

Soft Soil Brazilian Review

04

Rutura por liquefação.
Barragens de rejeitos e áreas portuárias da
Amazônia continuam na mira.

22

Análise de soluções tanto para impedir
como para recuperar solos liquefeitos

42

Estratégias para melhorar massas de solo
de barragens de rejeitos e de margens
fluviais da Amazônia susceptíveis ou pós
liquefação

36 Consulta

Como entender liquefação, fluxo e
rutura do solo associados?

RUTURA POR LIQUEFAÇÃO

Barragens de rejeitos e áreas portuárias
da Amazônia continuam na mira

pág.04



EDITORIAL

A crescente importância da engenharia da liquefação do solo, no comportamento de barragens de rejeitos, seja para estabilizá-las, seja para descaracterizá-las, assim como na estabilização de margens portuárias da Amazônia, destaca-se a necessidade de se avaliar soluções específicas, para o estado de liquefação, a que ficam submetidas, com consequências devastadoras. Esta edição da SSBR, discute mais detalhes importantes, para ambas as situações, além do que já foi apresentado nas edições 23ª e 18ª. As dramáticas ruturas por liquefação do solo, na área portuária de Manaus, AM, em 2010, (além de em anos anteriores) e da barragem de Brumadinho, em Minas Gerais, em 2019, perpetuados por vídeos ainda existentes na internet, além das ruturas por liquefação do porto de Santana, no Amapá, em 2013 (além de em anos anteriores) e da barragem do Fundão, em Minas Gerais, em 2015, todas evidenciam semelhanças, onde as barragens apresentam fluxos ilimitados, e as dos portos apenas fluxos limitados, com deslizamentos apresentando espalhamento lateral, são bem recentes e nos oferecem, como em nenhum lugar do mundo, oportunidades para entender profundamente o assunto, possibilitando medidas corretivas e

preventivas específicas. Exatamente, a instabilidade de maciços, induzida por liquefação é, certamente, a principal causa da rutura de barragens de rejeitos em Minas Gerais e margens fluviais na Amazônia. A ênfase deve ser colocada na prevenção destes fatos, em vez do após. Se anteciparmos considerações de risco e soluções específicas poder-se-á eliminar, também, o impacto ambiental e otimizar custos reais. Esta edição, destaca uma série de importantes desenvolvimentos recentes, e em andamento na engenharia da liquefação do solo, oferecendo visão ampla sobre detalhes geotécnicos pertinentes, bem como sugestões acerca da enorme experiência adquirida na solução da liquefação da margem portuária de Manaus, com mais de 300mil metros quadrados de melhoramento de solo pertinente. Uma experiência sem precedentes.

Boa leitura
Joaquim Rodrigues



SOFT SOIL BRAZILIAN INSTITUTE

Rua Correia de Araújo, 12- Barra da Tijuca
Rio de Janeiro/ RJ- Brasil- CEP 22611-070
Tel: (21) 31543250

EDIÇÃO

DIRETOR EDITORIAL
Engº Joaquim Rodrigues

DIRETORES ADJUNTOS
Engº Thomas Rodrigues
Engº Roger Kim
Engª Patricia Tinoco

PUBLICIDADE, ASSINATURA
Cleide Ferreira

EDITOR DE ARTE
Ágatha Braga

REPRINTS EDITORIAIS
Mariana Tati

FALE CONOSCO

softsoilgroup.com.br

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

[\(21\) 3154-3250](tel:(21)3154-3250)

atendimento@softsoilbrazilianinstitute.com.br

"Soft soil Brazilian Review" é uma revista

digital com publicação bimestral

Receba notificações sobre nossa revista.

Inscreva-se em:

atendimento@softsoilbrazilianinstitute.com.br

com.br



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

27

Edição - Jan/Fev 2023

04



16



30



Sumário

Rutura por liquefação
Barragens de rejeitos e áreas
portuárias da Amazônia
continuam na mira **04**

Joaquim Rodrigues

Análise de soluções tanto para
impedir como para recuperar
solos liquefeitos **16**

Patricia Tinoco

Estratégias para melhorar
massas de solo de barragens
de rejeitos e de margens
fluviais da Amazônia
susceptíveis ou pós liquefação **30**

Roger Kim

Capa



A liquefação estática do solo, perda repentina da resistência de solos fofos/ moles quando carregados e impossibilitados de drenar, caracterizado por ruturas catastróficas, que ocorreram em barragens de rejeitos, em Minas Gerais e em áreas portuárias da Amazônia, ainda se faz presente, exatamente por que as mesmas condições que serviram de gatilho permanecem.

Seções

Editorial **02**

Agenda **27**

Consulta **28**

softsoilbrazilianinstitute.com.br

Rutura por liquefação. Barragens de rejeitos e áreas portuárias da Amazônia continuam na mira

Instabilidades, induzidas por liquefação estática, é uma das principais causas que levam à ruptura não só barragens de rejeitos mas, principalmente, áreas portuárias fluviais, particularmente na Amazônia. Aprendemos, de maneira dramática que é melhor prevenir do que remediar. Ao anteciparmos

possíveis considerações de risco, eliminam-se grandes questões com enorme redução de custos inerentes. Diversos estudos têm sido realizados, a respeito da liquefação, em bacias de rejeitos e em áreas portuárias fluviais, sobretudo no que se refere à estimativa dos parâmetros da resistência não dre-

nada da massa do solo, por meio de ensaios de campo e laboratório. Na realidade, há um grande trabalho de recuperação na grande rutura do solo, por liquefação, ocorrida na área portuária de Manaus, no final de 2010, e que deve ser considerada como parâmetro exemplar para situações semelhantes.

Nota-se, na realidade, a necessidade do desenvolvimento de metodologias para a determinação da probabilidade da ruptura por liquefação, sobretudo para a condição de carregamento. De qualquer maneira, a questão da instabilidade por liquefação estática não é pertinente, apenas, à área de barragens

de rejeitos. É importante utilizar, nos trabalhos de monitoramento geotécnico, antes e após, ao longo das obras, sondagens não invasivas com tomografia do solo por imagem (TSI) que, através de correlações obtêm-se, com extrema precisão, a resistência não drenada do solo e sua rigidez, sempre confrontando-

-se com sondagens piezométricas e pressiométricas tradicionais. Trata-se de tecnologia inovadora que, por imagem, de grandes volumes de solo, atesta-se a condição pós liquefação e melhorada do solo. Segurança em alto nível.

O fenômeno do rápido esvaziamento dos rios, na Amazonia, mantém campos de excessos de poropressão nos maciços, tornando-os instáveis. Soluções de contenção, com colunas e estacas são catastróficas, na medida em que não suportam tamanha quantidade de poropressão.

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

MECANISMOS DE RUTURA POR LIQUEFAÇÃO ESTÁTICA

Estudos de risco, aplicados à possibilidade da ocorrência da liquefação do solo, estabelecem **três categorias** de rutura.

01

Rutura hidráulica, com a ocorrência de níveis d'água excepcionalmente elevados, seja por precipitação elevada e/ou variação brusca dos níveis de poropressão.

Movimentos de massa, devido à carregamentos atuantes excepcionais, propriedades das massas de solos divergentes das conhecidos ou, ainda, presença de feições geológicas não detectadas ou não consideradas nas fases de projeto e construção. Este modo de rutura, pode ser caracterizado por instabilidade no equilíbrio limite do maciço.

02

03

Erosão interna, com processo de remoção das partículas do solo do maciço e dos elementos de fundação para jusante, por fluxos de percolação, através de forças hidráulicas exercidas pela água, percolando através dos poros ou aberturas.

Contudo, ainda não existe padronização sobre quais são os modos de rutura finais e, a generalização, deve-se à confusão entre termos como gatilho, eventos iniciadores, causas da falha, cadeia de eventos e a rutura por si própria. Os três estudos conhecidos de acidentes, ocorridos com barragens de rejeitos em Minas Gerais e em margens fluviais na Amazônia, são de grande importância no entendimento dos mecanismos de rutura por liquefação e na sua evolução, constituindo-se nos mais importantes passos para o aprimoramento e evolução contínua dos critérios e detalhes dos projetos de intervenção. A análise dos acidentes mostra, de forma inequívoca, quais decisões são inadequadas e quais as pertinentes para se evitar novas ruturas. A rutura por liquefação, é um processo que ocorre em solos não coesivos, saturados e em condição de carregamento não drenado. Durante o carregamento, a poropressão aumenta, até valores iguais à tensão de confinamento inicial. Por outro lado, a tensão efetiva, existente no esqueleto do solo, é reduzida a zero e, como consequência, a massa perde praticamente toda sua resistência cisalhante, comportando-se como um líquido viscoso. Modelos de análise tradicionais, por equilíbrio limite são, pois, insuficientes para retratar o fenômeno dinâmico onde, em um determinado momento, a massa se contrai, tornando a adjacente, até então compacta, em fofa e assim sucessivamente até a ruptura total do maciço.



O fenômeno da liquefação de grandes extensões, na zona portuária de Manaus, em 2010, que impactou a vida em todo o estado.

