 2D, enquanto elementos de interface

impermeáveis são posicionados externamente para simular cortinas de contenção. As vigas de coroamento, pranchas e escoramentos internos foram modelados por elementos de viga 1D. Para garantir o acoplamento entre nós, da parede diafragma e das pranchas, os elementos das pranchas e vigas de coroamento foram extraídos e gerados com base nas coordenadas dos elementos da parede diafragma. Para minimizar a influência do tamanho do modelo no resultado, fixou-se em 30 m a distância da borda da escavação até o limite do modelo, cerca de 2,5 vezes a profundidade da escavação. A profundidade do modelo é de 40 m. Com base no levantamento do nível freático, estabeleceu-se em -1 m, seu valor médio anual. O proces-

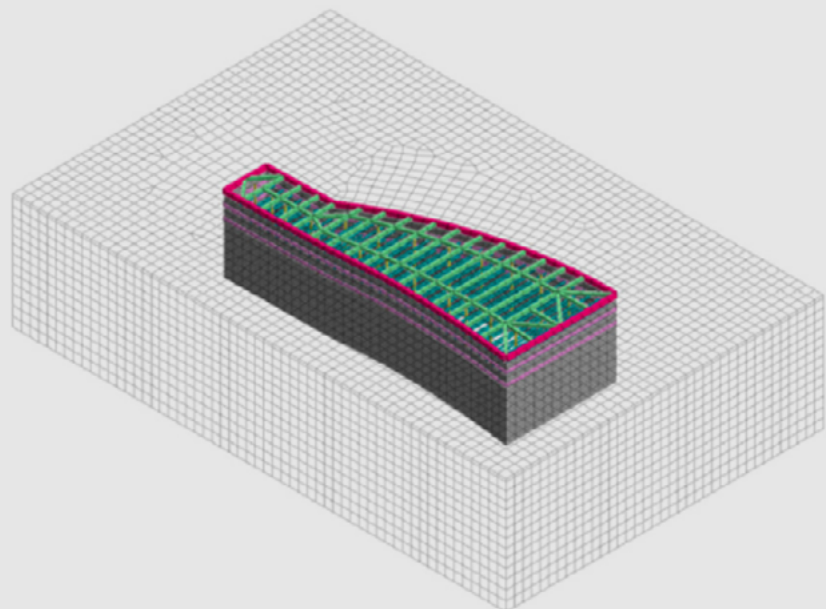


Figura 4 - Discretização da malha do modelo.

Nome	Espessura (m)	Peso específico (Kn.M-3)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (°)	E _{ref} 50 (Mpa)	E _{ref} oed (Mpa)	E _{ref} (Mpa) _{ur}
Solo de preenchimento	m	17,5	11,2	8,9	4,4	2,7	27
Argila siltosa	2	18,7	10,3	9	2,9	1,8	18,8
Silte argiloso com areia	12	19,7	17,8	9	4,5	5,1	35,6
Areia siltosa	3	18,9	8,2	28,1	15,2	12,1	34,9

Tabela 2 - Parâmetros do modelo MOHR-COULOMB modificado.

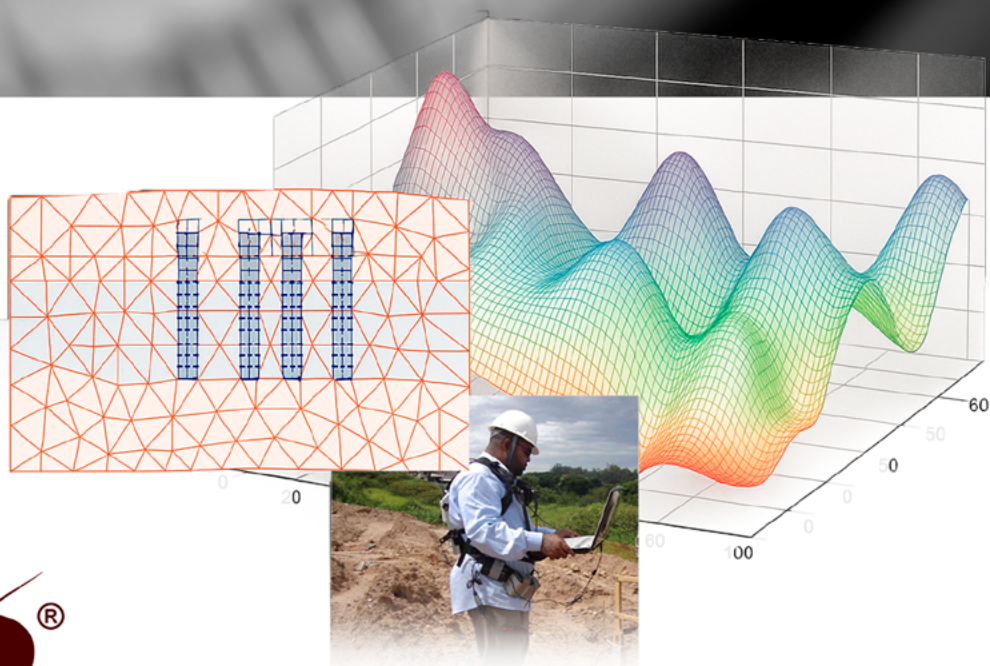
CPR[®]

GROUTING

Melhorar solos moles exige **precisão**

Melhorar solos moles exige precisão e segurança, exige CPR Grouting, a melhor resposta necessária no tempo desejado.

Tudo isto com monitoramento geotécnico específico, através de análises piezométrica, pressiométrica e, principalmente, tomográfica. Ou seja, com a precisão e a segurança de um bom relógio Suíço.



CPR[®]

GROUTING



 geotecnia.engegraut.com.br

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

 [Engegraut - Engenharia Geotecnica](#)

so construtivo foi dividido em etapas sucessivas de escavação, baixando-se o nível da água para 1 m abaixo da base da escavação antes de cada etapa. O rebaixamento do lençol freático é simulado de forma transitória. Aplicou-se limitações normais ao perímetro do modelo e nas verticais a partir da base. Na figura 4, visualiza-se a geração da malha e a disposição dos apoios internos, com sua discretização no modelo numérico tridimensional, típico de análises pelo método dos elementos finitos (MEF), aplicados à geotecnia. O volume externo transparente representa o domínio global do solo, suficientemente grande para minimizar os efeitos de borda. A região central colorida corresponde à zona de interesse (escavação, estrutura enterrada ou região carregada), onde se espera maior gradiente de tensões e deformações. A malha é refinada nessa região central (elementos menores), garantindo maior precisão no resultado. A medida em que se afasta da zona crítica, a malha torna-se mais grosseira, reduzindo custo computacional sem perda significativa da qualidade. As cores diferentes indicam materiais distintos ou camadas estratigráficas, conforme a tabela 2. O contorno superior, destacado, sugere a superfície do terreno ou a interface estrutural onde podem estar aplicadas cargas ou condições de contorno. Este modelo foi idealizado para capturar a redistribuição das tensões, as deformações induzidas pela escavação e a interação solo-estrutura.

Explicando a alteração do solo externo à escavação.

Refere-se principalmente a perturbação hidromecânica, e não a remoldagem física do solo. Trata-se da alteração do estado tensional e hidráulico do solo causado por migração do fluxo infiltrante, pela redistribuição da poropressão(u), pela mudança do gradiente hidráulico e pela variação das tensões efetivas (σ'). Ou seja, o solo

não é cortado, misturado ou remexido, mas perde o equilíbrio, sofre rearranjo interno progressivo, podendo entrar em estado metaestável, sobretudo por que há solos moles e sensíveis. Não se trata, portanto, do amolgamento clássico (remoldagem mecânica por escavação ou trado) ou destruição estrutural do esqueleto do solo. Na prática, corresponde à perturbação por fluxo e drenagem, havendo alteração do campo de poropressões, redução temporária ou permanente do σ' , com possível perda da rigidez, aumento da deformabilidade e recalque. Com a presença de solos sensíveis, é o início de sua desestruturação progressiva. Neste

contexto, é interessante citar o índice de perturbação hidráulica do solo, d , assim quantificando:

- $d < 0,3 \rightarrow$ perturbação leve (solo ainda responde elasticamente).
- $d > 0,3 \rightarrow$ perturbação forte (solo entra em regime não linear, com dano estrutural indireto). Este conceito é exatamente o oposto do melhoramento do solo com geoenrijecimento (CPR Grouting), ou seja, o rebaixamento descomprime e perturba, o CPR recomprime, reestrutura, consolida, confina e estabiliza o solo. O CPR restabelece σ' por via mecânica, sem induzir fluxo desestabilizador.

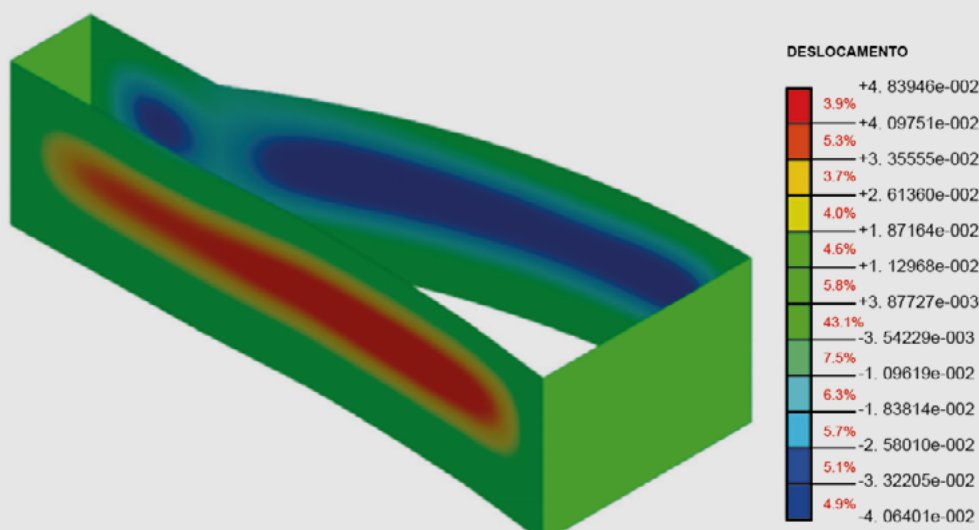


Figura 5 –Deslocamento horizontal da parede diafragma da contenção da escavação, responsável pela estabilidade estrutural da escavação profunda, limitando deslocamentos horizontais do solo e, simultaneamente, atuando como barreira hidráulica, reduzindo a entrada da água subterrânea. As estacas escavadas periféricas, dispostas ao redor da escavação, aumentam a rigidez global do sistema, contribuindo para o controle do deslocamento e rotação da parede diafragma, especialmente nas zonas de transição geométrica, melhorando a estabilidade local do solo adjacente. A escavação é contida por paredes diafragma, que funcionam como elementos estruturais rígidos, garantindo a estabilidade global do maciço e o controle dos deslocamentos laterais durante a escavação profunda. Além da função estrutural, a parede diafragma atua como barreira hidráulica, reduzindo a entrada da água subterrânea. No modelo numérico, sua geometria complexa foi simplificada para viabilizar o cálculo, mantendo o efeito estrutural essencial. A parede diafragma, representa uma cortina impermeável auxiliar, instalada para complementação no controle da circulação e da poropressão durante a escavação. No modelo, a parede diafragma foi simulada como uma interface impermeável, permitindo avaliar a redistribuição das poropressões, a redução do fluxo de água, e o impacto dessas condições no risco da instabilidade local.

Análise da deformação da estrutura da parede de contenção

O cálculo foi realizado com o software Midas GTS NX, e a deformação global da parede diafragma equivalente é apresentada na Figura 5, com resultado numérico do des-

locamento horizontal, típico de uma análise tridimensional por elementos finitos de uma escavação contida por parede diafragma. Na escala de cores, o azul é onde o deslocamento horizontal é menor (região mais estável). O verde amarelo são os deslocamentos intermediários e o vermelho são os maiores deslocamentos horizontais. Os valores indicados na legenda estão na ordem de 10^{-2} m (centímetros), coerentes com análises de escavações

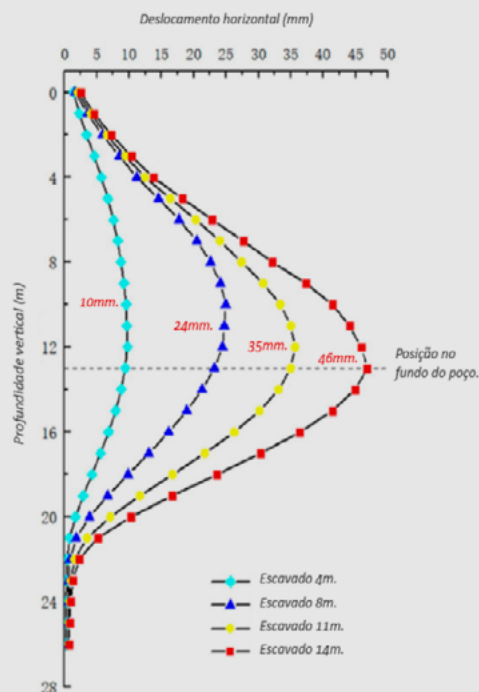
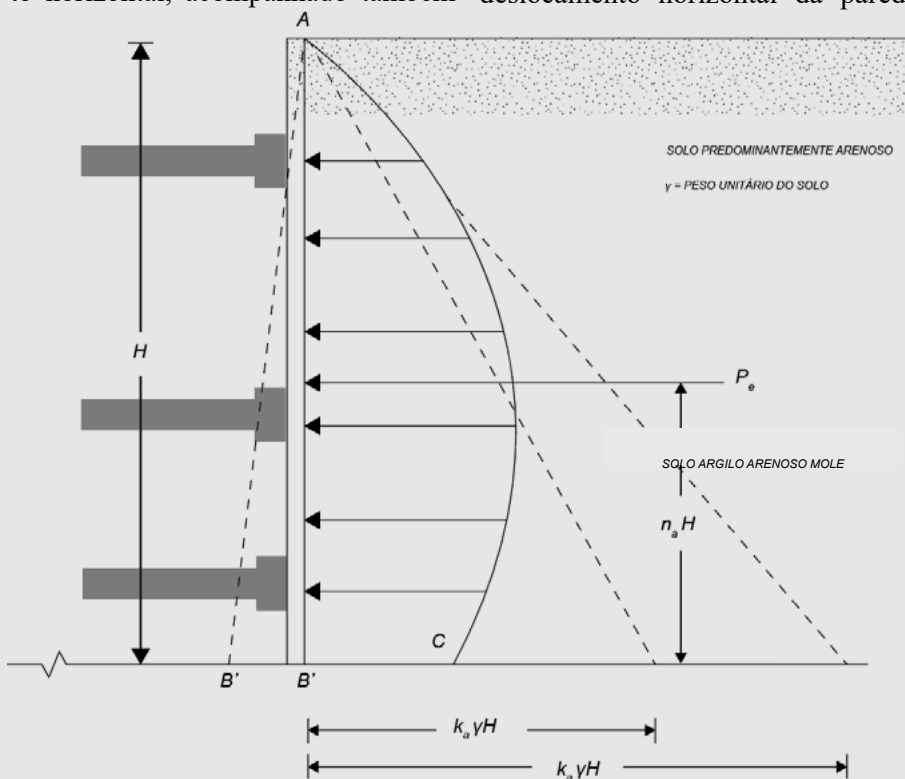


Figura 6 –Deslocamento horizontal da parede diafragma por etapa de escavação.

profundas em solo mole. Observa-se Concentração de deslocamentos (vermelho), ao longo de um trecho longitudinal da parede, que indica flexão da parede diafragma induzida pela escavação, uma região crítica associada à zona de empuxo ativo do solo, uma distribuição assimétrica dos deslocamentos, sugerindo condição geométrica irregular da escavação ou variação estratigráfica do solo, além de redução dos deslocamentos em profundidade (azul), evidenciando efeito de engastamento na base e/ou no apoio em camada mais rígida. Há, também, efeito tridimensional claro, onde o campo de deslocamentos não é uniforme ao longo do comprimento, mostrando que análises 2D tendem a subestimar ou superestimar deslocamentos locais. O deslocamento horizontal máximo da parede diafragma equivalente é de 43 mm, o que equivale a 0,3% da profundidade da escavação (H). Para reduzir a influência do tamanho da malha nos resultados, testou-se quatro tamanhos de malha (5 m, 4 m, 3 m e 2 m), utilizando deslocamentos das paredes diafragma de ambos os lados do poço e o recalque superficial máximo como critérios de avaliação. Conforme mostrado na Tabela 3, quando a malha era de 4 ou 5 m, os resultados variaram bastante, mostrando baixa precisão. Por outro lado, ao reduzir para 3 m, os resultados estabilizaram. Considerando-se a eficiência computacional, adotou-se a malha de 3 m para as análises subsequentes. Devido à maior largura da seção curva da escavação, há maior perda de rigidez nos apoios internos horizontais e o volume da argila mole, que sofre redução de resistência pelo

alívio na base, é mais expressivo. Assim, o deslocamento horizontal da estaca, na seção curva, é maior enquanto a deformação na parte retangular é menor. Na seção curva, a deformação no lado de maior curvatura é menor que no lado de menor curvatura, e o deslocamento horizontal máximo da parede diafragma, no lado de maior curvatura, aproxima-se da seção retangular. No lado de menor curvatura, a região de maior deslocamento horizontal está mais próximo do lado mais largo. Pela geometria da escavação, o efeito de “arco”, da parede diafragma, na seção curva de maior curvatura, aumenta a rigidez, reduzindo o deslocamento horizontal. Já no lado de maior curvatura, o aumento da largura horizontal da escavação gera uma alteração mais significativa no formato da seção, provocando concentração de tensões e elevação do deslocamento horizontal, acompanhado também

de deslocamento no topo das estacas. Logo abaixo da superfície escavada, encontram-se camadas de Silte Argiloso com Areia, de maior resistência, e acima, camadas de Argila Siltosa, menos resistente. Essa configuração estratigráfica limita os deslocamentos horizontais na base da caixa escavada, fazendo com que o deslocamento horizontal máximo se desloque para a região central da face da escavação. O geoenrijecimento atuaria exatamente na região onde aparecem os maiores deslocamentos, aumentando a rigidez lateral do maciço (E_h), promovendo a elevação da resistência não drenada (S_u) e a redução da curvatura da parede diafragma. O efeito esperado seria migração das cores vermelho/ amarelo para o verde/ azul, redução significativa do deslocamento máximo horizontal e maior segurança para edificações adjacentes. O deslocamento horizontal da parede



Em escavações escoradas, o estado de tensões não atinge plenamente a condição ativa clássica, resultando em uma redistribuição de pressões laterais com máximas na região intermediária da contenção. Este comportamento justifica a adoção de diagramas de empuxo aparente e evidencia a importância do controle da deformabilidade do solo, especialmente em ambientes urbanos sensíveis. Sem melhoramento do solo, há grandes deslocamentos, aumento de empuxo e risco a edificações próximas. Com melhoramento do solo, há aumento da rigidez (E), aumento da resistência (S_u), redução da deformação, aproximando o comportamento de K_0 estável. O resultado é menor redistribuição desfavorável, menor empuxo mobilizado e mais segurança.

Tamanho da malha (m)	2	3	4	5
Monitoramento da curvatura grande (mm)	35,2	35,1	29,5	31,3
Monitoramento da curvatura pequena (mm)	46,1	46,3	37,5	39,4
Recalque da superfície (mm)	23,6	23,4	17,7	19,3

Tabela 3 - Influência do tamanho da malha nos resultados dos cálculos.



