

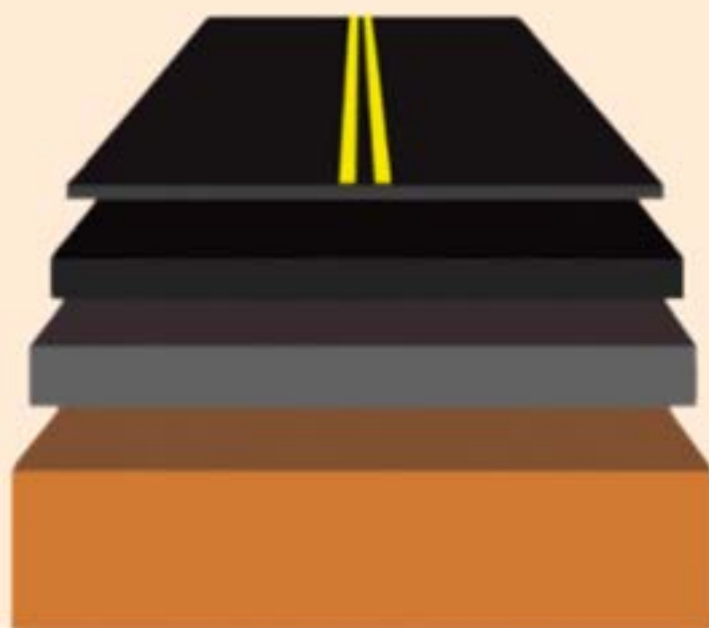
Soft Soil Brazilian Review

- 04
Aterros para estradas sobre solos moles:
problemas atuais e perspectivas futuras
- 12
A análise do projeto do aterro sobre solos
moles
- 34
Melhoramento do solo mole.
Estratégia para estabilizar aterros estradai

28 Consulta

Como asseguramos, no projeto, a
estabilidade do aterro estradal?

ATERROS PARA ESTRADAS



SOBRE SOLOS MOLES

PROBLEMAS ATUAIS
E PERSPECTIVAS FUTURAS



EDITORIAL

Atualmente, a situação dos aterros e taludes rodoviários, construídos em regiões com solos moles, geram preocupação, principalmente à quem transita ou desloca-se por estradas e autoestradas, considerando que a maioria destes maciços de solo, não apresenta nenhum tipo de monitoramento ou controle tecnológico, visto que qualquer fator anômalo externo interfere em sua forma física, provocando sua instabilidade e contribuindo para o seu rompimento. Para isso, existem diversos tipos de métodos e controles tecnológicos, com determinados estudos e ensaios, apresentando dimensões reais em softwares, para auxílio nesta empreitada, tornando possível testar e analisar quais serão as adaptações mais favoráveis ao ambiente de estudo. Nesta edição, de nossa revista SSB, procuramos revisar as questões enfrentadas na construção de aterros rodoviários, sobre solos moles, propondo uma direção mais coerente para seu desenvolvimento. Apresentamos uma importante matéria, acerca do melhoramento efetivo do solo mole, e as técnicas alternativas, além de fatores que contribuem para a estabilidade de aterros estradais. Os resultados mostram que o processo de recalque, a es-

tabilidade dos taludes dos aterros e a capacidade de carga do solo, infelizmente, ainda é motivo de dificuldades para projetistas geotécnicos, sem domínio da técnica de melhoramento de solos moles. Informamos, também, que dados geométricos são fatores-chave para o projeto de aterros estradais. O conteúdo desta edição, pode e deve ser utilizado para desenvolver sistemas de orientação para futuros projetos, modelagem numérica, oferecendo uma revisão bem mais ampla, para geotécnicos que trabalham ou que iniciarão pesquisas ou trabalhos neste campo. A construção ou ampliação de estradas, é mais necessária do que nunca, e envolver grandes estruturas de terra, com dois componentes essenciais, o solo de fundação e o aterro, parâmetros fundamentais para a análise do desempenho da obra como um todo. Só, e somente só, com a compreensão e interpretação do comportamento destes componentes, com dispositivos de deformação, e estabilidade poder-se-á conhecer o possível mecanismo de colapso.

Boa leitura
Joaquim Rodrigues



SOFT SOIL BRAZILIAN INSTITUTE

Rua Correia de Araújo, 131- 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

(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



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

04



12



34



Capa



Obras geotécnicas são estruturas de grande porte, como construção ou ampliação de rodovias, uma necessidade permanente hoje em dia. Graves impactos na sociedade, estão associados com este tipo de obra, em que os riscos de falhas, geram grandes perdas financeiras, ambientais e de vidas humanas. Assim, a análise da estabilidade de um talude e a verificação de sua probabilidade de falha, assim como o próprio aterro, são de extrema importância para evitar acidentes.

24

Edição - Jul/Ago 2022

Sumário

Aterros para estradas sobre solos moles. Problemas atuais e perspectivas futuras **04**

Joaquim Rodrigues

A análise do projeto do aterro sobre solos moles **12**

Patricia Tinoco

Melhoramento do solo mole. Estratégias para estabilizar aterros estradais **34**

Roger Kim

Seções

Editorial **02**

Agenda **24**

Consulta **28**

softsoilbrazilianinstitute.com.br

Aterros para estradas sobre solos moles

Problemas atuais e perspectivas futuras.

Ao construir ou ampliar estradas, precisamos levantar aterros para adequar o perfil longitudinal da futura via. A grande questão, quando surgem depósitos de solos moles no caminho que, simplesmente, não permitem recebê-los, há a exigência do melhoramento

do solo, para readequa-los. Para sua construção, torna-se necessário entender sobre a necessária estabilidade destes alteamentos, assim como os inerentes mecanismos de deformação, particularmente em ampliações rodoviárias, com o risco da obra apresentar sérios problemas, com inúmeros prejuí-

zos. Dentro deste contexto, e com a mesma importância, dois outros fatores são também importantes: a qualidade do material do aterro e o grau de compactação a ser imposto em suas camadas sem o que, o próprio aterro, será motivo de deformações/recalques. Utiliza-se, como material de aterro, solo, agregados

naturais e material leve, o que exige o conhecimento de suas características de drenagem, compactação, compressibilidade e resistência. Voltando ao solo mole de fundação, que precisará suportar os aterros, costuma ter como características alta compressibilidade/plasticidade e sensibilidade, além de baixa

ou nenhuma resistência cisalhante que, invariavelmente, promovem ausência de capacidade suporte e grandes problemas de recalque, razão pela qual torna-se necessário o melhoramento destes solos. A questão da deformação do solo de fundação, sob os aterros a serem construídos é, sempre, motivo de

análise previa, juntamente com a escolha do método de tratamento do solo. O método específico de tratamento de solos moles é com seu melhoramento efetivo, com geoenrijecimento, que oferece eficiência mínima de 95%. Ou seja, apenas 5% de recalque residual, comparado ao recalque total,

Figura 1: Na ampliação desta rodovia federal, não se melhorou o solo de fundação, com níveis de resistência e rigidez suficientes. O resultado foi a rutura longitudinal, ao longo da emenda dos aterros.

" Meu conheci-
mento sobre so-
los moles mudou
completamente
após ler o livro"

Eng. Thaissa Lisboa



**Solicite agora
mesmo!**



com a construção do aterro sem qualquer tratamento do solo. Técnicas alternativas, ou mesmo paliativas pois, efetivamente, não melhoram o solo, mas sim, formam colunas que procuram transferir as cargas dos futuros aterros para camadas resistentes profundas, apresentam eficiência média em torno de 50%, ou seja, desenvolverão cerca de 50% de recalque residual após a construção do aterro, devido ao fato de que o solo mole, que permanece entre colunas, sofre recalque comprometendo a futura obra. Outro aspecto relevante, tem a ver com uma destas técnicas alternativas, a coluna de brita, que necessita que o solo mole tenha, minimamente, 15kPa de resistência, ausência de matéria orgânica e uma profundidade limitada máxima, de 10m, sem o que as colunas sofrem o fenômeno do "embarrigamento". Por outro lado, quanto maior for a rigidez das colunas, maior será o efeito do arqueamento do solo entre elas, o que causará mais recalques. Todas estas informações deverão ser repassadas ao cliente, pelo geotécnico especialista em melhoramento de solos, informando o fator de segurança, as análises de estabilidade, de recalque, além do inerente monitoramento do desenvolvimento do tratamento do solo, com análises pressiométricas, piezométricas e com tomografia por imagem. Ao final, torna-se obrigatório e imprescindível questionar a certificação do tratamento do solo mole imposto.

O SOLO MOLE E OS DESAFIOS.

Depósitos de solo moles brasileiros são encontrados em praticamente todas as cidades litorâneas apresentando, tipicamente, uma fina camada de aterro superficial sobrepondo-se a profundas camadas de argila mole (comumente orgânicas), apresentando coloração preta à cinza claro, combinação de argila e matéria orgânica/turfa, com inerentes propriedades físicas, químicas, mecânicas e biológicas. Testes laboratoriais de pesquisas recentes, que envolvem rutura de aterros, sobre argilas moles, evidenciam a presença de minerais como illita e a montmorilonita, que produzem características de baixa resistência cisalhante e enorme potencial expansivo, tornando o

solo propenso à rutura. Outras pesquisas atuais, confirmam esta asserção, de que a illita apresenta características de alto limite de liquidez, contribuindo para a obtenção de parâmetros de baixa resistência e instabilidade, devido a particularidades de altas deformações laterais e verticais. A carga gerada pelo peso dos aterros, faz surgir tensões no solo, particularmente poropressões, desencadeando mecanismos de deformação, caracterizados por tensões não drenadas, semelhante a um fluido viscoso. Exemplos de ruturas de rodovias em construção e, principalmente, em ampliações ocorrem, quase que frequentemente, em nosso país, e não são catalogadas. Um exemplo bem



Figura 2: A heterogeneidade do solo de fundação causou esta rutura. Dai a necessidade de homogeneizá-lo, ao longo do percurso, com melhoramento do solo.

divulgado, ocorreu em uma ampliação estradal, no município de Quissamá, no Rio de Janeiro. A tentativa de precarregamento, ocasionou extensas ruturas, no solo de fundação, obrigando ao efetivo melhoramento do solo, com geoenrijecimento, considerando que sua condição, pós rutura, ficou ainda pior.



Figura 3: Antes, durante e depois com a construção de novo aterro, nesta ampliação estradal, no município de Quissamá, RJ.

Esta é uma das razões, pelas quais, em aplicações de rodovias, dever-se-á considerar, com bastante cuidado, a instabilidade dos aterros, devido a movimentos laterais, causados pelo novo aterro em relação ao antigo, particularmente devido ao diferencial de rigidez entre os dois maciços, motivo pelo qual dever-se-á, sempre, objetivar a maior rigidez possível para aterros de aplicações rodoviárias. Um outro problema recente, de rutura de aterro, ocorreu na ampliação da BR-101, em Goianinha, no Rio Grande do Norte onde, com precarregamento, tentou-se elevar o aterro junto à antiga rodovia. Novamente, uma extensa e profunda rutura, do aterro, rompendo inclusive as novas estacas da futura ponte, quase comprometendo a antiga BR. Situação como esta, exigem o imediato melhoramento do solo.

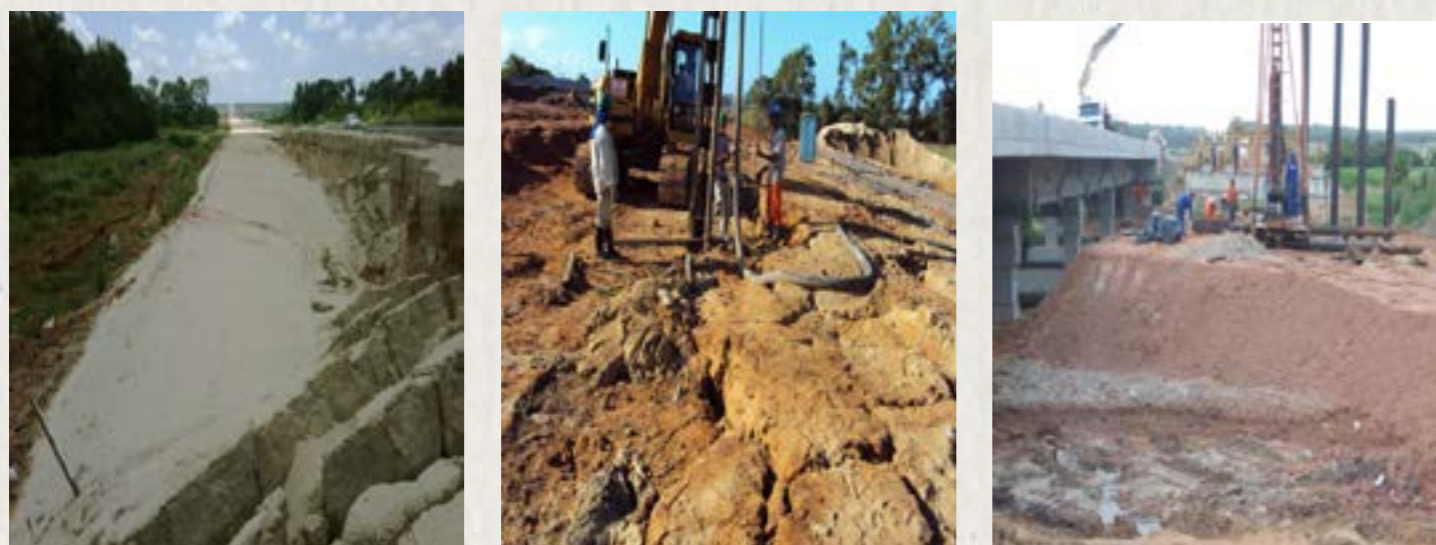


Figura 4: Ampliação estradal, com precarregamento e a rutura longitudinal, junto a antiga rodovia. O antes, durante e depois, na sequencia fotográfica, com a cravação de novas estacas e a construção de novo aterro neste trecho da BR-101, em Goianinha, Rio Grande do Norte.

Ilustrando ainda mais, a grave situação da utilização da tecnica de precarregamento, em construção de aterros estradals, há o caso da rutura do aterro de alteamento e ampliação estradal no trecho da PE-051, ligando os municípios de Porto de Galinhas à Serrambi, em Ipojuca, em Pernambuco.



Figura 5: A tentativa de elevação do novo aterro, ocasionou o afundamento de extenso trecho estradal, na PE-051. Fotos do antes, durante e depois, com a estrada elevada e ampliada, devido ao melhoramento do solo.

Um outro aspecto importante, manifesta-se após o "tratamento do solo mole". O aterro de construção ou de ampliação estradal deforma, vertical e horizontalmente, quando aumenta-se as tensões de compressão no solo de fundação, alterando-se a quantidade de água no solo, sua massa e temperatura, podendo durar longos períodos. Nesta condição de transição, com o desenvolvimento de deformações, há perda peso e volume, ocorrendo afundamentos e trincas na superfície do aterro que, com chuvas, aparecem alagamentos e penetração d'água para dentro do solo, tornando-o mais crítico. O necessário conhecimento do recalque, envolve os componentes total e o diferencial, entre regiões distintas, motivado pela heterogeneidade do solo, particularmente em suas camadas moles, onde sobressai a enorme diversidade de rigidez. É exatamente aí, que atua o melhoramento efetivo do solo, com geoenrijecimento, comprimindo e drenando cada metro cúbico de solo, homogeneizando-o e enrijecendo-o para valores pré-determinados. Com relação ao necessário conhecimento da estimativa do recalque, a geotecnia do solo mole passou por uma sofisticada e recente revolução, onde passamos do método 1d clássico, para métodos numéricos, com a grande vantagem de que elementos finitos são aplicados em materiais elásticos, anisotrópicos e não-homogêneos, podendo lidar com comportamentos tensão-deformação, não linearidade e várias complexidades. Os dados de entrada, no entanto, desempenham papel importante em sua previsão, tornando-se importante analisar, cuidadosamente, as restrições inerentes, de modo a garantir a qualidade final da análise.