Acesse os links abaixo para visualização de vídeos:

<https://www.youtube.com/watch?v=RZLD6gdD4Sg>

<https://www.youtube.com/watch?v=SNp17dUkiA&t=36s>

<https://www.youtube.com/watch?v=9cf6nR4X894&t=32s>

<https://www.youtube.com/watch?v=hQm26f6Mslo&t=4s>

Modelos constitutivos, seriam mais representativos para a análise deste modo de ruptura, contudo, a variabilidade espacial leva a grandes erros em seus resultados. A liquefação, de massas de solos, é observada em maciços sob carregamento estático e sob carregamento dinâmico, como o efeito de vibrações, causadas pela cravação de estacas e formação de colunas. A ruptura de um maciço por liquefação, como todo colapso, depende de condições inerentes à massa do solo e do carregamento externo. No ponto crítico, desta paridade de forças, ocorre o gatilho, como espécie de carregamento (magnitude, frequência, taxa, natureza), e condições iniciais da massa de solo susceptível ao estado do equilíbrio limite. Outro fator importante, é a forma com que se atinge este (des)equilíbrio. Para a ruptura de margens fluviais, na Amazonia, considera-se o rápido esvaziamento do rio, característico da região, permanecendo altos níveis de poropressão nos maciços. O início da liquefação depende, significativamente, da variação incremental da poropressão e do estado de tensões iniciais. A ocorrência do fluxo liquefeito, entre outros fatores, é dependente das tensões iniciais existentes, de acordo com as seguintes hipóteses:

- ➔ **O fluxo liquefeito pode ser iniciado quando as tensões cisalhantes, no equilíbrio inicial, forem maiores que a resistência do solo no estado residual (ou permanente);**
- ➔ **A mobilidade do solo, pode iniciar-se quando a tensão cisalhante inicial é menor que a resistência residual (ou permanente), geralmente identificada quando as poropressões tornam-se suficientemente grandes para produzir escorregamentos laterais (lateral spreading) em terrenos (pouco) inclinados.**

Portanto, a resistência do solo na condição liquefeito, é a mobilizada com grandes deformações, depois que é ativada. Neste ponto, o solo deforma sem variação de volume, de tensão de cisalhamento e de tensões efetivas. Assim, a condição de estabilidade da massa de solo, está diretamente relacionada à magnitude das tensões cisalhantes atuantes. A escolha da resistência ao cisalhamento, apropriada para uma análise de estabilidade, por equilíbrio limite, deve ser precedida de cuidadosa observação do comportamento tensão-deformação do solo. As variáveis do solo, sus-



Cerca de 50 mts de largura da margem portuária de Manaus, na vazante do Rio Negro veio a baixo, via liquefação, em uma extensão superior a 1,500 mts, estabelecendo uma altura do talude (na vazante) de quase 20 mts.

SOLO MOLE NO SEU PROJETO? NÃO TRABALHE COM TÉCNICAS ALTERNATIVAS OU ADAPTADAS

FAÇA MELHORAMENTO DE SOLO



Melhoramento de solos moles é GEOENRIJECIMENTO*

*100% teoria do adensamento da argila

ceptíveis à liquefação, dependem de três perspectivas:

Os Aspectos naturais

Sabe-se que uma massa de solo, mais suscetível à liquefação, não possui coesão, propriedade diretamente ligada à presença de argilominerais. No caso particular do rejeito de minério de ferro, em barragens de rejeitos, sua oxidação remanescente, produz texturas conpressiónárias que, relacionada à maior densidade natural da hematita, alteram o comportamento ao cisalhamento dos estratos formados pelo rejeito. O teor de finos, de um modo geral, na massa do solo, influencia na suscetibilidade à liquefação de duas maneiras distintas, reduzindo a permeabilidade do solo, e contribuindo para a resistência ao cisalhamento, devido ao acréscimo da coesão. Entretanto, no caso de solos formados por finos não plásticos, a influência é apenas negativa, com um aumento da suscetibilidade à liquefação causada pela redução da condutividade hidráulica. Assim, não se pode restringir a análise à distribuição granulométrica, mas inserir também a componente plasticidade (presença de argilo-minerais) na ava-

O Estado inicial

Refere-se a compacidade (índices de vazios) e as tensões existentes, provenientes do confinamento, que determina ainda a resistência ao atrito

de materiais granulares, sendo tão elevadas, quando maiores forem seus valores. A taxa de aumento da resistência, contudo, muda com o progressivo acréscimo da pressão de confinamento. A proporção que as tensões de contato aumentam, ocorre a redução de vazios pelo imbricamento do material, bem como a quebra de grãos.

A Condição de saturação

Para que a liquefação ocorra, é necessário que a massa de solo possua água suficiente em seus poros, de modo a receber o acréscimo de carga e, conseqüentemente, reduzir as tensões efetivas. Em uma situação limite, o solo precisa ter grau de saturação mínimo, para que a contração transmita a pressão para água e não para o ar, ou seja, o solo não precisa, necessariamente, estar inteiramente saturado. Yoshimi et al. (1989 apud Freire Neto, 2009) apresentam dados de ensaios de laboratório, em que a liquefação ocorreu em materiais com grau de saturação de aproximadamente 80%. Entretanto a saturação, somente, não induz comportamento não drenado,



Uma enorme extensão da margem portuária veio abaixo por liquefação.

sendo necessário interferência da condutividade hidráulica do solo, diretamente ligada a granulometria e à velocidade do carregamento aplicado. Assim, uma condição não drenada, ocorre quando a taxa de carregamento é superior à taxa de drenagem, provocando excesso de poropressão. O estabelecimento de drenagem prévia, com geodrenos, no melhoramento do solo, com geoenrijecimento, impede o desenvolvimento do aumento da poropressão, abrindo caminho para o processo subsequente da compressão radial, que aumenta simultaneamente a resistência e a rigidez da massa de solo, anulando completamente sua liquefação. A ruptura da massa de solo por liquefação, como todo colapso, depende de condições inerentes e, claro, do carregamento externo imposto. No ponto crítico ocorre o gatilho, somando-se condições de carregamento, como intensidade, frequência, taxa e natureza, além das susceptíveis ao estado do equilíbrio limite.

Em resumo, são duas as variáveis gatilho:

01

Velocidade do carregamento

Para acionar o gatilho da liquefação, a resistência de pico deve ser ultrapassada, devido ao carregamento não-drenado, somente alcançado se sua velocidade for suficientemente alta, de acordo com o coeficiente de permeabilidade do solo, não permitindo a dissipação das poropressões.

02

Natureza do carregamento

Tanto em situação dinâmica, quanto de carregamento estático, a condição última de tensões é, basicamente, a mesma. Uma massa granular, submetida a um carregamento cíclico, atinge o ponto de ruptura por liquefação, após um número variável de ciclos de carga, para a mesma superfície de colapso, provocada por carregamento estático, muito embora os históricos de carregamento sejam diferentes. Conclui-se, que a natureza do carregamento, não tende a exercer influência no potencial de liquefação de massas granulares. Entretanto, a forma ou a velocidade que se atinge a resistência liquefeita final, dependerá do número de ciclos e da taxa de carregamento. O mecanismo do início da liquefação estática, acontece devido à mudanças na poropressão, geradas por chuvas intensas e gradientes hidráulicos, como por exemplo em rápidas vazantes de rios.



As ruturas por liquefação de 2010, em Manaus, em alguns setores do porto, adentraram cerca de 100m.

A MECÂNICA DA LIQUEFAÇÃO E A RESISTÊNCIA RESIDUAL

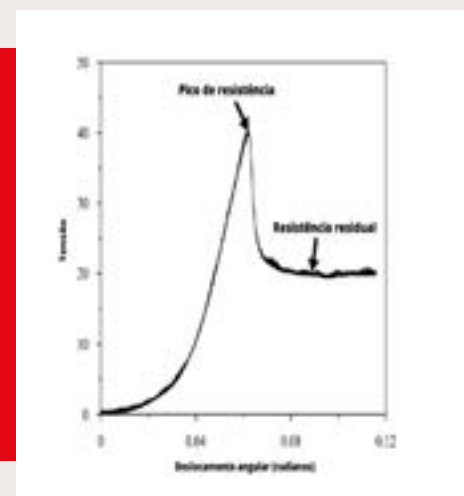
Muitos fatores contribuem para o início da liquefação, como a densidade relativa a tensão confinante, a resistência, a mineralogia, além de fatores ambientais. A densidade relativa

e a taxa de tensões existentes, embora sejam medidas eficazes para a avaliação do desencadeamento da liquefação, não fornecem nenhuma informação sobre o estado pós-

liquefação do solo, incluindo a resistência ao cisalhamento, muitas vezes considerada como a resistência residual liquefeita. A ideia de se utilizar testes controlados por defor-

mações, foi atribuído à capacidade de desenvolver e controlar excessos de poropressões, com deformações cíclicas de cisalhamento em vez de tensões.

A resistência residual, no solo liquefeito, pode ser considerada como a mínima ao cisalhamento, quando a liquefação é desencadeada, apresentando grandes deslocamentos em condições saturadas, sem coesão, resultando no rearranjo das partículas e em movimentos contínuos para manter mínima a resistência ao atrito, exibindo aparente resistência ao fluxo, devido a interações interpartículas. A Figura, a seguir, apresenta a curva representativa para determinação da resistências ao cisalhamento no pico e residual.



Estudos específicos avaliaram e quantificaram a resistência residual do solo liquefeito, utilizando-se sondagens SPT, Testes de Penetração de Cone-CPT (Robertson et al. 2010), testes triaxiais (Vaid e Sivathayalan 1996), modelagens em grande escala (Honnet et al. 2018) e modelagens centrífugas (Dewoolkar et al. 2015), além de modelos empíricos e numéricos (Kramer e Wang 2015). O desafio de obter-se este parâmetro, pode ser atribuído a deformações e tensões não uniformes, difíceis de serem obtidas com testes pós-liquefação. Assim, a utilização da resistência residual obtida, com base no carregamento, para uma avaliação realista, deve ser feita quando a massa liquefeita foi considerada um Fluido não newtoniano. Para grandes níveis de deformação, a resistência residual é diretamente afetada pela taxa de deformações cisalhante aplicada, resultando em um aumento na resistência, com altas taxas de cisalhamento. Para obter-se a resistência re-

sidual mais fácil e consistente, considera-se sua normalização com tensões efetivas verticais iniciais. Embora esta proporção seja, geralmente, utilizada em solos coesivos, também adota-se para históricos de casos, utilizando-se sondagens SPT ou CPTu, o que faz obter correlações razoáveis, no comportamento tensão-deformação do solo liquefeito, até níveis de tensões moderados e condições representativas dos efeitos de redistribuição dos vazios. Embora a normalização seja uma prática padrão, baseada nas condições iniciais, nem sempre pode ser apropriada. Moss et al.(2020) recomendaram a normalização da resistência residual, considerada apropriada para areias liquefeitas, submetidas a altas tensões, o que pode resultar em maior dispersão na análise da liquefação por fluxos. Assim, a resistência residual deve ser avaliada com e sem normalização, de modo a se obter uma resposta completa. Semelhante à normalização da resistência residual, pela tensão efetiva vertical propôs-se, também, uma abordagem da normalização com as tensões efetivas médias.