SENSORES DE RECALQUE



**CÉLULAS DE PRESSÃO
PARA ATERROS**

GEOKON

TRUSTED MEASUREMENTS®

EQUIPAMENTOS GEOTÉCNICOS



**CÉLULAS DE PRESSÃO
CRAVÁVEIS NO TERRENO**



PIEZÔMETROS

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

REPRESENTANTE EXCLUSIVO NO BRASIL

G5 ENGENHARIA LTDA

TEL: (41) 3402-1707

G5ENGENHARIA.COM.BR



diafragma, na seção com máxima deformação, foi removida para validar o modelo numérico, conforme figura 6. Acima da superfície da escavação, há uma camada de 12 m de argila mole turfosa, enquanto a areia siltosa e o silte arenoso no fundo da escavação apresentam melhores propriedades, oferecendo base sólida para a ancoragem da parede diafragma. Por conta disso, a deformação da parede diafragma tem comportamento simulando engastamento. Com o aumento da profundidade da escavação, o ponto de deslocamento máximo da parede diafragma tende a se aprofundar. Após a conclusão da escavação, o deslocamento horizontal máximo ocorre próximo ao fundo da caixa escavada. À medida que a escavação avança, o deslocamento horizontal da parede diafragma cresce gradativamente, conforme esperado. Quando a escavação é finalizada, o deslocamento horizontal máximo da parede diafragma atinge 46 mm. A figura 6 mostra perfis de deslocamento horizontal de uma parede diafragma em diferentes estágios de escavação (4,8,11 e 14m), em função da profundidade. No eixo x, o deslocamento horizontal em (mm), no eixo y, é a profundidade vertical em (m) e cada curva corresponde a um estágio da escavação. As principais conclusões são o crescimento progressivo do deslocamento, à medida em que aprofunda-se a escavação, passando de 10mm (4m) para 40 mm (14m). Ocorre um formato típico de embarrigamento, onde o máximo deslocamento ocorre próximo ao fundo da escavação (linha tracejada), e não na superfície, correspondente ao comportamento clássico de paredes flexíveis em solos moles. Há rotação e flexão da parede, onde a base apresenta ancoragem passiva no solo mais profundo. Acima, predomina a flexão induzida pelo alívio de tensões da escavação. Há influência dos estágios, onde cada avanço da escavação redistribui tensões, afastando o ponto de máximo deslocamento para baixo e ampliando sua intensidade. As implicações para o projeto/obra são três:

- indica controle, aprimorado pela deformabilidade e não apenas pela resistência;
- justifica medidas de contenção/rigidez adicionais, como melho-

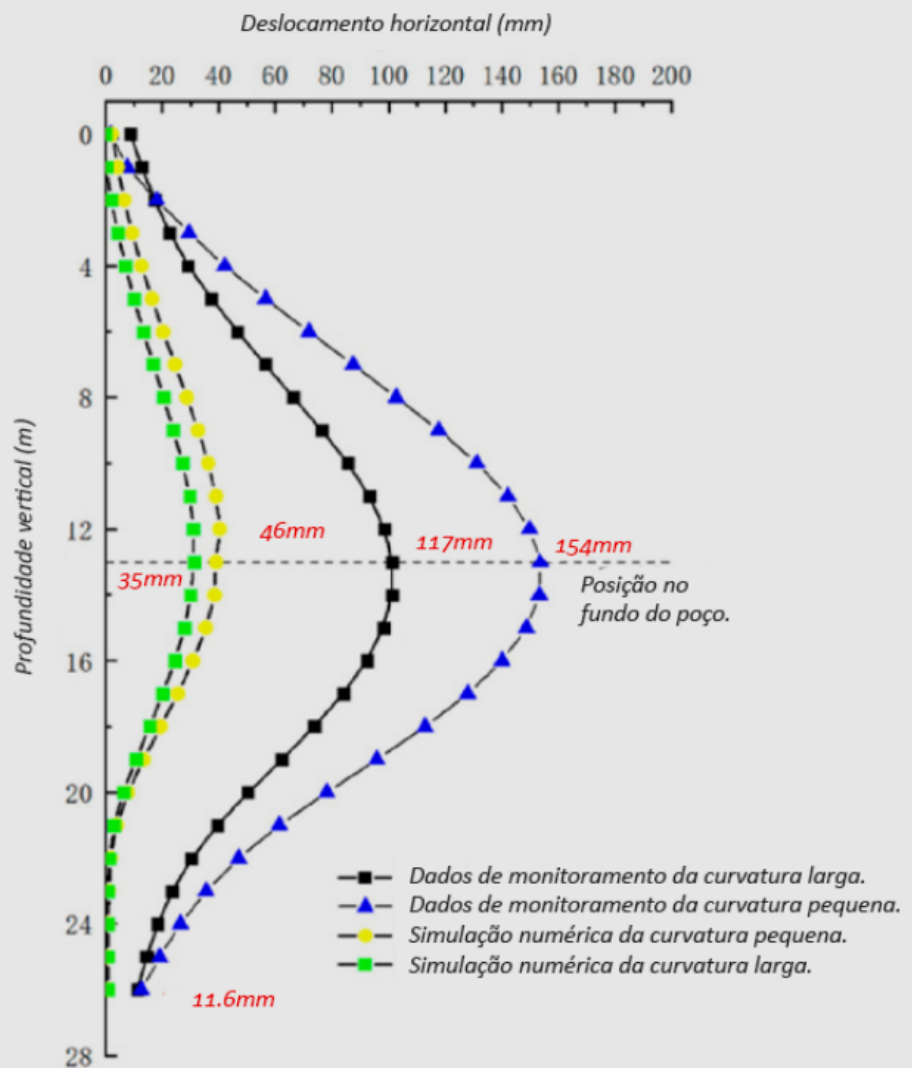


Figura 7 -Comparação entre o deslocamento da parede diafragma e os dados de monitoramento. no fundo da escavação até -14 m. Para confirmar se o tempo do rebaixamento de lençol freático na simulação numérica, estava de acordo com as exigências do projeto, obteve-se a distribuição do potencial hidráulico total ao longo da seção transversal da escavação, após a etapa final de rebaixamento, como apresentado na Figura 6a. Durante o processo de rebaixamento, a carga piezométrica dentro do poço ficou abaixo do nível esperado, e o potencial hidráulico total, ao redor do poço, também ficou relativamente baixo, formando um rebaixamento em forma de funil centrado no poço. Nas bordas da escavação, o potencial hidráulico total apresentou-se mais elevado.

ramento do solo com geonrijecimento para eliminar deslocamentos;

- a presença de solos moles deixa claro a necessidade de solução que aumente a rigidez e a resistência do maciço adjacente.

Comparou-se resultados do deslocamento horizontal, da parede diafragma, na região de maior deformação, obtidos pela simulação numérica, aos dados reais do monitoramento com inclinômetro. Na figura 7, o eixo horizontal (x), refere-se ao deslocamento horizontal da parede (mm), e o vertical (y) à profundidade (m). A linha tracejada horizontal indica a posição do fundo da escavação em torno de 13m. O comportamento observado tem formato típico de flexão,

onde todas as curvas exibem perfil em arco, característico de paredes flexíveis em solo mole. O máximo deslocamento ocorre próximo ao fundo da escavação, onde o confinamento lateral é mínimo. A influência da curvatura da escavação mostra curvatura pequena (azul – monitoramento), com deslocamento máximo de 154mm, correspondente a um comportamento mais crítico com maior mobilização do solo. Evidencia-se uma curvatura grande (preto – monitoramento), com um deslocamento máximo em torno de 117mm, com maior efeito tridimensional e melhor redistribuição de tensões, redução do deslocamento da ordem de 25% apenas pela geometria. A validação do modelo numérico, evidencia que as simulações numéricas (verde e amarelo) reproduzem bem

o formato e a ordem de grandeza dos deslocamentos medidos, onde pequenas diferenças são esperadas devido a idealização constitutiva do solo mole, à dificuldade de representar corretamente a sensibilidade e a degradação estrutural do solo. O processo de deslocamento não é, portanto, governando apenas pela rigidez do solo mas, principalmente, por sua deformabilidade adjacente e as condições de contorno tridimensionais. Assim, escavações longas e retas tendem a apresentar deslocamentos significativamente maiores do que escavações com fechamento em planta. O comportamento apresentado evidencia que o problema central não é apenas estrutural e sim geomecânico, onde a redução efetiva dos deslocamentos exige aumento da rigidez (E) do solo mole, e a redução da deformabilidade e da sensibilidade, só obtido com o melhoramento do solo com geoenrijecimento, comprimindo, consolidando e confinando-o.

Análise dos fatores que contribuem para grandes deformações na escavação

Com base nos dados do monitoramento realizado e no relato da inspeção de campo, além da análise dos parâmetros geológico-geotécnico, identificou-se três parâmetros responsáveis por grandes deformações na escavação:

- A escavação, situa-se em uma planície aluvial, onde ocorre ampla distribuição de argila mole, que apresenta baixa resistência ao cisalhamento e pouca capacidade suporte, dificultando a estabilização durante a realização das estacas.
- Em solos moles, altamente sensíveis, como argilas orgânicas e aluviões recentes, a execução de estacas molda-

das in situ apresenta limitações técnicas relevantes.

- A baixa resistência ao cisalhamento impede a autostabilização do furo durante a perfuração, favorecendo o colapso das paredes e a intrusão do solo no interior da estaca durante a concretagem. Este processo resulta na contaminação do concreto fresco por finos saturados, aumento da relação água/cimento efetiva e degradação da interface solo-estaca, com redução do atrito lateral e da capacidade resistente. Trata-se de um problema sistêmico, inerente à incompatibilidade entre o método executivo convencional e o comportamento mecânico do solo mole, dificilmente detectável após a execução.
- As alterações na poropressão, causadas pelo rebaixamento do lençol freático, e a redistribuição das pressões do solo devido ao alívio proporcionado pela escavação, afetam tanto o solo interno quanto ao redor do poço, levando à redução da resistência do solo.
- De acordo com a inspeção de campo, houve falhas na

execução da cortina Impermeabilizante em alguns pontos, resultando em infiltração pelas estacas de contenção, desestabilizando o solo ao redor, provocando amolecimento local das propriedades do solo e aumentando as forças externas sobre as estacas, o que contribuiu para o aumento das deformações.

Análise da perturbação do solo ao redor da escavação

O impacto das atividades da escavação, na perturbação do solo, pode ser dividido em dois principais mecanismos. Primeiro, o processo de rebaixamento do lençol freático, durante a escavação, alterando o estado trifásico do solo. O rebaixamento reduz a poropressão do solo e, com a diminuição da água, os vazios entre as partículas passam a ser preenchidos com água livre, causando contração dos vazios, levando a uma retração volumétrica da massa de solo, resultando em aumento da resistência do solo dentro da escavação. Para a argila mole, ao redor, a redução da poropressão é relativamente pequena e insuficiente para causar sua completa consolidação.



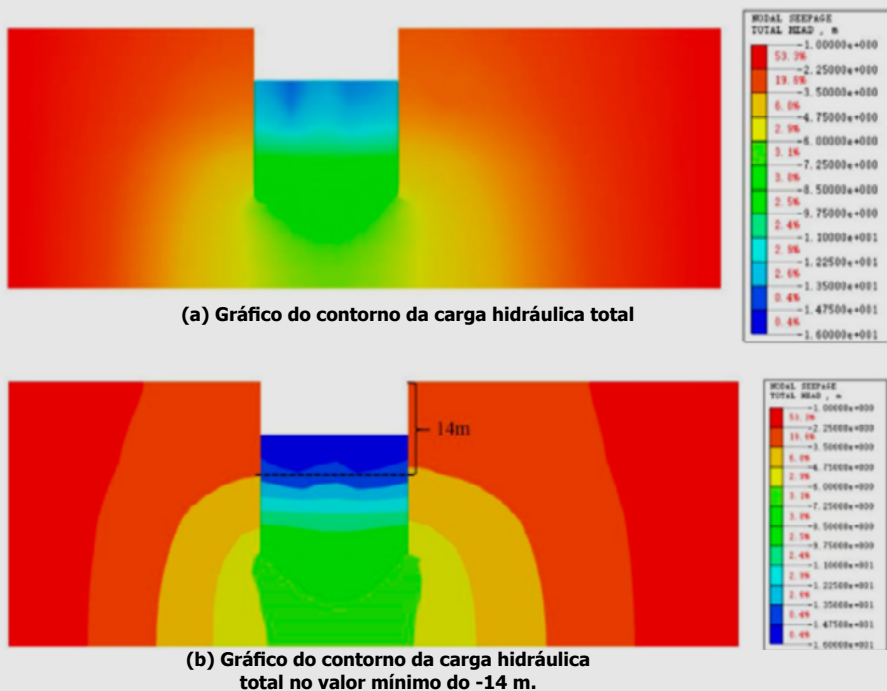


Figura 8 –Contorno da carga hidráulica total, durante a fase final do rebaixamento da escavação. As cores quentes (vermelho/ laranja) indicam maior carga hidráulica fora da escavação. As cores frias (verde/ azul) indicam redução da carga hidráulica no interior da escavação devido ao rebaixamento. O valor mínimo atinge cerca de -14m, concentrado no fundo/ centro da escavação. As curvas evidenciam um gradiente hidráulico intenso direcionado para a escavação, indicando fluxo convergente de água, confirmando a condição crítica do ponto de vista da percolação, com grande risco de instabilidade do fundo, se não houver tratamento ou bloqueio hidráulico adequado. Ou seja, o rebaixamento gera forte atração do fluxo para a escavação, reduzindo a carga interna, mas aumentando o risco geotécnico. O índice de perturbação do solo, d , é um conceito físico/ qualitativo, utilizado para classificar se a perturbação é leve ou forte (ex.: $d < 0,3$, significa perturbação leve). O λ_d , por sua vez é o parâmetro matemático de redução, associado à perturbação, definido para entrar diretamente nas equações constitutivas ou numéricas. No texto, é definido como:

$$\lambda_d = 1 - \frac{\mu}{\mu_0}$$

Onde

- μ_0 = poropressão inicial (antes da obra);
- μ = poropressão após a perturbação.

Em resumo

- d = índice conceitual que expressa quanto o solo foi perturbado
- λ_d = fator adimensional derivado de d , usado para quantificar essa perturbação nas equações, reduzindo rigidez, resistência ou estado de tensões.

É comum em artigos utilizar o d para interpretação física e o λ_d para modelagem matemática/ numérica.

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

O processo de rebaixamento do lençol freático remove parte dessa água, diminuindo a coesão, pois ocorre a quebra do contato entre elas, o que acaba desestabilizando a estrutura e diminuindo a resistência da argila mole. Por outro lado, a resistência da argila não perturbada depende bastante da organização das partículas do solo. Durante a escavação, à medida que as paredes diafragma se deformam, o estado de tensão do solo, ao redor, passa da pressão do solo in-situ, estática, para uma condição de pressão ativa, alterando a trajetória de tensões no solo e, devido às particularidades da argila mole, surgem concentrações de tensão em situações complexas, podendo modificar as características da resistência do solo. Além disso, os deslocamentos causados no solo provocam alongamento ou compressão de sua estrutura, enfraquecendo ainda mais a argila mole, reduzindo sua resistência. A operação do rebaixamento do lençol freático foi realizada antes do início da escavação. Devido à baixa permeabilidade da argila mole e sua forte interação com a água subterrânea, cada etapa do rebaixamento foi programada para durar 14 dias. Para otimizar a eficiência do cálculo, cada fase foi dividida em 7 subetapas, com resultados registrados a cada 2 dias. O último estágio do rebaixamento exigiu baixar o nível da água no fundo da escavação até -14 m. Para confirmar se o tempo do rebaixamento de lençol freático na simulação numérica, estava de acordo com as exigências do projeto, obteve-se a distribuição do potencial hidráulico total ao longo da seção transversal da escavação, após a etapa final de rebaixamento, como apresentado na Figura 8a. Durante o processo de rebaixamento, a carga piezométrica, dentro do poço, ficou abaixo do nível esperado, e o potencial hidráulico total, ao redor do poço, também ficou relativamente baixo, formando um rebaixamento em forma de funil centrado no poço. Nas bordas da escavação, o potencial hidráulico total apresentou-se mais elevado.

Após a conclusão da escavação, a profundidade do poço atingiu 13 m em relação à superfície. Para visualizar a eficiência do rebaixamento, ajustou-se o potencial hidráulico total mínimo ao nível esperado de -14 m. Conforme mostrado na Figura 8b, o potencial hidráulico total dentro da escavação, atingiu o patamar desejado, comprovando a eficiência do rebaixamento e o atendimento à especificação da obra. Portanto, conclui-se que os parâmetros transitórios do rebaixamento, utilizados na simulação numérica, satisfizeram as exigências estabelecidas. Tomando como exemplo a etapa final do rebaixamento, de -10 m para -14 m, o nível d'água no poço, devido ao rebaixamento é mantido 1 m abaixo do esperado, ou seja, em -15 m, após a conclusão do processo. A distribuição da poropressão, após o rebaixamento, é apresentada na Figura 9. Devido ao gradiente hidráulico, a água do solo, ao redor da escavação segue fluindo continuamente em direção ao poço. Como resultado, a poropressão, na base

do poço e em seu entorno imediato, diminui expressivamente, sendo que a maior redução ocorre no solo mais próximo ao poço. Em região mais distante, essa queda é menos acentuada. No fundo da escavação, próximo ao poço do rebaixamento, ocorre pressão negativa d'água. A área afetada pela variação da poropressão, causada pelo rebaixamento, estende-se desde a base da escavação até aproximadamente 8 metros abaixo. O deslocamento horizontal da parede diafragma é, principalmente, influenciado pela pressão

lateral exercida pelo solo ao redor. Durante o processo de rebaixamento, a água subterrânea, fora da escavação, migra para o interior do poço, modificando a poropressão ao redor e, assim, o fluxo de infiltração acaba perturbando o solo externo. Ao analisarmos a variação da poropressão obtida na simulação numérica do fluxo de rebaixamento, é possível avaliar o grau de perturbação do solo. O índice de perturbação do solo (d) é definido conforme a equação apresentada na página anterior

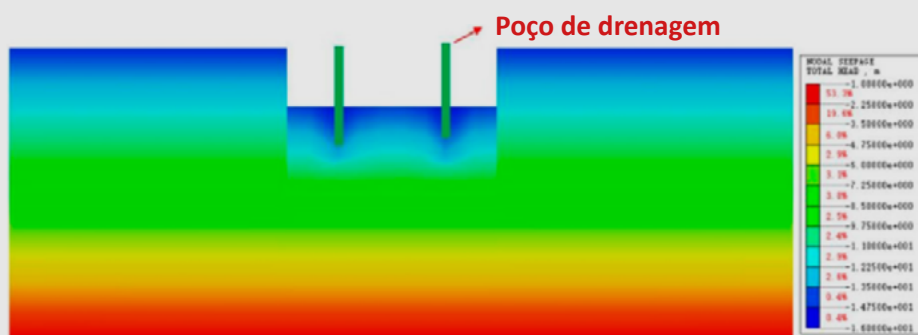


Figura 9 - O campo da poropressão no solo. O vermelho/ amarelo indicam maior pressão, e o verde/ azul – menor pressão. O poço de drenagem cria zona de alívio de pressão, visível pelo rebaixamento das cores azuis ao redor, induzido pelo fluxo de água em direção ao poço, reduzindo a poropressão local e aumentando a tensão efetiva. Observa-se melhora na estabilidade do solo e redução do risco de recalque.



Escavações irregulares em solos moles promovem redistribuições complexas de tensões, resultando em deformações não uniformes ao longo do maciço. A variação geométrica da escavação intensifica concentrações de deformação e amplia a zona de influência, especialmente em condições de baixa resistência não drenada. A interação entre rebaixamento de poropressões e alívio de tensões favorece deslocamentos laterais e recalques superficiais. Neste cenário, o controle da rigidez do solo torna-se determinante para a estabilidade global. Técnicas de melhoramento, como o geoenrijecimento prévio do maciço, reduzem significativamente o deslocamento e riscos associados à escavação.

Observou-se a variação da poropressão em diferentes profundidades do solo, ao redor da escavação, tipo 3 m, 6 m e 9 m da borda do poço. A ilustração dos pontos de medição está na Figura 10. Calculou-se o grau de perturbação, λ_d , em cada ponto da medição conforme a equação anteriormente apresentada, e os pontos fora da área escavada, estão ilustrados na Figura 11. Na direção horizontal, a perturbação causada pelo rebaixamento é mais intensa no solo próximo ao poço. Na direção vertical, o grau de perturbação, nas camadas superficiais de solo (acima de 6 m) é, geralmente maior, diminuindo conforme aumenta a profundidade e os efeitos do rebaixamento se dissipam. Com o rebaixamento, a água livre presente no solo, ao redor, migra para a escavação e, quanto mais próximo do poço, menor o caminho de percolação. Este percurso reduzido, gera gradiente hidráulico mais elevado, resultando em maior pressão de percolação e, conseqüentemente, maior perturbação no solo.