PERSPECTIVAS FUTURAS.

Continuando a analisar fatores que contribuem para o conhecimento da estabilidade de aterros estradais, sobre solos moles, seja para construção e ampliação, incluindo a elevação do greide, evidenciam-se importantes estudos atuais e sequenciados, como os apresentados abaixo:

- ➔ Hadjigeorgiou J. (2006)
- ➔ Irsyam M. (2007)
- ➔ Milles B. (2010)
- ➔ Radhadin H. (2011)
- ➔ Cirone A. (2016)
- ➔ Cirone A. (2018)

São trabalhos pertinentes à comunidade geotécnica de solos moles, informando que a estabilidade de taludes, a capacidade de carga e o conhecimento do efeito deformativo, são fatores importantes para a necessária segurança de aterros estradais, particularmente com o desenvolvimento das análises simplificadas (Cirone, 2016) e a determinação do fator de melhoramento do solo, o que quantifica sua eficiência (Cirone 2018). O fator mais relevante, destas descobertas, é que é possível melhorar solos moles, especificamente com base na consolidação de cada tipo de argila mole, de maneira rápida e com alta eficiência, de até 95%. O conhecimento dos dados reais geotécnicos, desempenham papel importante no futuro projeto. É interessante observar que a maioria dos geotécnicos preocupam-se mais em investigar a altura do aterro o que, na realidade, a inclinação do talude e a largura de sua crista devem ser determinados antes que a análise de estabilidade seja realizada. As alturas crítica, segura e razoável devem ser investigadas, no entanto, a maioria das diretrizes emitidas, por órgãos de transporte, em todo mundo, enfatizam que taludes e cargas laterais precisam satisfazer di-

retrizes normativas que, comumente, são limitadas em relação a critérios para determinação da condição do talude, baseado na altura do aterro. Outro tópico importante, é a discussão da eficiência das técnicas alternativas de tratamento do solo mole, que não priorizam a necessária consolidação do solo mole, caminho natural para seu melhoramento, o que amplia nosso conhecimento para a execução de aterros estradais mais seguros, quando há presença de solos moles.

SURGÊNCIAS D'ÁGUA EM SUBSOLOS

Cada vez mais são comuns surgências d'água no piso e paredes de subsolos de edificações. Nossa tecnologia, com injeção de aglomerantes impermeabilizantes, que interrompe todo e qualquer vazamento é única no Brasil. Nossa experiência é sua segurança. Consulte-nos.



www.engegraut.com.br
tel.: (21) 3154-3250
desde 1982

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 Engegraut 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.
- [1] Arulrajah A, Maghoolpilehood F, Disfani MM, Horpibulsuk S. (2014) Spent coffee grounds as a non-structural embankment fill material: Engineering and environmental considerations. Journal of Cleaner Production, 72:181-186.
 - [2] Yu Z, Jianhui Z, Xu Z, Xiaodong P, Hongwei L, Hao C. (2017) Finite Element Analysis of Embankment with Soft Foundation Reinforced by Geogrids. Modern Civil and Structural Engineering, 1(1):78-83.
 - [3] Watts K, Charles A. (2015) Building on fill: geotechnical aspects, Third. Garston, Watford: Building Research Establishment.
 - [4] Xue J feng, Chen J feng. (2015) Reinforcement strength reduction in FEM for mechanically stabilized earth structures. Journal of Central South University, 22(7):2691-2698.
 - [5] Zhuang Y, Wang K. (2017) Numerical simulation of high-speed railway foundation improved by PVD-DCM method and compared with field measurements. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 21(11):1363-1383.
 - [6] Yu H, Wang Y, Zou C, Wang P, Yan C. (2017) Study on Subgrade Settlement Characteristics After Widening Project of Highway Built on Weak Foundation. Arabian Journal for Science and Engineering, 42(9):3723-3732.
 - [7] Quang ND., Dang SM. (2013) Settlement calculation and back-analysis of soil properties for a test embankment on a soft clay ground improved by PVD and vacuum-assisted preloading at a site in Vung Tau, Viet Nam. Springer Series in Geomechanics and Geoenvironmental Engineering, 3:317-322.
 - [8] Li S, Huang X, Zeng C. (2017) Performance of an Embankment Foundation with Sand over Clay: Experimental and Numerical Analyses. International Journal of Geomechanics, 17(6):1-11.
 - [9] Nazir R, Moayedhi H, Subramaniam P, Gue S-S. (2017) Application and Design of Transition Piled Embankment with Surcharged Prefabricated Vertical Drain Intersection over Soft Ground. Arab J Sci Eng. doi: 10.1007/s13369-017-2628-6.
 - [10] Yean-Chin T, Peir-Tien L, Kuan-Seng K. (2016) Construction Control Chart Developed from Instrumented Trial Embankment on Soft Ground at Tokai of Kedah, Malaysia. Procedia Engineering, 143(1ctg):548-555.
 - [11] Che Mamat R. (2013) Engineering properties of Batu Pahat soft clay stabilized with lime, cement and bentonite for subgrade in road construction. MS Thesis, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Universiti Tun Hussien Onn Malaysia.
 - [12] Liu SY, Cai GJ, Tong LY, Du GY. (2008) Approach on the Engineering Properties of Lianyungang Marine Clay from Piezocone Penetration Tests. Marine Georesources & Geotechnology, 26(3):189-210.
 - [13] Horpibulsuk S, Wijitchot A, Nerimitkornburee A, Shen SL, Suksiripattanapong C. (2014). Factors influencing unit weight and strength of lightweight cemented clay. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 47(1):101-109.
 - [14] Le TM, Fatahi B, Khabbaz H. (2012) Viscous Behaviour of Soft Clay and Inducing Factors. Geotechnical and Geological Engineering, 30(5):1069-1083.
 - [15] Yalcin A. (2007) The effects of clay on landslides: A case study. Applied Clay Science, 38(1-2):77-85.
 - [16] Ohlmacher GC. (2000) The Relationship between geology and landslide hazards of Atchison, Kansas, and vicinity. Current Research in Earth Sciences, 244(3):1-16.
 - [17] Oser C, Cinicioglu SF. (2017) Embankment Design Method Combining Limit-State Approach with Stress-Path Application. International Journal of Geomechanics ASCE, 17(4):1-16.
 - [18] Lu N, Wayllace A, Oh S. (2013) Infiltration-induced seasonally reactivated instability of a highway embankment near the Eisenhower Tunnel, Colorado, USA. Engineering Geology, 162:22-32.
 - [19] Rahadian H, Hendarto, Prasetya B. (2011) The Failure of Road Embankment Over North Java Soft Soil. In: Geotech. Eng. Disaster Mitig. Rehabil. Highw. Eng. pp 224-232.
 - [20] Tatarniuk C, Bowman ET. (2012) Case Study of a Road Embankment Failure Mitigated Using Deep Soil Mixing. In: Proc. Fourth Int. Conf. Grouting Deep Mix. American Society of Civil Engineers, pp 471-482.
 - [21] Mills B, McGinn J. (2010) Design, Construction, and Performance of a Highway Embankment Failure Repaired with Tire-Derived Aggregate. Transportation Research Record, (2170):90-99.
 - [22] Irsyam M, Susila E, Himawan A. (2007) Slope Failure of an Embankment on Clay Shale at km 97+500 of the Cipularang Toll Road and the Selected Solution. In: Int. Symp. Geotech. Eng. Gr. Improv. Geosynth. Hum. Secur. Environ. Preserv. Bangkok, Thailand, pp 531-540.
 - [23] Hadjigeorgiou J, Kyriakou E, Papanastasiou P. (2006) A Road Embankment Failure Near Pentalia in Southwest Cyprus. In: Int. Symp. Stab. Rock Slopes Open Pit Min. Civ. Eng. The South African Institute of Mining and Metallurgy, Cape Town, pp 343-352.
 - [24] Davis EH, Booker JR. (1973) The effect of increasing strength with depth on the bearing capacity of clays. Géotechnique, 23(4):551-563.

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.

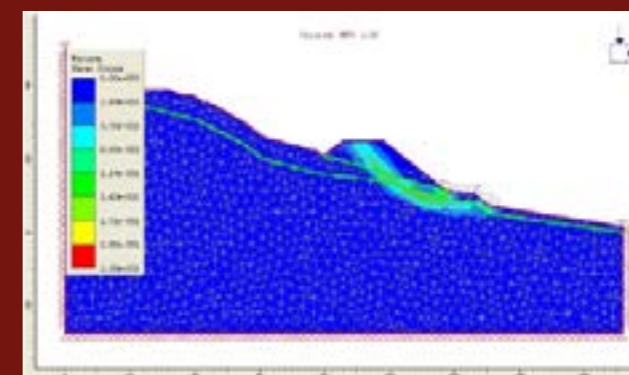
Conheça hoje mesmo esta moderníssima tecnologia (com preço atrativo)

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

A análise do projeto do aterro sobre solos moles

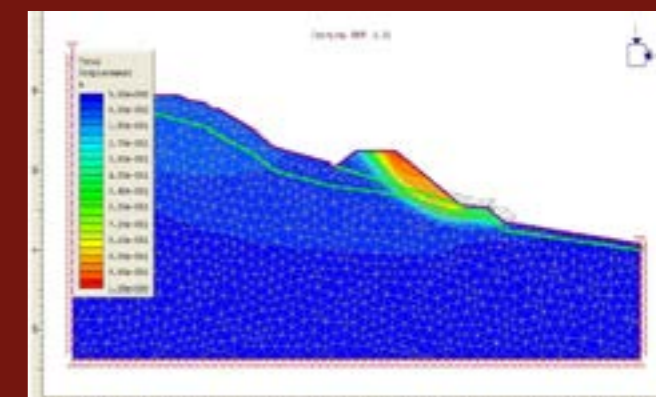
Figura 1: Rutura do aterro estradal motivado pela heterogeneidade do solo de fundação, baixa capacidade suporte e a intensa presença de chuvas.

Qualquer projeto de aterro estradal é complexo, particularmente para ampliação de rodovias, pois dependerá do propósito da construção, do ambiente e, claro, das condições do solo de fundação. Precisar-se-á, também, definir o planejamento, os dados geométricos e a análise de estabilidade/recalque, normalmente fazendo a modelagem com método de elementos finitos (MEF). O aterro consiste de uma série de camadas compactadas, até chegar ao greide da superfície do projeto. A modelagem, com MEF, é um método que possibilita projetar e analisar vários problemas, inclusive com geometrias complicadas e carregamentos, que com soluções analíticas não seriam possíveis. Existem três tipos de elementos finitos utilizados, com uma dimensão (linha), duas dimensões (plano) e três dimensões (sólido), sendo o de duas o mais utilizado no estudo da estabilidade de aterros. Estamos falando do PLAXIS, do ABAQUS e do FLAC, softwares utilizados para análises, testes e projetos na área geotécnica do solo mole, havendo a preferência pelo PLAXIS. Para a estabilidade de taludes de aterros utiliza-se, frequentemente, duas dimensões. Com relação ao talude do aterro, à medida que sua inclinação torna-se instável, a ruptura pode ocorrer em vários locais diferentes. Uma pequena ruptura ou deslizamento de um pedaço do talude, denomina-se ruptura local, ocorrendo geralmente

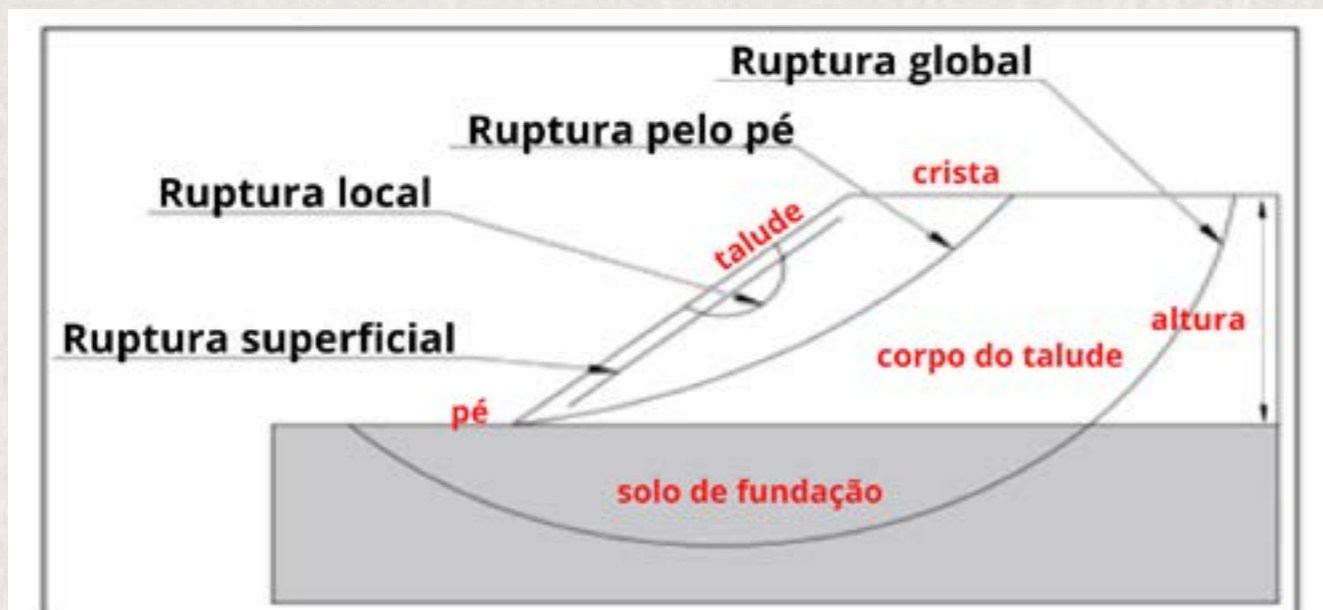


Nesta seção, da rutura estradal, pertinente a foto anterior, evidencia-se rutura profunda, indicando o desenvolvimento de concentração máxima da tensão cisalhante.

Na mesma seção, evidencia-se a rutura, pouco profunda, indicando o desenvolvimento de concentrações de deslocamentos totais.



em áreas onde o solo é fraco e pouco compactado, o que promove entrada da água e, assim, desencadeia a futura ruptura. Trincas na superfície do aterro, promovem infiltração da chuva, que faz com que a superfície do talude deslize, tornando-se a causa mais comum, especialmente em áreas sujeitas a intensa pluviometria. As causas de rupturas superficiais, são a ausência ou compactação do aterro inadequada, perda da coesão aparente, infiltração e saturação. Pode ocorrer no pé do talude, devido ao grande ângulo de inclinação, baixa resistência do solo e/ou sobrecargas. A ruptura global, ocorre quando o solo de fundação, apresenta camadas de solos moles não melhoradas.