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

ou cinzenta. Para torná-lo rijo faça

MELHORAMENTO DE SOLO

EFEITOS DO GRAU DE SATURAÇÃO DO SOLO

Terzaghi (1943), introduziu, pela primeira vez o conceito de tensão efetiva, definido como um meio bifásico, onde a poropressão e as tensões de contato entre partículas, foram avaliadas separadamente como na Equação abaixo:

$$\sigma' = \sigma t - uw$$

onde σ' é a tensão efetiva, σt é a tensão total e uw é poropressão, verificando-se que é uma interpretação precisa do comportamento mecânico, tanto para os estados totalmente saturados como seco. No entanto, esta abordagem tradicional não considera o estado de tensões para solos, com três fases. Bishop (1959) apresentou uma alternativa, conforme mostrado na equação a seguir, que incorporou o efeito da sucção matricial das tensões efetivas de Terzaghi, introduzindo um parâmetro de tensão efetiva de escala (χ).

$$\sigma' = \sigma t - ua + \chi(ua - uw)$$

Onde χ é uma função do grau de saturação do solo e reflete a contribuição da sucção matricial sobre forças interpartículas. A partir das formulações apresentadas, tanto por Terzaghi quanto por Bishop, evidenciou-se o impacto da saturação no estado de tensão dos solos e a resposta de cargas estáticas e dinâmicas. A saturação pode afetar a resposta dinâmica do solo através de dois importantes mecanismos: 1) A presença de gás pode diminuir o módulo volumétrico do fluido dos poros, fator que

contribui para a geração de excessos de poropressões durante o carregamento dinâmico aumentando, assim, a resistência à liquefação 2) as forças de contato entre partículas, em um estado de três fases, são diretamente afetados pelo nível de saturação do solo, afetando tanto as tensões efetivas quanto as propriedades dinâmicas dos solos. Os efeitos da saturação do solo, variam tanto para respostas estáticas quanto dinâmicas, baseadas



A liquefação estática do solo, ainda é o principal problema nas áreas portuárias da Amazônia.

no estado de saturação e na trajetória de retenção solo-água. A liquefação do solo, portanto, é um dos fenômenos mais disruptivos que ocorrem em obras geotécnicas, devido à perda da resistência de solos saturados ou quase saturados. Ao longo dos últimos 15 anos, investigou-se diferentes aspectos do desencadeamento da liquefação no solo. Para entender estes mecanismos e caracterizar a resposta do solo, utilizou-se medições in-situ, modelagens e, principalmente, o desenvolvimento da técnica de melhoramento de solos, com geoenrijecimento. Efetivamente, esta técnica que viabiliza a consolidação do solo, mostrou-se 100% efetiva, seja pelo monitoramento simultâneo da resposta do solo, pela poropressão, pela rigidez, além do dramático aumento de resistência à liquefação induzindo, praticamente, zero perturbação no solo, com altos níveis de drenagem impostos.

REFERÊNCIAS

- Joaquim Rodrigues é engenheiro civil M.Sc. formado no Rio de Janeiro em 1977, pós-graduado pela COPPE na Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1999. Diretor do Soft Soil Group e da Engengraut Geotecnia e Engenharia, associada à ABMS e ao American Society of Civil Engineers desde 1994. Desenvolveu duas técnicas de tratamento de solos moles, sendo motivo de patente o GEOENRIJECIMENTO, utilizada hoje em todo o Brasil. Possui 40 anos de experiência em melhoramento de solos.
- Andrus, R.D. and Stokoe, K.H (1997). "Liquefaction Resistance Based on Shear Wave Velocity." Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, NCEER-97-0022.
- Arango, I. (1996). "Magnitude Scaling Factors for Soil Liquefaction Evaluations." Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No. 11, pp. 929-936.
- Arulanandan, K. and Symbico, J. (1993). "Post-Liquefaction Settlement of Sands." Predictive Soil Mechanics: Proceedings of the Wroth Memorial Symposium held at St. Catherine's College, Oxford, July 27-29, Thomas Telford, London, pp. 94-110.
- Bartlett, S.F. and Youd, T.L. (1995). "Empirical Prediction of Liquefaction-Induced Lateral Spread." Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 121, No. 4, pp. 316-329.

GEOKON

TRUSTED MEASUREMENTS®

EQUIPAMENTOS GEOTÉCNICOS

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



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

Conheça hoje mesmo esta moderníssima tecnologia (com preço atrativo)

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

Análise de soluções tanto para impedir como para recuperar solos liquefeitos

Após sondagens específicas, evidenciou-se a necessidade de se melhorar o solo mais para o interior da zona portuária de Manaus.

As dúvidas, quanto a condição da segurança geotécnica, normalmente geram impasse para

a evolução de um projeto, tanto para impedir como para recuperar ruturas do solo por liquefação. O caminho direto

e correto para esta solução geotécnica portanto, considerando-se a condição de solos fofos ou moles, é o recurso

da consolidação, que objetiva comprimi-lo e drená-lo simultaneamente, tornando-o rígido. Inteirar-se dos parâmetros

geotécnicos do solo mole envolvidos, é medida obrigatória para o conhecimento da metodologia, que permitirá ade-

quar todo o sistema existente à condição futura. O solo, que condiciona a análise da estabilidade, geralmente é mole,

com presença de siltes e areias, que comportam-se de maneira não drenada, estando susceptível à liquefação, devido a sua difícil drenagem. Os parâmetros de resistência e deformabilidade apresentados, definem uma condição bastante característica, o que impõe uma solução natural à base de consolidação, medida natural e obrigatória para solos moles saturados.

A NECESSIDADE DA CONSOLIDAÇÃO DO SOLO

Consolidar solos, significa reestabelecer, aprimorar ou fazer crescer parâmetros geotécnicos, ou seja, suas propriedades físicas e mecânicas, de modo a oferecer a estabilidade necessária e, claro, a rigidez específica, que elimine grandes deformações, impondo a resistência necessária. Um fator importante, que deverá ser conhecido é a sensibilidade do solo ao amolgamento, razão entre a resistência no estado indeformado, e a resistência ao cisalhamento no estado totalmente amolgado. O valor da sensibilidade do solo pode ser obtido diretamente por meio de ensaios, como o da compressão não confinada, palheta e o da queda do cone sueco (fall-cone). É interessante observar, o atual estado da arte da engenharia da liquefação do solo, com os 5 passos obrigatórios:

1

Investigação do "potencial de liquefação" ou o risco do seu "acionamento" (início).

2

Investigação da resistência do solo, pós liquefação, e a estabilidade global pós liquefação.

3

Investigação da probabilidade/expectativa de deslocamentos e deformações longas e curta, induzidas pela liquefação.

4

Investigação das consequências destes deslocamentos/deformações.

5

Implementação, com monitoramento geotécnico contínuo, da recuperação do solo liquefeito, com base em sua consolidação.

ANÁLISE DE SOLUÇÕES

A solução específica deverá ter características chaves, como aplicabilidade, efetividade com base em análises geotécnicas, custo, além de parâmetros ambientais de importância. A solução deverá eliminar o potencial de liquefação, aumentando sobremaneira a densidade do solo, como um todo e, principalmente, permitir a total drenagem, de modo a obter-se o pleno controle da poropressão além, claro, de impor nível de homogeneização que garanta a rigidez e resistência necessários. Todos estes benefícios não só reduzem, como eliminam potenciais acúmulos de campos de excessos de poropressão, mantendo quase nula a taxa de poropressão, T_u , onde $T_u = \frac{u_e}{\sigma'_v}$, sendo u_e o excesso de poropressão e σ'_v , a tensão vertical efetiva inicial. As principais vantagens de se manter quase nulo os valores do T_u (ou seja, $T_u < 0,5$) são:

01

A homogeneização (com melhoramento do solo) irá impor níveis altíssimos de resistência e rigidez, garantindo suporte vertical e lateral à estrutura sobrejacente, anulando a extensão da deformação lateral do solo, particularmente quando há taludes, devido a ação de carregamentos rápidos, no solo agora pouco ou nada saturado.

02

Anular grandes recalques (particularmente os diferenciais), causados pela alta compressibilidade do solo original/liquefeito, havendo baixa tensão confinante.

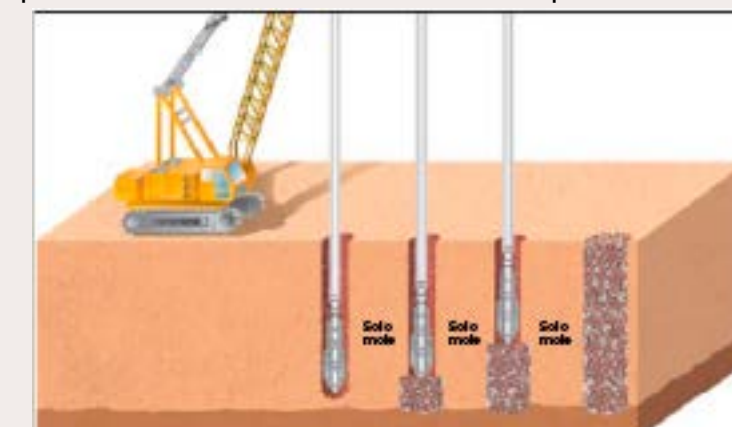
03

A homogeneização elimina gradientes hidráulicos nômades, que causam migração da porção fina do solo, causando instabilidade.