A aplicação do geoenrijecimento, com CPR Grouting, promove o aumento da rigidez e da resistência do solo, reduzindo deformações e garantindo maior controle do comportamento do maciço durante a etapa construtiva. Mais do que conter o solo, trata-se de controlar o seu estado de tensões, assegurando estabilidade, segurança e previsibilidade em escavações complexas

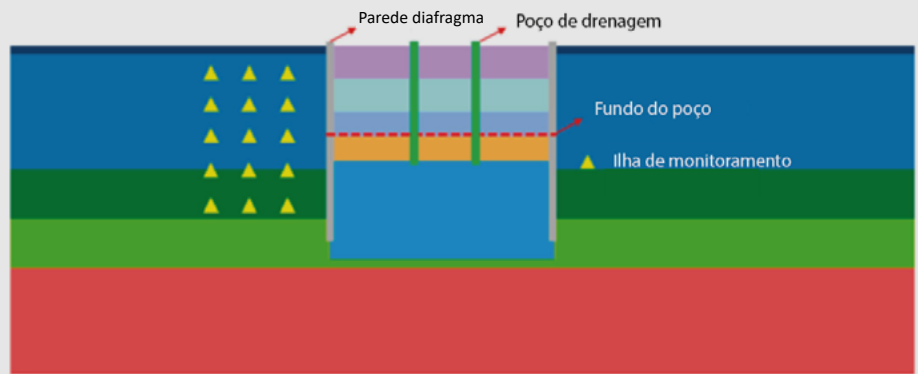


Fig 10 - Pontos de medição da poropressão em torno da escavação, mostrando como o fluxo infiltrante e a redistribuição da poropressão ocorre após a intervenção no solo, com a perturbação hidráulica e tensional causada por alteração do regime de fluxo, ou seja, a escavação cria um gradiente hidráulico. A água migra lateral e verticalmente, modificando o campo de poropressões. Variação das tensões efetivas, com redução da poropressão, que aumenta as tensões efetivas em algumas zonas. Em outras, pode haver aumento temporário da poropressão (dependendo da permeabilidade e do tempo). Estabelece uma zona de influência além do perímetro escavado que, mesmo sem escavação direta, o solo "externo" sofre reorganização estrutural, devido ao solo mole sensível.

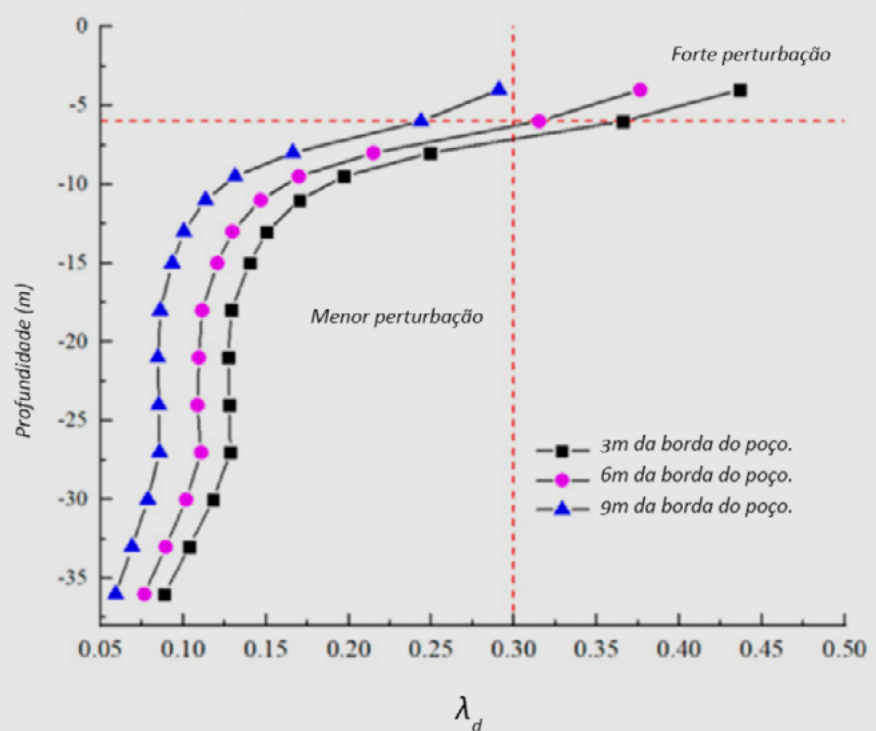


Fig 11 - O gráfico mostra o grau de perturbação do solo (λ_d) em função da profundidade, para diferentes distâncias em relação à borda da escavação (3 m, 6 m e 9 m). Quanto mais próximo da escavação, maior é o grau de perturbação do solo, sobretudo nas camadas superiores. Existe uma zona de forte perturbação próxima à superfície (aprox. até 5–7 m de profundidade), associada ao alívio de tensões e à redistribuição das poropressões após a escavação. Em maiores profundidades, o solo entra em uma zona de perturbação menor, com redução progressiva de λ_d . Mesmo a 9 m da borda da escavação, ainda há perturbação mensurável, indicando que o efeito da escavação se propaga lateralmente e em profundidade, embora com intensidade decrescente. A linha vertical tracejada indica um limiar prático entre comportamento pouco e significativamente perturbado. Portanto, a escavação gera um campo tridimensional de alívio de tensões e variação da poropressão, produzindo perturbação relevante do solo fora da cava, particularmente pela presença do solo mole sensível.

Verticalmente, o solo mais superficial, com menor área de recarga de água subterrânea, responde mais rapidamente à diminuição do nível freático, provocado pelo rebaixamento, ocasionando mudanças mais acentuadas na poropressão. Já o solo mais profundo, com maior área de recarga e linhas de fluxo mais dispersas, sofre menos influência do rebaixamento. No nível final do rebaixamento à -14 m, a cur-

va do grau de perturbação apresenta ponto de inflexão perceptível. Abaixo dessa profundidade, a perturbação do solo cai consideravelmente. À medida que a profundidade aumenta, o solo enfrenta maior tensão de sobrecarga, o que contribui de forma mais significativa para a poropressão. Portanto, para solos mais profundos, na mesma posição horizontal, a perturbação



Análise de Estabilidade



Escavações e Contenções



Muros e Gabiões



Recalque



Sondagens de Solo



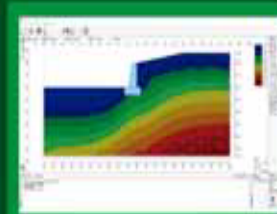
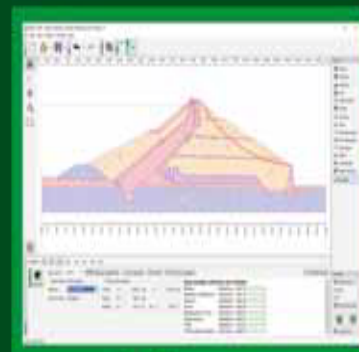
Túneis e Poços



Estudos
geológicos



Muros e
Gabiões



AVALIE GRATUITAMENTE

Solicite: comercial@solucoescad.com.br

Distribuido por:

SOLUÇÕES CAD
BIM

www.solucoescad.com.br



causada pela percolação é menor em relação às camadas mais superficiais.

O que é o regime hidrostático?

O regime hidrostático corresponde à condição em que a poropressão do solo está em repouso, sem fluxo. Nesta condição, a poropressão aumenta linearmente com a profundidade, sendo função apenas da cota do nível e do peso específico da água. Não há gradientes hidráulicos induzidos por escavação, bombeamento ou carregamento. Este regime caracteriza o estado natural de equilíbrio hidráulico do solo, base de referência para identificar variações da poropressão, processos de consolidação ou instabilização provocada por intervenção geotécnica.

A perturbação do solo vizinho provocada pela escavação

Para garantir dados precisos do deslocamento, durante a escavação, realizou-se seu reajuste na fase do equilíbrio geostático, considerando que o solo estava totalmente consolidado antes da escavação. A distribuição da tensão efetiva no solo ao redor, em um determinado corte transversal da escavação é apresentada na Figura 12a. Conforme a profundidade aumenta, o peso próprio do solo cresce, e, consequentemente, a tensão efetiva também se eleva gradualmente com a profundidade. Observa-se, na figura 12b, após o término da escavação, a tensão efetiva no solo ao redor. Para o solo próximo à parede-diafragma, o processo de escavação gera pressão ativa, reduzindo a pressão e, consequentemente, diminuindo a tensão efetiva. Ao longo da profundidade, a redistribuição da pressão do solo provoca alterações abruptas nas interfaces

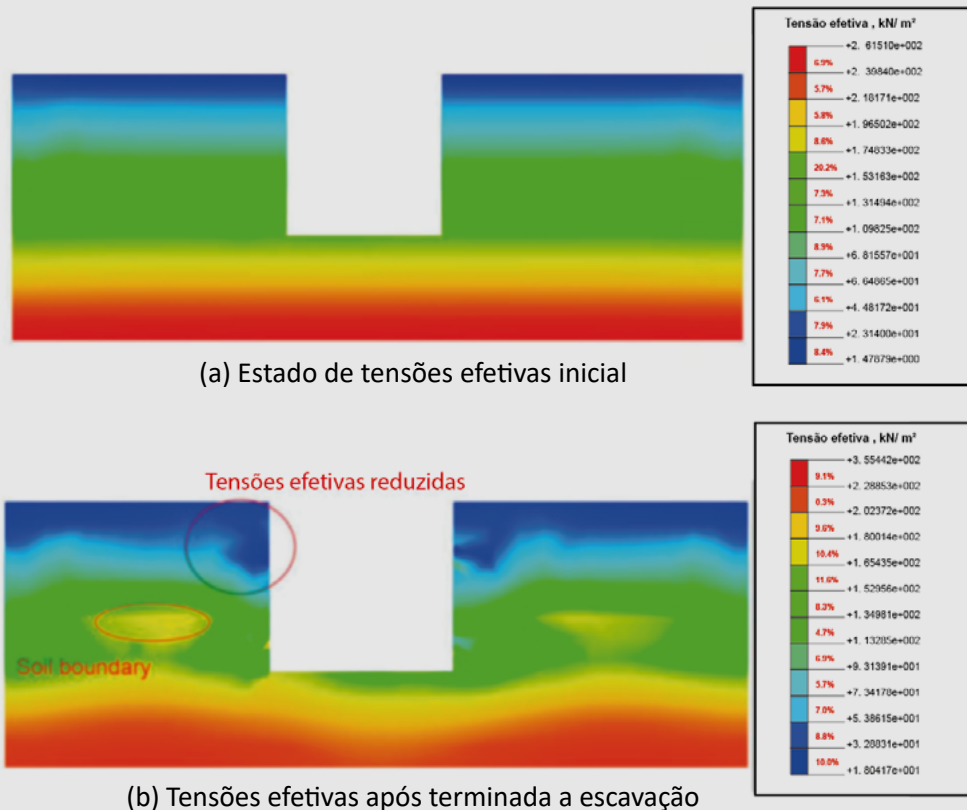


Fig 12 - Antes da escavação o solo está em equilíbrio geostático, com tensões efetivas distribuídas de forma contínua e crescente com a profundidade. Após a escavação, a retirada de solo provoca alívio de tensões, gerando redução da tensão efetiva principalmente nas laterais e no fundo da escavação. Esta redução altera o estado de equilíbrio do maciço, induzindo deformações, recalques e instabilidade, sobretudo pela presença do solo mole.

das camadas. As diferenças nas propriedades do solo, nestas regiões, causam concentração de tensões, elevando a tensão efetiva nas bordas. Durante a escavação, o solo adjacente à parede diafragma deixa de estar confinado, que atua no solo. A tensão efetiva é como no estado natural, passando a se deslocar levemente em direção à cava, mobilizando um estado de pressão ativa, no qual a tensão horizontal do solo é reduzida. Como a poropressão não se dissipa instantaneamente, ocorre diminuição da tensão efetiva no solo, próximo à parede, implicando em perda temporária da rigidez e da resistência no local, sendo um dos principais mecanismos responsáveis por deformações laterais, recalque e pela zona de solo perturbado ao redor da escavação. No contexto geotécnico, a tensão é a força por unidade de área que atua no solo. A tensão efetiva é a parcela realmente suportada pelo esqueleto do solo, controlando sua resistência e sua deformabilidade. Durante a escavação, a remoção do peso das camadas superiores (solo, água e cargas superficiais) reduz a tensão vertical total (TVT) atuante e, consequentemente, a tensão efetiva, provocando alívio de tensões, redistribuição do campo de esforços

O que é a fase do equilíbrio geostático?

Esta fase representa o estado inicial natural do volume do solo considerado, antes de qualquer intervenção humana. Nesta condição, o solo encontra-se em equilíbrio com seu próprio peso, com as tensões totais e efetivas distribuídas de forma estável com a profundidade, e as poropressões governadas exclusivamente pelo regime hidrostático, servindo como referência fundamental para análises numéricas e geotécnicas, pois todas as alterações posteriores, como escavações, carregamentos ou melhoramento do solo, são avaliados em relação a esse equilíbrio inicial.

e aumento das deformações no solo adjacente. A TVT aumenta com a profundidade e representa o estado natural do carregamento do solo local. Durante uma escavação, a remoção dessa sobrecarga reduz a TVT, gerando alívio de tensões e diminuição da tensão efetiva, o que normalmente provoca deformações e instabilidade do solo adjacente. A redistribuição das pressões no solo, provocado pela escavação, impacta seu peso próprio ao redor. Durante o processo de escavação, identificou-se infiltrações pontuais em algumas áreas da contenção da escavação, indicando falha parcial da cortina impermeabilizante, provocando alterações bruscas no campo de fluxos externos do solo, aumentando sua perturbação ao redor. Esta alteração fragiliza as propriedades do solo nesses locais o que, por sua vez, resulta em maior deslocamento horizontal da contenção nessas regiões da escavação.

Análise da perturbação do solo causada pela infiltração durante a escavação

A infiltração através da cortina impermeável, costuma alterar o campo de fluxos ao redor do local. Com base nos dados da poropressão, extraídos dos pontos de medição, ao redor da escavação, conforme mostrado na Figura 10 anterior, os níveis de perturbação do solo ao redor foram calculados e os resultados são apresentados na Figura 13. Quando o ponto de vazamento está a -9 m, os níveis de perturbação do solo aparecem na Figura acima. Mudanças significativas são observadas nas proximidades do ponto de vazamento. A 3 m da escavação, a perturbação do solo ultrapassa o limite, ocasionando forte interferência. A 6 m, o impac-

to é moderado, e a 9 m, o solo quase não é afetado pela infiltração. À medida que aumenta a distância da escavação, o efeito da perturbação causada pela infiltração diminui consideravelmente. No geral, a perturbação do solo causada por infiltração localizada é menor do que aquela decorrente do processo de rebaixamento da água na escavação.

De acordo com os cálculos, o deslocamento horizontal da parede diafragma no ponto de vazamento, aumenta apenas 2% em comparação com outros locais. Assim, assumindo propriedades inalteradas do solo, na simulação numérica, o impacto da infiltração no deslocamento horizontal da parede diafragma é pouco

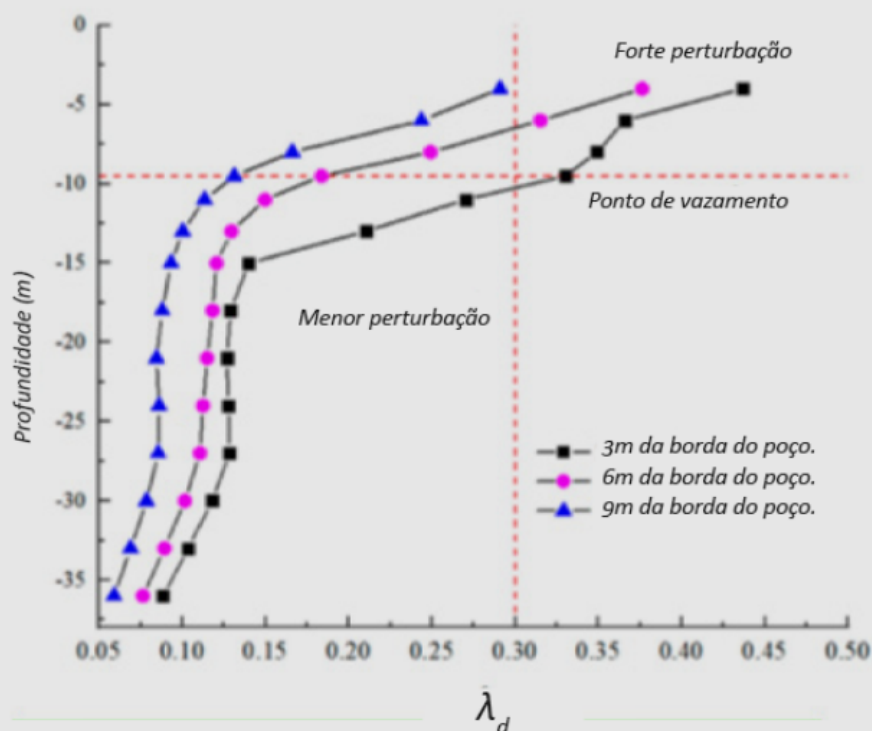


Fig 13 - O gráfico evidencia que o rebaixamento do lençol freático gera gradientes hidráulicos elevados junto à parede diafragma, provocando aumento significativo do índice de perturbação do solo (λ_d), principalmente nas regiões rasas e próximas à escavação. Observa-se que, a cerca de -10m de profundidade, ocorre transição clara da perturbação moderada para a forte, associado ao ponto de vazamento, onde o fluxo concentrado reduz as tensões efetivas e degrada a rigidez do solo. A perturbação é fortemente dependente da distância à escavação, sendo máxima a 3m da borda, o que explica o aumento das deformações e o risco de instabilidade hidráulica local. Em contraste, o melhoramento do solo, com CPR Grouting promoveria a redução da permeabilidade, o controle do fluxo infiltrante e a recomposição do estado de tensões, limitando o crescimento do λ_d e melhorando substancialmente o desempenho hidráulico e mecânico do maciço durante a escavação.

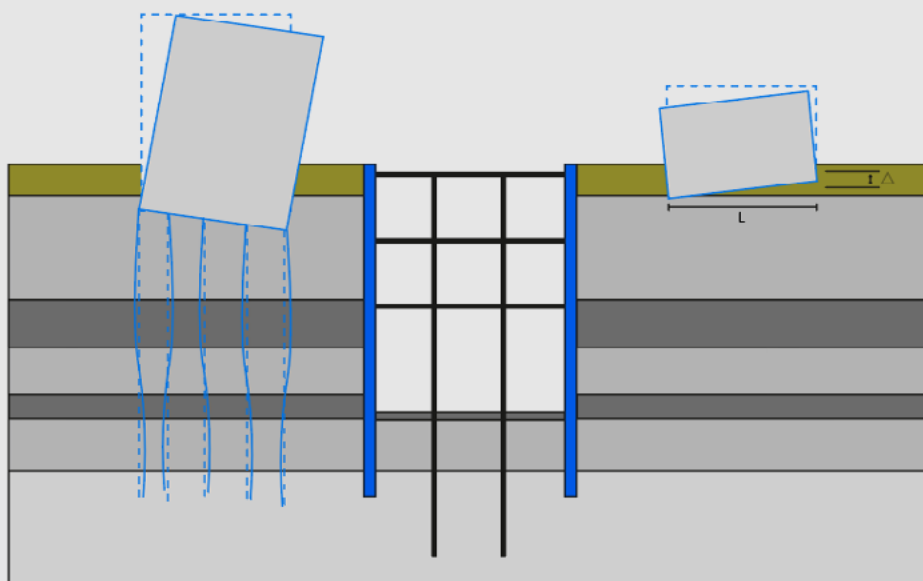


Fig 14 - Escavação em solos moles reduz o confinamento lateral, diminui o K_0 e gera deslocamentos que se propagam até a superfície, afetando áreas além da escavação. O controle dessas deformações depende do aumento da rigidez do maciço. O melhoramento do solo atua diretamente nesse mecanismo, elevando o K_0 , promovendo expansão radial e reduzindo significativamente os deslocamentos, garantindo maior estabilidade e segurança à obra.