Modos de ruptura de um talude

De acordo com a NBR 11682 (2009), talude estável não apresenta nenhuma característica de instabilidade, como trincas, sulcos, erosão, abatimentos, surgências anormais de água, rastejo e ranhuras. Depende fundamentalmente da sua resistência ao cisalhamento, função do atrito e coesão do solo, estando sua estrutura intimamente ligada ao seu histórico de tensões, como erosão, tectonismo e intemperismo. Ao definirmos a geometria do talude do aterro, a condição do solo de fundação

e as características da resistência ao cisalhamento do solo, poder-se-á avaliar a estabilidade da obra, por meio de análises computacionais as quais, em sua maioria, baseiam-se nos métodos do equilíbrio limite, utilizados geralmente com modelos bidimensionais. Deslizamentos ou escorregamentos podem ocorrer de diferentes maneiras, lenta ou bruscamente, geralmente pela perda abrupta ou gradual da resistência ao cisalhamento do solo, pela alteração das condições geométricas

ou mesmo da umidade. Ocorrem, também, de maneira rotacional, composta, translacional, com fluxos ou por quedas, associando-se cada tipo, às características do talude do aterro, como altura, profundidade, raio de alcance, material instável e potencial destrutivo, o que permite o entendimento e a formulação de possíveis medidas preventivas e corretivas. A dinâmica da água do solo é de extrema importância para o estudo da estabilidade do talude do aterro, responsável pela

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

www.engegraut.com.br

deflagração de movimentos de massa, ocasionados pelo aumento das solicitações ou redução da resistência cisalhante. Na análise da tensão efetiva, a poropressão atuante deve ser estimada pela condição da água do solo, utilizando-se quatro métodos:

1

Superfície freática: Com duas dimensões, é obtida com o nível da água subterrânea livre delimitada, em campo, com poços de monitoramento.

2

Dados piezométricos: Obtêm-se valores da poropressão, em pontos descontínuos no interior do talude, interpolando-se para estimá-la em qualquer outro ponto. Os dados podem ser obtidos com piezômetros de campo e redes de fluxo, preparadas manualmente ou através de solução numérica.

3

Razão de poropressão: Método simples e comum, para normalizar as poropressões medidas no talude. Na Equação abaixo, é possível observar a relação da poropressão e a tensão vertical neste método.

$$\Delta u = u / \sigma_v$$

Onde:

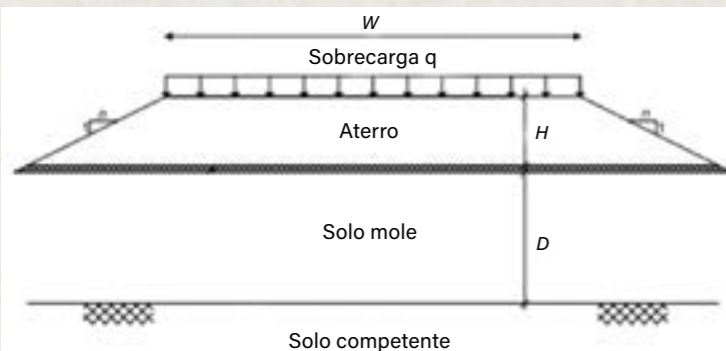
Δu = razão de poropressão;

u = poropressão;

σ_v = tensão vertical total na profundidade z .

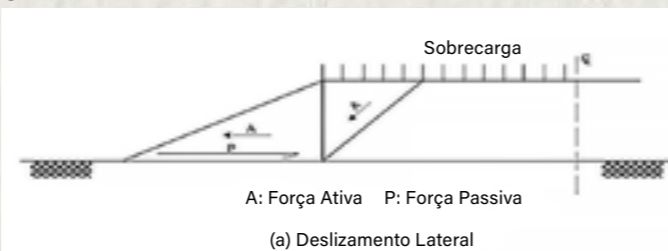
4

Poropressão constante: Utilizado caso se deseje especificar uma poropressão constante em qualquer camada do solo do talude.



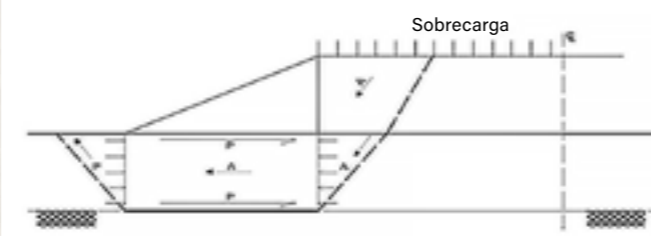
Geometria do modelo de aterro de precarregamento.

Entre as superfícies de ruptura, a circular apresenta maior frequência em taludes de aterros feitos com material homogêneo. Por esta razão, as análises são realizadas em um plano bidimensional. Na estrutura do aterro, construído com solo relativamente homogêneo, de camada em camada, a superfície



A: Força Ativa P: Força Passiva

(a) Deslizamento Lateral



-- : Mecanismo de ruptura geral crítica A: Força Ativa P: Força Passiva

(b) Extrusão

O mecanismo da ruptura do aterro sobre solo mole

aproxima-se muito de um círculo, quando alcança a ruptura. A superfície de ruptura, com qualquer geometria, é comum em solos heterogêneos. Ao se discutir causas da ruptura em taludes de aterros estradals, é útil começar pela consideração do requisito fundamental de sua estabilidade, o que significa que a resistência ao cisalhamento do solo deve ser superior as solicitações, para que permaneça estável. Com este pensamento básico, poder-se-á assegurar que a causa fundamental da instabilidade, seja motivada pela eficiência da resistência cisalhante do solo, em relação as

tensões de cisalhamento, que atuarão, necessário para o equilíbrio. Esta condição, pode ser obtida de duas maneiras, com a diminuição da resistência ao cisalhamento do solo e aumentando-se as tensões cisalhantes atuantes. A redução da resistência cisalhante do solo, pode ocorrer por quatro maneiras:

1° Aumento da poropressão (redução das tensões efetivas)

Um aumento do nível de água, no interior do solo, causado por fortes chuvas ou por águas subterrâneas, provoca redução na tensão efetiva, ocorrendo em todos os tipos de solos. O tempo, para que a pressão em seus poros se altere, dependerá principalmente da permeabilidade do solo. Havendo alta permeabilidade, ocorrem rápidas alterações na condição da água subterrânea e, para o caso de solos com baixa permeabilidade, as mudanças serão lentas. Embora a permeabilidade da matriz de um solo argiloso, apresente-se muito baixa, a massa da argila pode ter uma "permeabilidade secundária maior", devido à trincas e rachaduras em sua superfície. Desta forma, a poropressão, nos depósitos de argila, podem ser alteradas com rapidez surpreendente.

2° Fissuras e trincas na superfície

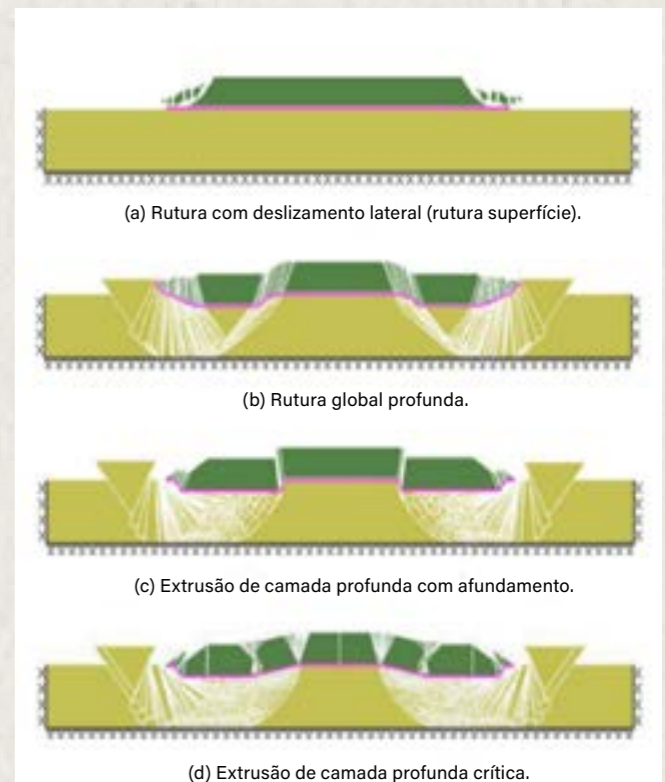
Rupturas em taludes são, frequentemente, precedidas pelo desenvolvimento de trincas e fissuras na superfície do solo perto da crista do talude, desenvolvendo-se quando as tensões atuantes na superfície do aterro, excedem sua resistência à tração. Lembrar que, com a presença de rachaduras, toda a força, em seu plano é perdida. Se permanecerem cheias de água, por tempo suficiente para que fluxos d'água ocorram na face do talude, sobe a poropressão do solo, ocorrendo a ruptura.

3° Aumento do índice de vazios

Argilas altamente plásticas, se expandem ao entrar em contato com a água. Consequentemente, baixas pressões de confinamento, promovem inchamento do solo.

4° Intemperismo

Solos perdem resistência, como resultado do intemperismo, que envolve vários processos. O físico altera a forma e tamanho dos grãos do solo, o químico e o biológico acarretam mudanças em sua composição, levando a formação de um novo solo, com propriedades alteradas.



Mecanismos de rutura de aterro sobre solo mole (exagerado)

Mesmo que a resistência do solo não se altere, o talude poderá sofrer ruptura, se as cargas atuantes forem alteradas, resultando em maiores tensões cisalhantes no solo. Os mecanismos, através das quais as tensões cisalhantes se alteram, ocorrem por três maneiras:

1

CARGAS PRÓXIMAS À CRISTA DO TALUDE

A tensão cisalhante atuante no solo, necessária para o equilíbrio do talude, aumentará caso sejam aplicadas cargas junto à crista do talude. Para evitar este perigoso aumento, tais cargas devem ser mantidas longe da crista.

2

PRESSÃO NA ÁGUA PRESENTE NAS FISSURAS NA REGIÃO SUPERIOR DO TALUDE

Se as trincas existentes próximo à crista de um talude, forem total ou parcialmente preenchidas com água, a pressão hidrostática aumenta no interior do solo, aumentando as tensões cisalhantes, desestabilizando-o.

3

QUEDA NO NÍVEL DA ÁGUA NA BASE DE UM TALUDE

A pressão externa da água, atuando na face de um talude, como a de um rio, fornece efeito estabilizador. Se o nível da água do rio diminuir, a influência estabilizadora é reduzida, e as tensões cisalhantes afloram. Quando este processo ocorre rapidamente, a pressão nos poros do solo não diminui, com a mesma rapidez e, conseqüentemente, o talude do aterro torna-se menos estável. Outro fator importante, presente na maioria das rupturas de taludes, é a presença de solos que contêm minerais de argilas. O comportamento de solos argilosos, é muito mais complicado do que o comportamento de solos arenosos, já que há interação físico-química entre partículas das argilas e a água que preenche seus vazios. Quanto maior o conteúdo destes minerais, maiores serão as alterações no comportamento do talude, como contração e retração, levando-o à ruptura.

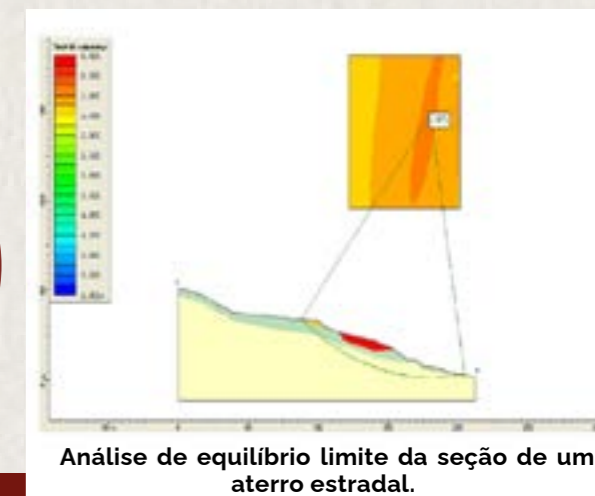
MÉTODOS PARA ANÁLISE DA ESTABILIDADE DO TALUDE ESTRADAL

Os principais métodos são analíticos, baseados na teoria do equilíbrio limite, pois permitem a determinação do fator de segurança (FS) do talude, a partir das propriedades da resistência cisalhante do solo. As análises consistem em determinar se há resistência suficiente no solo do talude, para suportar as tensões cisalhantes que tendem a provocar sua ruptura ou deslizamento. As hipóteses ou suposições, baseiam-se na teoria do equilíbrio limite, e são três:

a) O solo comporta-se como um material rígido plástico, rompendo bruscamente sem deformar-se;

b) As equações do equilíbrio estático, são válidas até a iminência da ruptura quando, na realidade, o processo é dinâmico;

c) O FS é constante ao longo da linha de ruptura, isto é, ignoram-se eventuais fenômenos de ruptura progressiva.



Outros modelos incluem métodos analíticos, baseados em modelos matemáticos de tensão e deformação (elementos finitos), métodos experimentais, empregando modelos físicos e métodos observacionais, baseados na experiência de análises de rupturas anteriores. A análise pode ser feita estudando-se toda a superfície de ruptura, ou dividindo-se a massa deslizada em parcelas ou lamelas. O método das lamelas, foi desenvolvido por Petterson e Fellenius e, ao longo do tempo, foi aperfeiçoado. Outros métodos realizam o cálculo do FS por meio de iterações, e cada um deles possui certo grau de precisão. Dentre os mais utilizados, encontra-se o método de Bishop simplificado, o qual

realiza análises de estabilidade de taludes, por meio de programas computacionais. Uma vez obtidos valores da resistência ao cisalhamento, poropressões, geometrias do talude e outras propriedades do solo/talude, executar-se-ão cálculos de estabilidade para verificar se as forças resistentes são suficientemente maiores do que as solicitações atuantes, de modo a evitar seu deslizamento, consistindo-se em determinar um fator de segurança (FS), utilizando-se um dos vários procedimentos da análise pelo método de equilíbrio limite. Todos esses procedimentos empregam a mesma definição do FS e o calculam utilizando-se equações do equilíbrio estático. A análise da estabilidade, envol-

ve um conjunto de procedimentos que visam a determinação de um índice ou de uma grandeza, que permita quantificar o quão próximo da ruptura um determinado talude se encontra. O fator de segurança (FS) é definido na Equação abaixo:

$$FS = MR / MA$$

Onde MR é o somatório dos momentos dos esforços resistentes e MA é o somatório dos momentos das solicitações atuantes em relação ao centro de rotação. Supõe-se que o estado limite de equilíbrio, existe quando os momentos atuantes, ao longo da superfície de ruptura assumida, são iguais aos momentos resistentes, ou seja, quando o FS

é 1, permanecendo o talude em estado de ruptura eminente. Na Tabela ao lado encontra-se, de maneira simplificada, uma comparação entre os valores do FS e as respectivas condições em que o talude se encontraria.

Geralmente, o valor 1,5 para FS, é aceitável para projeto de talude estável. Porém, para a NBR 11682 (ABNT, 2009) este valor pode se alterar, de acordo com o julgamento das consequências que

resultam da instabilidade do talude, ou seja, dependerá de possíveis danos causados, em decorrência da ruptura do talude, características do projeto e risco de vida. A Tabela abaixo, apresenta os valores mínimos

FATOR DE SEGURANÇA	CONDIÇÃO DO TALUDE
FS<1,0	Talude instável; caso venha a ser construído nestas condições, sofrerá ruptura.
FS=1,0	Condição limite de estabilidade, associada à iminência de ruptura; também condição adotada geralmente nos cálculos de retro análise.
FS>1,0	Condição estável; quanto mais próximo de 1,0 for o FS, mais precária e frágil será a condição de estabilidade do talude.
FS>>1,0	Condição estável; quanto maior for o FS, menores serão as possibilidades do talude sofrer ruptura, quando submetido a condições críticas (percolação de água, etc.)