É interessante observar que, na ausência da homogeneização do solo (melhorado), a utilização de soluções à base de colunas, induzirá acúmulos de excessos de poropressão, durante a imposição de tensões cisalhantes, com o carregamento rápido e a rede de solo saturado ao redor das colunas, causando desequilíbrio da condição suporte, devido a desproporção ou oscilação da rigidez relativa dos dois materiais, (coluna-solo) aumentando a instabilidade geral. O mecanismo da concentração de tensões, quando da liquefação do solo é completamente inexistente. Outro fator importante, é que colunas são instáveis a movimentos de massas laterais. Analisa se, a seguir, as soluções:

Coluna de brita

O comportamento de colunas de brita continua não compreendida por técnicas analíticas e numéricas, razão pela qual prever seu comportamento em solos moles e muito moles é completamente inseguro, e trás inúmeros desafios específicos, como a falta de dados representativos, particularmente no campo das tensões entre a coluna de brita e o solo mole envolvente, as alterações de médio e longos prazos impostas ao solo mole envolvente, ao redor das colunas, a ausência total de resistência à empuxos laterais, fundamental para este tipo de solução, além do efeito de longo prazo para as questões das deformações por fluência. Provavelmente, a grande e eterna incógnita é a ausência de certificação. Esta técnica de fundação, sim, porque trata-se de elementos verticais idealizados para receber

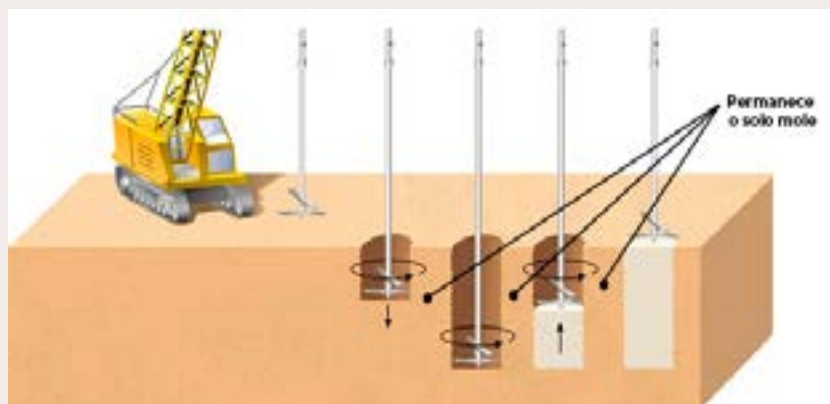


Técnica de fundação à base de colunas de brita, instáveis à movimentos laterais de solos.

carga na ponta, transferindo-se para sua base, logo não se trata de melhoramento de solo. Outro aspecto contundente é a forma traumática de execução que, para o caso de barragens de rejeitos e margens fluviais não é adequada além, claro, da ausência de resistência cisalhante para seu confinamento, e para a sustentação da coluna (embarrigamento), mesmo quando da utilização de camisa de geotêxtil que, mesmo assim causará o desaprumo. O estudo recente, 2020, do processo de retirada da coluna de brita, realizado em solos moles, por Xin Tan, oferece mais detalhes bem atualizados, acerca deste método de fundação. Esta técnica alternativa produz grande quantidade de refugo ou descarte e processo de vibração intenso.

Deep soil mixing (dsm)

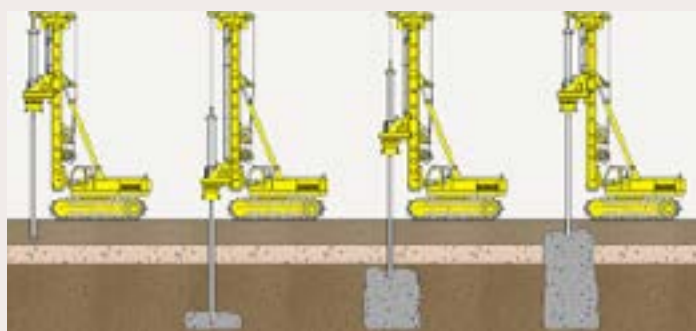
Esta técnica alternativa de trabalho, independentemente do método que emprega, à semelhança das colunas de brita, não é uma técnica de melhoramento de solos, exatamente pelo fato de que é uma técnica de fundação, que objetiva receber carga no seu topo, transferindo-a para a base, sobre solo resistente, estabelecendo elementos verticais, ficando o solo mole/muito mole ao redor. A presença de rejeitos industriais, acompanhado de substâncias químicas tóxicas, sem dúvida, tornarão a ação do cimento, para formar o solo cimento, uma tarefa inglória, já que interferem profundamente nas reações químicas com o aglomerante empregado. Aqui, também, questiona-se o método de certificação, assim como a ausência de resistência do conjunto de colunas formadas, objetivando-se a estabilidade para grandes empuxos laterais e a condição deformativa do solo mole/muito mole, que permanece ao redor das colunas, essencial em margens fluviais. Esta técnica produz grande quantidade de refugo ou descarte.



Técnica de fundação à base de colunas de solo-cimento instáveis à movimentos laterais de solos.

Jet grouting

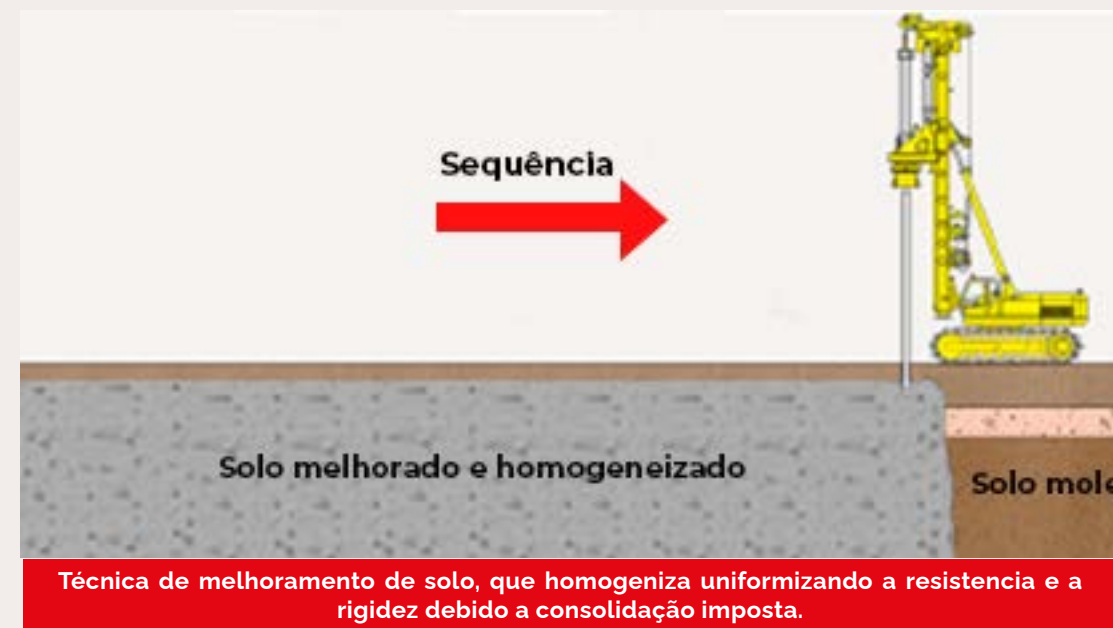
Este método alternativo de trabalho, também é uma técnica de fundação, e não de melhoramento de solos, já que objetiva criar colunas, ficando o solo mole/ muito mole ao redor. Todas as particularidades relatadas nas técnicas anteriores são válidas aqui, também. Produz grande quantidade de refugo ou descarte, além de potentes jatos d'água e vibração no solo, que comprometem extraordinariamente o solo em barragens de rejeitos e margens fluviais.



Colunas de Jet Grouting produzem grande refugo, mantem o solo mole ao redor e são instáveis a empuxos laterais.

MELHORAMENTO DO SOLO COM GEOENRIJECIMENTO

A teoria do melhoramento de solos argilosos, com geoenrijecimento, segue 100% as diretrizes técnicas da teoria da consolidação, única forma de chegar aos objetivos desejados, na prática. O geoenrijecimento, com CPR Grouting impõe, previamente, drenos necessários, seguindo-se do processo compressivo que permite a drenagem do solo argiloso mole/muito mole, tornando-o rígido, firme e estável geotecnicamente, seja para receber cargas, seja para melhorar a estabilidade ou para permitir escavação posterior, sem improvisos, alternativas ou paliativos, e sem geração de refugo.



Técnica de melhoramento de solo, que homogeniza uniformizando a resistência e a rigidez devido a consolidação imposta.

Intrinsecamente ao objetivo comum, seja de descaracterizar barragens de rejeitos, como estabilizar margens fluviais, na Amazonia, estudos pertinentes à possibilidade da liquefação, durante o melhoramento do solo, foram previamente realizados e, melhor, bem testados em obras de grande porte similares, particularmente em toda zona portuária de Manaus. À seguir, analisa-se detalhes executivos do melhoramento do solo, específico para barragens de rejeitos e margens fluviais da Amazônia.



Com a margem portuária preparada, o serviço de melhoramento de solo foi iniciado.

O melhoramento do solo na descaracterização de barragens de rejeitos

Com relação ao comportamento geomecânico do rejeito, suas características estão estritamente ligadas ao tipo, origem e teor do minério, método de lavra, tratamento escolhido para a sua concentração e o método de disposição. Em outras palavras, o comportamento geotécnico depende diretamente da granulometria e da plasticidade dos finos do rejeito. Para entender,



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

torna-se imprescindível saber como deforma, escoa e rompe, aspectos intimamente ligados ao estado físico que o rejeito se encontra e às solicitações impostas, sabendo-se que à medida que a água é retirada, sua consistência vai aumentando progressivamente, de maneira que a resistência aumenta exponencialmente. Esta é uma atividade inerente ao melhoramento do solo.

Na figura abaixo, estão quatro faixas de consistências, com nomenclaturas mais utilizadas, observando-se a sensibilidade da resistência em relação ao teor de sólidos e a densidade do rejeito. Observa-se que o comportamento mecânico do rejeito, ocorre desde a reologia até a resistência ao cisalhamento, e entre os modelos dos critérios de ruptura utilizados, o de Mohr Coulomb é o que melhor representa o comportamento do rejeito de minério

de ferro, com fração granular predominante, e comportamento dependente do índice

não-drenado e podem levar a estrutura à ruptura por liquefação, devido à possibilidade



Melhoramento do solo sendo executado.

de vazios, da condição de drenagem imposta, do tipo de solicitação e velocidade com que é aplicada, do confinamento imposto, do grau de saturação e do arranjo de suas partículas. No caso de barragens, executadas por aterro hidráulico, ocorre a formação de estruturas fofas que, associadas a carregamentos rápidos, geram situação de carregamento

de altos valores da poropressão, que se igualam à tensão total, levando a resistência da massa de rejeitos a valor nulo. A determinação da resistência da massa de rejeitos, pode ser realizada com ensaios de laboratório, como por ensaios de campo, havendo muita dificuldade para a reconstituição de amostras ou coleta indeformadas. É consenso,



Concentração/Densidade do rejeito versus Resistência não drenada. Baseado em Davies et al. (2010); Lima (2006) e Ribeiro, V. Q. F. (2015).

que as diversas técnicas de reconstituição de amostras, influenciam fortemente os resultados, principalmente realizados em corpos de prova no estado fofo. A massa de rejeitos de minério de ferro, apresentam valores relativamente altos para a resistência ao cisalhamento, função do alto grau de angularidade das partículas, nos ensaios de campo. Existem vários estudos sobre rejeitos de minério de ferro, com foco em suas características geomecânicas, como os depositados na pilha do Xingu, localizada em Mariana, Minas Gerais. Lopes (2000), avaliou a influência da granulometria, da composição química e da porosidade nas propriedades geotécnicas da massa de rejeitos, por meio de ensaios de caracterização e cisalhamento direto. Espósito (2000), correlacionou os parâmetros da resistência e seus desvios, com a variabilidade da porosidade, determinada em campo. Com ensaios de laboratório, encontrou a resistência e permeabilidade do rejeito avaliando, probabilisticamente, a estabilidade física da estrutura quanto à liquefação. Portes, 2013, em seu estudo sobre o comportamento do resíduo de minério de ferro, chegou a seguintes conclusões:

- O comportamento do rejeito fofo é nitidamente distinto do denso, principalmente para baixos valores do índice de vazios ou porosidade;
- Não existe diferença significativa, no ângulo de atrito, obtido via ensaio de cisalhamento direto ou triaxial (CD). Eventuais divergências, podem ser atribuídas às condições de moldagem dos corpos de provas;
- Para elevadas compacidades, o rejeito tende a ter comportamento totalmente estável, apresentando resistências elevadas;
- A compactidade exerce influência muito maior que o teor de ferro no comportamento do rejeito, em termos de resistência.