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**



significativo. Contudo, na prática, perturbações localizadas causadas pela infiltração costumam aumentar o deslocamento horizontal da estrutura de contenção, principalmente devido ao amolecimento das características do solo, o que resulta em maior deslocamento horizontal na escavação.

Análise da deformação induzida pela escavação com base na perturbação do solo

Para estudar a deformação do poço sob condição de solo perturbado, realizou-se análise da diminuição dos parâmetros geotécnicos das camadas de solo nas regiões afetadas, considerando os diferentes mecanismos de perturbação. Para o caso do distúrbio provocado por rebaixamento do lençol freático e vazamentos, observou-se mudanças significativas nos resultados dos ensaios SPT próximos aos pontos de falha, após o ingresso de água. Segundo os testes, nas regiões levemente afetadas, os parâmetros M-C do solo, especialmente a coesão (c) e o ângulo de atrito interno (ψ), apresentaram redução de 2% a 19%, já em áreas com perturbação severa, a queda variou entre 28% e 37%. Considerando que neste caso o vazamento d'água subterrânea é considerado leve, os parâmetros do solo, em um raio de 3 m ao redor do ponto de vazamento, foram reduzidos em 20%. No caso de perturbação causada pelo rebaixamento do lençol freático, durante a escavação, os parâmetros do solo, em um raio de 6 m da borda da escavação e acima de 6 m de profundidade, foram reduzidos em 25%, enquanto nas camadas mais profundas, onde a interferência é mínima, os parâmetros foram reduzidos em 10%. Com relação à perturbação, provocada pela redistribuição das tensões, durante

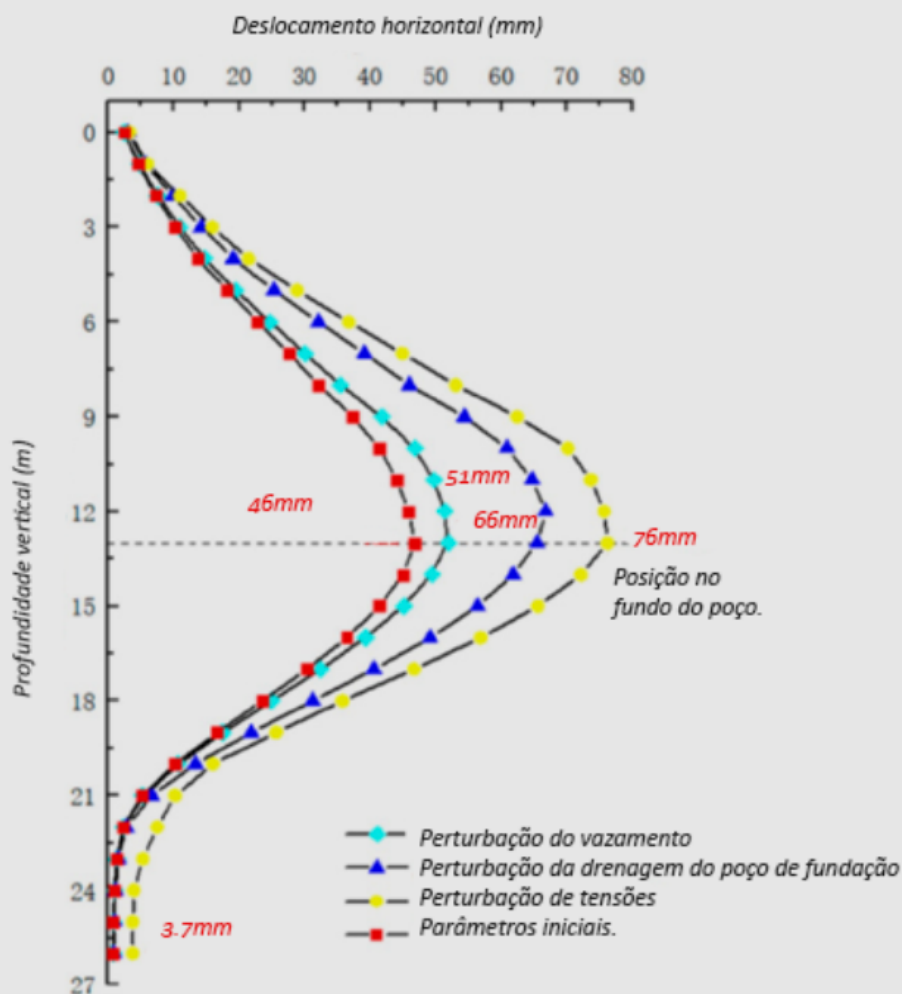


Figura 15 - O gráfico apresenta o deslocamento horizontal (mm) da parede diafragma ao longo da profundidade (m), comparando o modelo numérico e os dados monitorados em campo. Os parâmetros iniciais (preto) é um modelo com parâmetros geotécnicos "de projeto", subestimando fortemente os deslocamentos, com pico da ordem de 46mm, indicando um maciço considerado excessivamente rígido. A fragilização combinada (em vermelho) é um modelo com redução combinada de rigidez e resistência (amolgação, alívio de tensões, redistribuição de poropressões), sendo que o pico atinge ~141 mm, aproximando-se do comportamento real. Os dados do monitoramento (em azul), informa as medições reais em campo. O deslocamento máximo ocorre próximo ao fundo da escavação, com valor da ordem de ~154 mm. Poder-se-á afirmar que o máximo deslocamento concentrado, junto ao fundo da escavação, é típico de escavações profundas em solos moles, onde há perda de confinamento lateral, redução de tensões efetivas e plastificação progressiva do solo adjacente à parede. O bom ajuste entre monitoramento (azul) e o modelo com enfraquecimento combinado (vermelho) mostra que considerar apenas parâmetros iniciais não é suficiente para representar o comportamento real. A diferença entre 46 mm – 150 mm evidencia o papel dominante do amolgação + alívio de tensões + efeitos hidráulicos no desempenho da parede.

a escavação, observou-se redução expressiva no coeficiente de rigidez das amostras da argila siltosa perturbada, enquanto a diminuição dos valores de c e ψ foi relativamente modesta. Considerando a distribuição espacial da perturbação de tensão efetiva (DEP-

TE) na escavação, aplicou-se uma redução de 25% nos parâmetros do solo nas regiões afetadas. Em seguida, analisou-se os resultados do deslocamento da parede diafragma após a escavação.

O que é a distribuição espacial da perturbação das tensões efetivas no maciço de solo devido à escavação (DEP-TE)?

Seu significado físico é que quando se escava, remove-se o peso do solo (alívio de carga), redistribui-se as tensões no maciço, gerando variação de poropressões e provocando deformações (movimentos laterais e verticais). O DEPTE informa "onde" e

"quanto" essas tensões efetivas foram alteradas no solo, com base na equação

$$DEPTE = \frac{\Delta\sigma'}{\sigma_o'}$$

Onde:

- $\Delta\sigma'$ é a variação da tensão efetiva
- σ_o' é a tensão efetiva inicial

Ou seja, é uma medida relativa da perturbação causada pela escavação, permitindo mapear:

1. Zonas altamente perturbadas

- Próxima à escavação
- Grande redução de tensões efetivas
- Possível amolecimento estrutural do solo sensível

2. Zonas moderadamente perturbadas

- Próxima à escavação
- Região intermediária
- Redução parcial de tensões

3. Zonas praticamente intactas

- Região intermediária
- Redução parcial de tensões

A presença de solos moles altamente sensíveis, há redução da tensão efetiva, com grande perda de sua resistência, sendo que sua estrutura colapsa, razão pela qual objetiva-se redução significativa tanto da rigidez do solo (E), quanto de sua coesão (c), havendo pequena alteração do ϕ . Portanto, o DEPTE é uma ferramenta para quantificar e mapear a degradação do estado tensional do solo, permitindo identificar zonas de enfraquecimento induzidas pela escavação. Este conceito é extremamente relevante ... há presença de solos moles, seja em escavações profundas (EEE, canais, rodovias), solos sensíveis e próximos a estruturas existentes, já que informa externamente onde o solo perde rigidez e resistência, tornando relevante a utilização do melhoramento do solo, com CPR Grouting, pois recompõe as tensões efetivas, aumenta extraordinariamente o confinamento, reduzido a zona do DEPTE crítica e controlando as deformações. Ou seja, anula a zona DEPTE, transformando solo perturbado em solo geoenrijecido.

Quando reduzimos apenas os parâmetros do solo, figura 15, na zona de infiltração da escavação, o deslocamento horizontal da parede diafragma aumenta 9,8% acima da superfície da escavação em relação ao seu estado inicial, sem alterar significativamente o local do maior deslocamento da contenção. Quanto maior a perturbação hidromecânica do solo (vazamentos, rebaixamento e redistribuição de tensões), maior o deslocamento lateral da parede diafragma, com pico concentrado próximo ao fundo da escavação. Se imaginarmos um melhoramento do solo, com CPR Grouting, veremos que atua exatamente nesses mecanismos críticos, reduzindo a permeabilidade, o que implica em menor vazamento, aumentando a rigidez e a tensões efetivas, implicando em menor redistribuição das tensões, e limitando/impedindo deslocamento horizontais e recalques associados. Em resumo, o gráfico demonstra que o controle das perturbações do solo é decisivo para a estabilidade da escavação, reforçando tecnicamente a adoção do CPR Grouting como solução preventiva e mitigadora de deslocamentos. Quando reduzimos apenas os parâmetros do solo, na zona de perturbação, devido ao rebaixamento do lençol freático, o deslocamento horizontal total da parede diafragma cresce. Isto ocorre devido à menor perturbação das camadas profundas, causado pelo rebaixamento e a maior perturbação nas camadas superficiais, permitindo que a parede mantenha um bom efeito de ancoragem em profundidade, resul-

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

tando em uma tendência ascendente do deslocamento máximo horizontal. Se considerarmos apenas a perturbação causada pela escavação, o alcance da influência é maior em comparação ao rebaixamento, o que afeta também as camadas mais profundas do solo. Como resultado, o deslocamento total da parede diafragma supera o observado no cenário do rebaixamento do lençol freático e, devido à diminuição dos parâmetros do solo profundo, ocorre um efeito de “pé “ na base da parede, com deslocamento de 3,7 mm no fundo. Ao considerar apenas um cenário de perturbação, o deslocamento da parede mostra desvio significativo em relação aos dados reais monitorados. Por isso, foi realizada uma análise conjunta dos três cenários da perturbação. O

efeito de “pé “ ocorre na base da parede, na interface com o solo mais profundo, estando associado a flexão e rotação da extremidade inferior da parede, que funciona como um “engaste elástico” no solo. Quando o solo profundo é enfraquecido ou perturbado, este apoio perde rigidez, permitindo deslocamentos concentrados na ponta (no caso citado, ~3,7 mm). Trata-se de um efeito estrutural-geotécnico localizado, típico de paredes profundas. O efeito do enfraquecimento do solo mais profundo, decorre da redução das tensões efetivas e da rigidez do solo em profundidade, geralmente causado por rebaixamento do lençol freático, alteração das poropressões ou perturbação do solo durante a escavação. Este enfraquecimento amplifica desloca-

mento globais da parede, principalmente em sua região inferior. É um efeito geotécnico global, que afeta o comportamento geral da parede. Em resumo, o efeito de “pé “ explica onde o deslocamento se concentra (na base). O amolecimento do solo profundo explica por que esse deslocamento aumenta. Quando analisamos isoladamente, pode parecer pequeno, no entanto, combinado, produz desvios relevantes em relação ao monitoramento real. A mensagem principal é que controlar o comportamento do solo profundo (por exemplo, com o melhoramento do solo com CPR Grouting) é fundamental para reduzir tanto o efeito de “pé “ quanto o deslocamento global da parede.

- 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 Engengraut 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.
- Investigation of deformation in irregular excavations and soil disturbance in highly sensitive soft ground regions. XiYan Bao, ZhongQiang Fang, JinYang Lv*, LinTong Lu and JingHan Yuan.
- Bai, S.-Y., Wang, W.-J., Xie, X.-Y., and Zhu, D.-L. (2023). Experimental study on HS-small model parameters of soil considering disturbance and its application in foundation pit engineering. *Yantu Lixue/Rock Soil Mech.* 44 (1), 206–216.
- Bouali, M. F., Karkush, M. O., and Bouassida, M. (2021). Impact of wall movements on the location of passive Earth thrust. *Open Geosci.* 13 (1), 570–581. doi:10.1515/geo-2020-0248.
- Chen, B., Xu, S., Peng, F., Li, Q., and Ye, W. (2011). Experimental study of indices for evaluating small disturbance in underground-crossing construction.
- Yanshilixue Yu Gongcheng Xuebao/Chinese J. Rock Mech. Eng. 30 (Suppl. 1), 2682–2689.
- Deng, Y. S., Guo, Y. J., Zou, B. P., Wang, J. X., Liu, X. T., Chen, Q. Z., et al. (2023).
- Failure analysis and zoning control of water gushing in foundation pit. *Eng. Fail. Anal.* 145, 107029. doi:10.1016/j.eng-failanal.2022.107029.
- Duan, Q., Shi, J., and Wu, D. (2016). Design and realization of foundation pit leakage detection system based on flow-fitting principle.
- Zhongnan Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban). *J. Central South Univ. Sci. Technol.* 47 (12), 4108–4114.



AMOSTRADOR PARA SOLOS TURFOSOS



Este é um dos kits para amostragem de solos turfosos.

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

Soft Soil
Group

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

POROPRESSÃO E O RECALQUE NA ESCAVAÇÃO PROFUNDA EM SOLO MOLE.

Figura 1 - A utilização de contenção metálica com escoramento interno constitui solução tradicional para escavação profunda. No entanto, trata-se de um sistema que atua apenas na contenção dos deslocamentos, sem promover qualquer melhoria nas propriedades geotécnicas do solo. Durante a escavação, ocorre o alívio de tensões e a redistribuição do estado tensional, resultando em deformações laterais inevitáveis, mesmo na presença de escoramentos. Em solos moles, este comportamento pode levar a recalques no entorno e comprometer estruturas vizinhas. A abordagem moderna exige não apenas conter o solo, mas promover o seu geoenrijecimento, garantindo estabilidade global e controle efetivo das deformações. Nesse contexto, técnicas de melhoramento, como o CPR Grouting, passam a atuar diretamente na causa do problema, aumentando a rigidez, a resistência do maciço e reduzindo significativamente os riscos associados à escavação.

Escavação profunda, em solo mole, continua sendo uma das situações mais críticas da engenharia geotécnica urbana, sobretudo pela combinação da redistribuição das tensões, redução da tensão efetiva e elevação dos riscos de recalque e danos em estruturas vizinhas. Diversos estudos internacionais demonstram que a redução da poropressão, induzida pela escavação, associada ao sistema de contenção, exerce papel central no comportamento deformacional do maciço. Procuramos analisar, a partir de dados de campo e monitoramento, como a evolução da poropressão e o recalque, estão diretamente relacionados à estratégia cons-

trutiva adotada, durante escavações profundas em argilas moles. Resultados evidenciam que soluções convencionais, baseadas apenas na contenção estrutural e no rebaixamento do lençol freático, tendem a atuar de forma reativa, com controle limitado das deformações ao longo do tempo. Neste contexto, o melhoramento prévio do solo, capaz de reduzir a poropressão, aumentando a tensão efetiva e elevando a rigidez do maciço, passa a ser elemento decisivo para a estabilidade global da escavação. O melhoramento do solo, com CPR Grouting, insere-se como solução técnica consistente, ao promover a consolidação controlada do solo mole, com redução antecipada da poropressão e a mitigação do recalque induzido pela escava-

ção, atuando de forma complementar e integrada aos sistemas tradicionais de contenção. Procuramos deixar evidente, a necessidade de sairmos de soluções meramente estruturais para abordagens que consideram o comportamento hidro-mecânico do solo, ampliando a segurança, a previsibilidade e o desempenho da escavação profunda em ambiente urbano sensível. Trabalhos em solos, como escavações e fundações profundas, em presença de argilas moles, promovem danos às edificações e estruturas vizinhas. Os custos associados a esses danos, invariavelmente, são elevados. Há, no entanto, estratégias para reduzi-los, e este é o foco principal desta matéria. As principais causas do processo deformacional, relacionado à

execução de escavações profundas, em solos moles, são apresentados na figura 2, caracterizados por:

- Movimentos do solo induzidos por tensões cisalhantes, associadas a deslocamentos horizontais das paredes de contenção.
- Vazamentos que provocam redução da poropressão e recalque por consolidação, especialmente quando a tensão efetiva ultrapassa a pressão de pré-consolidação.
- Efeitos de instalação ou “perturbação” causados pela perfuração para tirantes ou para estacas dentro da escavação.

Ao promover a consolidação profunda do solo, o CPR Grouting cria um maciço geoenrijecido, menos permeável e mais rígido, que corta os caminhos preferenciais da percolação, estabilizando o regime de poropressões e reduzindo, significativamente, o risco de vazamentos e o levantamento em túneis com presença de solos moles. Considerando que as condições hidrogeológicas são semelhantes para escavações, esses resultados indicam que, em uma escavação de 100 m × 100 m, pode ocorrer uma redução significativa da poropressão na base da camada

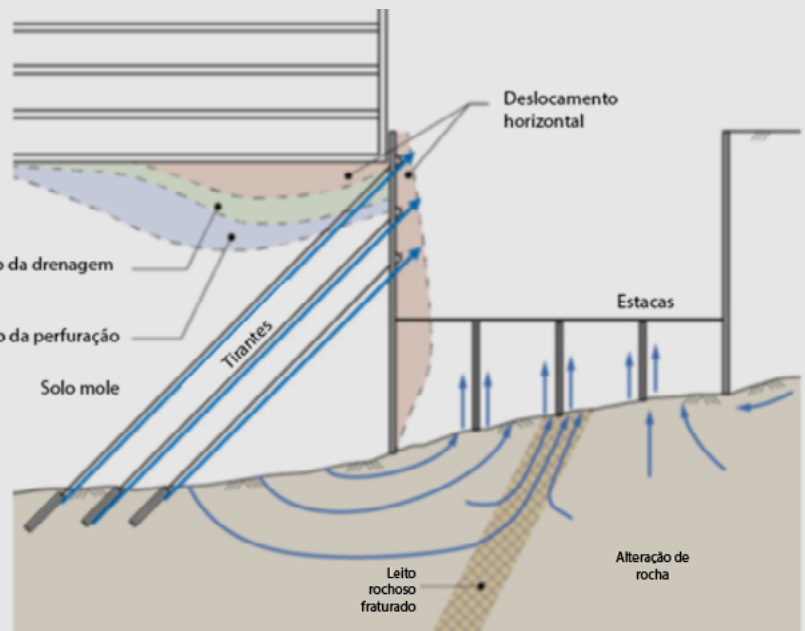


Figura 2 - Representação das principais causas de recalque associadas à escavações profundas em argila mole. A figura apresenta os principais mecanismos responsáveis pelo recalque e deslocamentos horizontais, associados à escavações profundas em solos moles, destacando-se os efeitos que o simples sistema estrutural (paredes, tirantes e estacas) não consegue eliminar sozinho. Os mecanismos críticos apresentados são o efeito da drenagem e do rebaixamento, que provoca redução da poropressão, aumento temporário das tensões efetivas e o adensamento do solo mole, gerando recalque que se propaga para além da escavação. O efeito da perfuração, onde a execução de tirantes, estacas e ancoragens perturbam o solo, principalmente em argilas sensíveis, induzindo o amolgamento, caminhos preferenciais de fluxos e perda local da rigidez. Mesmo com tirantes, o deslocamento horizontal da contenção e suas paredes, tendem a deslocar para dentro da escavação, mobilizando deformações no maciço adjacente, traduzindo-se em recalque superficial. A interação com alteração do leito rochoso cria circuitos hidráulicos profundos, ampliando o raio de influência do rebaixamento, agravando o recalque e a instabilidade no contato solo-alteração. O segundo mecanismo crítico é a limitação da solução, sendo puramente estrutural. A figura deixa claro que tirantes, estacas e paredes controlam a estabilidade global, mas não controlam adequadamente a deformabilidade, o fluxo d'água e a redistribuição das tensões em solos moles.