Fonte: Carvalho (1991).

Tabela: Fatores de segurança e a condição de estabilidade do talude.

Nível de segurança contra perda de vidas humanas	Alto	Médio	Baixo
Nível de segurança contra danos materiais e ambientais			
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Nota 1: No caso de grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores de segurança, da tabela acima, devem ser majorados em 10%.

Nota 2: Esta tabela não se aplica aos casos de rastejo, voçorocas, ravinas e queda ou rolamento de blocos.

Fonte: NBR 11682 (ABNT, 2009).

Tabela: Fatores de segurança mínimos para estabilidade de taludes segundo a NBR 11682.

de FS, em função do potencial de risco contra danos materiais, ambientais e perda de vidas humanas. Assim, exige-se maiores FS, para obras onde haja maiores riscos diretos às pessoas, tais como em áreas habitacionais, industriais, de transmissão de energia, de abastecimento urbano, rodovias e ferrovias.

Programas Computacionais para Análises do Equilíbrio Limite de taludes estradais.

Para analisar a condição da geometria, solo e cargas simples, geralmente emprega-se programas de computador que usam, principalmente, o método do equilíbrio limite para realizar os cálculos. Estão disponíveis programas de computador, que podem lidar com uma ampla variedade de geometrias e inclinação, estratigrafia e resistência ao

cisalhamento do solo, condições da poropressão, cargas externas e o próprio melhoramento do solo. A maioria dos programas possui recursos para pesquisar, automaticamente, a superfície de escorregamento mais crítica, com o menor fator de segurança e pode lidar com superfícies de ruptura circulares e não circulares. Além disso, os

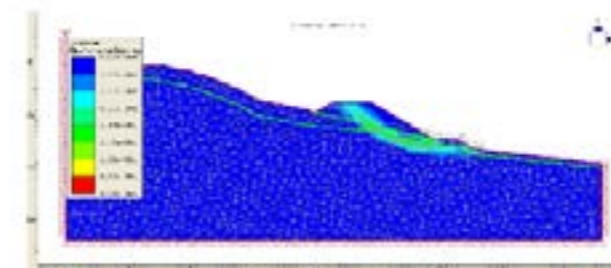
programas também possuem recursos gráficos, para exibir os dados de entrada e os resultados dos cálculos de estabilidade do talude estradal. Dois tipos de programas computacionais, que trabalham com o método de equilíbrio limite, estão disponíveis para a análise da estabilidade de um talude estradal.

Programas de análise

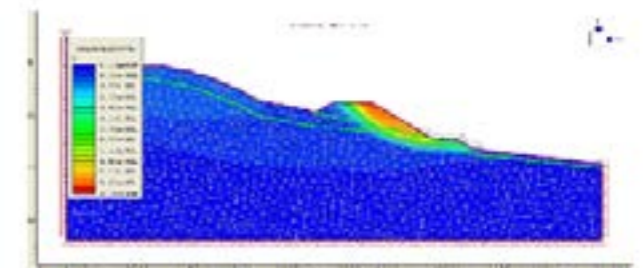
Permitem, ao usuário, empregar dados de entrada, como a geometria do talude, propriedades do solo, condições da poropressão, cargas externas, melhoramento do solo, calculando o FS para condições prescritas, representando o tipo mais geral de programa de computador, com estabilidade de inclinação e, quase sempre, baseiam-se em um ou mais dos procedimentos de lamelas.

Programas de design

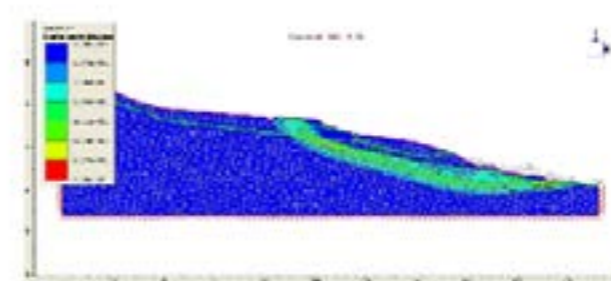
Destinam-se a determinar quais condições de declive são necessárias, para fornecer um ou mais fatores de segurança especificados pelo usuário.



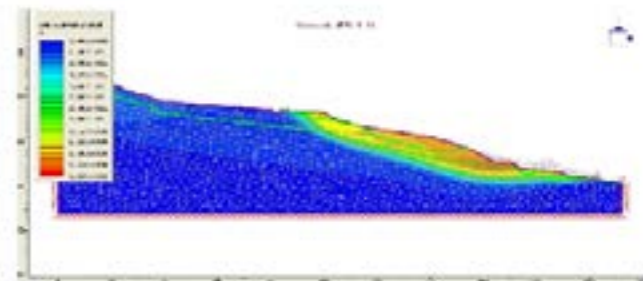
Seção de ruptura superficial ilustrando o desenvolvimento da concentração das tensões cisalhantes máximas.



Seção de ruptura superficial falha rasa ilustrando o desenvolvimento da concentração dos deslocamentos.



Seção ilustrando o desenvolvimento da concentração máxima das tensões de cisalhamento.



Seção com ruptura profunda ilustrando o desenvolvimento da concentração do deslocamento total.

Os programas permitem que o usuário especifique a geometria e altura do talude, além de cargas externas, juntamente com as propriedades do solo. Podem utilizar, também, informações sobre materiais para o melhoramento do solo, como a resistência à tração dos bulbos do geoenrijecimento, juntamente com o FS necessário.

OS SOFTWARES DE CÁLCULO

De acordo com a Rocscience (2020), o software Slide2 possui vários métodos de cálculo, incluindo o método de Bishop, oferecendo a possibilidade de efetuar cálculos de es-

tabilidade de taludes com vários tipos de solos, efeitos da água sobre o maciço, tipos de estruturas e análises probabilísticas, que geram uma grande confiabilidade no

software. Por outro lado, é de fácil aplicação, necessitando-se ingressar com a geometria do talude, o peso específico dos materiais, ângulo de atrito, coesão e nível de água.

PRESSIÔMETRO

Um ensaio geotécnico completo realizado no campo

Fácil de operar e 100 % viável



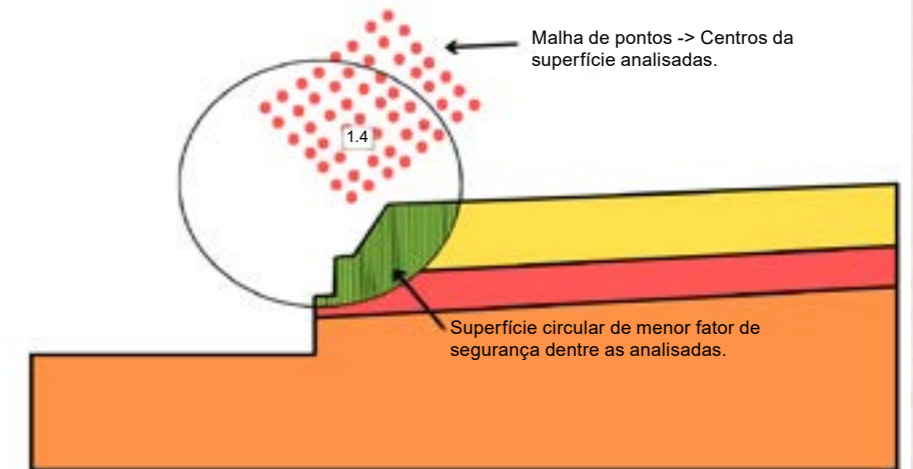
ROCTEST

Representante exclusivo no Brasil

+55 21 2718 3968

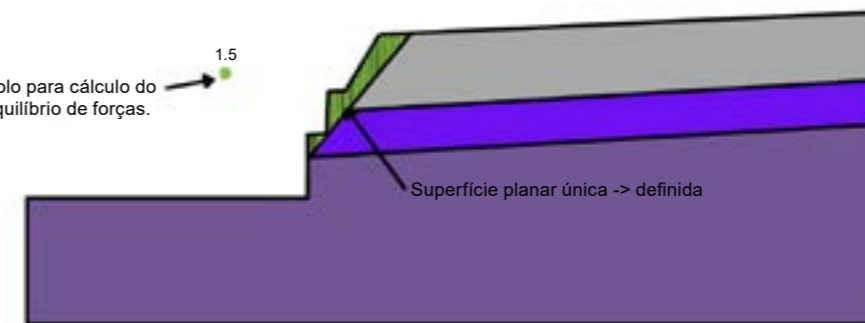
3Geo vendas@3geotecnologia.com
TECNOLOGIA www.3geotecnologia.com

- Modelos bidimensionais tipo equilíbrio limite
- Pesquisa de diversas superfícies de ruptura
- Circulares – arcos de circunferência
- Planares – especificadas
- Abordagens estatísticas



Polo para cálculo do equilíbrio de forças.

1.5



- Modelos de elementos finitos
- Análise de superfícies de plastificação
- Geração do estado de tensões para posterior análise tipo equilíbrio limite

Comparando-se os resultados das análises, da estabilidade de taludes de aterros estradais, com os métodos do equilíbrio limite e com elementos finitos, muitos geotécnicos optam pelo segundo, já que oferecem fatores de segurança mais precisos e explicam melhor o comportamento das tensões no solo, ao mesmo tempo em que eliminam suposições de tensões utilizadas no método de equilíbrio limite.

A QUESTÃO DA GEOMETRIA E DA ALTURA DO ATERRO ESTRADAL

A análise da estabilidade do talude do aterro, com MEF, exige estipular dados característicos à modelagem geotécnica, como altura, largura da crista do aterro, inclinação do talude, etc,

basicamente na experiência do geotécnico de solos moles. Trivialmente, utiliza-se aterros com 1,5m de altura, largura entre cristas do aterro entre 35m e 40m e inclinação de 1:1,5 (vertical e horizontal) para o talude. Observa-se, nos manuais de projeto para estradas, de vários países, as seguintes diretrizes. Conforme planilha ao lado:

Altura	Inclinação Lateral (V:H)
0 - 6 m	1:1.5
0 - 6 m	1:3
0 - 1 m	1:4
1 - 3 m	1:2
Mais de 3 m	1:1.5
0 - 1.5 m	1:8 (terreno plano) 1:6 (terreno ondulado)
1.5 m e mais	1:6 (terreno plano ou ondulado)
1 m	1:1.5
2 m	1:2
3 m	1:2.5

Tabela: Diversos padrões para alturas de aterros e inclinação de taludes para projeto de estradas.

Muitos projetistas utilizam o conceito de altura de aterro crítico, seguro e razoável, já que consideram contribuir para sua estabilidade, o que é corroborado por diversos estudos. Com o melhoramento efetivo do solo mole, com geoenrijecimento, esta questão torna-se irrelevante, já que não haverá recalque acumulativo. O geoenrijecimento do solo mole adequa-o a altura do aterro que for estipulada, conferido com as análises de estabilidade e de recalque. Há um caso de obra, super interessante, que consistiu da construção de três vias marginais na rodovia Anhanguera, SP, onde havia presença de solo mole até a profundidade de 14m e a existência de duto



Início dos trabalhos de melhoramento do solo mole anexo a rodovia Anhanguera, observando-se o desnível existente e o riacho.



O melhoramento do solo já executado, assim como 12m de aterro sobrepostos, incluindo o leito do riacho, que recebeu novas galerias.

de gás, com 800mm no limite da faixa de domínio. As três rodovias marginais exigiram aterros de até 12m de altura, sendo necessário a construção de muro gabião para conter o talude, devido a limitação da faixa de domínio. Como se percebe, havia a exigência de zero recalque, durante e após a execução dos aterros, o que foi con-

trolado com nível ótico de precisão e inclinômetros. A altura segura do aterro, com 12m, dependia do fator de segurança estipulado, obtido com o ganho de resistência e rigidez do solo melhorado, com geoenrijecimento.



Uma das marginais, à Anhanguera, pronta, observando-se o grande talude terminado (pé) em cima do muro gabião, já na faixa de domínio, que coincide com o duto de gás.

REFERÊNCIAS

- Patricia Karina Tinoco é engenheira geotécnica. Trabalha com melhoramento de solos moles.
- [1] Chai J chun, Shrestha S, Hino T, Uchikoshi T. (2017) Predicting bending failure of CDM columns under embankment loading. *Computers and Geotechnics*, 91:169-178.
- [2] Smith CC, Tatari A. (2016) Limit analysis of reinforced embankments on soft soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(4):504-514.
- [3] Buttlng S, Cao R, Lau W, Naicker D. (2018) Class A and Class C numerical predictions of the deformation of an embankment on soft ground. *Computers and Geotechnics*, 93:191-203.
- [4] Keller GR. (2016) Application of geosynthetics on low-volume roads. *Transportation Geotechnics*, 8(April):119-131.
- [5] Yapage N, Liyanapathirana S. (2018) Behaviour of geosynthetic reinforced column supported embankments. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 16(1):44-62.
- [6] Zhou WH, Lao JY, Huang Y, Chen R. (2017) Group effect on soil arching in geogrid- reinforced pile-supported embankments. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 5(2):130-134.
- [7] Hegde AM, Sitharam TG. (2015) Effect of infill materials on the performance of geocell reinforced soft clay beds. *Geomechanics and Geoengineering*, 10(3):163-173.
- [8] Umashankar B, Mouli S, Hariprasad C. (2015) Settlement of Embankment Constructed with Geofoam. In: Iskander M, Suleiman MT, Anderson JB, Laefer DF (eds) *Int. Found. Congr. Equip. Expo 2015*. American Society of Civil Engineers, pp 161-170.
- [9] Paolo Di Pietro. (2017) Practical Applications with Geosynthetic Mats Reinforced with Steel Wire Meshes to Prevent Embankment Damage by Burrowing Large Rodents and Beavers. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 11(1):8-15.
- [10] Chaiyaput S, Bergado DT, Artidteang S. (2014) Measured and simulated results of a Kenaf Limited Life Geosynthetics (LLGs) reinforced test embankment on soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 42(1):39-47.
- [11] Marto A, Othman BA, Kasim F, Bakar I. (2012) Comparison of Field Performance between Bamboo-Geotextile Composite Embankment and High Strength Geotextile Embankment. *Advanced Materials Research*, 587:77-80.
- [12] Lal D, Sankar N, Chandrakaran S. (2017) Effect of reinforcement form on the behaviour of coir geotextile reinforced sand beds. *Soils and Foundations*, 57(2):227-236.
- [13] Da Silva EM, Justo JL, Durand P, Justo E, Vázquez-Boza M. (2017) The effect of geotextile reinforcement and prefabricated vertical drains on the stability and settlement of embankments. *Geotext Geomembranes*. doi: 10.1016/j.geotextmem.2017.07.001.
- [14] Zhuang Y, Wang KY. (2016) Finite-Element Analysis on the Effect of Subsoil in Reinforced Piled Em-



bankments and Comparison with Theoretical Method Predictions. *International Journal of Geomechanics*, 16(5):04016011-1-15.