Observa-se, portanto, que o processo de drenagem imposta à bacia de rejeitos, seguido do processo lento compressivo, pertinente ao melhoramento do solo, é o melhor caminho em termos de estabilidade à liquefação.

O melhoramento do solo para estabilização de margens portuárias na Amazônia

A instabilidade, com grandes rupturas, por liquefação, em margens fluviais da Amazônia, como as das zonas portuárias de Santana, AP, e de Manaus, AM foram preferencialmente, causadas pelo grande excesso de poropressão estacionados nos maciços, devido a rápida vazante dos rios. A prevenção de fluxos liquefeitos envolve, essencialmente, o controle das variáveis suscetibilidade e gatilho, que tem a ver com as características da massa do solo. O aumento da densidade relativa e a redução da saturação são as vias mais eficazes e econômicas, o que é obtido, com melhoramento do solo.

O melhoramento do solo em curso na área portuária de Manaus.



O passo a passo do geoenrijecimento (CPR Grouting)

Trata-se de uma efetiva técnica de melhoramento de solos moles/muito moles, totalmente baseada na teoria da consolidação das argilas promovendo, previamente, a inserção de drenagem artificial, seguido da compressão radial de cada metro cúbico de solo. O resultado é a aceleração do recalque e o incremento da resistência cisalhante que, em contrapartida, ganha grande estabilidade e ausência de deformações. Apesar da técnica ser conceitualmente muito simples, seu estudo teórico e numérico revela-se extremamente complexo, pois envolve uma série de variáveis na modelagem geotécnica de cada obra, razão pela qual trata-se de uma patente obtida pela empresa que trabalha a quase 50 anos com melhoramento de solos. Em linhas gerais, cravam-se geodrenos, seguindo-se da formação de verticais onde, com equipamento específico, adentra-se no solo até o impenetrável e bombeia-se, de baixo para cima, uma argamassa seca especial, formando-se bulbos que impõe processo de compressão radial no solo, via expansão de cavidades, possibilitando sua



O melhoramento do solo em curso na área portuária de Manaus.

drenagem pelos geodrenos que circundam cada local. O resultado é a consolidação acelerada de todo o solo, tornando-o um maciço estável. O processo de certificação, é feito através de ensaios pressiométricos, em conjunto com tomografia do solo por imagem onde obtém-se, antes e após parâmetros geotécnicos de resistência e de rigidez do solo, previamente dimensionados. O resultado final do Geoenrijecimento é um solo compósito homogêneo, composto por milhares de verticais, com bulbos expandidos de geogROUT, impondo condição de adensado, confinado e comprimido. Este solo compósito, possui módulo de elasticidade representado por uma ponderação dos bulbos do geogROUT e os volumes de solo adensado, comprimido e confinado envolventes.

Sequência executiva

No terreno, antes do início dos serviços de Geoenrijecimento das camadas de solo mole/muito mole, realiza-se investigação da área assentando-se, eventualmente, camada de aterro de conquista, iniciando-se análises geotécnicas preliminares, com pressiômetro, tomografia



com imagens e piezômetros, de modo a se checar os parâmetros do solo, ao longo da área em questão. Com equipamento apropriado, executa-se a cravação de geodrenos, em malha especificada, em toda a área, de acordo com espaçamentos e profundidades previstas em projeto. Em seguida, com lança apropriada introduzida no solo, formar-se-ão as verticais com bulbos de geogROUT, via expansão de cavidades, de

O melhoramento do solo em curso na área portuária de Manaus.

baixo para cima, com critérios de tensão e deformação pré-estabelecidos no projeto executivo. Estas verticais de adensamento, são executadas ao longo de toda a profundidade do solo mole, de acordo com malha prevista em projeto (triangular ou quadrada), tendo espaçamento que varia, tipicamente, de 2 a 4 m. A dissipação do excesso de poropressão é garantida pelos geodrenos, previamente posicionados. Desta forma, comprime-se o solo de maneira rápida e eficiente, impondo níveis de resistência e rigidez pré estabelecidos.

Equipamentos

Para execução dos serviços é necessário implantar a central de geogROUT, com espaço para os depósitos de água, areia, silte e cimento, além de geodrenos, totalizando cerca de 1000m². Uma equipamento de trabalho é formado por lança perfuratriz, lança cravadora de geodrenos e lança de bombeamento, bomba e caminhões betoneiras. Além da bomba de grouting.

Materiais

Geodrenos. O uso do dreno fibroquímico, ou geodreno, objetiva drenar a água do solo, uma vez em processo de compressão entre as verticais. Sua aplicação estabelece fluxos radiais, com diminuição do caminho de percolação, acelerando o processo de adensamento e a dissipação do excesso de poropressão. O geodreno fibroquímico tem cerca de 10 cm de largura por 5mm de espessura, e é formado por núcleo de plástico recoberto por geotêxtil. Apresenta elevada capacidade de descarga ($q_w > 150 \text{ m}^3/\text{ano}$), de modo a tornar desprezível sua resistência hidráulica. Sua cravação é feita por meio de lanças verticais, que atingem a profundidade desejada.

O geodreno consiste de:

- Elemento central termoplástico laminado de PEAD (Polietileno de Alta Densidade), do qual saem perpendicularmente pequenas paredes verticais nas duas faces, formando pequenos canais.
- Elemento filtrante: geotêxtil não tecido de poliéster altamente permeável e hidrófilo.



Geodreno vertical CPR Geodreno.

Cravação dos geodrenos.

GeogROUT. O geogROUT não é calda de cimento, mas sim um grout seco, dosado e desenvolvido à base de areia, silte, cimento e aditivos. Os agregados são, geralmente, obtidos na própria região da obra. A dosagem é feita em função da distribuição granulométrica dos agregados e da composição de suas partículas, além da consistência controlada, para a formação dos bulbos, que comprimem radialmente o solo. A resistência à compressão, geralmente exigida, é bem superior à do solo melhorado, geralmente com valores superiores a 10kg/cm², à 28 dias.

Controle executivo

Todo o processo do Geoenrijecimento do solo, é acompanhado por rigoroso controle de qualidade geotécnico, de modo a verificar se o solo geoenrijecido atende às necessidades específicas do projeto. O geogROUT, confeccionado no local, recebe controle de consistência com o abatimento pelo slump teste. O excesso da poropressão é monitorado, constantemente, com piezômetros de cordas vibrantes. Ensaios de campo, com pressiômetro e tomografia por imagem, realizadas antes, durante e após os serviços do Geoenrijecimento, visam avaliar o nível de resistência e rigidez obtidos com o avanço do serviço. A profundidade trabalhada depende das camadas mole/muito mole, estabelecida pelas sondagens existentes.



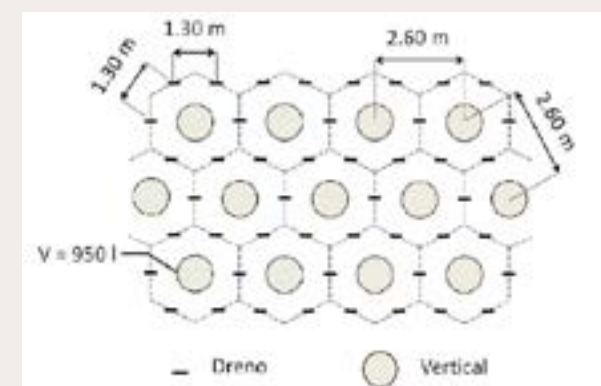
Formação das verticais do geoenrijecimento do solo mole, via expansão dos bulbos, que geram compressão radial, em toda a área de solo mole – muito mole, atrás de malha adequada.

Todavia, este dado não é isento de erros, assim como é normal encontrar naturais variações de profundidades ao longo de um determinado trecho. Por isso, durante a fase de cravação dos geodrenos, ocorre a verificação profundidade dos depósitos de solo mole / muito mole, via resistência à penetração do mandril de cravação. Logo, a profundidade do Geoenrijecimento é ajustada em função das condições de campo. A pressão e o volume de formação dos bulbos de compressão radial do solo, são monitorados mediante transdutores acoplados diretamente à tubulação do geogROUT, conectando-se com smartphone ou tablet, via bluetooth, informando a pressão e volume imposto a cada metro de profundidade.

Malha de intervenção no solo

As verticais de adensamento, são executadas em malha quadrada com típico espaçamento 3,00m x 3,00m. Desta forma, ter-se-á 6 drenos ao redor de cada vertical.

Volume dos bulbos



O volume típico dos bulbos de compressão radial é de 900l. Desta forma, ter-se-á um diâmetro médio teórico de 120cm. A execução dos bulbos terá início no terreno impenetrável rochoso inferior, promovendo-se um bulbo a cada metro de profundidade, de baixo para cima, até chegar à superfície.

Configuração das malhas do melhoramento do solo.

Pressão dos bulbos

A imposição de tensões no solo, durante a formação de cada bulbo de compressão radial, ocorre como alternativa ao critério de volume, quando da existência de camadas mais resistentes (pouca compressibilidade).

Na ausência de compressibilidade, considerando-se as características de projeto, o critério de pressão, imposto ao solo, é de aproximadamente 10kg/cm².

Certificação do melhoramento do solo

A certificação do processo de geoenrijecimento do solo, inerente ao serviço, é realizado com ensaios piezométricos, tomográficos e pressiométricos. O monitoramento do excesso e dissipação de poropressão, iniciar-se-á antes da fazer de cravação dos geodrenos. Portanto, a instrumentação típica consiste de:

1°

Uma (01) unidade de medição e controle de geoenrijecimento do solo, para cada frente de trabalho avaliando o volume e a pressão de bombeamento, o que garantirá os parâmetros geotécnicos desejados.