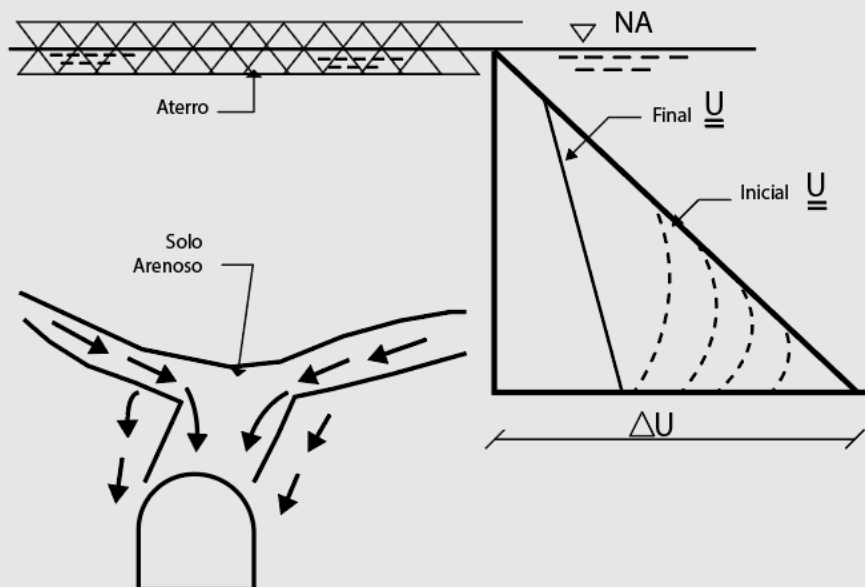


Figura 3 - Vazamento em túneis realizados em rocha, cobertos por depósitos de argila. O túnel escavado, na base da alteração rochosa, quando recoberta por depósitos argilosos e camadas arenosas, estabelece caminho preferencial de percolação ao longo do contato solo-rocha. A areia e o cascalho funcionam como dreno natural, concentrando o fluxo em direção ao túnel, promovendo vazamentos localizados e o aumento da poropressão na base do maciço. A consequência direta é a redução da tensão efetiva no solo sobrejacente, com alívio progressivo durante a escavação, podendo levar ao levantamento do fundo, instabilidade e ao recalque tardio. A estratégia para a utilização do melhoramento do solo, é que o problema não é apenas estrutural, mas hidráulico-geomecânico, já que há necessidade de controlar o fluxo e a rigidez. O melhoramento do solo deve interromper a conectividade hidráulica (reduzir k) entre camadas permeáveis e o túnel, aumentando a rigidez (E) e a tensão efetiva no entorno, limitando deformações e uniformizando o campo de deslocamentos, assim como reduzindo gradientes e concentrações de fluxos.

O terceiro mecanismo crítico é o melhoramento do solo que atua diretamente nos mecanismos apresentados, como o aumento da rigidez (E) do solo mole, redução dos deslocamentos horizontais e do recalque induzido, elevação da resistência não drenada (S_u), com maior estabilidade do maciço durante e após a escavação. Redução da permeabilidade efetiva, diminuição do efeito de drenagem profunda e do raio de influência do rebaixamento. E o controle da perturbação causada por perfurações, onde o solo melhorado passa a se comportar como um meio mais homogêneo e menos sensível. Se analisarmos a figura, sob a ótica do melhoramento do solo, com CPR Grouting, ter-se-á a expansão/ compressão radial do solo, promovendo o pré-adensamento e o confinamento do solo mole antes da escavação. Os campos de deformação e os fluxos indicados em azul seriam fortemente atenuados. O sistema de contenção/ melhoramento, passaria a trabalhar de forma integrada, e não reativa. Em resumo, a figura evidencia que os principais recalques associados à escavações profundas, em solos moles, não decorrem apenas do empuxo lateral mas, sobretudo, da drenagem induzida, da perturbação do solo e da redistribuição profunda das tensões. O melhoramento do solo, ao aumentar a rigidez, a resistência e o controle hidráulico do maciço, atua diretamente na origem desses mecanismos reduzindo, significativamente, deslocamentos e riscos

da argila, fora da área escavada, se o vazamento ultrapassar cerca de 5-10 l/min no total. No entanto, é difícil prever exatamente o quanto a poropressão será reduzida e a extensão lateral da área afetada, pois isso depende da condição hidrogeológica local.

Drenagem na Escavação

As causas da drenagem em uma escavação podem ser variadas e complexas, já que diferentes condições hidrogeológicas influenciam diretamente os efeitos sobre a poropressão. Contudo, os principais cenários de vazamentos em escavações, quando há argila mole, são as seguintes:

- Vazamento através da parede de estacas-prancha
- Vazamento por frestas entre a base da parede de estacas-prancha e o leito da alteração de rocha
- Vazamento por fissuras junto ao leito da alteração de rocha
- Vazamento durante a perfuração para instalação de tirantes ou estacas (pelo tubo de revestimento ou pelo espaço entre o solo e o tubo)

O vazamento pela parede de estacas-prancha ocorre, principalmente, durante o corte das aberturas para a perfuração de tirantes. Além disso, pode haver infiltração por travas mal vedadas ou sem vedação adequada entre os segmentos das estacas. Se a profundidade da escavação atingir o nível da rocha, expondo a superfície rochosa, há grande potencial de vazamento pelas fraturas. Expor a base da parede de estacas-prancha também aumenta esse risco, especialmente quando a superfície da rocha é inclinada e há uma camada de solo permeável sobre ela. A perfuração para instalação de estacas e tirantes pode provocar vazamentos quando realizada abaixo do nível do lençol freático ou em condições artesianas. Esse vazamento pode acontecer tanto pelo espaço entre o tubo de aço instalado e o solo quanto pelo próprio

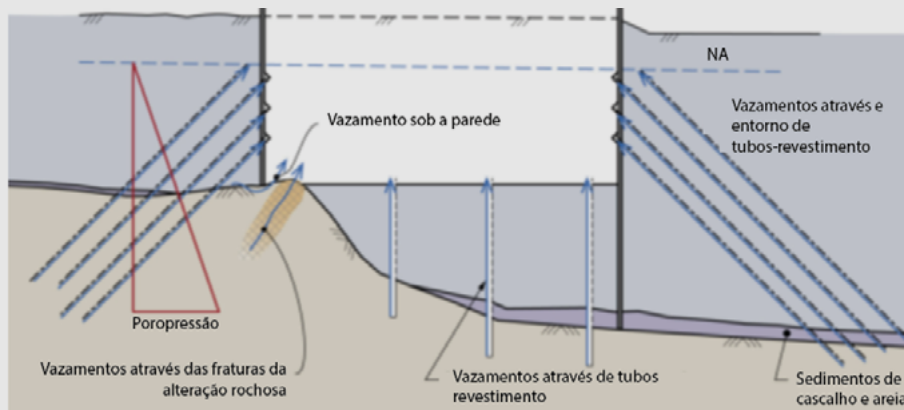


Figura 4: Situação de vazamentos em escavação profunda realizada em solo mole. Sedimentos de areia e cascalho funcionam como meio de redistribuição da poropressão, reservatório intermediário de fluxos e atalho hidráulico sob a escavação. A figura ilustra as principais rotas de percolação da água subterrânea, associadas à escavação profunda executada em solos moles, mesmo quando há sistemas de contenção aparentemente contínuos (parede diafragma, estacas secantes, paredes moldadas, etc.). alguns problemas são, primeiro, vazamentos sob as paredes. Mesmo com a parede cravada ou moldada em profundidade, ocorrem fluxos d'água por baixo da contenção, especialmente quando a parede não atinge uma camada verdadeiramente impermeável, ou há contraste de permeabilidade entre camadas, onde o gradiente hidráulico aumenta devido ao rebaixamento interno. Este mecanismo está diretamente associado ao risco de piping, levantamento hidráulico e instabilidade do fundo da escavação. Segundo, a vazamentos através das fraturas da alteração da rocha, já que quando há rocha fraturada, a contenção apoia-se ou se aproxima da alteração do substrato rochoso e suas fraturas funcionam como condutos preferenciais para fluxos. Mesmo com paredes profundas, a água contorna a escavação pela base rochosa, elevando a poropressão residual no interior. Terceiro, a vazamentos através ou entorno das estacas. Na figura, observa-se claramente que há juntas entre painéis, interfaces solo-concreto ou até imperfeições executivas que criam caminhos verticais de fluxos, permitindo que a água ultrapasse a contenção. Esse é um mecanismo clássico de perda da eficiência hidráulica da parede, muitas vezes subestimados no projeto. Quarto, ao rebaixamento externo e gradientes inclinados. As linhas inclinadas representam o campo de fluxos, mostrando que o rebaixamento interno altera o regime hidráulico externo, sugerindo gradientes oblíquos, que forçam a água a migrar lateralmente e por baixo da escavação. Isto explica por que patologias ocorrem fora do perímetro da obra, afetando edificações vizinhas. Quinto, à distribuição da poropressão. O diagrama, em vermelho, indica que o rebaixamento interno não elimina totalmente a poropressão sob a escavação, permanecendo níveis elevados de poropressão em profundidade. A consequência direta é que haverá redução da tensão efetiva, aumento da deformabilidade e risco de instabilidade global. Em resumo, a contenção, por si só, não controla o regime hidráulico do maciço. O fluxo subterrâneo sempre encontra caminhos alternativos se o solo ao redor e abaixo da escavação não for melhorado. Fica claro, portanto, que reduzir a permeabilidade, aumentar a rigidez do solo e controlar a poropressão, exige melhoramento do solo e não apenas da parede. Solução de melhoramento do solo, com CPR Grouting, densificação e consolida sob e ao redor do solo mole, interrompendo caminhos de fluxos, elevando a tensão efetiva e estabilizando o sistema como um todo, e não apenas o elemento estrutural.

Comparação Técnica – Controle Hidráulico e Estabilidade da Escavação.

Paredes diafragma (solução convencional)

- Atua localmente, como barreira estrutural.
- Não elimina caminhos de percolação sob a parede, em fraturas da rocha ou nas interfaces solo-concreto.
- O rebaixamento interno gera gradientes hidráulicos elevados, mantendo poropressões residuais sob a escavação.
- Resultado típico é a redução da tensão efetiva, maior deformabilidade do solo e risco de levantamento hidráulico, piping e recalques externos.

CPR Grouting (melhoramento do maciço)

- Atua no maciço como um todo, não apenas no elemento de contenção.

- A expansão radial dos bulbos reduz a permeabilidade, aumenta a rigidez e interrompe caminhos preferenciais de fluxo.
- Promove dissipação e controle da poropressão, inclusive sob a base da escavação.
- O Resultado é a elevação da tensão efetiva, maior estabilidade global e eliminação dos deslocamentos internos e externos. Em síntese, enquanto a parede diafragma contém, o CPR Grouting estabiliza. O controle efetivo do regime hidráulico exige o melhoramento do solo, e não apenas a construção da contenção. A consolidação elimina o problema crônico dos vazamentos através dos tubos-revestimento, fechando interfaces permeáveis, eliminando a conectividade hidráulica.

É muito comum haver “risco” na redução da poropressão, devido a vazamentos para dentro da escavação, minimizados com a adoção de medidas mitigatórias. O “risco” não é a redu-

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

● **Conhecimento**

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

● **Comodidade**

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

● **Feedback**

Tire todas as dúvidas com profissionais do mercado, gratuitamente.

Solicite seu Webinar através do número (21)99359-9105

Para mais informações, acesse: softsoilgroup.com.br

Ou envie um e-mail para: atendimento@softsoilgroup.com.br





Figura 5 - Escavações profundas em solos moles impõem alterações significativas no regime de poropressões, podendo induzir instabilidade global e recalques excessivos em estruturas adjacentes. O controle da dissipação das poropressões é determinante para a segurança e o desempenho dessas escavações. A redução controlada da poropressão contribui diretamente para o aumento da tensão efetiva e, consequentemente, da resistência ao cisalhamento do solo. Soluções que promovem o geoenrijecimento prévio do maciço, associadas ao monitoramento geotécnico, permitem limitar deslocamentos e evitar mecanismos progressivos de ruptura. Nesse contexto, o melhoramento do solo se consolida como elemento essencial para garantir estabilidade, controle de recalques e segurança em áreas urbanas sensíveis.

ção da poropressão em si, mas sim da redução não controlada da poropressão, causada por vazamentos para dentro da escavação. Ou seja, quando a poropressão diminuiu, por que há vazamento de água para a escavação, implica que existe caminho hidráulico ativo com falha na parede diafragma, junta mal vedada, interface solo-estrutura permeável. Forma-se um gradiente hidráulico elevado, com fluxo convergente para dentro da escavação e aumento das forças da percolação. Desta forma, podem ocorrer mecanismos indesejáveis, como piping ou erosão interna, arraste de finos, alívio de tensões com desestruturação do solo e o rebaixamento do lençol freático fora da área prevista. O paradoxo aparente é a redução planejada da poropressão, com melhoramento do solo, com CPR Grouting, que é 100% benéfica, pois aumenta a tensão efetiva, a resistência e a estabilidade de todo o contexto. Por outro lado, a redução da poropressão por vazamentos é 100% arriscada, pois indica falha hidráulica do sistema, podendo gerar instabilidade local e global. Portanto, a redução da poropressão é benéfica quando controlada, entretanto, quando ocorre por vazamentos para o interior da escavação, sinaliza presença de fluxos não previstos, gradientes hidráulicos elevados e mecanismos de instabilidade, como erosão interna e piping. Rotineiramente, os métodos mais comuns para mitigar ou atenuar esse “risco” são os seguintes:

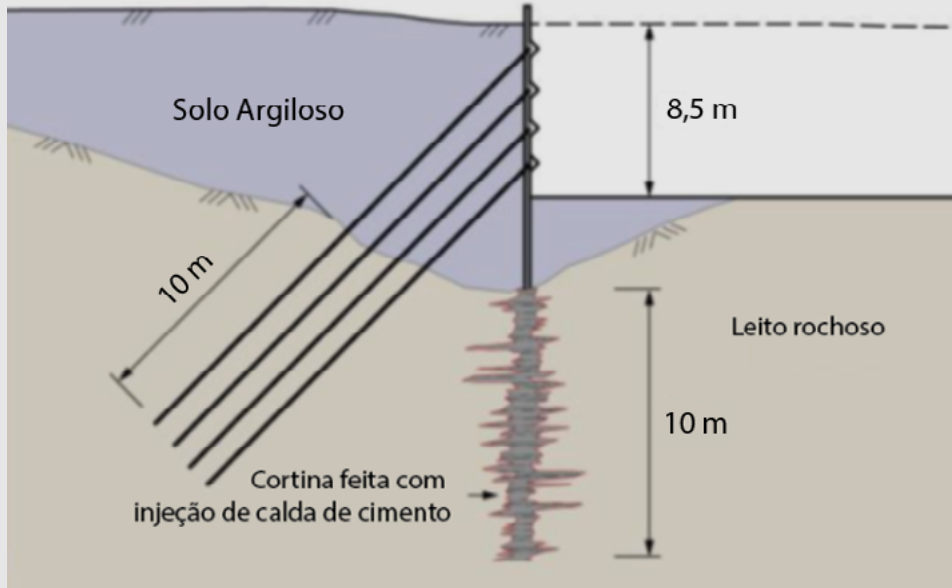


Figura 6 - escavação profunda em solo argiloso, próxima ao leito de alteração da rocha, com controle combinado de estabilidade e percolação por meio de cortina de grout. A geometria e o contexto geotécnico informam uma camada superior com solo argiloso responsável pelos maiores riscos de instabilidade e fluxos. Presença de substrato aparentemente íntegro, localizado a cerca de 10m abaixo. A escavação tem profundidade aproximada de 8,5 m, executada junto a uma estrutura vertical (parede). Há presença de cortina inclinada feita com Grouting e elementos com aproximadamente 10m de comprimento, atravessando o solo argiloso até o leito rochoso. Tem função hidráulica, com redução drástica da permeabilidade e do controle de percolação, com prevenção de piping. E função mecânica, com aumento da rigidez e da resistência ao cisalhamento do maciço tratado. Apresenta cortina vertical estanque, feita com Grouting, com cerca de 10m, conectando a escavação ao leito rochoso, atuando como barreira hidráulica contínua, interceptando linhas de fluxo que tenderiam a passar sob a escavação. O mecanismo de estabilidade global apresenta a combinação cortina inclinada e cortina vertical, com redução do gradiente hidráulico, sob o fundo da escavação, com diminuição das forças de subpressão. Apresenta aumento do fator de segurança global (FS) contra ruptura por levantamento hidráulico e instabilidade basal. A leitura conceitual é que o controle do fluxo é tão crítico quanto o controle resistente. O Grouting não é apenas “impermeabilização”, mas modificação estrutural do maciço, alterando o campo de tensões e deformações. A inclinação dos elementos é estratégica, já que aumenta o comprimento efetivo de ancoragem e a eficiência hidráulica com menor volume do tratamento.

- vedação na interligação das paredes de estacas-prancha, usando materiais de preenchimento tipo poliuretano, polímeros e resinas de pega controlada.
- reparando aberturas nas paredes.
- utilizando obturadores temporários nos tubos para tirantes ou estacas injetadas
- executando vigas de concreto armado ao longo do pé da cortina de estacas-prancha para cobrir e vedar o espaço entre a parede e o topo da rocha
- injeção de calda de cimento ao redor e sob o pé da cortina de estacas-prancha
- grauteamento da rocha no maciço sob a cortina de estacas-prancha e nos furos dos tirantes
- infiltração d'água junto ao leito rochoso

Análise de uma escavação profunda

Trata-se de uma escavação, abrangendo uma área de aproximadamente 50 m × 30 m. O rebaixamento atingiu cerca de 10 m

de profundidade, ficando 8 m abaixo do nível do lençol freático. Utilizou-se paredes de estacas-prancha até o leito rochoso, apoiada por 1 a 5 níveis de tirantes ancorados em solo competente. A fundação do futuro empreendimento combinou fundação direta sobre o leito rochoso e estacas de aço cravadas. A Figura 6 apresenta um corte típico da escavação. O solo da região apresentava camadas de aterro sobre argila mole, normalmente consolidada, até alcançar o leito rochoso. Em parte da escavação, sob o solo argiloso, havia camada permeável de solo silto-arenoso. De modo a minimizar a redução da poropressão, adotou-se medidas para evitar recalque nas estruturas das edificações vizinhas. Uma cortina de cimento foi injetada na alteração de rocha, atingindo 10 metros abaixo do pé da parede de estacas-prancha. Além disso, instalou-se três poços antes do início da escavação. A figura 7, apresenta o monitoramento da poropressão ao nível do leito rochoso, assim como as pressões infiltrantes.