[15] Parsa-Pajouh A, Fatahi B, Vincent P, Khabbaz H. (2014). Trial Embankment Analysis to Predict Smear Zone Characteristics Induced by Prefabricated Vertical Drain Installation. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(5):1187-1210.

[16] Sheil BB, McCabe BA. (2014) A finite element-based approach for predictions of rigid pile group stiffness efficiency in clays. *Acta Geotechnica*, 9(3):469-484.

[17] Rezanian M, Nguyen H, Zanganeh H, Taiebat M. (2018) Numerical analysis of Ballina test embankment on a soft structured clay foundation. *Computers and Geotechnics*, 93:61-74.

[18] Xue JF, Chen JF, Liu JX, Shi ZM. (2014) Instability of a geogrid reinforced soil wall on thick soft Shanghai clay with prefabricated vertical drains: A case study. *Geotextiles and Geomembranes*, 42(4):302-311.

[19] Rabie M. (2014) Comparison study between traditional and finite element methods for slopes under heavy rainfall. *HBRC Journal*, 10(2):160-168.

[20] Ghafari A, Nikraz HR, Sanaeirad A. (2016) Finite element analysis of deformation and arching inside the core of embankment dams during construction. *Australian Journal of Civil Engineering*, 14(1):13-22.

[21] Zhao L, Yang F, Zhang Y, Dan H, Liu W. (2015) Effects of shear strength reduction strategies on safety factor of homogeneous slope based on a general nonlinear failure criterion. *Computers and Geotechnics*, 63:215-228.

[22] Duncan JM. (1996) State of the Art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of Slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(7):577-596.

[23] Kirkby W, Pickett PE. (2018). *Geotechnical Manual*. Texas Department of Transportation.

[24] Singh TN, Verma AK, Sarkar K. (2010) Static and dynamic analysis of a landslide. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 1(4):323-338.

[25] Iñiguez JB. (2016) Enhanced Limit Method for Slope Stability Analysis. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21(26):10215-10232.

[26] Fellenius W. (1936) Calculation of the stability of earth slope. In: *Trans. 2nd Congr. Large Dams*. Washington, DC, US., pp 445-462.

[27] Bishop AW. (1955) The use of slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 5(1):7-17.

[28] E. Spencer. (1967) A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. *Geotechnique*, 17(1):11-26.

[97] Morgenstern NR, Price VE. (1965) The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Geotechnique*, 15(1):79-93.

[29] Liu SY, Shao LT, Li HJ. (2015) Slope stability analysis using the limit equilibrium method and two finite element methods. *Computers and Geotechnics*, 63:291-298.

[30] Guo T, He Z. (2012) Comparison of factor of safety of a roadway slope based on the limit equilibrium method and shear strength reduction method. In: *GeoHunan Int. Conf. American Society of Civil Engineers, Hunan, China*, pp 34-40.

[31] Luo N, Bathurst RJ, Javankhosdel S. (2016) Probabilistic stability analysis of simple reinforced slopes by finite element method. *Computers and Geotechnics*, 77:45-55.

[32] Alemdag S, Kaya A, Karadag M, Gurocak Z, Bulut F. (2015) Utilization of the limit equilibrium and finite element methods for the stability analysis of the slope debris: An example of the Kalebasi District (NE Turkey). *Journal of African Earth Sciences*, 106:134-146.

[33] Liu KW, Rowe RK. (2015) Numerical modelling of prefabricated vertical drains and surcharge on reinforced floating column-supported embankment behaviour. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(6):493-505.

[34] Ishii Y, Ota K, Kuraoka S, Tsunaki R. (2012) Evaluation of slope stability by finite element method using observed displacement of landslide. *Landslides*, 9(3):335-348.

[35] Zienkiewicz OC, Humpheson C, Lewis RW. (1975) Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics. *Geotechnique*, 25(4):671-689.

[36] Sun C, Chai J, Xu Z, Qin Y, Chen X. (2016) Stability charts for rock mass slopes based on the Hoek-Brown strength reduction technique. *Engineering Geology*, 214:94-106.

[37] Griffiths DV, Lane P a. (1999) Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, 49(3):387-403.

[38] Kulhawy FH. (1969) Finite element analysis of the behavior of embankments. The University of California at Berkeley, California. U.S.A.

[39] Korea Expressway Corporation. (1996) Road design manual, soil and foundation (in Korean). Korea Expressway Corporation.

[40] Public Works Department Malaysia. (2010) Guideline for slope design..

[41] Ministry of Work Tanzania. (2011) Road geometric design manual..

[42] Texas Department of Transportation. (2014) Roadway Design Manual..

[43] New Jersey Department of Transportation. (2015) Roadway design manual..

03 e 04 de Maio de 2022 ICMGAD 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia de Mineração, Análise e Projeto de Minas Roma - Itália	07 e 08 de Junho de 2022 ICGG 2022: Conferência Internacional sobre Geomecânica e Geotécnica Sydney - Austrália	15 e 16 de Junho de 2022 ICAEG 2022: Conferência Internacional sobre Avanços em Geotecnia Ambiental Toronto - Canadá	19 e 20 de Julho de 2022 ICSGA 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia do Solo e Aplicações Paris - França
03 e 04 de Maio de 2022 ICAGGM 2022: Conferência Internacional sobre Geotécnica Aplicada e Modelagem Geotécnica Roma - Itália	07 e 08 de Junho de 2022 ICEGR 2022: Conferência Internacional sobre Pesquisa Geotécnica Ambiental São Francisco- Estados Unidos	17 e 18 de Junho de 2022 ICMGSM 2022: Conferência Internacional sobre Geotécnica Marinha e Mecânica do Solo Riga- Letônia	19 e 20 de Julho de 2022 ICESGG 2022: Conferência Internacional sobre Estudos Experimentais em Geotécnica e Geotêxteis Toronto - Canadá
03 e 04 de Maio de 2022 ICGFE 2022: Conferência Internacional sobre Geotécnica e Engenharia Fundamental Cingapura - Cingapura	07 e 08 de Junho de 2022 ICAGE 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia Aplicada e Engenharia São Francisco- Estados Unidos	24 e 25 de Junho de 2022 ICSMGE 2022: Conferência Internacional sobre Mecânica do Solo e Engenharia Geotécnica Paris - França	19 e 20 de Julho de 2022 ICAGRR 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia Avançada de Estradas e Ferrovias Helsinque - Finlândia
09 e 10 de Maio de 2022 ICSMEG 2022: Conferência Internacional sobre Mecânica do Solo e Geotécnica Ambiental Dubai- Emirados árabes	10 e 11 de Junho de 2022 ICSG 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia do Solo Copenhague - Dinamarca	24 e 25 de Junho de 2022 ICSGR 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia e Pesquisa do Solo Istambul - Turquia	19 e 20 de Julho de 2022 ICSEGG 2022: Conferência Internacional sobre Engenharia de Solo, Geologia e Geotecnia Copenhague - Dinamarca
09 e 10 de Maio de 2022 ICSEGG 2022: Conferência Internacional sobre Engenharia de Solo, Geotecnia e Geologia Dubai- Emirados árabes	10 e 11 de Junho de 2022 ICEGSA 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia Ambiental para Aplicações Sustentáveis Barcelona - Espanha	05 e 06 de Julho de 2022 ICMGUM 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia de Engenharia Aplicada Paris - França	19 e 20 de Julho de 2022 ICAEGG 2022: Conferência Internacional sobre Geologia e Geotecnia de Engenharia Aplicada Paris - França
09 e 10 de Maio de 2022 ICAMG 2022: Conferência Internacional sobre Medições Avançadas em Geotecnia Dubai- Emirados árabes	10 e 11 de Junho de 2022 ICEGGA 2022: Conferência Internacional sobre Geotécnica Ambiental e Aplicações Geoambientais Barcelona - Espanha	08 e 09 de Julho de 2022 ICEGR 2022: Conferência Internacional sobre Pesquisa Geotécnica Ambiental Praga- Tcheca	19 e 20 de Julho de 2022 ICEG 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia Ambiental Toronto - Canadá
13 e 14 de Maio de 2022 ICCEGG 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia e Geologia de Engenharia Costeira Amsterdã - Holanda	10 e 11 de Junho de 2022 ICSGFE 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia do Solo e Engenharia de Fundação Copenhague - Dinamarca	08 e 09 de Julho de 2022 ICSGFE 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia do Solo e Engenharia de Fundação Praga- Tcheca	05 e 06 de Agosto de 2022 ICGCRP 2022: Conferência Internacional sobre Geotécnica, Pesquisa Atual e Problemas Montreal - Canadá
13 e 14 de Maio de 2022 ICEGGE 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia Ambiental e Engenharia Geoambiental Roma - Itália	10 e 11 de Junho de 2022 ICGEG 2022: Conferência Internacional sobre Engenharia Geofísica e Geotécnica Copenhague - Dinamarca	15 e 16 de Julho de 2022 ICSG 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia do Solo Estocolmo - Suécia	05 e 06 de Agosto de 2022 ICGAG 2022: Conferência Internacional de Geotecnia e Geotécnica Aplicada Amsterdã - Holanda
20 e 21 de Maio de 2022 ICCGGG 2022: Conferência Internacional sobre Geotécnica Computacional, Geomodelagem e Geoinformática Berlim - Alemanha	15 e 16 de Junho de 2022 ICSMG 2022: Conferência Internacional sobre Mecânica do Solo em Geotecnia Toronto - Canadá	15 e 16 de Julho de 2022 ICEGA 2022: Conferência Internacional sobre Geotecnia Ambiental e Aplicações Estocolmo - Suécia	19 e 20 de Agosto de 2022 ICSMGE 2022: Conferência Internacional sobre Mecânica do Solo e Engenharia Geotécnica Londres-Reino Unido
			19 e 20 de Agosto de 2022 ICSMG 2022: Conferência Internacional sobre Mecânica do Solo e Geotécnica Londres-Reino Unido

COMO ASSEGURAMOS, NO PROJETO, A ESTABILIDADE DO ATERRO ESTRADAL?

Para quem trabalha com melhoramento de solos, a causa imediata para problemas de rutura em aterros argilosos e seus taludes, a resposta rápida seria as propriedades do solo e a presença de chuvas na região. Para assegurar a estabilidade de um aterro, o projeto geotécnico exigirá três fatores básicos, resistência, deformação e permeabilidade ou condutividade hidráulica. A capacidade de carga e a estabilidade do talude estão entre os elementos importantes para o fator resistência. Deformação é influenciada pelo recalque diferencial/superficial e o deslocamento lateral do solo. Poropressão e percolação d'água são elementos que afetam a permeabilidade do solo. Evidentemente, estamos considerando a presença de camadas de argilas moles no solo de fundação, que implica em características de compressibilidade alta, elevada quantidade d'água, baixíssima resistência e permeabilidade implicando, caso nada seja feito, em recalques durante longos períodos. Três questões precisam ser debatidas.



Rutura do aterro estradal.

1ª Questão

A capacidade de carga

Trata-se da competência do solo suportar cargas do necessário aterro e a seguir, da estrada a ser construída, sem qualquer manifestação cisalhante no solo de fundação, envolvendo mecanismos localizados e generalizados de deformação ou mesmo rutura. Há diversos estudos recentes, que investigam o desempenho de aterros, construídos sobre solos moles, com baixa capacidade de carga. Entre os mais interessantes estão:

- Efeitos das propriedades aleatórias do solo, para sua capacidade suporte, com diferentes resistências.

- Efeito do carregamento e o tempo de atuação.

Conceitualmente, está claro que a resistência cisalhante do solo mole, sua profundidade e as sobrecargas são os fatores que influenciam a capacidade de carga, essenciais em qualquer projeto de aterros sobre solos moles. Ao longo

dos últimos 25 anos, diversos pesquisadores examinaram a aplicação de quatro estratégias para aumentar a capacidade de carga de solos argilosos moles:

- Pré-carregamento
- Aterro estaqueado
- Colunas com plataforma de transferência de carga, entre elas:
 - I. Coluna de brita
 - II. DSM
 - III. Jet Grouting
- Melhoramento efetivo do solo

Nos estudos, ficou evidente que a primeira opção, só é eficaz quando o solo argiloso mole tem, no máximo, 5 a 7 metros de profundidade, provando-se que as necessárias tensões de compressão, que geram a consolidação, mal chegam a estas profundidades. Sendo, portanto, descabido cravar geodrenos a profundidades maiores. A segunda e terceira opções, considerando-se que a argila mole só é tornada rígida com sua consolidação, passam a ser alternativas paliativas e, conseqüentemente, caras já que não atuam na causa do problema. Por fim, o melhoramento do solo, com geoenrijecimento, atua diretamente na causa, que tem como consequência, baixa capacidade de carga.

2ª Questão

A estabilidade

Taludes estão intimamente relacionados à altura de aterros que, quanto mais altos, mais íngremes são. A questão da estabilidade de taludes de aterros é aspecto extremamente importante, devido aos efeitos colaterais de sérios prejuízos e perda de vi-



Rutura do aterro estradal.

das. Diversos pesquisadores, em diferentes países, investigaram recentemente, causas da instabilidade e da rutura de aterros, identificando os seguintes fatores pertinentes:

- Precipitação extensa de chuvas
- Escoamento superficial
- Escavações
- Excesso de poropressão
- Inclinação do talude
- Condição geológica

- Alterações climáticas
 - Erosão pela própria gravidade
 - Altas propriedades dinâmicas de solos granulares expostos à intempérie.
 - Movimentos de massa
- Escavação e formação de taludes é uma atividade humana, necessária para qualquer construção, particularmente estradas, induzindo movimento no maciço formado, além de vi-

brações e perturbação, o que faz o processo deformativo acelerar, particularmente, com a incidência de chuvas, ocorrendo condição ideal para instabilidade. O fator geométrico, caracterizado pelo ângulo de inclinação do talude, passa a ser o principal componente do talude formado, tendo em vista a medição de sua estabilidade. À medida em que o ângulo do talude aumenta, a

tensão cisalhante no solo e o processo erosivo aumentam, significando que baixa inclinação, pouco mobiliza tensões cisalhantes.