2°

Um (01) pressiómetro TEXAM da Rocrest.

3°

Vinte (20) piezômetros de cordas vibrantes. (típico)

4°

Um (01) nível óptico e três (03) régua de medição.

5°

Um equipamento de tomografia por imagem

REFERÊNCIAS

- Patricia Karina Tinoco é engenheira geotecnica. Trabalha com melhoramento de solos moles.
- Andrade JE, Ramos AM, Lizcano A (2013) Criterion for flow liquefaction instability. Acta Geotech. <https://doi.org/10.1007/s11440-013-0223-x>
- Borja RI (2006) Condition for liquefaction instability in fluid-saturated granular soils. Acta Geotech 1:211–224. <https://doi.org/10.1007/s11440-006-0017-5>
- Byrne PM, Ss Park, Beaty M, Sharp M, Gonzalez L, Abdoun T (2004) Numerical modeling of liquefaction and comparison with centrifuge tests. Can Geotech J 211:193–211. <https://doi.org/10.1139/T03-088>
- Najma A, Latifi M (2017) Predicting flow liquefaction, a constitutive model approach. Acta Geotech 12(1):793–808
- Ozutsumi O, Sawada S, Iai S, Takeshima Y, Sugiyama W, Shimazu T (2002) Effective stress analyses of liquefaction-induced deformation in river dikes. Soil Dyn Earthq Eng 22(9–12):1075–1082
- Cirone Alessandro, Projeto, Controle e Execução do CPR Grouting.

SOLOTEST®

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



1.014.250 - Extrator Shelby de Bancada



1.055.001 - Prensa de Adensamento



1.022.250 - Prensa CBR / Marshall Digital Microprocessada



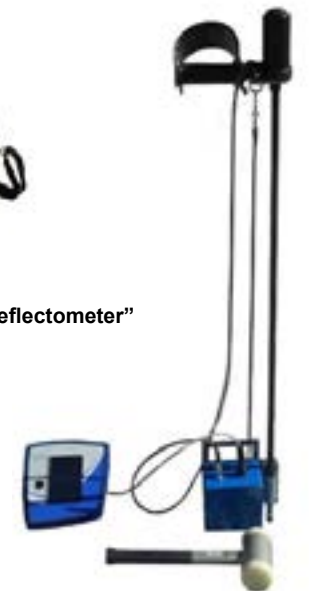
4.100.030 - Medidor de Densidade de Solo Não Nuclear (SDG)



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



4.100.300 - LWD "Light Weight Deflectometer"



4.100.035 - Penetrômetro Dinâmico Eletrônico para Solos Panda

COMO ENTENDER LIQUEFAÇÃO, FLUXO E RUTURA DO SOLO ASSOCIADOS?



Uma das áreas, da zona portuária de Manaus, acometida por liquefação em 2010, com fluxo limitado a espalhamento lateral.

Ambiguidades na utilização do termo liquefação e na relação entre liquefação e rutura do solo, frequentemente, provocam confusão entre geotécnicos,

geólogos e outros profissionais da área, possibilitando interpretação e diagnósticos equivocados. Há inúmeros trabalhos, particularmente de laboratório,

que podem esclarecer a diferença entre liquefação e rutura do solo. Liquefação do solo é definida como a transformação de um solo, preferencialmente

granular, em estado sólido para o liquefeito, como consequência do aumento da poropressão. Esta definição evita a confusão entre liquefação do solo e possíveis condições de rutura por fluxo, após a liquefação. A condição de rutura por fluxo divide-se em dois tipos:

01 | POR FLUXO ILIMITADO

Se a redução dos excessos de poropressão, causado pela distância, durante a deformação fluida, não for suficiente para solidificar o solo e, assim, interromper o escoamento.

02 | POR FLUXO LIMITADO

Se for suficiente para solidificar o solo, após o processo de deformação finita.



Alguns segundos após o início da rutura por liquefação da barragem de Brumadinho, em Minas Gerais com fluxo ilimitado.

Após a liquefação de um maciço, fluxos ilimitados geralmente promovem deslizamentos com extensa movimentação e correnteza, enquanto que por fluxos limitados, ocorre no máximo deslizamentos com espalhamento lateral. Devido ao efeito crítico, que o processo de liquefação tem sobre o comportamento seguro de maciços de terra e sua estabilidade, nestes últimos dez anos, há enorme quantidade de pesquisas correlacionadas ao fenômeno da liquefação e os fatores que a controlam.

REFERÊNCIAS

- Castro, Gonzalo, 1969, Liquefaction of sands: Harvard Soil Mechanics Ser. no. 81, 112 p.
- Finn, W. D., Bransby, P. L., and Pickering, D. J., 1970, Effect of strain history on liquefaction of sand: Am. Soc. Civil Engineers Proc., Jour. Soil Mechanics and Found. Div., v. 96, no. SM6, p. 1917-1934.
- Seed, H. B., and Idriss, I. M., 1971, Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential: Am. Soc. Civil Engineers Proc., Jour. Soil Mechanics and Found. Div., v. 97, no. SM9, p. 1249-1273.
- Seed, H. B., Lee, K. L., and Idriss, I. M., 1969, Analysis of Sheffield Dam failure: Am. Soc. Civil Engineers Proc., Jour. Soil Mechanics and Found. Div., v. 95, no. SM6, p. 1453-1490.
- Seed, H. B., and Peacock, W. H., 1971, Test procedures for measuring soil liquefaction characteristics: Am. Soc. Civil Engineers Proc., Jour. Soil Mechanics and Found. Div., v. 97, no. SM8, p. 1099-1119.
- Varnes, D. J., 1958, Landslide types and processes, chap. 3, in Eckel, E. B., ed., Landslides and engineering practice: Nat'l. Research Council, Highway Research Board Spec. Rept. 29, NAS-NRC Pub. 544, p. 20-47.



Nesta barragem de rejeitos, também com rutura por liquefação com fluxo ilimitado.

Estratégias para melhorar massas de solo de barragens de rejeitos e de margens fluviais da Amazônia

Susceptíveis ou pós liquefação

Eng. Roger Kim

Tomando como exemplo a margem portuária de Manaus, AM no final de 2010, completamente destruída e adentrando no Rio Negro, é possível imaginar a grandiosidade dos volumes dos excessos de poropressão acumulados no solo, ao longo da margem, a dramática redução da rigidez e da resistência dos maciços ali existentes. Esta extensa rutura, por liquefação, assim como a do porto de Santana, AP que ocorreu, três anos após, em 2013, apresentam semelhanças, como pode ser observado nos vídeos, relatórios e estudos existentes. Se compararmos os vídeos das ruturas da Barragem de Brumadinho, com a da área portuária de Manaus observa-se, também, semelhanças. A liquefação tem sido, e continuará a ser, a principal fonte de grandes danos em margens portuárias da Amazônia e, por extensão, em barragens de rejeitos, causando perda de vidas e afetando, sobremaneira, a economia de municípios e do estado.

Serviços intensos de melhoramento do solo, na zona portuária de Manaus, AM, sobre o solo rompido por liquefação.



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

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

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

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

Leveraging the Leica MCI – a unified

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

LEICA GEOSYSTEMS

Contact us

Communications Team

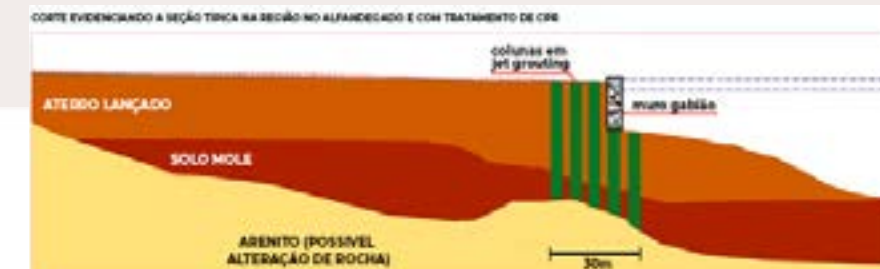
Leica Geosystems AG

CH-9435 Heerbrugg

Switzerland

media@leica-geosystems.com

Os parâmetros geotécnicos utilizados nas análises de equilíbrio limite convencional, precisam ser muito bem investigados, possivelmente com sondagens por imagem, como a tomografia do solo por imagem, TSI, já que há substancial ou radical alteração dos parâmetros geotécnicos do solo, ao longo da área destruída, na medida em que o processo de liquefação ocorre. Recomendações contidas nos documentos "The Japan PHRI and the Japanese Geotechnical Society", produziram diretrizes de projetos (PHRI 1997, JGS 1998), para especificação da extensão da melhoria do solo, adjacente às áreas com ruturas assim como importantes particularidades pertinentes. Modelagens, pertinentes às recomendações PHRI, demonstram que a migração dos campos de excessos de poropressão, existentes no solo liquefeito não melhorados, podem desenvolver outras zonas de tensões nos solos adjacentes, que está sendo melhorado, particularmente devido a baixa resistência cisalhante existente. Isto é extremamente preocupante, se pensarmos na solução a ser imposta, através da ocorrência de um exemplo prático.



Projeto de execução de colunas de jet grouting na área rompida.



Praticamente um ano de serviços, de "recuperação da área rompida", com colunas de Jet Grouting, o solo foi novamente liquefeito. Colunas não sustentam enormes empuxos gerados por grandes campos de excessos de propressão. Os equipamentos de Jet Grouting misturaram-se ao solo rompido.