A medição indicou poropressão no leito rochoso, variando entre os níveis +1 e -1 antes do início da escavação. Os dados do monitoramento revelam que as pressões começaram a cair durante a perfuração dos tirantes, nos níveis 3 e 4. Durante este processo, observou-se vazamentos, principalmente entre a parede de estacas-prancha e o revestimento dos tirantes mas, também, através do próprio revestimento. Esse foi o principal motivo para a dissipação da poropressão. Para elevar os níveis de poropressão na alteração da rocha, aumentou-se a pressão da infiltração, o que trouxe algum resultado, enquanto medidas como injeção de cimento e solda foram realizadas para conter fontes visíveis de vazamento. A redução da poropressão ficou limitada a cerca de 1 m. Não se observou, praticamente, qualquer vazamento pelo leito rochoso. A cortina de cimento, sob a parede de contenção, cumpriu sua função de vedar as fraturas que continham água. Um dos fatores principais para limitar a redução da poropressão, provavelmente, foi o extenso monitoramento das atividades no local, além do relatório das infiltrações, com destaque para a importância da vedação também dos pequenos vazamentos. Além disso, a combinação entre injeção de calda e o processo de infiltração mostrou-se eficaz. Para compreen-

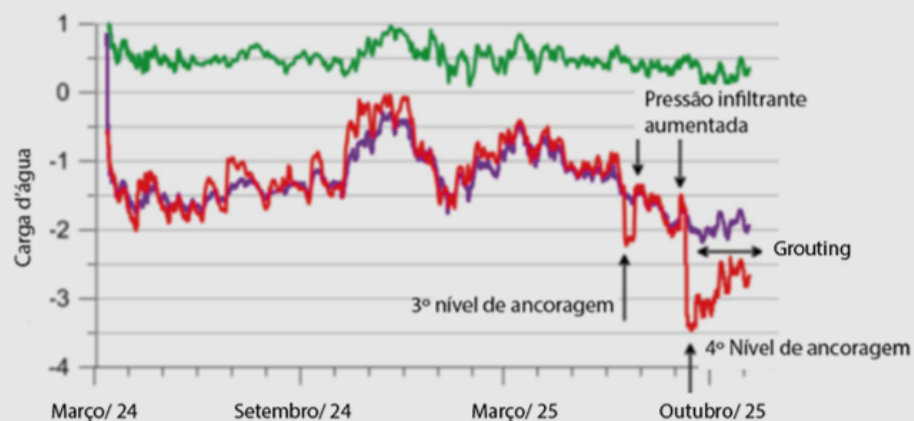


Figura 7 - Níveis monitorados da poropressão e do processo infiltrante. O gráfico evidencia que, ao longo das fases da escavação e da ancoragem, ocorre aumento da infiltração e variações significativas da poropressão, especialmente antes da intervenção com Grouting, refletindo gradientes hidráulicos elevados e maior instabilidade hidráulica do maciço. Nesta solução convencional, o Grouting atua de forma localizada e reativa, reduzindo parcialmente a infiltração após sua execução, mas mantendo oscilações relevantes da carga piezométrica ao longo do tempo. Por outro lado, com o melhoramento do solo, com CPR Grouting, atua-se de forma preventiva e contínua, promovendo a redução global da permeabilidade do solo, a uniformização do campo de poropressões, o controle mais eficiente do fluxo infiltrante, e o aumento simultâneo da rigidez e da tensão efetiva do maciço. Assim, diferentemente do comportamento observado na figura, o CPR Grouting tende a eliminar picos de infiltração e a estabilizar o regime hidráulico desde as fases iniciais da obra, reduzindo o risco de piping, instabilidade do fundo da escavação e perda da eficiência do sistema de ancoragens.

der melhor os efeitos da drenagem na escavação em solo mole, observou-se que mesmo adotando rejuntamento e infiltração de forma sistemática, a redução máxima da poropressão, próxima à escavação, chegou a 20-50% da profundidade da escavação abaixo do nível freático. Além disso, essa redução pode se estender lateralmente por até 300-400 m a partir da escavação. Conclui-se que manter os níveis de poropressão é um desafio, mesmo

quando medidas mitigadoras são implementadas. A drenagem está entre as principais causas de processos de recalque não previsto em projeto. Fica evidente que medidas preventivas devem ser adotadas desde o planejamento inicial até a conclusão da obra. Torna-se fundamental realizar estudos de viabilidade e avaliação da condição do terreno, incluindo análise geotécnica (especialmente a razão de sobreconsolidação) e hidro-



ENGEGRAUT



Duplicação da BR470



Área Portuária de Manaus

INCONFUNDÍVEL

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

CUSTO-BENEFÍCIO

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

GEOENRIJECIMENTO

100% melhoramento de solos tecnologia exclusiva ENGEGRAUT.

geológica (pressões artesianas, análise de sensibilidade à drenagem), para avaliar o risco de redução da poropressão em relação à profundidade de projeto da escavação e à distância até o topo do leito rochoso. Também é necessário considerar o tempo previsto para a obra e o período que a vala da escavação poderá permanecer aberta. Neste momento,

é importante considerar os impactos de obras anteriores e em andamento (movimentações de solo decorrentes de drenagem para túneis, valas de escavação, terraplenagem e aterros, rebaixamento do lençol freático). Além disso, devem ser definidos limites de alerta para redução da poropressão e requisitos para os valores máximos permitidos. O processo

de recalque, incluindo a fluência, deve ser analisado conforme a sensibilidade dos edifícios vizinhos, estruturas e infraestruturas próximas à escavações quanto a possíveis danos. O risco da redução da poropressão, devido a perfuração de tirantes e estacas precisa ser comparado com métodos alternativos.

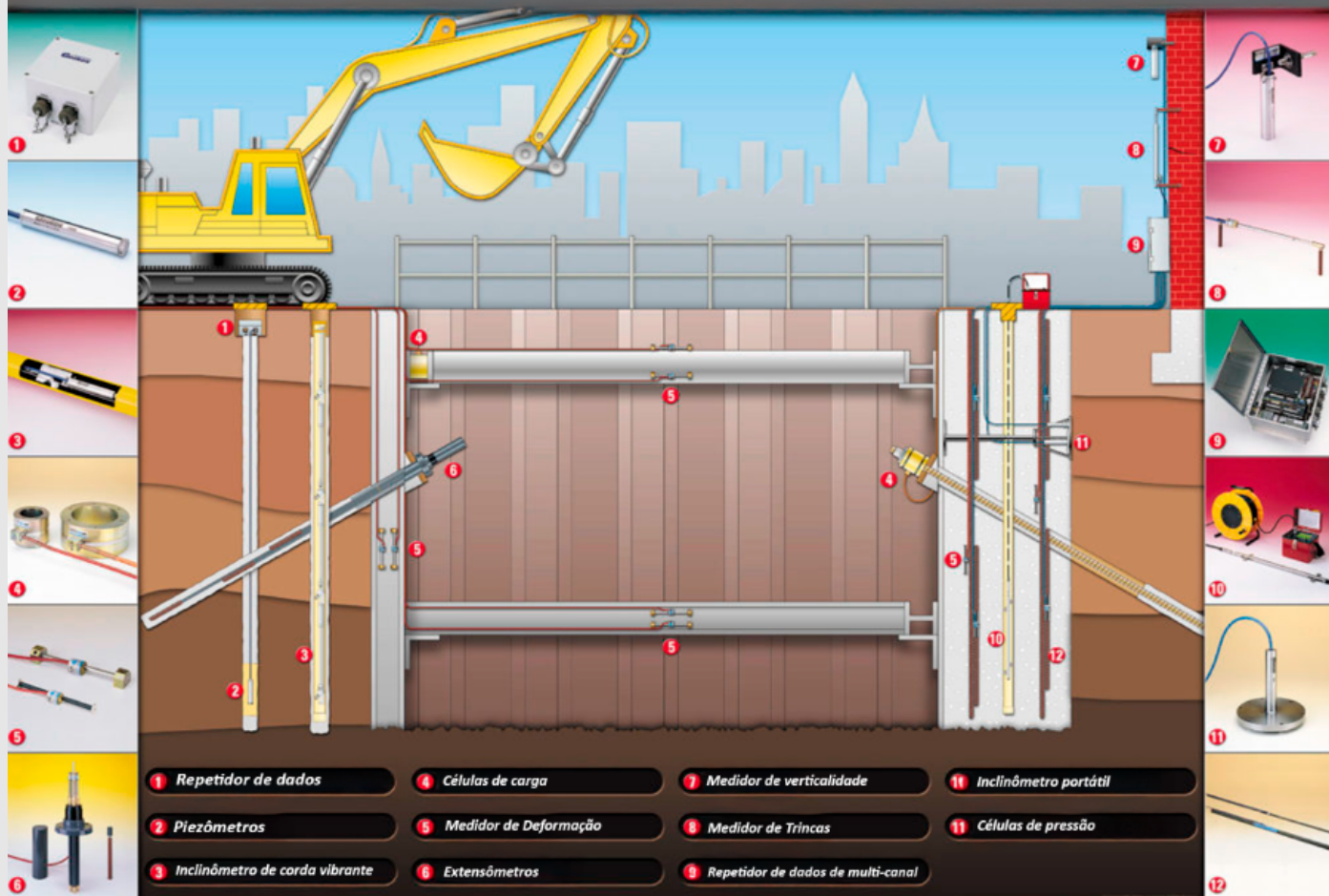
REFERÊNCIAS

- Patricia Karina Tinoco é engenheira geotécnica. Trabalha com melhoramento de solos moles.
- Pore pressure reduction and settlements induced by deep supported excavations in soft clay. J. Langford. NGI, Norway, jenny.langford@ngi.no G. Baardvik, K. Karlsrud. NGI, Norway.
- Braaten, A., Baardvik, G., Vik, A. & Brendbekken, G. (2004). Observed effects on the pore pressure caused by extensive foundation work and deep excavations in clay. Proceedings of the Nordic Geotechnical Conference, Ystad, Sweden.
- Eggen, A. (2015). Erfaringseksempel -bevaring av poretrykk og begrensning av skade. Tekna seminar Grunnvanns senkning og setninger ved dagens urbanisering. 8 oktober 2015.

GEOKON

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



PRESSIÔMETRO

Um ensaio geotécnico completo realizado no campo

Fácil de operar e 100 % viável



ROCTEST

Representante exclusivo no Brasil

+55 21 2718 3968

 **3Geo**
TECNOLOGIA

vendas@3geotecnologia.com

www.3geotecnologia.com

GOSTARIA DE SABER MAIS SOBRE O MELHORAMENTO DO SOLO, COM CPR GROUTING, EM OBRAS DE ESCAVAÇÃO PROFUNDA, QUANDO HÁ PRESENÇA DE SOLOS MOLES, COMPARANDO-O COM O SISTEMA TRADICIONAL COM CONTENÇÕES DIVERSAS.

Figura 1 - Escavações profundas em ambientes urbanos exige controle rigoroso deformacional e da redistribuição de tensões no maciço. Observa-se, na imagem, a presença de sistemas de contenção provisória associados a intensa atividade construtiva, evidenciando o risco de deslocamentos laterais e recalques indesejados. Em solos moles, tais efeitos são amplificados pela baixa rigidez e elevada compressibilidade, podendo comprometer estruturas adjacentes. Nesse contexto, o melhoramento prévio do solo, como o CPR Grouting, atua diretamente no aumento da rigidez e na redução das poropressões, proporcionando maior estabilidade global. A técnica promove um comportamento mais homogêneo do maciço, reduzindo deslocamentos e garantindo segurança durante todas as etapas da escavação. Trata-se de uma solução que integra desempenho geotécnico e viabilidade construtiva em cenários de alta complexidade.

No sistema tradicional, com estacas-prancha, parede diafragma, cortinas atirantadas ou escoradas, o solo mole permanece essencialmente inalterado. A estabilidade global e os deslocamentos passam a depender quase exclusivamente da rigidez da contenção e do controle de poropressões. Do ponto de vista dos parâmetros geotécnicos, podemos ter $OCR \sim 1$ (solo normalmente adensado), implicando em alta compressibilidade e grande sensibilidade a alívios de tensões e a presença de k_0 elevado, significando grandes tensões horizontais iniciais, rapidamente redistribuídas durante a

escavação. A presença de solo mole, através ou abaixo da contenção, significa baixa resistência (s_u ou c' baixas), promovendo ou desenvolvendo (E), que incorre em deslocamentos superfícies críticas na massa mole, laterais significativos, recalques à



Figura 2 - Escavações em solos de baixa consistência, sem um adequado processo de enrijecimento prévio, expõe o maciço a deformações excessivas e instabilidade localizada. A ausência de controle da rigidez e da poropressão favorece deslocamentos laterais e risco de colapso progressivo das paredes. Nesta condição, intervenções pontuais tornam-se insuficientes para garantir a segurança global da escavação. O melhoramento do solo, com CPR Grouting, promove o aumento da resistência não drenada e a redução das deformações, permitindo uma escavação mais estável e controlada. Trata-se de uma solução que atua diretamente no comportamento do solo, e não apenas na contenção estrutural.

A importância da razão de sobreadensamento (OCR)

A razão de sobreadensamento (OCR – Overconsolidation Ratio) é um parâmetro geotécnico fundamental, definido pela relação entre a tensão de pré-adensamento (máxima tensão que o solo já sofreu) e a tensão vertical efetiva atual, indicando que o solo é normalmente adensado ($OCR = 1$) ou sobreconsolidado ($OCR > 1$), influenciando a previsão do recalque e a resistência ao cisalhamento em projetos de fundações e estabilidade de taludes. Trata-se de uma medida da “memória” das tensões do solo. Um valor de OCR alto (geralmente > 2 ou 4) indica que o solo já foi submetido a cargas superiores à atual, sendo mais rígido e menos suscetível a recalques. É essencial para distinguir solos moles (normalmente

adensados) de solos rígidos (sobreconsolidados), impactando o projeto de escavação profunda. Pode ser obtido através de ensaios de laboratório (edômetro/adensamento) ou campo (como o ensaio de palheta Vane Test ou CPT – Cone Penetration Test). Sua classificação é a seguinte:

- Normalmente consolidado (NC): $OCR \sim 1$
- Levemente sobreconsolidado (LOC): OCR entre 1,3 e 4
- Fortemente sobreconsolidado (HOC): $OCR > 10$

montante e risco elevado para estruturas vizinhas. Portanto, no sistema tradicional, a obra depende fortemente de escoramentos múltiplos, tirantes, rebaixamento agressivo do NA e instrumentação intensa, pois o solo não colabora” com a estabilidade. Ao abordarmos uma escava-

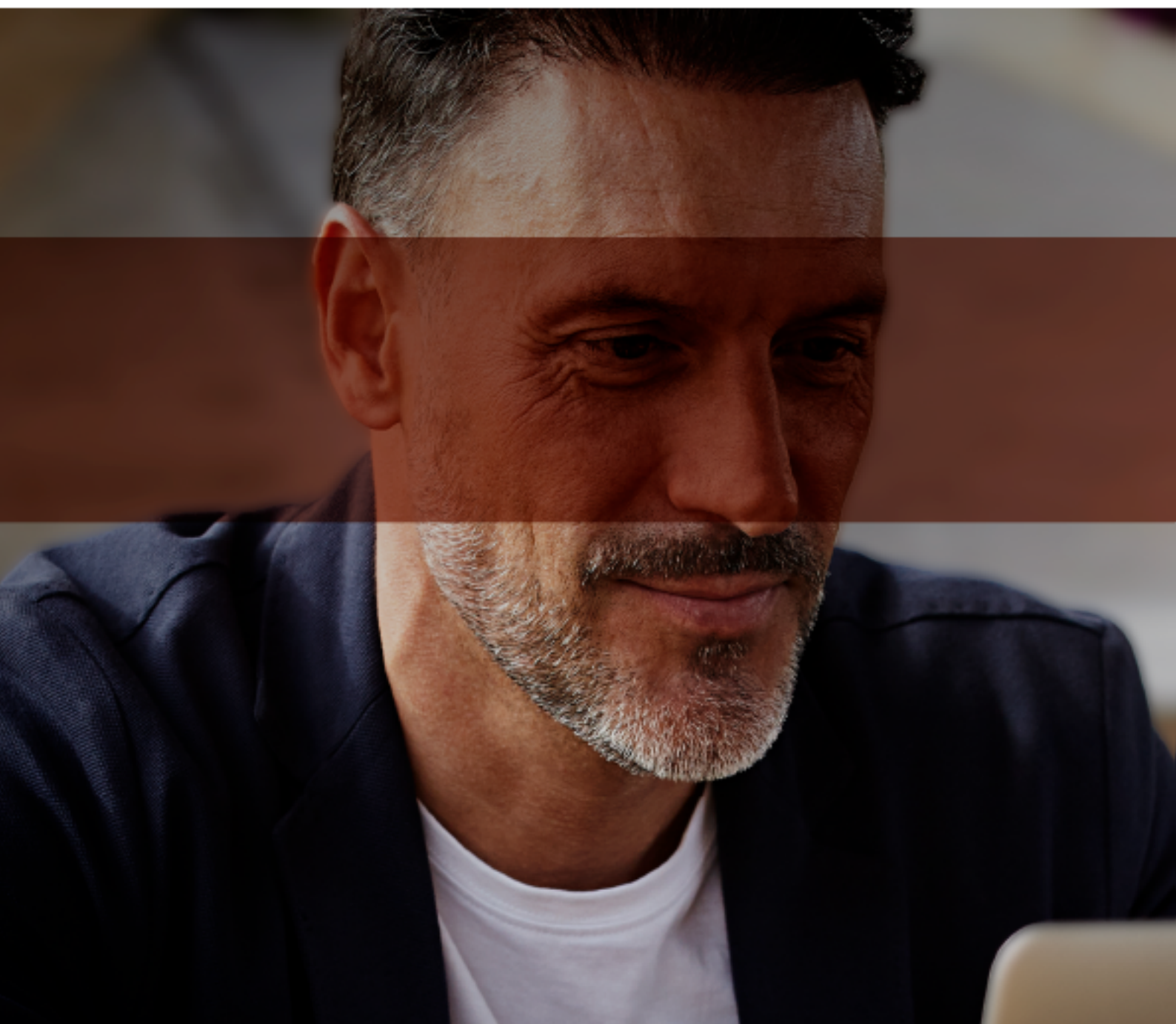
ção profunda com melhoramento do solo, modifica-se o estado do solo, fazendo com que o foco deixe de ser apenas “segurar o solo”, passando a se alterar o estado tensional e mecânico do maciço antes e/ ou durante a escavação. Em termos geotécnicos, o OPR efetivo aumenta, sendo que o processo de compressão radial imposto pelo CPR Grouting, via expansão de cavidades, pelo bombeamento de grout seco, gera um estado equivalente à sobreconsolidação induzida, aumentando a resistência mobilizável e reduzindo/ eliminando o estado deformacional. Promove-se uma redistribuição favorável do K_0 , onde as tensões horizontais tornam-se mais estáveis e menos sensíveis ao alívio imposto pela escavação. Há um aumento significativo da resistência (c' ou su), onde o solo geoenrijecido passa a atuar como zona resistente, desviando ou aprofundando a superfície de ruptura. Há um aumento expressivo da rigidez (E), com redução direta de deslocamentos laterais

Contaminação de solo?

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

Confie em quem tem experiência.





- :: 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.

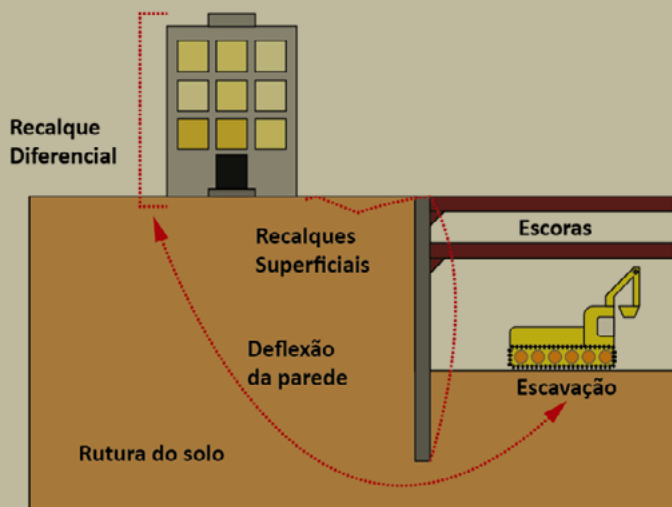


iBSM INSTITUTO
BRASILEIRO
DO SOLO MOLE

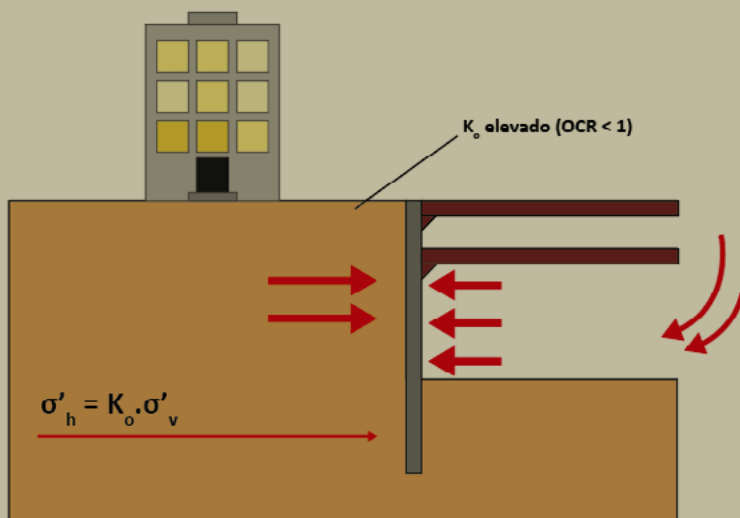
ACESSE SOFTSOILBRAZILIANGROUP.COM E ESCOLHA
A EDIÇÃO IDEAL PARA SUA PESQUISA.