3ª Questão

O recalque

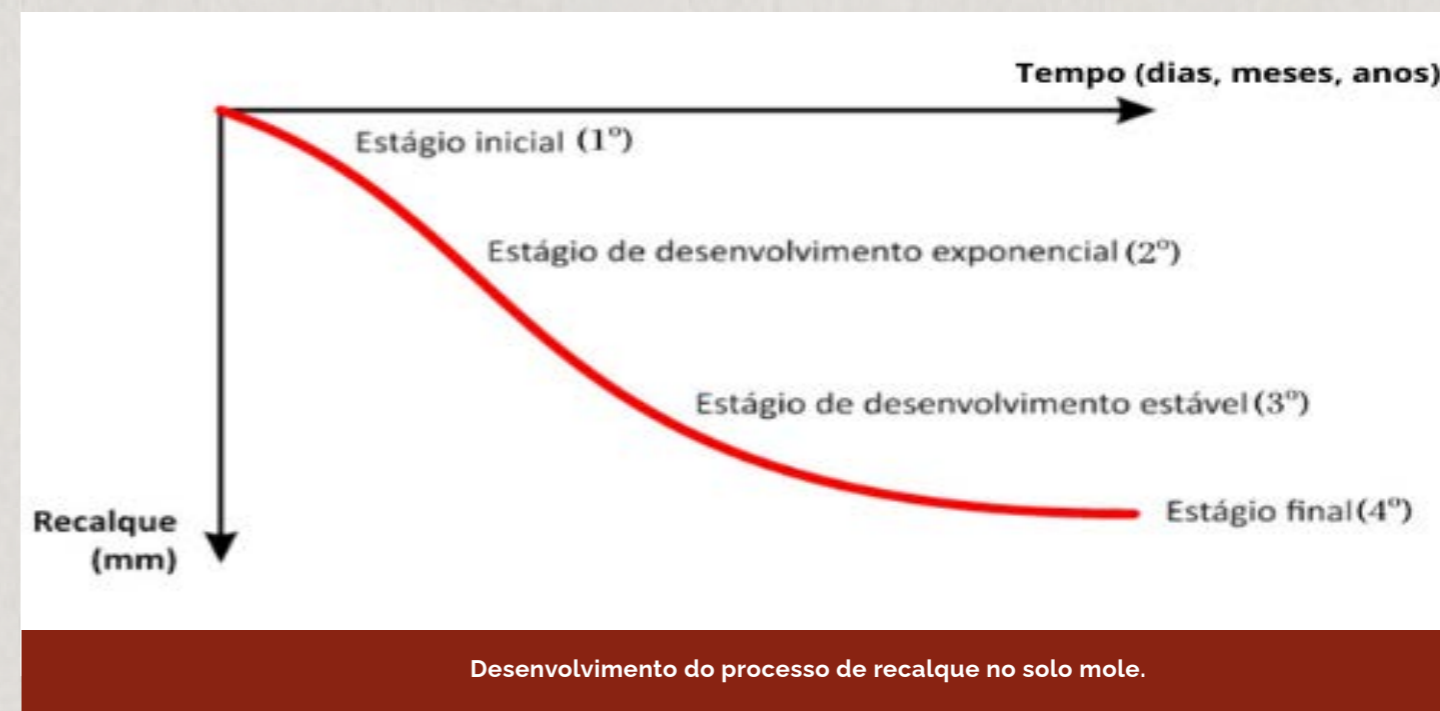
Recalque pode ser considerado o tamanho total da deformação vertical, na superfície do solo, e ocorre devido ao desenvolvimento de tensões compressivas, motivadas pelo peso do aterro, no solo base que, na condição de solo argiloso mole, deforma vertical e horizontalmente, por longos períodos de tempo. Estas deformações verticais, no caso de estradas, causam desníveis em sua superfície, que alagam, inundam e a condenam, assim como a seus usuários. Estes desníveis, provocados pelos recalques diferenciais (movimentos verticais entre dois locais), são consequência do processo de consolidação que ocorre na argila mole, do solo de fundação. Durante a elaboração do projeto do aterro, a computação do recalque, envolve as condições imediato e de consolidação. Para a condição pós-obra, calcula-se o recalque por compressão secundária ou fluência. Toda esta preocupação, visa evitar o lugar comum, de grandes recalques ao longo



do subleito de futuras rodovias/ferrovias. A importante interrogação da previsão do recalque, ao longo da futura obra, tem sido um dos importantes tópicos na geotecnia da argila mole. Como, de forma característica, os atributos do recalque, nas camadas de solos moles, desenvolvem-se com o correr do tempo, a curva recalque-tempo tem sido a solução mais prática para o problema. O método mais comum, para uma antevisão ou estimativa do recalque, ao longo de um determinado tempo, é ajustar a curva construída com as medidas obtidas no controle de recalque medido na obra. Muitas curvas de ajustes têm sido utilizadas, como a curva exponencial, a curva hiperbólica, a curva de Poisson e o método de Asaoka. Recentemente, foram

introduzidos novos métodos, para estimar recalques em solos moles, baseados em novos mecanismos, como o método de Grey, o método logístico e o modelo de Gompertz. Sabemos que o recalque total, em uma camada do solo mole, é composto pelos componentes imediato, de consolidação e da consolidação secundária, e seu desenvolvimento pode ser dividido em quatro estágios, conforme figura na próxima página. No estágio inicial, o solo encontra-se no estado elástico, e o recalque aumenta linearmente, durante os primeiros momentos do carregamento, estabelecendo velocidade relativamente baixa. No estágio de desenvolvimento exponencial, o solo encontra-se no estado elasto-plástico, ocorrendo al-

terações em seu volume e, conseqüentemente, deforma devido a consolidação, havendo uma não linearidade. Com a manutenção da carga, o recalque e sua velocidade continuam a aumentar devido a consolidação, alcançando seu limite. Na etapa do desenvolvimento estável, a carga deixa de crescer, mas a consolidação ainda continua a ocorrer e o processo de recalque perdura, enquanto sua velocidade diminui progressivamente com o tempo. Finalmente, no estágio final, a velocidade do recalque diminui a valores ínfimos, tendendo a zerar, enquanto seu valor chega a um máximo, permanecendo estável. Os métodos de cálculo do recalque, baseados em dados obtidos em obras, ao contrário dos cálculos teóricos, são os que apresentam-se mais precisos e confiáveis.



Para concluir, estudos atuais mostram que o tipo de solo mole, sua condição de deposição, sua capacidade de drenagem e, principalmente, a técnica a ser empregada em seu tratamento, são os fatores que afetarão o futuro processo de recalque. Evidentemente, a heterogeneidade do solo mole, ao longo de suas camadas, responderão pelo recalque diferencial, que ocorrerá pela rodovia, razão pela qual sempre objetiva-se a uniformidade da rigidez, só obtida com seu melhoramento.

REFERÊNCIAS

- [1] Davis EH, Booker JR. (1973) The effect of increasing strength with depth on the bearing capacity of clays. *Géotechnique*, 23(4):551-563.
- [2] Michalowski RL. (1992) Bearing Capacity of Nonhomogeneous Cohesive Soils Under Embankments. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(7):1098-1118.
- [3] Michalowski RL. (1993) Bearing Capacity of Nonhomogeneous Clay Layers under Embankments. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(10):1657-1669.
- [4] Indraratna B, Balasubramaniam AS, Balachandran S. (1992) Performance of test embankment constructed to failure on soft marine clay. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(1):12-33.
- [5] Eide O, Holmberg S. (1972) Test fills to failure on soft Bangkok clay. In: *Spec. Conf. Perform. Earth Earth-Supported Struct. ASCE, Lafayette, Indiana, United States*, pp 159-180.
- [6] Dascal O, Tournier JP, Tavenas F, Rochelle P La. (1972) Failure of a test embankment on sensitive clay. In: *Spec. Conf. Perform. Earth Earth-Supported Struct. ASCE, Lafayette, Indiana, United States*, pp 129-158.
- [7] Popescu R, Deodatis G, Nobahar A. (2005) Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity. *Pro-*

- babulistic Engineering Mechanics, 20(4):324-341.
- [9] Lehtonen VJ, Meehan CL, Lämsivaara TT, Mansikkamäki JN. (2015) Full-scale embankment failure test under simulated train loading. *Géotechnique*, 65(12):961-974.
- [10] Kim BB, Lee S. (2005) Comparison of Bearing Capacity Characteristics of Sand and Gravel Compaction Pile Treated Ground. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 9(3):197-203.
- [11] Lopez-Querol S, Arias-Trujillo J, GM-Elipse M, Matias-Sanchez A, Cantero B. (2017). Improvement of the bearing capacity of confined and unconfined cement-stabilized aeolian sand. *Construction and Building Materials*, 153:374-384.
- [12] Rowe RK, Li AL. (2005) Geosynthetic-reinforced embankments over soft foundations. *Geosynthetics International*, 12(1):50-85.
- [13] Hewlett WJ, Randolph MF. (1988) Analysis of piled embankment. *Ground Engineering*, 21(3):12-18.
- [14] Sarsby RW. (2007) Use of 'Limited Life Geotextiles' (LLGs) for basal reinforcement of embankments built on soft clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(4-5):302-310.
- [15] Ozdemir MA. (2016) Improvement in Bearing Capacity of a Soft Soil by Addition of Fly Ash. *Procedia Engineering*, 143(1ctg):498-505.
- [16] Brabb EE. (1991) The world landslide problem. *Episodes*, 14(1):52-61.
- [17] Ballantyne CK. (1986) Landslides and slope failures in Scotland: A review. *Scottish Geographical Magazine*, 102(3):134-150.
- [18] Dai FC, Lee CF, Li J, Xu ZW. (2001) Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology*, 40(3):381-391.
- [19] Davies TC. (1996) Landslide research in Kenya. *Journal of African Earth Sciences*, 23(4):541-545.
- [20] Tang C, Zhu J, Qi X, Ding J. (2011) Landslides induced by the Wenchuan earthquake and the subsequent strong rainfall event: A case study in the Beichuan area of China. *Engineering Geology*, 122(1-2):22-33.
- [21] Xu XZ, Liu ZY, Xiao PQ, Guo WZ, Zhang HW, Zhao C, Yan Q. (2015) Gravity erosion on the steep loess slope: Behavior, trigger and sensitivity. *Catena*, 135:231-239.
- [22] Yong L, Chengmin H, Baoliang W, Xiafei T, Jingjing L. (2017) A unified expression for grain size distribution of soils. *Geoderma*, 288:105-119.
- [23] Kinnell PIA. (2000) The effect of slope length on sediment concentrations associated with side-slope erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3):1004-1008.
- [24] Hou Q, Wu G, Li H, Fan G, Zhou J. (2019) Large deformation and failure mechanism analyses of Tangba high slope with a high-intensity and complex excavation process. *Journal of Mountain Science*, 16(2):453-469.
- [25] Duncan JM. (1996) Soil slope stability analysis. In: Turer KA, Schuster RI (eds) *Landslides, Investig. Mitig. National Research Council*, Washington, DC, US., pp 337-371.
- [26] Huat BBK, Ali FH, Low TH. (2006) Water infiltration characteristics of unsaturated soil slope and its effect on suction and stability. *Geotechnical & Geological Engineering*, 24(5):1293-1306.
- [27] Terzaghi K. (1925) *Erdbaumechnik*. Franz Deuticke, Leipzig and Vienna.
- [28] Kong X. (2016) Prediction of Subgrade Settlement Based Fuzzy Self Adaptable Method of Artificial Intelligence. 9th International Symposium on Computational Intelligence and Design, (7):144-147.
- [29] Zou C, Wang Y, Lin J, Chen Y. (2016) Creep behaviors and constitutive model for high density polyethylene geogrid and its application to reinforced soil retaining wall on soft soil foundation. *Construction and Building Materials*, 114:763-771.
- [30] Zou L, Wang S, Lai X. (2013) Creep model for unsaturated soils in sliding zone of Qianjiangping landslide. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(2):162-167.
- [31] Azzam WR, Basha A. (2017) Utilization of soil nailing technique to increase shear strength of cohesive soil and reduce settlement. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 9(6):1104-1111.
- [32] Grimstad G, Haji Ashrafi MA, Degago SA, Emdal A, Nordal S. (2016) Discussion of 'Soil creep effects on ground lateral deformation and pore water pressure under embankments'. *Geomechanics and Geoengineering*, 11(1):86-93.
- [33] Sato H, Nhan TT, Matsuda H. (2018) Earthquake-induced settlement of a clay layer. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 104(May 2017):418-431.
- [34] LaGatta MD, Boardman BT, Cooley BH, Daniel DE. (1997) Geosynthetic Clay Liners Subjected to Differential Settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(5):402-410.
- [35] Paveenchana T, Arayasiri M. (2009) Solving the Problems of Differential Settlement of Pavement Structures in the Bangkok Area. In: *GeoHunan Int. Conf. 2009*. American Society of Civil Engineers, Changsha, Hunan, China, pp 180-185.
- [36] Moghaddam RB, Jayawickrama PW. (2017) General bearing capacity theory and soil extraction method for the mitigation of differential settlements. In: *Geotech. Front. 2017*. American Society of Civil Engineers, Orlando, Florida, pp 314-323.
- [37] Skempton AW, Bjerrum L. (1957) A Contribution to the settlement analysis of foundations on clay. *Géotechnique*, 7(4):168-178.
- [38] Bo MW, Fabius M, Chu J, A. Arulrajah. (2011) Predicting consolidation settlements using small strain, large-strain and stress path methods. In: *Proc. 17th Int. Conf. Soil Mech. Geotech. Eng.* pp 3481-3485.
- [39] Boussinesq M.J. (1885) *Application Des Potentiels*. Gauthier-Villars, Paris [in French]: à l'Étude de l'Équilibre et du Mouvement Des Solides Elastiques.
- [40] Disfani MM, Arulrajah A, Suthagaran V, Bo MW. (2013) Long-term settlement prediction for wastewater biosolids in road embankments. *Resources, Conservation and Recycling*, 77:69-77.
- [41] Duncan M. (1993) Limitation of conventional analysis of consolidation settlement. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(9):1333-1359.
- [42] Carroll R. (2011) Use of CRS test to predict settlement in an Irish silt. 21st Eur. Young Geotech. Eng. Conf. Rotterdam.
- [43] Skempton AW, Peck RB, MacDonald DH. (1955) Settlement analyses of six structures in Chicago and London. *Proceedings Institution of Civil Engineers*, 4(4):525-542.
- [44] Bergado DT, Teerawattanasuk C. (2008) 2D and 3D numerical simulations of reinforced embankments on soft ground. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(1):39-55.

Geotextiles and Geomembranes, 26(1):39-55.

[44] Bergado D., Chong KC, Daria PAM, Alfaro MC. (1990) Deformability and consolidation characteristics of soft Bangkok clay using screw plate tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(5): 531-545.

[45] Poulos HG, Davis EH. (1963) Triaxial testing and three dimensional settlement analysis. In: *Proc. 4th Aust. New Zeal. Conf. SM FE*, Adelaide. pp 233-243. Chai J chun, Shrestha S, Hino T, Uchikoshi T. (2017) Predicting bending failure of CDM columns under embankment loading. *Computers and Geotechnics*, 91:169-178.

[46] Smith CC, Tatari A. (2016) Limit analysis of reinforced embankments on soft soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(4):504-514. Buttling S, Cao R, Lau W, Naicker D. (2018) Class A and Class C numerical predictions of the deformation of an embankment on soft ground. *Computers and Geotechnics*, 93:191-203.

Localização estratégica e eficiência
logística geralmente estão localizados
em terrenos com solos moles.



Melhoramento de solo mole é

GEOENRIJECIMENTO

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

Melhoramento do solo mole.

Estratégias para estabilizar aterros estradais

Melhoramento do solo mole para implantação de estação do BRT, no Rio de Janeiro.