Logo após a extensa rutura na margem portuária de Manaus, na vazante do Rio Negro, em outubro/2010, iniciaram-se serviços de melhoramento do solo, com geoenrijecimento, em uma região e em outra, serviço de recuperação com formação de colunas, com Jet Grouting, no lado oposto, de modo a convergir, considerando-se a urgência desejada, isto em janeiro/2011. Com o desenvolvimento dos serviços na vazante seguinte, em outubro de 2011, ocorreu rutura em toda a área em que se desenvolvia as colunas de Jet Grouting. A partir daí, todo o serviço foi realizado com melhoramento de solo, até 2015. O motivo desta rutura pode estar associado a baixa resistência cisalhante do solo, entre colunas de Jet Grouting que, associado à traumática particularidade do desenvolvimento dos serviços, com jatos d'água, que aumentam os campos de poropressão, produzindo vibrações e, também, amplificando pressões de terra laterais, ocasionou a ruína completa do solo, envolvente entre colunas. Mitchell e outros, 1998, apresentaram este estudo, da influência da migração dos excessos



A extensão dos danos foi enorme, inclusive com a vida de 3 funcionários do porto.

de poropressão, das zonas de solos liquefeitos, adjacente à solos não liquefeitos. A partir do limite do solo não melhorado, a dimensão lateral do solo melhorado, ainda é afetada pelo excesso de poropressão, sendo aproximadamente igual a metade da profundidade do depósito liquefeito. Para o caso da capacidade de carga de sapatas e estacas de fundações, a área do solo melhorado deve ser estendida lateralmente, a partir da estrutura em questão, de um valor igual a metade da profundidade da camada, que provavelmente sofreu liquefação. É interessante observar os simples exemplos de instabilidade estática global, correspondente a situações onde há uma "face livre", em direção a qual pode ocorrer o espalhamento lateral

(figuras a e b, a seguir) e casos sem faces livres, mas com solo entaludado (figura c e d), que caracterizam bem barragens de rejeitos e áreas portuárias da Amazônia. O estado do solo, pós "grandes" deformações e deslocamentos (ruturas), provocados por liquefação e/ou amolecimento do solo, induzido por excessos de poropressão, é extremamente difícil de ser avaliado. Para a totalidade dos projetos de recuperação, de áreas com ruturas por liquefação, as "grandes" deformações associadas à instabilidade estática, pós liquefação exige, sempre, o melhoramento de cada metro cúbico do solo liquefeito, reestabelecendo-se a resistência e a rigidez desejadas. Grandes ruturas de solos, associadas à liquefação incluem:

1. Ruturas por fluxos, em taludes ou em condições com face-livre.
2. Grandes deformações em solos inclinados e em condição de face-livre.
3. Rutura da capacidade de carga de fundações particularmente rasas.
4. Aumento da pressão lateral da terra, junto à estruturas, ocasionando grandes deslocamentos.
5. Perda da resistência passiva do solo junto à estruturas, ancoragens e estacas carregadas lateralmente.
6. Recalques excessivos.

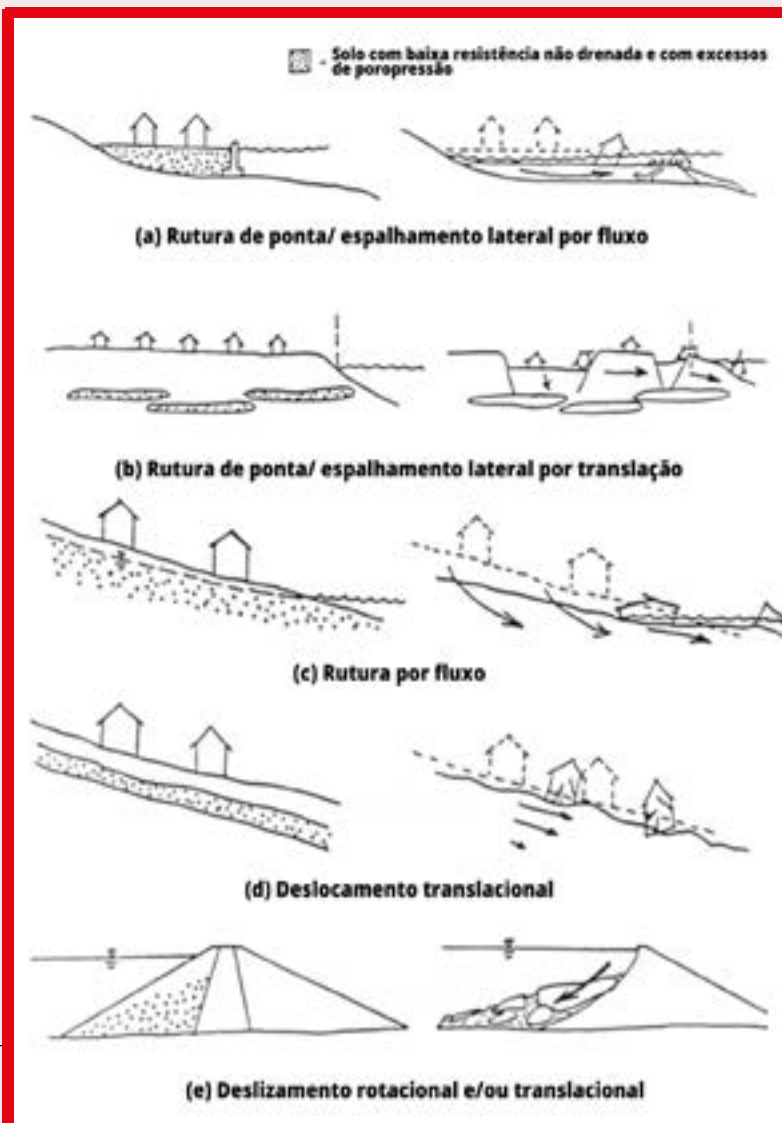


Image courtesy of Adviseurs in Bouwtechniek (ABT)

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



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

PLAXIS: Simulating Soil Lab Tests

www.bentley.com

Dear User,

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

The agenda for the one-hour session encompasses:

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

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

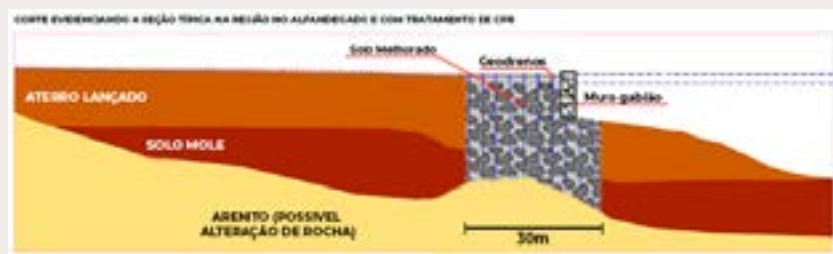
Geotechnical Analysis SIGs – complimentary virtual workshops to keep you working optimally!

• **Estratégia de recuperação utilizada na área portuária de Manaus, AM, após a extensa rutura, por liquefação, na vante do Rio Negro em 2010.**

Observa-se, portanto, que os objetivos da recuperação de áreas, submetidas a ruturas por liquefação será, sempre, em direção à sua consolidação, monitorando-se o desenvolvimento, de preferência com sondagens por imagens, da evolução da resistência e rigidez, associadas ao aumento da drenagem. Na área portuária de Manaus, a estratégia utilizada foi desenvolver a melhoria do solo, com geoenrijecimento, a partir das áreas à montante da margem, consideradas estáveis, após sondagens SPT, piezométricas, pressiométricas e com tomografia por imagem, TSI. A partir daí, iniciou-se a cravação de geodrenos e a formação das verticais, para formação de bulbos, via ex-



A extensão e a profundidade dos problemas, promoveram um enorme desafio para a estabilização dos



Projeto de melhoramento do solo, na área rompida.





depois. Os valores obtidos, após o melhoramento do solo permitiu, além de recuperar as áreas perdidas, na recente rutura (2010), adentrar mais 35m, Rio Negro adentro, de modo a reconquistar/reintegrar áreas anteriormente perdidas para o rio. (ruturas passadas)

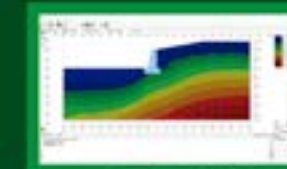
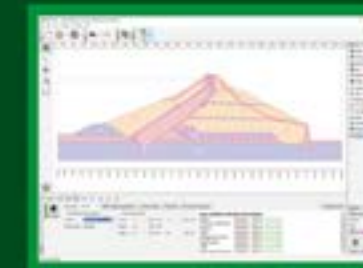
Área portuária, após o melhoramento do solo, e a elevação do muro em gabião e aterro, conforme projeto acima.



GEO5

Software de Geotecnia para uma vasta gama de análises:

-  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

Distribuído por:

SOLUÇÕES CAD BIM

www.solucoescad.com.br





Área portuária de Manaus, após os serviços concluídos de melhoramento de solos. A área do cais foi toda retificada e ampliada.

• Estratégia sugerida para descaracterização de barragens de rejeitos

Em todas as fases de um projeto de barragem de rejeitos, torna-se necessário adequar ou readequar a condição do solo, seja antes de iniciar sua deposição, seja durante o alteamento ou após, para o reaproveitamento do rejeito. Melhoramento de solo, entenda-se, significa

restabelecer, aprimorar ou fazer crescer os parâmetros geotécnicos, através das propriedades físicas e mecânicas dos materiais envolvidos, na barragem de rejeitos, de modo a oferecer a estabilidade necessária e, claro, a rigidez específica. A técnica de melhoramento de solos, deve seguir 100% as diretrizes técnicas da teoria da consoli-



Barragem de rejeitos: A preocupação para o uso futuro da área

dação da argila, única forma de chegar aos objetivos desejados. O melhoramento do solo, com geoenrijecimento impõe, previamente a drenagem necessária, seguindo-se do processo compressivo, que permite consolidar o solo

argiloso mole/ rejeito, seja para receber cargas, seja para melhorar a estabilidade ou para permitir escavações posteriores. Tudo isto, de forma viável, sem improvisos, ou paliativos, como técnicas de fundação à base de colunas.