ESCAVAÇÃO CONTROLADA PERTO DE EDIFICAÇÕES.

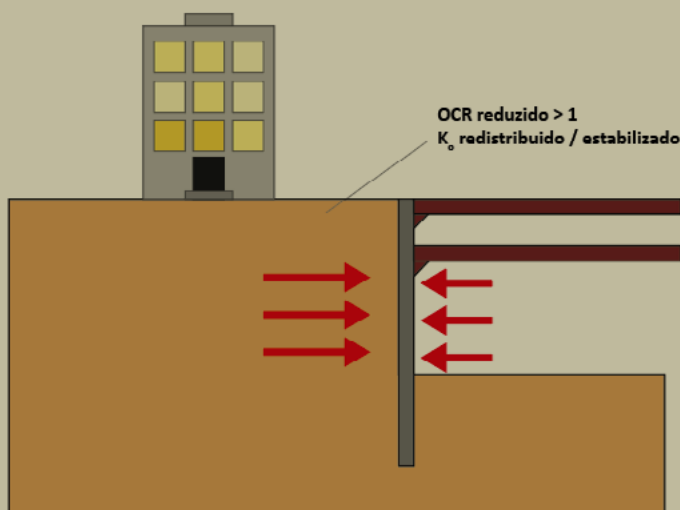


Sem melhoramento do solo



K_0 elevado e baixa rigidez
Grandes deslocamentos laterais

Com melhoramento do solo



K_0 Estabilizado e maior rigidez
Controle deformacional do maciço

O COEFICIENTE DE EMPUXO EM REPOUSO (K_0)

É um parâmetro fundamental na geotecnia e mecânica dos solos, definido como a razão entre a tensão horizontal efetiva (σ'_h) e a tensão vertical efetiva (σ'_v) do solo que não sofreu deformações laterais (ou seja, deformação radial nula), representando o estado de tensão "natural" do solo antes de qualquer escavação ou movimentação. Sua definição matemática é a expressão:

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$$

No estado de repouso, assume-se que o solo está em repouso absoluto sem deformação lateral ($E_{hh} = 0$). O K_0 é essencial para o dimensionamento de muros de arrimo, escavações, túneis e fundações profundas onde a deformação do solo é contida. Como valores típicos, varia geralmente entre 0,4 e 0,5 para solos normalmente adensados, mas pode ser próximo de 1,0 ou superior em argilas pré-adensadas (OCR alto). Para questões de estimativa, o cálculo do K_0 pode ser determinado em laboratório com ensaios especiais (como a célula K_0 ou ensaios triaxiais) ou estimado por fórmulas empíricas.

Solos normalmente adensados:

$$K_0 = 1 - \sin(\phi')$$

Onde ϕ' é o ângulo de atrito efetivo do solo.

Solos pré adensados:

$$K_0 = (1 - \sin(\phi')) \cdot OCR^{\sin(\phi')}$$

Onde OCR é a taxa de sobreconsolidação.

- K_0 (repouso) o muro não se move.
- K_a (ativo) o muro se afasta do solo (menor pressão)
- K_p (passivo), o muro empurra o solo (maior pressão)

O uso do K_0 correto é crucial para evitar fissuração ou falha em estruturas de contenção, garantindo que o solo não exerça mais pressão do que o calculado.

O resultado deixa de ser um problema dominado pela contenção, passando a ser um problema de estabilidade do maciço melhorado, com menor demanda estrutural, menor número de escoras e tirantes, maior previsibilidade do comportamento deformável e maior segurança em áreas urbanas sensíveis. Em termos de parâmetros geotécnicos, poder-se-á compará-los com a planilha ao lado. Em escavações profundas, com presença de solos moles, o uso exclusivo de contenções tradicionais não altera os parâmetros fundamentais do solo (OCR, K_0 , resistência e rigidez), limitando-se a reagir aos deslocamentos induzidos pela escavação. O melhoramento do solo com o CPR Grouting, por sua vez, atua diretamente nesses parâmetros, promovendo mudança real no comportamento do maciço, o que se traduz em maior estabilidade global, menores deformações e maior segurança construtiva. Contenção profunda tem a ver com movimentos de massa em solos moles, e são governados pelos mesmos parâmetros fundamentais, ou seja, o K_0 , OCR, resistência e rigidez. Se considerarmos uma escavação com formação de um talude em condição natural, seu estado geotécnico será OCR ~ 1 (solo normalmente adensado), K_0 elevado, com tensões horizontais "travadas" no maciço, baixa rigidez (E) e baixa resistência mobilizável. O mecanismo do movimento de massa terá um incremento de carga (aterro, tráfego, chuva) ou perda de confinamento, redistribuição rápida de tensões, redução de resistência ao cisalhamento e a formação de superfície de ruptura rasa ou profunda. A manifestação típica são escorregamentos progressivos, recalque diferencial e deformações lentas que evoluem para ruptura. Ou seja, o K_0 elevado mantém o maciço "carregado lateralmente". Quando ocorre qualquer perturbação, o solo não tem ri-

gidez nem reserva resistente para se reorganizar. Se, por outro lado, executarmos um melhoramento do solo na área a ser escavada, ter-se-á um solo sobreconsolidado. O estado geotécnico após o CPR Grouting será um OCR induzido > 1 , um K_0 redistribuído e estabilizado, um aumento expressivo da rigidez (E) e resistência cisalhante. Ter-se-á um novo comportamento do maciço, com o solo melhorado absorvendo tensões internamente,

ocorrendo redução da deformabilidade global, a superfície potencial de ruptura é desviada, aprofundada ou deixa de se formar. Ou seja, o talude passa a trabalhar como maciço estável, havendo movimentos residuais muito pequenos ou insignificantes e um controle efetivo do recalque e deslocamento. Em resumo, o melhoramento do solo transforma um problema de instabilidade em um de equilíbrio interno do maciço.

COMPARAÇÃO DIRETA – LEITURA PELOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Aspecto	Sistema tradicional	CPR Grouting
OCR	≈ 1 (NC)	OCR induzido > 1
K_0	Elevado e sensível à escavação	Mais estável após o melhoramento (readequação) do solo
Resistência	Baixa (solo governa ruptura)	Elevada (solo readequado governa)
Rigidez	Baixa	Alta
Deslocamentos	Elevados	Fortemente reduzidos
Dependência da contenção	Muito alta	Reduzida
Risco para vizinhos	Alto	Muito menor

REFERÊNCIAS

- Karlsrud, K., Langford, J., & Lande E. J., Baardvik G. (2015). Avaliação de danos e deformações relacionadas à execução de ancoragens e estacas escavadas em valas de fundação.
- Relatório parcial 1+2.4 do projeto BegrensSkade.
- Lande, E. J. (2015). Testes de campo com perfuração de ancoragens. Documentação dos efeitos da perfuração em argila.
- Relatório parcial 4.1 do projeto BegrensSkade.
- Johansen, T., Haugen, T. & Brudeseth, Å. Havneleret – vala de construção selada em bacia portuária aterrada NFF. Dias de Geotecnia, Mecânica de Rochas e Detonação em Túnel 2008. p. 271 – 279.
- Peck, P. B. (1969). Escavações profundas e tunelamento em solo macio. Anais da 7ª Conf. Int. de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Cidade do México. Volume de Estado da Arte, pp. 225-290.
- Statens vegvesen, Diretoria de Rodovias. Relatório nº 326. Relatório de experiência em valas de fundação. E18 entre o Túnel Festning e o Túnel Ekeberg. Empreendimento Havneleret. Data: 12.06.2014.
- Veslegard, G., Lande E. J. & Simonsen A. (2015). Melhoria e desenvolvimento contínuo de ancoragens e estacas escavadas. Métodos, execução e documentação. Relatório parcial 3.4 do projeto BegrensSkade.
- Xu, W., Li, J.-Q., and Duan, C.-J. (2010). Sensitivity analysis of a deep foundation pit with special plane shape to soil parameters. Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese J.
- Geotechnical Eng. 32 (Suppl. 1), 173–176.

ESCAVAÇÃO EM SOLO MOLE. O RISCO NÃO ESTÁ NA RUTURA E, SIM, NA DEFORMAÇÃO.

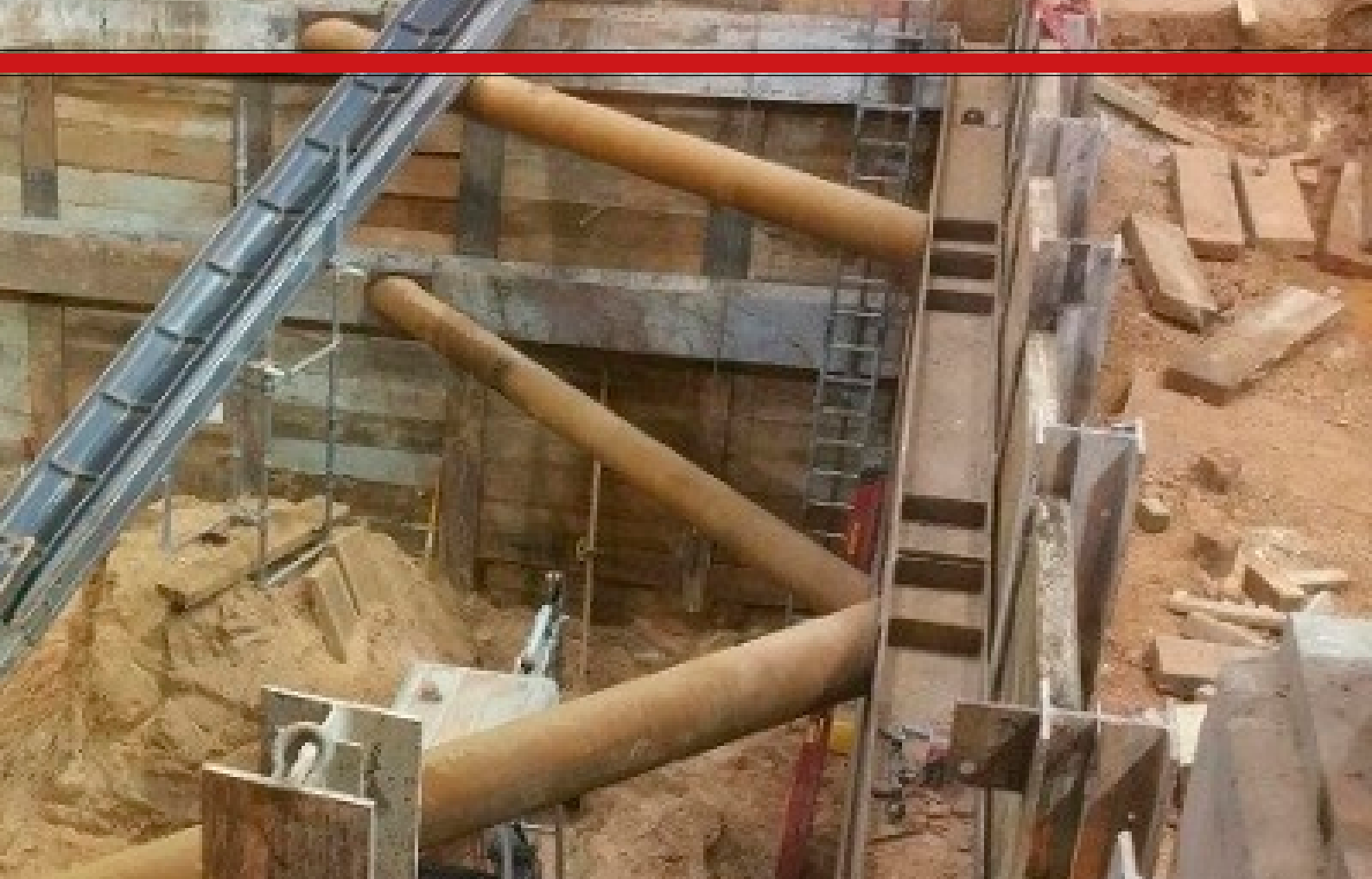
Figura 1 - Escavação profunda com presença de estruturas de contenção e elementos inclinados de transferência de carga, típicos de situações onde há necessidade de redistribuição de esforços e controle de deformações. Em cenários como este, a interação solo-estrutura é crítica, especialmente quando há heterogeneidade de rigidez e risco de deslocamentos diferenciais. Soluções convencionais tendem a atuar apenas como elementos estruturais, sem tratar o maciço de fundação como um todo. O CPR Grouting, ao promover a compactação radial do solo e aumento do estado de tensões efetivas, atua diretamente na melhoria da rigidez do maciço, reduzindo deslocamentos e garantindo maior uniformidade de comportamento. Essa abordagem transforma o solo em elemento estrutural ativo, elevando a segurança global e a durabilidade da obra.

Serviços típicos de escavação, referem-se à execução de estações elevatórias e unidades de tratamento de esgoto, implantadas em áreas urbanas, caracterizadas pela presença de solos moles saturados, nível d'água elevado e elevada sensibilidade à deformações induzidas por escavações profundas. A profundidade da escavação varia tipicamente entre 10 e 15 m, frequentemente executadas em proximidade imediata à edificações existentes, redes enterradas e vias urbanas. Nesta condição, soluções convencionais de contenção com múltiplos níveis de escoramento, rebaixamento agressivo do lençol freático ou cortinas contínuas apresentam elevado custo, maior risco construtivo e impactos significativos no entorno. A caracterização geotécnica simplificada informa que o subsolo tem comportamento por camadas superficiais, de aterros heterogêneos, espessa sequência de argilas moles a muito moles, normalmente

com baixa resistência não drenada (s_u), baixa rigidez inicial (E_i), elevada compressibilidade, nível d'água freático próximo à superfície e camadas mais competentes apenas em maiores profundidades, sem participação direta no comportamento da escavação. A razão entre a profundidade da camada mole e a da escavação é elevada, o que torna o problema governado essencialmente pelo comportamento deformacional do solo mole. A estratégia de solução, com melhoramento do solo com CPR Grouting, é realizada ao redor da futura escavação. O tratamento é disposto em forma de anel de confinamento, envolvendo o perímetro da escavação, com verticais executadas até profundidades inferiores à cota final da escavação, promovendo aumento da resistência não drenada do solo, elevação significativa da rigidez do maciço tratado, redução da permeabilidade do conjunto solo-grout e a consolidação radial do solo mole adjacente. Este sistema cria um volume de solo melhorado estruturalmente contínuo, que passa a atuar como meio semi-rígido de contenção e controle hidráulico. A sequência cons-

trutiva adotada tem a seguinte sequência:

- Investigação geotécnica detalhada, incluindo SPT e, quando possível, ensaios pressiométricos para definição de parâmetros iniciais de resistência e rigidez;
- Execução das verticais de CPR Grouting, entorno da escavação, com espaçamentos e diâmetros definidos em função do grau de confinamento desejado;
- Formação de anel consolidado, com sobreposição das zonas de influência dos bulbos;
- Aguardo do ganho de resistência e rigidez do sistema solo-grout;
- Início da escavação em etapas, geralmente sem necessidade de escoramento interno ou com escoramentos mínimos;
- Execução da estrutura definitiva da estação (poços, caixas, lajes de fundo);



- Finalização da escavação sem rebaixamento permanente do lençol freático.

Do ponto de vista mecânico, o melhoramento do solo de fundação, com CPR Grouting, não atua como incorporação de elementos de transferência de carga, mas como um processo de consolidação forçada do solo mole, utilizando-o como estrutura suporte de contenção necessária, promovendo redução/ eliminação das deformações laterais induzidas pela escavação, diminuição da convergência do maciço, controle do recalque do entorno e a estabilização do fundo da escavação contra levantamento hidráulico. O comportamento do sistema passa a ser governado por meio composto solo-graú, com propriedades médias bem superiores às do solo natural e parâmetros específicos à necessidade do projeto. De forma análoga aos modelos probabilísticos apresentados na literatura, os principais parâmetros geotécnicos (s_u , E_i , E_m) podem ser tratados como variáveis aleatórias, re-

fletindo a variabilidade natural do solo mole. A aplicação do melhoramento do solo de fundação, com CPR Grouting, reduz significativamente o coeficiente de variação dos parâmetros mecânicos, a probabilidade de ocorrência de deslocamentos admissíveis e o risco de perda de serventia de edificações adjacentes. Do ponto de vista da confiabilidade, o melhoramento do solo atua tanto aumentando a média dos parâmetros resistentes quanto reduzindo sua dispersão, resultando em um ganho global de segurança e desempenho. Em obras executadas em diversas cidades como Rio de Janeiro e Recife, observa-se, de forma recorrente, escavações estáveis até 15 m sem escoramento interno, ausência de fluxo significativo de água para o interior da escavação, deslocamentos laterais e recalques praticamente desprezíveis no entorno, além de maior previsibilidade construtiva e redução do risco operacional. Demonstra-se, portanto, que o CPR Grouting é uma solução tecnicamente eficiente e economicamente competitiva para escavações profundas em solos moles

saturados, especialmente em obras de saneamento urbano. A técnica permite transformar um problema crítico de estabilidade e controle hidráulico em um processo construtivamente simples, robusto e com elevado grau de confiabilidade, alinhando-se aos conceitos modernos de análise deformacional e desempenho em engenharia geotécnica.



Figura 2 - O problema não é apenas escavar. É garantir que o solo permaneça estável durante todo o processo.

Uma estação elevatória Em Recife, PE

A geometria e o cenário são de um grande poço/ caixa para uma estação elevatória de esgoto em área urbana, com profundidade máxima de escavação de $H = 13\text{m}$, largura equivalente da escavação $B = 22\text{ m}$ (retangular), tendo estrutura de contenção mínima, sem múltiplas linhas de escoras (objetivo do melhoramento do solo com CPR é reduzir demanda de escoramento). A solução implica em um anel de CPR Grouting ao redor do perímetro, com verticais para atravessar totalmente a camada mole e “ancorar” em camada arenosa subjacente, além de reduzir/ eliminar fluxos d’água. A camada predominante é de argila mole saturada (baixa plasticidade a média) e NA alto. A camada competente profunda não controla o processo de deformação, com efeito desprezível no comportamento da escavação.

Para a avaliação do desempenho deformacional da escavação e da sua confiabilidade, algumas propriedades do solo são expressas na forma de variáveis normalizadas, o que permite reduzir efeitos de escala, facilitar comparações entre obras distintas e incorporar a variabilidade natural do solo mole de forma consistente.

Resistência normalizada do solo (S_u/σ'_v)

A resistência normalizada é definida como a razão entre a resistência não drenada do solo (s_u) e a tensão vertical efetiva (σ'_v) no ponto considerado, s_u/σ'_v . Esta variável adimensional representa o nível relativo de resistência do solo, em relação ao estado de tensões atuante, sendo amplamente utilizada na caracterização de argilas moles e levemente sobreadensadas. Valores baixos de s_u/σ'_v indicam solos mais

frágeis e altamente deformáveis, típicos de depósitos aluvionares recentes, enquanto valores mais elevados refletem solos mais estruturados ou com algum grau de sobreadensamento. No contexto de escavações profundas, a resistência normalizada exerce papel fundamental no controle das deformações laterais e da estabilidade global do maciço, uma vez que governa a capacidade do solo de mobilizar resistência sob condição não drenada. O CPR Grouting atua diretamente sobre essa variável, promovendo um aumento efetivo da resistência mobilizável do solo melhorado, ao induzir consolidação radial e incremento do estado de tensões confinantes.