O mercado da engenharia geotécnica, possui diversas estratégias objetivando-se adequar o solo de fundação, com solos moles, de modo a receber aterros rodoviários. Estas estratégias, referem-se a técnicas de tratamento de solos moles, algumas propostas em diversos países. De trinta anos pra cá, houve enorme desenvolvimento, tanto em novos métodos conceptivos, quanto nos equipamentos de execução, tornando este segmento da geotecnia mais efetivo, eficiente e econômico. Como de costume, o estado da arte, de tratar solos moles, está à frente da teoria. Empresas com conhecimento deste tipo de solo, desenvolvem sua própria tecnologia, estabelecendo novos métodos executivos, invariavelmente mais eficientes e econômicos, exatamente pelo fato de que é um misto de ciência e arte, pelas dificuldades inerentes de se trabalhar com este tipo de solo, adequando-o a novos projetos. É o caso do geoen-

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

ou cinzenta. Para torná-lo rijo faça

MELHORAMENTO DE SOLO

Solicite informações
www.softsoilbrazilianreview.com.br

rijecimento do solo mole, moderna e única técnica de melhoramento efetivo de solos moles, que pré-estabelece parâmetros geotécnicos de resistência e rigidez, específicos para cada projeto, algo raro ou inexistente, nas demais tecnologias existentes. É interessante observar a história deste segmento da geotecnia, a partir do estudo de casos paliativos, como cravação de estacas de madeira, seguido de colunas de brita e, depois colunas de solo cimento para reforçar solos moles, até a técnica de, efetivamente, melhorá-lo com geoenrijecimento. O fato é que, cada local a ter o solo tratado continua sendo um enorme desafio para engenheiros geotécnicos, tendo em vista a enorme quantidade de variáveis a serem equacionadas, seja pela presença de depósitos de material orgânico ou turfa, seja pela presença de argilas sensíveis, invariavelmente objetivando-se alterar ou adequar sua enorme compressibilidade e instabilidade. Um dos conceitos básicos, que conduzem ao desenvolvimento do solo melhorado, é a difícil arte de certificá-lo, um complemento inovador. Outro aspecto importante, é entender o conceito efetivo de "melhoramento de solos moles" e, em particular, desmistificar o conceito de "reforço", imposto pelo mercado à esta prática, e que antecede obras geotécnicas. Quando se comparam soluções de transferência de cargas, com melhoramento efetivo do solo mole, com o geoenrijecimento, sempre há debates, ocorrendo a seguinte questão: além do custo, como comparar, tecnicamente, estes dois sistemas, já que ambos objetivam conceitos diferentes. Evidentemente, a eficiência na redução do recalque é a resposta certa além,



Melhoramento do solo mole para duplicação de rodovia no Rio de Janeiro.

claro, da estabilidade do solo melhorado. Na realidade, não há como comparar, tecnicamente, os dois sistemas. Muito pode-se falar sobre intervenção ou melhoria das características dos solos argilosos moles. Talvez o mais antigo método, além da formação de colunas, seja o de simplesmente remover o solo, substituindo-o por solo competente. No entanto, só é razoável e econômico para profundidades que não ultrapassem os 3m, sem transpor o nível d'água do terreno. O aspecto ambiental, no entanto, é fator limitante. Pré-carregamento, com uso de geodrenos, ainda hoje muito utilizado no aumento da capacidade de carga de solos moles, é solução genérica e muito pouco eficiente, na medida em que há variação de profundidade desses depósitos, ao longo de um trajeto, o que se materializa em estradas

com enormes deformações verticais e distorções, tornando nossas estradas perigosas e de baixa qualidade. Além disto, tem como desvantagens uma série de imposições técnicas que, normalmente, não são cumpridas:

- A solução é crítica ou perigosa para encontros de pontes e viadutos, já que não há efetividade da rigidez do solo
- A sobrecarga deve-se estender horizontalmente por pelo menos 10m além do perímetro da construção;
- O problema do transporte de grandes quantidades de solo. Seu custo, hoje, torna o preço inviável nas grandes capitais;
- A sobrecarga deve permanecer por meses ou até mesmo anos, até que instrumentos geotécnicos como piezômetros, placas de recalque e inclinômetros, além de cálculos necessários, sinalizem sua remoção;
- É completamente ineficiente quando da existência de depósitos de solo argiloso mole profundos, que apresentam pouca ou nenhuma permeabilidade;

Conceituam-se as técnicas de tratamento de solos moles, subdividindo-a em melhoramento do solo, com geoenrijecimento e técnicas alternativas ou paliativas, denominadas de georreforço.

O geoenrijecimento do solo mole

O geoenrijecimento é uma modalidade de grouting, desenvolvido especificamente para solos argilosos moles. Grouting é a única modalidade geotécnica de intervenção no solo que, efetivamente, modifica suas propriedades, fazendo com que o próprio solo passe a suportar as

cargas previstas, com parâmetros geotécnicos previamente impostos, sem qualquer efeito coluna. É necessário esclarecer que Jet Grouting não é uma modalidade de Grouting, e sim uma técnica de estaqueamento já que trata-se da formação de estacas injetadas, não incorrendo em nenhuma melhoria para o solo envol-



Melhoramento do solo mole, com geoenrijecimento, na zona portuária de Manaus, AM.

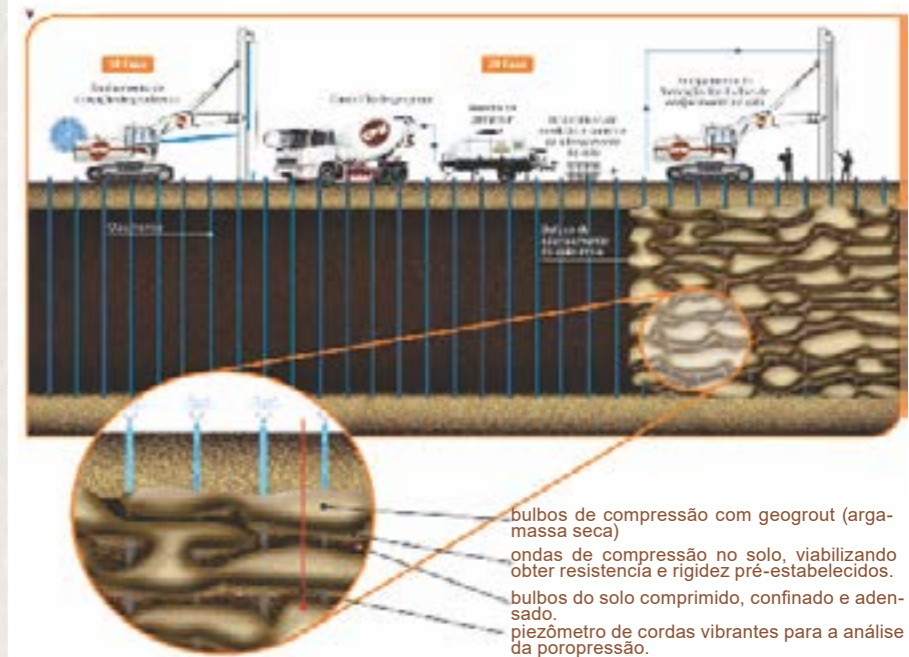
vente. O geoenrijecimento, utiliza integralmente a Teoria da Consolidação do solo, criando meio artificial drenante, seguido de um intenso processo de compressão radial do solo, com bulbos de argamassa seca (geogROUT), via expansão de cavidades. O resultado é um solo completamente modificado e homogeneizado, em toda a profundidade do depósito de solo mole. Sua grande particularidade recai sobre os parâmetros de resistência e rigidez do solo, permanentemente verificados à medida em que o serviço evolui, estabelecendo-se rígido controle da qualidade do volume do solo geoenrijecido, com certificação geotécnica, além de análises piezométricas, pressiométricas ou volumétricas com tomografia por imagem.

Aplicações típicas

- Estabilização de solos.
- Eliminação de recalques.
- Reforço de fundações readequando o solo à fundações existentes.
- Escavações.
- Encontros de pontes.
- Torna inerte solos contaminados.
- Específico para aterros sobre solos moles.
- Turbinas de vento.

No processo de geoenrijecimento, produz-se pressões que induzem a consolidação, à medida em que comprime-se o solo radialmente, fazendo com que o excesso de poropressão, intencionalmente criado seja, agora, dissipado na rede de geodrenos pré fixada. Este forte processo deformativo imposto no solo, é pré-estabelecido metro a metro, ao longo de verticais, em seu contexto volumétrico, promovendo alterações irreversíveis em sua massa, à medida em que modificam-se porções relativas de seu volume. Para tal, estabelece-se dois

O geoenrijecimento basicamente consiste das fases de cravação de geodrenos e da formação de verticais com bulbos de compressão radial do solo, promovendo o geoenrijecimento.



Representação das fases de execução do processo de geoenrijecimento do solo mole.

Vantagens

- Obtenção dos parâmetros de resistência e rigidez pré-estabelecidos.
- Ausência total de vibrações.
- Redução significativa no tempo de construção.
- Amiga do ambiente.
- Ausência de aterros, refugos e lama.
- Chuvas não interrompem o serviço.
- Sem limite de profundidade.
- Eficiência inigualável.

critérios - o de volume e o de pressão - para a formação dos bulbos de compressão radial do solo, considerando-se a diversidade de camadas mais ou menos resistentes. Assim, por exemplo, se o programa de cálculo estabelece o critério de volume de 900 litros e o critério de pressão de 7kg/cm² para cada bulbo, significa dizer que, no campo, se o solo está aceitando 900 litros por bulbo, metro a metro, apresenta bastante compressibilidade. Se, por exemplo, surgir uma camada mais resistente, o que acontecerá é que não será possível expandir os 900 litros, mais sim, digamos 500 litros. Automaticamente adotar-se-á o critério de pressão até obter-se os 7kg/cm², naquele bulbo de 500 litros, e assim sucessivamente. Os dois critérios deverão ser atendidos. A análise de projeto, no geoenrijecimento do solo mole, assume que cargas verticais cisalhantes sejam integralmente suportadas pela massa de solo homogeneizado, através das seguintes proposições:



O processo de geoenrijecimento inicia-se com a cravação de geodrenos até a base do solo mole. Em seguida, o equipamento promove verticais, com bulbos de argamassa seca, a cada metro de profundidade, que comprimem o solo radialmente, de baixo para cima, utilizando-se espaçamentos que variam, em planta, de 2,0m a 6,0m. Desta forma, geodrenos e verticais de



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



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

PLAXIS: Simulating Soil Lab Tests

www.bentley.com

Dear User,

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

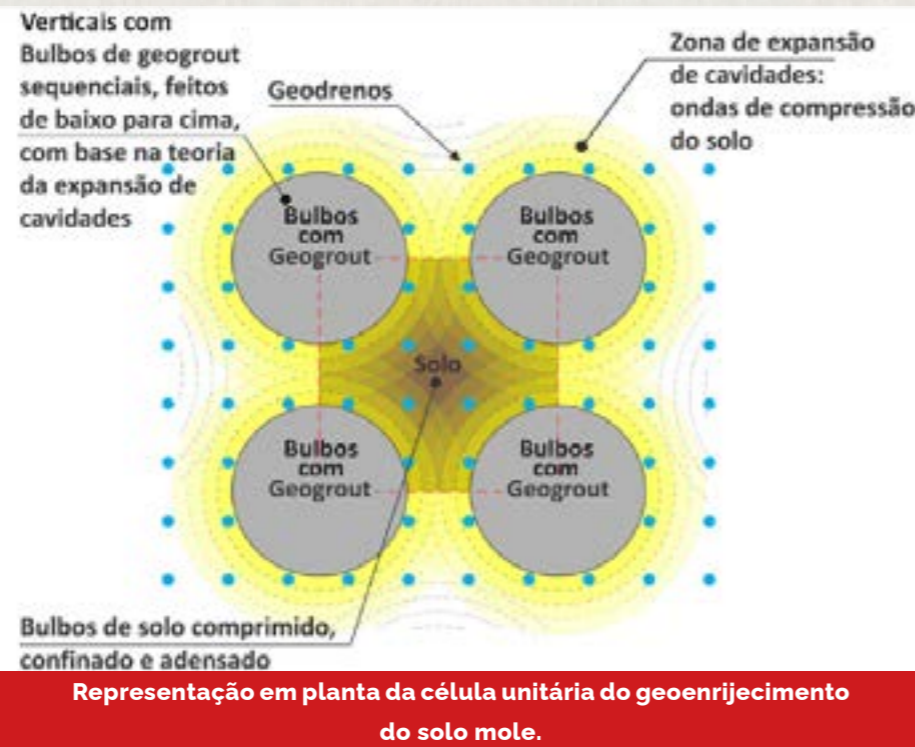
The agenda for the one-hour session encompasses:

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

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

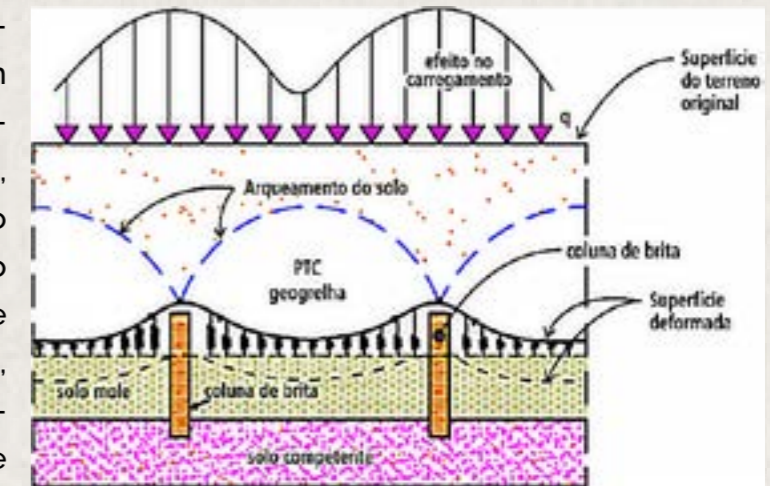
Geotechnical Analysis SIGs – complimentary virtual workshops to keep you working optimally!

adensamento são realizadas conforme malhas regulares, compondo um padrão geométrico, triangular ou quadrado (ao lado). Em relação a movimentação de massa, decorrente do processo de consolidação da argila mole, produzindo-se tensões radiais, o geoenrijecimento anula todo este processo, decorrente do procedimento de homogeneização imposto ao solo, com elevados parâmetros de resistência e rigidez, a cada metro cúbico de solo.



Colunas de brita

Caracteriza-se pela transferência de cargas, através de colunas de brita, para um substrato mais resistente tendo, idealmente, comprimento em torno de 6m e, no máximo 10m, abaixo da superfície do terreno, com características de mole a fofa (NYSDOT* Geotechnical). A utilização de PTC é obrigatória, assim como o solo mole, em torno das colunas de brita, deverá fornecer suporte lateral suficiente (mínimo de 15 kPa), de modo a impedir embarrigamento excessivo em qualquer região ao longo da coluna (NYSDOT Geotechnical DesignManual). Na figura, a seguir, apresenta-se o sistema de georeforço à base de coluna de brita.



Esquema do georeforço com colunas de brita.

*NYSDOT – New York State department of transportation.

O georeforço do solo mole

Este processo, diferente do geoenrijecimento, baseia-se no conceito de transferência de cargas, através da formação de colunas, para camadas de solo mais resistentes. É composto por elementos verticais, denominados inclusões colunares, seguido da execução de plataforma de transferência de carga (PTC), para efetuar o transporte da carga do aterro e do empreendimento para as colunas. Segundo o proceedings of the second BGA international conference on foundations, ICOF 2008 e Andromeda/Briancon, 2008, "o sistema de tratamento do solo mole, a base de mecanismos de transferência de carga,

com PTCs, suportadas por colunas ou estacas, é solução alternativa adotada para atenuar o problema do solo mole, reduzindo os recalques total e diferencial." Os mecanismos de transmissão de cargas são agrupados com os seguintes métodos:

Coluna de brita.

Deep soil mixing.

Jet Grouting.