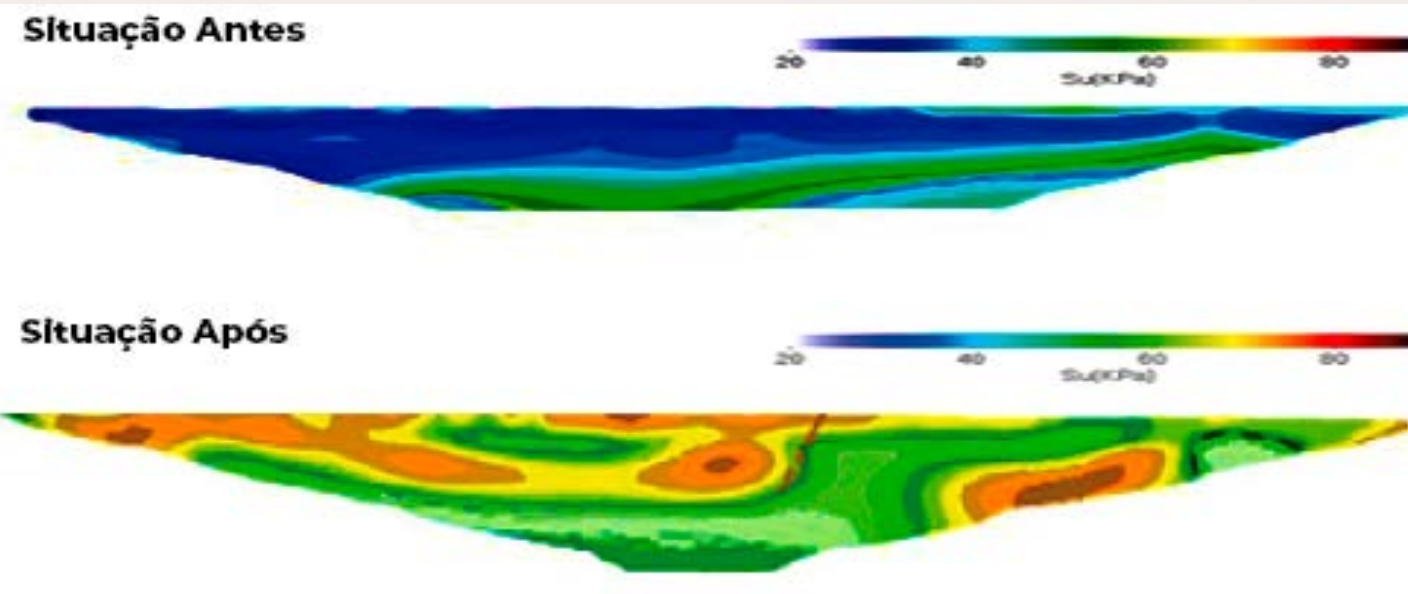
Análise do solo com pressiômetro.

A desejada consolidação, é particularmente útil em situações de instabilidade de barragens, com alteamento de montante, ou condições similares, promovendo a estabilização da barragem, de jusante para montante, aumentando seu fator de segurança, sem



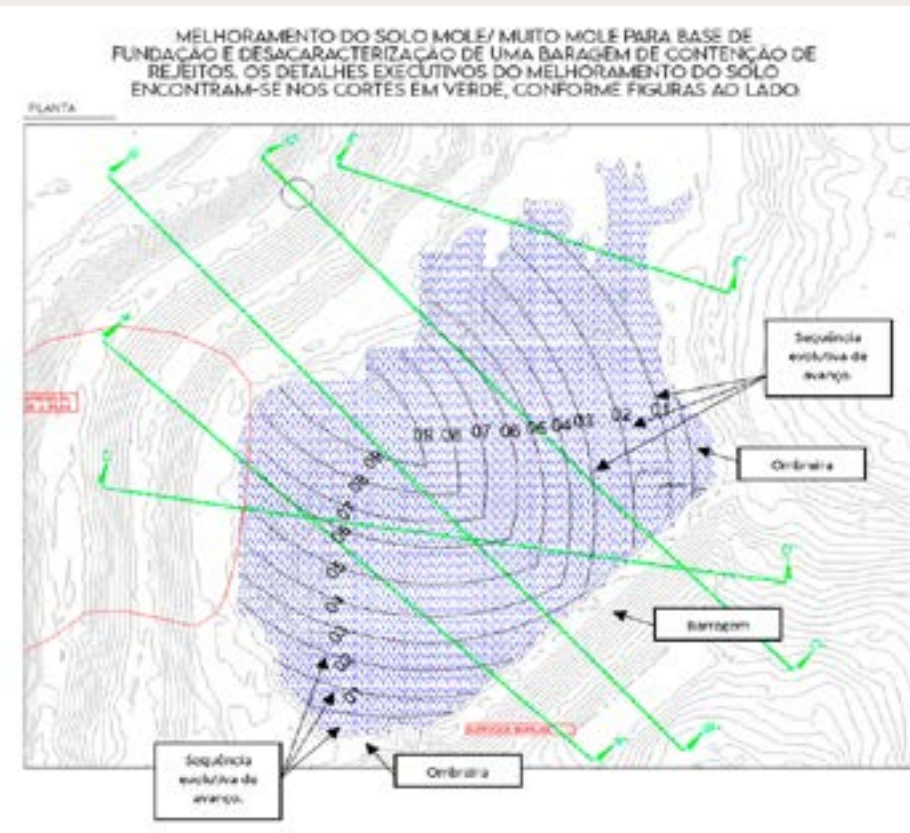
Cravação de geodrenos e a formação de bulbos de compressão do solo. Trata-se do melhoramento do solo com geoenrijecimento.

risco associado, considerando-se que, a medida que evolui, garante-se mais e mais maciços e a desejada contenção, neutralizando empuxos laterais advindos de montante. Importante ressaltar que qualquer solução não deve apresentar qualquer pro-



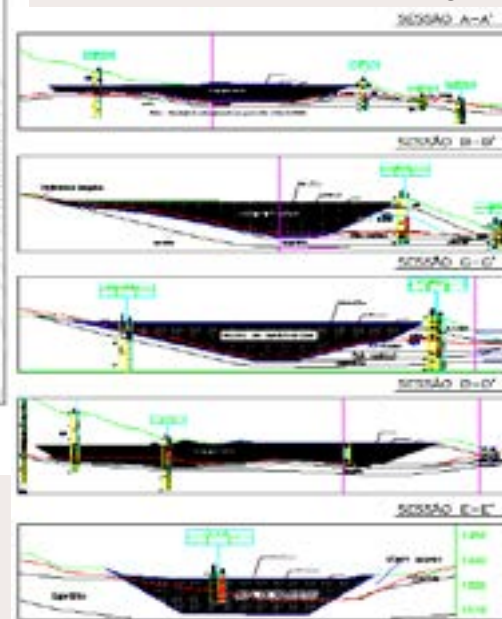
Tomografia por imagem, antes do melhoramento do solo e após. O aumento da resistência cisalhante garante a estabilidade necessária para intervir na área.

cesso de cravação ou vibração prejudicial. Uma vez melhorado o solo, só se permite sua certificação com ferramenta geotécnica caracterizada por ensaios de deformabilidade, tipo pressiômetro, ensaios de placa, dilatômetro e tomografia por imagem, exatamente pelo fato do solo melhorado ter dois componentes e não mais um, apenas. Razão pela qual, ensaios penetrométricos, tipo SPT, CPTu e palheta não conseguem analisá-los, conjuntamente. Desta forma, o melhoramento do solo é bem avaliado com tomografia por imagem e, complementarmente com o pressiômetro. Nas imagens tomográficas, acima, verifica-se a presença de material mole, no início dos serviços que após o melhoramento, constata-se sua consolidação e estabilidade.



ao mesmo tempo em que melhora-se sua capacidade suporte, para receber cargas e, principalmente, empuxos horizontais advindos de montante.

No projeto, a seguir, apresenta-se estratégia de trabalho para uma barragem de rejeitos, que deverá receber mais carregamento de montante, na medida em que as pilhas são ampliadas. Torna-se necessário melhorar o solo, de modo a descaracterizar a barragem,



REFERÊNCIAS

- Roger Kim é engenheiro civil e trabalha com melhoraamento de solos moles.
- JOAQUIM RODRIGUES, Melhoramento de solos moles e o geoenrijecimento, Rio de Janeiro, 2018
- ALBUQUERQUE FILHO, L. H. Avaliação do Comportamento Geotécnico de Barragens de Rejeitos de Minério de Ferro através de Ensaio de Piezocone. 2004.192. Universidade Federal de Ouro Preto - MG, Brasil, 2004.
- ANDREWS, Desmond C; MARTIN, Geoffrey R. Criteria for Liquefaction of Silty Soils. 12th World Conf. on Earthquake Engineering, Auckland, New Zeland, 2000, p. 1-8
- ARAUJO, C. B. DE. Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro Teses.Ufrj.Br. p. 133
- BEATY, M. H.; BYRNE, P. M. Liquefaction and deformation analysis using a total stress approach Journal of Geotechnical and Geomironmental Engineering, v. 134, n. 8. p. 1059 - 1072. 2008.
- BEDIN, J. Estudo Do Comportamento Geomecânico De Residuos De Mineração. 2010. 205 f. Tese (doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre - RS, Brasil, 2010.
- BEDIN, J. et al. Gold tailings liquefaction under critical state soil mechanics. Géotechnique, v. 62, n. 3, p. 263-267, 2012.
- BISHOP, A. W. Progressive failure-with special reference to the mechanism causing it. 1967, Oslo: Proc. Geot. Conf, 1967. p. 142.
- BISHOP, A. W. Shear strength parameters for undisturbed and remoulded soil specimens. 1971, Cambridge University: Roscoe Memorial Symposium, 1971. p. 3-58.
- BITTAR, R. J. Acidentes e Incidentes em Barragens de Rejeitos: Como Prevenir ou Atenua-los? 2017, Belo Horizonte - MG: II Seminário de Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeitos - SGBR-15 e 16 de Maio de 2017, 2017.
- BOULANGER, R. W.; IDRIS, I. M. Evaluation of potential for liquefaction or cyclic failure of silts University of California, 2004. and clays - Report No. UCD/CGM-04/01.. Davis: Department of Civil & Environmental Engineering.
- BOULANGER, R. W.; IDRIS, I. M. Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays, soils Journal of Geotechnical and Geomironmental Engineering. v. 132, n. 11. p. 1413-1426. 2006.
- BOWLES, D. S. Tolerable risk for dams: How safe is safe enough? US Society on dams annual conference, Philadelphia, Pennsylvania, USA. 2007., n. March, p. 1-24.
- BRAY, J. D. et al. Liquefaction susceptibility of fine-grained soils. 2004, Berkeley, California, USA: Proceedings 11th ICSD and 3th ICEGE, 2004.



O SOFT SOIL BRAZILIAN INSTITUTE ajuda você e sua obra sobre solos moles

Melhorar solos moles exige conhecimentos geotécnicos práticos e teorias sofisticadas. Cada obra é um caso específico que exige solução diferenciada. Saiba como dimensionar o Geoenrijecimento do solo mole, através de planilha exclusiva. Basta acessar o link:
http://www.engegraut.com.br/geoenrijecimento/MC_v1.0.rar

softsoilbrazilianinstitute.com.br

PARCEIROS