Rigidez normalizada do solo (E_i/S_u)

A rigidez normalizada é definida como a razão entre o módulo de rigidez inicial do solo (E_i) e a resistência não drenada (s_u):

$$\frac{E_i}{S_u}$$

Esta razão adimensional expressa a capacidade do solo de resistir a deformações para um dado nível de resistência, sendo particularmente relevante em análises de deslocamentos induzidos por escavações. Em solos moles, a rigidez apresenta elevada variabilidade espacial e dependência do nível de tensões, o que torna a utilização de valores absolutos de módulo elástico pouco representativa. A normalização por s_u permite capturar, de forma mais realista, o comportamento deformacional do solo. Valores baixos de E_i/S_u estão associados a solos altamente compressíveis, nos quais pequenas variações de tensão resultam em deformações significativas. Por outro lado, valores elevados indicam um solo mais rígido, com menor propensão a deslocamentos laterais e recalques. A aplicação do CPR Grouting resulta em um aumento significativo da rigidez equivalente do maciço, uma vez que o solo consolidado passa a se comportar como um meio composto solo-graut, com resposta deformacional substancialmente mais rígida.



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



1.014.250 - Extrator Shelby de Bancada



1.055.001 - Prensa de Adensamento



1.022.250 - Prensa CBR / Marshall Digital Microprocessada



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



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



4.100.300 - LWD "Light Wheight Deflectometer"



4.100.035 - Penetrômetro Dinâmico Eletrônico para Solos Panda

Rua Conselheiro Carrão, nº 275
Bela Vista - SP - Brasil - CEP 01328-000
Tel: (11) 3289-0211
www.solotest.com | solotest@solotest.com

A EVOLUÇÃO DOS ENSAIOS GEOTÉCNICOS CHEGOU.

Equipamento Automático de
Cisalhamento & Adensamento



tendência do modelo

A tendência do modelo (Model Bias Factor – BF) é uma variável aleatória que representa a diferença sistemática entre a previsão do modelo analítico ou empírico e o comportamento real observado em campo. Em outras palavras, o BF incorpora simplificações inerentes ao modelo teórico, incertezas na representação do comportamento real do solo e limitações na calibração do modelo com dados experimentais. Um valor médio de $BF = 1.0$ indica que, em média, o modelo é não tendencioso, ou seja, nem superestima nem subestima deformações. No entanto, a variabilidade associada ao BF pode ser significativa, refletindo a incerteza global do modelo. Diferentemente das variáveis do solo, a tendência do modelo não representa uma propriedade física do maciço, mas sim a incerteza associada à própria ferramenta de previsão utilizada na análise. Na avaliação da confiabilidade, o BF é tratado como uma variável aleatória independente, e sua consideração conduz a estimativas mais realistas da probabilidade de excedência de deslocamentos admissíveis, evitando uma falsa sensação de segurança baseada apenas em parâmetros médios.

Importância da abordagem normalizada

O uso de resistência e rigidez normalizadas, combinado com a introdução explícita da tendência do modelo, permite incorporar, de forma racional, a variabilidade do solo mole, comparar diferentes soluções construtivas sob a mesma base probabilística, avaliar o impacto do melhoramento do solo não apenas no valor médio das deformações mas, também, na sua dispersão, além de quantificar ganhos reais de desempenho e confiabilidade obtidos com o melhoramento do solo com CPR Grouting. Nesta obra, os valores não foram assumidos arbitrariamente e, sim, resultaram de uma análise estatística de dados de campo e laboratório obtidos no próprio depósito argiloso da região pernambucana, reunindo-se vários pares de dados, de resistência não drenada, s_u , e tensão vertical efetiva, σ'_v . Para cada profundidade investigada calculou-se a razão $x_1 = s_u/\sigma'_v$. A partir do conjunto de valores de X_1 , realizou-se uma análise estatística, que resultou em um valor médio (media amostral) $\mu_{x_1} = 0,31$ e um coeficiente de variação, $COV_{x_1} =$

0,16. Parâmetros estatísticos extraídos diretamente dos dados do solo daquela região, pertinente à obra.

interpretação do valor médio obtido

Um valor médio de $s_u/\sigma'_v \sim 0,31$ é perfeitamente coerente com argilas moles, levemente sobreadensadas, pertinente a depósitos aluvionares profundos e carregamento geostático. Em termos práticos, para cada 100 kPa de tensão efetiva vertical, o solo mobiliza ~31 kPa de resistência não drenada. Esse nível é típico de solos que sofrem grandes deformações quando escavados sem confinamento adequado.

Interpretação física do coeficiente de variação obtido

O coeficiente de variação é definido como $COV = \sigma/\mu$ e o valor obtido 0,16 (16%) indica variabilidade moderada, típica de solos naturais sedimentares, dados suficientemente numerosos e bem distribuídos e ausência de anomalias extremas. Este nível de variabilidade é consistente com bancos de dados internacionais de argilas moles.

Exemplo numérico simplificado

É comum, ao longo da profundidade relevante da escavação, obter os seguintes parâmetros:

Profundidade (m)	S_u (kPa)	σ_v (kPa)	s_u/σ_v
3	18	55	0.33
6	28	90	0.31
9	38	125	0.30
12	47	155	0.30
15	58	185	0.31

Estatística:

Média: $\mu \approx 0.31$

Desvio padrão: $\sigma \approx 0.05$

COV: $0.05/0.31 \approx 0.16$



Figura 3 - Sistema de construção com estacas-prancha metálicas travadas por longarinas estruturais e escoras hidráulicas horizontais, garantindo a estabilidade das paredes da escavação. Quando adotamos o melhoramento do solo, com CPR Grouting, o comportamento global do maciço é alterado previamente à escavação. O solo deixa de ser apenas "contido" e passa a ser geoenrijecido, elevando sua resistência não drenada, aumentando o OCR local e modificando a condição das tensões horizontais (k_h), reduzindo de forma significativa deslocamentos horizontais, risco de instabilização do fundo, necessidade de níveis de escoramento e interferências em estruturas vizinhas.

Critério de desempenho

Em escavações profundas executadas em meio urbano, o desempenho do sistema não é governado apenas pela estabilidade última mas, principalmente, pelo controle das deformações induzidas no maciço e no entorno. Assim, o critério de avaliação adotado baseia-se na prestabilidade da obra, isto é, na limitação de deslocamentos a níveis aceitáveis para garantir a integridade de estruturas vizinhas e a funcionalidade da própria escavação. O critério de desempenho é estabelecido por meio de um limite admissível de deformação, representado genericamente por:

$$S_{\max} \leq S_{\text{adm}}$$

onde:

- $S_{\max}$ é o deslocamento máximo previsto (recalque superficial ou deslocamento lateral equivalente);
- S_{adm} é o deslocamento admissível adotado em projeto.

Neste caso de obra, adotou-se $s_{\text{adm}} = 25$ mm, valor compatível com escavações profundas em áreas urbanas, com a proximidade de edificações correntes e com limites usualmente recomendados em normas e práticas internacionais para controle de danos.

Interpretação probabilística

Uma vez que os parâmetros do solo apresentam variabilidade natural, o deslocamento máximo previsto, $s_{\max}$, passa a ser tratado como uma variável aleatória, e o critério de desempenho é avaliado em termos de probabilidade de excedência:

$$P(S_{\max} > S_{\text{adm}})$$

Quanto menor esta probabilidade, maior a confiabilidade do sistema. Esta abordagem permite quantificar, de forma objetiva, o efeito do melhoramento do solo com CPR Grouting na redução do risco de desempenho insatisfatório.



Figura 5 - Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) em Recife, em área com presença de solo extremamente mole e turfoso, com baixa resistência, elevada compressibilidade e NA aflorando. A intervenção prevê melhoramento do solo em profundidade de até 18 metros, visando aumentar a rigidez do maciço e garantir a estabilidade da escavação que vai a 12m, além da estrutura futura. A atuação neste tipo de solo exige soluções que promovam ganho efetivo da resistência, controle do recalques e do NA. O processo executivo já evidencia a necessidade de controle técnico rigoroso, desde a execução até o monitoramento. O melhoramento do solo é condição essencial para a segurança e viabilidade da obra.



Figura 6 - Após duas a três semanas do melhoramento do solo, observa-se a plena estabilização do fundo da escavação, mesmo com solo extremamente mole e orgânico, com NA aflorando. A ausência de água livre evidencia a significativa redução da poropressão, resultante do processo de consolidação induzido. O ganho de resistência ao cisalhamento permite a escavação segura, sem ocorrência de instabilidades ou bombeamento. Este comportamento comprova a eficácia do geoenrijecimento do maciço. Soluções como o CPR Grouting promovem condições reais de trabalho em solos anteriormente impraticáveis.

Função preditiva de deslocamentos com abordagem similar ao KJHH

Para estimar o deslocamento máximo induzido pela escavação, utiliza-se uma função preditiva empírica, baseada nos mesmos princípios do modelo KJHH, amplamente empregado na literatura para previsão de deformações associadas a escavações profundas em solos moles. O modelo relaciona deformações esperadas, às propriedades mecânicas do solo, à geometria da escavação, à rigidez do sistema de contenção e às incertezas inerentes ao processo de modelagem. De maneira simplificada, a função

preditiva pode ser expressa como:

$$S_{\text{pred}} = BF.C.H.f\left(\frac{s_u}{\sigma'_v}\right), \frac{E_i}{s_u}, K_{\text{sys}}$$

onde:

- S_{pred} é o deslocamento máximo previsto;
- BF é o fator de tendência do modelo;
- C é o coeficiente de calibração empírica;
- H é a profundidade da escavação;
- K_{sys} é a rigidez global do sistema de contenção;
- $F(\cdot)$ é a função que expressa a influência combinada da resistência e rigidez normalizadas do solo.



solotest.com.br

A collection of laboratory glassware including Erlenmeyer flasks, beakers, and test tubes on stands, along with other lab equipment like a microscope and a balance scale, all set against a red background.

**GERAL
& LABORATÓRIO**

Para fins de ilustração e fechamento do exemplo de caso, a função $f(\cdot)$ é considerada proporcional ao inverso das variáveis normalizadas do solo, resultando em:

$$S_{pred} = BF.C.H. \left(\frac{I}{s_u/\sigma_v} \right) \cdot \left(\frac{I}{E_i/s_u} \right)$$

Esta formulação reflete os comportamentos físicos fundamentais de que quanto menor a resistência normalizada, maior a tendência a grandes deslocamentos, que quanto menor a rigidez normalizada, maior a deformabilidade do maciço, quanto maior a profundidade da escavação, maior o potencial de deformação e que o fator BF ajusta a previsão para representar a incerteza do modelo. O coeficiente C é calibrado de modo que, para a condição pré-tratamento, a previsão média de deslocamento seja compatível com valores observados em escavações profundas, em argilas moles, da ordem de 30 a 35 mm, coerentes com casos históricos da literatura. Esta calibração não altera a estrutura probabilística do modelo, mas assegura que os níveis absolutos de deslocamento previstos sejam fisicamente plausíveis.

Comparando-se o cenário de escavação profunda sem CPR Grouting

Este primeiro caso representa a condição original do maciço, sem qualquer intervenção de melhoramento do solo com CPR Grouting, adotando-se como cenário de referência para avaliação de desempenho e risco. Este caso tem como objetivo quantificar o nível de deformabilidade esperado, a dispersão dos recalques e a probabilidade de excesso dos limites admissíveis, caracterizando o grau de risco associado à execução da escavação sem medidas específicas de melhoria do solo. Os dados de entrada são:

- $\mu(x_1) = 0,31$, $COV = 0,16$
- $\mu(x_2) = 2135$, $COV = 0,16$
- $\mu(BF) = 1,0$, $COV = 0,34$

O resultado ofereceu uma média de $\mu(s_{pred}) \sim 32$ mm e uma dispersão $\sigma(s_{pred}) \sim 15$ mm. A probabilidade de exceedência $p(s_{max} > 25 \text{ mm}) \sim 0,66$, ou

seja $\sim 66\%$ (muito alto, significando um cenário arriscado para o entorno e para execução sem escoramento).

O índice de confiabilidade é de $\beta \sim -0,4$ (negativo por que a média já passa do limite).

O que é o modelo HJHH?

O modelo KJHH é um método semiempírico, utilizado para prever deformações no terreno, induzidas por escavações, especialmente em solos moles e ambientes urbanos, correlacionando:

- A profundidade da escavação (H), a condição de rigidez do solo e a rigidez do sistema de contenção com os deslocamentos esperados.
- A deformação lateral da parede é estimada como uma fração de H (tipicamente entre 0,2% e 1,0% de H, dependendo da rigidez).
- A partir do deslocamento da parede, o modelo define o perfil do recalque na superfície, geralmente em forma de curva tipo Gaussiana.
- O recalque máximo costuma ocorrer a uma distância de cerca de 0,5 a 1,0 H da escavação.
- O método permite avaliar risco para estruturas vizinhas com base na magnitude e extensão da bacia de recalque.

É muito utilizado em estimativas preliminares e para calibração com instrumentação (inclinômetros e piezômetros) em obras de escavação. O modelo evidencia que a redução das deformações depende diretamente do aumento da rigidez do maciço, o que reforça a necessidade do melhoramento do solo com CPR Grouting, que atua no controle da deformabilidade do solo, não apenas na contenção. Abaixo, um quadro do modelo KJHH e as classes de comportamento, de acordo com o parâmetro δ/H que é, na prática, um indicador direto da rigidez global do sistema solo-contenção. O parâmetro δ/H tem a seguinte definição:

- δ = deslocamento horizontal máximo da parede
- H = profundidade da escavação

Classe	δ/H (%)	Comportamento da escavação	Condição típica	Risco para vizinhança
Muito rígido	< 0,2%	Deslocamentos mínimos	Parede muito rígida (parede diafragma espessa), múltiplos níveis de escoramento, solo melhorado	Muito baixo
Rígido	0,2 – 0,5%	Pequenos deslocamentos	Contenção eficiente, bom controle construtivo	Baixo
Intermediário	0,5 – 1,0%	Deformações moderadas	Cortinas flexíveis ou execução menos controlada	Médio
Flexível	1,0 – 2,0%	Grandes deslocamentos	Solo mole, contenção pouco rígida	Alto
Muito flexível	> 2,0%	Deformações excessivas	Solo muito mole + baixa rigidez	Muito alto / inaceitável



SOLOS

Todo solo de fundação exige condição geotécnica estável e isento de riscos. A presença de solos moles, com valores de S analisada, primeiramente, com relação a sua eficiência. Melhorar mole com CPR Grouting, é a melhor resposta, promovendo monitoramento geotécnico específico, através de análises pie respostas antes, durante e de



geotecnia.engegraut.com.br



@engegraut_geotecnia



Engegraut - Engenharia Geotécnica

MOLES

precisa, o que se traduz em um investimento praticamente SPT inferiores a 5, implica em solução geotécnica que deve ser solos moles exige precisão e segurança. O melhoramento do solo do segurança necessária no tempo desejado. Tudo isto com zométrica, pressiométrica e, principalmente, tomográfica, com depois dos serviços executados.



Por exemplo, em uma escavação profunda com 8m de profundidade, $\delta/H = 1\% \rightarrow \delta \approx 8 \text{ cm}$. O significado do δ/H é o seguinte:

- δ/H baixo $\rightarrow$ sistema rígido $\rightarrow$ controle de deformações
- δ/H alto $\rightarrow$ sistema flexível $\rightarrow$ mobilização de grandes deformações

Em solos moles, a tendência natural é δ/H elevado ($\geq 1\%$) haverá alto risco de recalque e, conseqüentemente, danos. A relação com recalques superficiais é a seguinte:

- Recalque máximo ($S_{\max}$) $\approx 0,5$ a $1,0 \delta$.
- Ponto de máximo recalque entre $0,5H$ e $1,0H$ da escavação.
- A bacia de recalque apresenta forma aproximadamente gaussiana.

Como consequência, mesmo pequenos valores de δ/H podem gerar recalques diferenciais significativos em edificações próximas. O modelo KJHH deixa claro que o controle das deformações não depende apenas da contenção, mas principalmente da rigidez do maciço de solo. Assim, com o melhoramento do solo há:

- $\rightarrow$ aumento do módulo de deformabilidade,
- $\rightarrow$ redução de deslocamentos laterais,
- $\rightarrow$ redução do δ/H
- $\rightarrow$ controle do recalque na superfície.

Ou seja, atua na causa do problema, não apenas nos efeitos. De acordo com o modelo KJHH, os deslocamentos laterais normalizados (δ/H) constituem o principal indicador do comportamento deformacional em escavações. Em solos moles, valores superiores a 1% são frequentes quando não há aumento da rigidez do maciço, implicando em elevado recalque e risco à estruturas vizinhas. A redução desses deslocamentos exige a melhoria das propriedades de deformabilidade do solo, o que justifica a adoção da técnica de geoenrijecimento.

Comparando-se o cenário de escavação profunda com CPR Grouting

Neste caso analisa-se o comportamento do maciço após a execução do anel de geoenrijecimento com CPR Grouting, mantendo-se a mesma formulação do modelo preditivo adotado no Caso 1. A diferença fundamental está na atualização estatística dos parâmetros do solo equivalente, refletindo os efeitos diretos da readequação do solo com o aumento das médias de resistência, rigidez e redução significativa da variabilidade espacial do maciço. Desta forma, este caso permite evidenciar, de maneira objetiva, como o CPR Grouting não apenas reduz o recalque médio, mas também torna o comportamento deformacional mais previsível e confiável, mesmo na presença da incerteza inerente ao modelo. As hipóteses após o CPR Grouting são $\mu(x_1) = 0,45$ (ganho de resistência equivalente) e $\mu(x_2) = 3000$ (ganho

de rigidez equivalente), com redução da variabilidade do maciço readequado $COV_{x_1} = 0,10$ e $COV_{x_2} = 0,10$, mantendo-se $COV_{BF} = 0,34$. Os resultados simulados são médias $\mu(s_{pred}) \sim 15\text{mm}$ e dispersão $\sigma(s_{pred}) \sim 5,8 \text{ mm}$. A probabilidade de excedência $P(s_{\max} > 25 \text{ mm}) \sim 0,05$. Ou seja $\sim 5\%$, dando um índice de confiabilidade aproximado de $\beta \sim 1,63$. Portanto, o melhoramento do solo, antes da escavação, desloca o problema de um regime de alta excedência ($\sim 66\%$) para baixa excedência ($\sim 5\%$), viabilizando a escavação profunda, praticamente sem contenção e forte controle hidráulico.

Avaliação da confiabilidade

Uma vez definida a função preditiva, a confiabilidade do sistema é avaliada por meio da probabilidade de excedência do limite admissível:

$$P(S_{pred} > S_{adm})$$

A introdução do CPR Grouting reflete-se no modelo por aumento dos valores médios de s_u / σ'_v e E_u/s_u , na redução de seus coeficientes de variação e na conseqüente redução da média e da dispersão de S_{pred} . O resultado é uma queda expressiva da probabilidade de excedência, indicando desempenho superior da escavação sob o ponto de vista da prestabilidade. Estes exemplos de aplicação demonstram que a adoção de uma abordagem probabilística, associada a modelos preditivos de deformação e ao uso do CPR Grouting, permite-se avaliar de forma quantitativa os ganhos de desempenho obtidos com o melhoramento do solo. O método evidencia que a técnica atua não apenas na redução das deformações médias mas, também, na diminuição da incerteza associada ao comportamento do maciço, aumentando significativamente a confiabilidade da escavação.

REFERÊNCIAS

- Roger Kim é engenheiro geotécnico especializado em melhoramento de solos moles.
- Pore pressure reduction and settlements induced by deep supported excavations in soft clay. J. Langford; G. Baardvik, K. Karlsrud.
- Hauser, C (2015). Rapport 20140406-03-R Vurdering av setninger i Oslo S og Bjørvikområdet Statusrapport pr. august 2015.
- Karlsrud, K. (1990). Forundersøkelser, funksjonskrav og valg av tettestrategi. NIF kurs: Tetting av tunneler, bergrom og byggegrøper.
- Karlsrud, K., Erikstad, L. & Snillsberg, P. (2003) Miljø- og samfunns-tjenlige tunneler. Undersøkelser og krav til innlekkasje for å ivareta ytre miljø. Statens vegvesen Publikasjon 103.
- Karlsrud, K., Langford, J., & Lande E. J., Baardvik G. (2015). Vurdering av skader og deformasjon knyttet til utførelse av stagforankring og borede peler i byggegrøper. BegrensSkade delrapport 1+2.4.
- Lande, E. J. (2015). Feltforsøk stagboring. Dokumentasjon av effekter ved boring i leire. BegrensSkade delrapport 4.1.

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

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

PARCEIROS