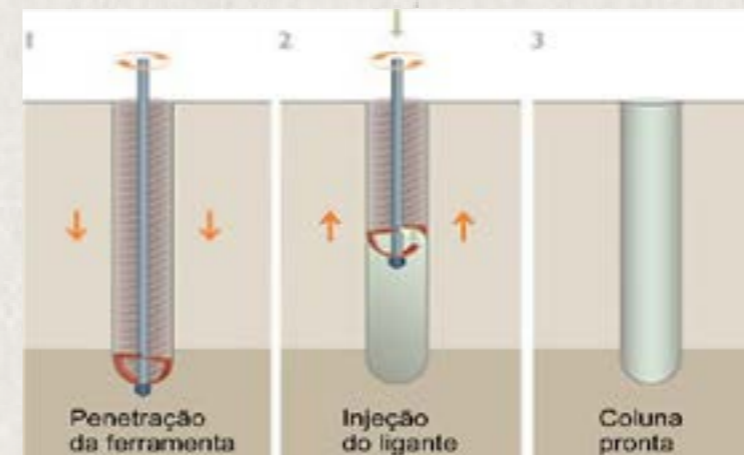
Estacas (aterro estruturado).

Todos estes métodos, tem base em elementos colunares, que recebem as cargas,

transmitidas pela PTC, tanto pelo efeito de arco, como da geogrelha, procurando transferi-las para camadas de solo resistente. Estes elementos colunares, ao receberem as cargas, ou grande parte, minimizam os recalques. Com relação a natural movimentação de massa, as colunas pouco ou nada atuam, deixando passar tensões horizontais prejudiciais, comprometendo sua estabilidade. Assim, efetivamente, não atacam a causa do problema, que é a alta compressibilidade e a ausência de capacidade de carga da argila mole, só obtido com sua consolidação.

Deep Soil Mixing

O sistema de georeforço de solos moles com Deep Soil Mixing (DSM), caracteriza-se por formar colunas de solo cimento, misturando material cimentício (cal ou cimento) ao solo, objetivando transferir as cargas do aterro e do empreendimento para camadas profundas resistentes, utilizando PTC. Segundo o European Standard on Deep Mixing, EN 14679, utiliza-se o DSM para misturar o solo. O material cimentício pode estar no estado seco ou na forma úmida, podendo se utilizar a combinação do local com o cimento Portland, o que exige estudo laboratorial preliminar, de modo a se avaliar sua mistura ao solo. No sistema à seco, a ferramenta entra no solo, utilizando ar comprimido, até a profundidade necessária. A partir daí, o sentido de rotação da ferramenta é revertido e a alimentação do ligante é iniciada, informando a quantidade de aglutinante que passou pela tubulação. A mistura com o solo, ao longo de uma vertical, com diâmetro pré-estabelecido, é efetuada a partir da profundidade alcançada até a superfície, estabelecendo-se a coluna. Outro problema é a contaminação das colunas com lama ou matéria orgânica. A técnica gera muito descarte na forma de lama.

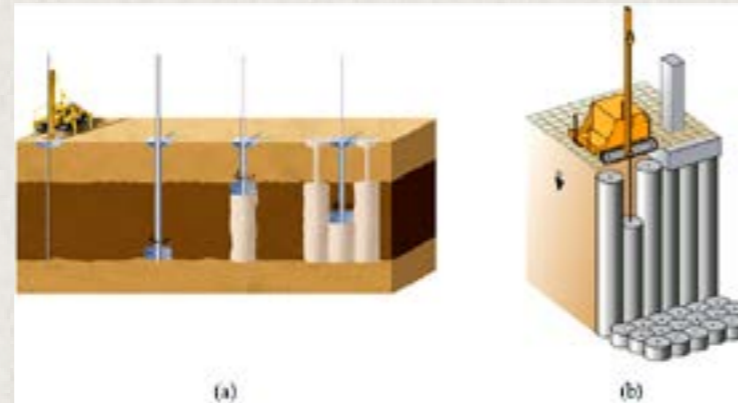


Etapas construtivas - DSM seco (Keller).

úvida, podendo se utilizar a combinação do local com o cimento Portland, o que exige estudo laboratorial preliminar, de modo a se avaliar sua mistura ao solo. No sistema à seco, a ferramenta entra no solo, utilizando ar comprimido, até a profundidade necessária. A partir daí, o sentido de rotação da ferramenta é revertido e a alimentação do ligante é iniciada, informando a quantidade de aglutinante que passou pela tubulação. A mistura com o solo, ao longo de uma vertical, com diâmetro pré-estabelecido, é efetuada a partir da profundidade alcançada até a superfície, estabelecendo-se a coluna. Outro problema é a contaminação das colunas com lama ou matéria orgânica. A técnica gera muito descarte na forma de lama.

Jet Grouting

Segundo Berry et al 1987 e 2000, Jet Grouting não é um Grouting, mas sim estacas injetadas ou um tipo de soil mixing. Isto porque, conceitualmente, Grouting implica em modificar as características do solo, o que não acontece com o Jet Grouting. O sistema de georeforço, com Jet Grouting, caracteriza-se por utilizar jatos d'água, com altíssima pressão (da ordem de 500kg/cm²) e altíssima velocidade (290m/s), destruindo o solo no formato de coluna para, a seguir, preenche-lo através de injeção de calda de cimento, de baixo para cima, recolhendo a tubulação e expulsando a lama formada, o que gera muito descarte e problemas ambientais. A formação das colunas não gera mudanças positivas nas propriedades mecânicas do solo mole original, como resistência, permeabilidade e deformabilidade. O solo, ao redor das colunas, fica amolgado e com características geotécnicas piores. Como as demais técnicas de georeforço, o Jet Grouting não melhora o solo mole, apenas possibilita a transferência das cargas, introduzindo colunas. O solo mole ao redor das colunas irá sofrer recalques com o amolgamento do solo, havendo a necessidade de se construir plataforma de transferência de cargas (PTC) de modo a diminuir estes efeitos. Outro problema é a contaminação das colunas com lama ou matéria orgânica, o que inviabiliza o método. Existem três sistemas de jet-grouting. A seleção do sistema mais apropriado é, geralmente, determinada pelas condições in situ do solo, experiência no sistema, diâmetro pretendido e na resistência exigida para as colunas.

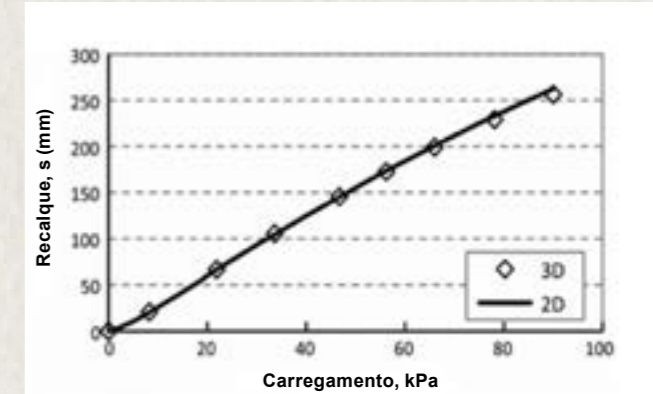


Aplicação georeforço do solo com jet-grouting formando colunas (www.haywardbaker.com).

A avaliação em campo do solo melhorado

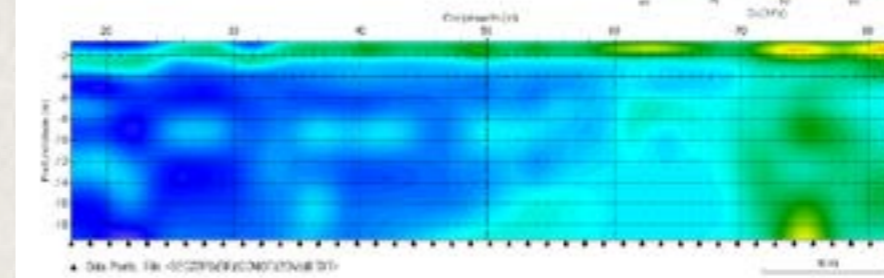
O comportamento mecânico do solo compósito, de acordo com sua célula unitária, que estabelece suas propriedades mecânicas, está associado aos elementos inclusão e solo, que trabalham conjuntamente, governado por suas propriedades, forma e topologia. Para a determinação de seu comportamento geotécnico, torna-se necessário avaliar sua resistência cisalhante, de modo a oferecer estabilidade, capacidade de carga e durabilidade, além da rigidez que possibilita reduzir ou eliminar a compressibilidade, evitando recalques. A avaliação do solo compósito, portanto, deverá considerar a condição da célula unitária, de modo a medir os dois parâmetros associados. Dever-se-á considerar que quando da inserção do 2º elemento, seja na forma de bulbos ou

colunas, o solo fica fragilizado ou amolgado, tornando impróprio ensaios de resistência com base na penetração (e ruptura) do solo pela ponta dos instrumentos SPT, CPT-U e palheta. Cabe, portanto, a realização de ensaios de deformação, seja com pressiómetro ou tomografia por imagem. No geoenrijecimento, a célula unitária é um ambiente de solo comprimido, confinado e adensado entre bulbos de material rígido. A análise tensão-

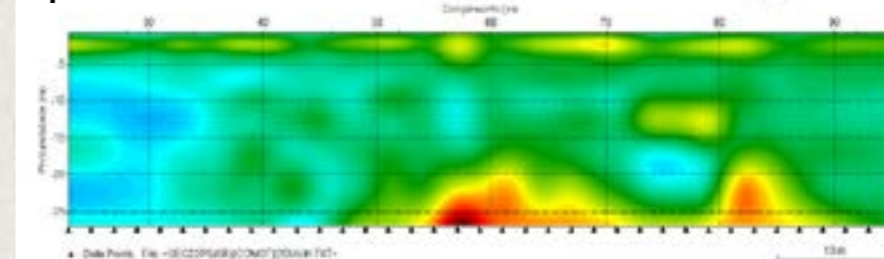


Curva recalque-tempo para modelos 2D e 3D no centro da coluna de georeforço.

Antes do melhoramento

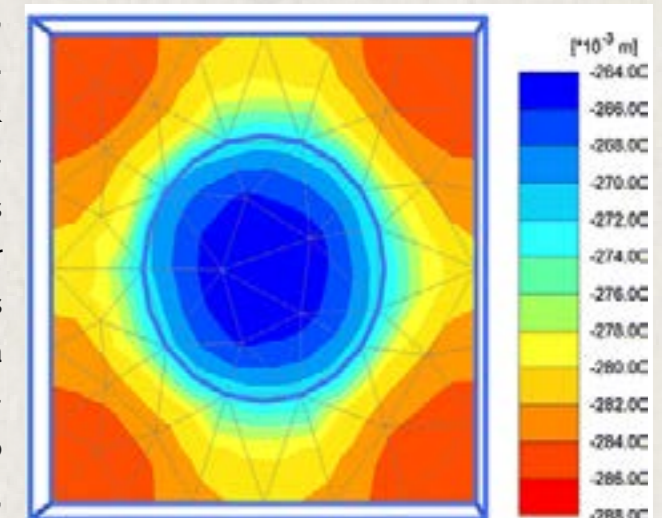


Após o melhoramento



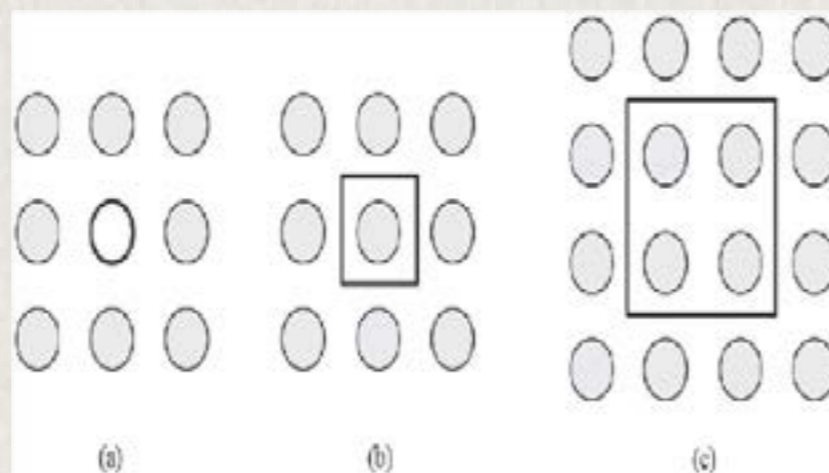
Certificação do melhoramento do solo mole com tomografia com imagem, correlacionada com a resistência do solo antes do melhoramento e após.

solo, rompendo-o. Howie et al, 2000, Campanella, R. G. & Robertson, P. K et al, 1983, Campanella, R. G. & Robertson, P. K et al, 1985, Campanella, R. G. & Robertson, P. K et al, 1989, posicionam esta questão, afirmando que a ponta destes equipamentos penetrométricos, são insensíveis para analisar solos melhorados. Portanto, são equipamentos inadequados para avaliação de solos tratados, já que não "traduzem" a interação entre solo, inclusões e o inerente campo de tensões, promovido pelo contexto homogeneizado, não identificando, portanto, os benefícios do estado de confinamento



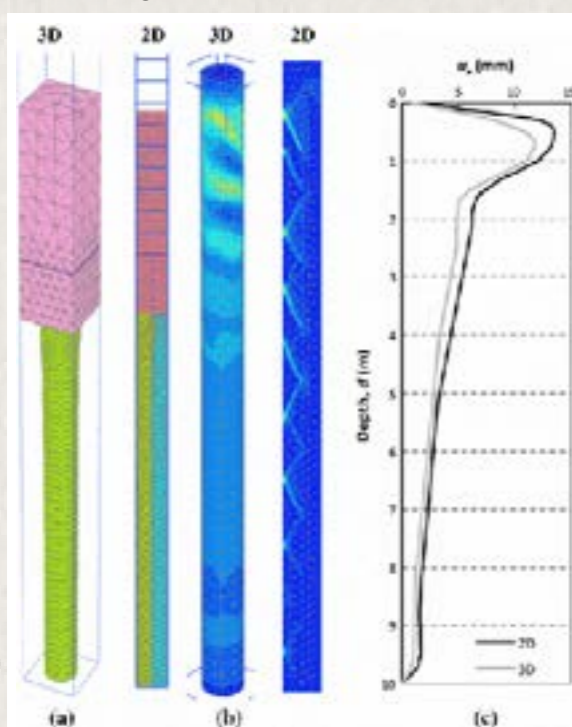
Cores de intensidade do recalque para o modelo 3D, em uma prova de carga sobre coluna.

imposto ou da condição imposta pelos elementos vizinhos. Esta asserção, é particularmente confirmada, quando se executam ensaios penetrométricos junto ou em cima dos geodrenos, onde a resistência de ponta é particularmente nula, devido ao estado de amolgamento imposto. Um método inovador caracterizado por deformação, que permite analisar solos efetivamente melhorados ou geoenrijecidos, de forma não destrutiva, rápida e econômica é a Tomografia do Solo por Imagem (TSI), que examina volumetricamente o solo, através de ondas sísmicas, que deformam o solo, geradas na superfície do terreno. As ondas, captadas por inúmeros geofones, são processadas e visualizadas em imagens, na condição original e pós melhoramento do solo. As tomografias são, então, comparadas, o que permite avaliar a eficiência do melhoramento



Certificação do tratamento do solo com geoforço.
Dever-se-á realizar testes de carga sobre placa em colunas isoladas e em grupos.

do solo. Todas as informações são deduzidas a partir de perfis da velocidade de onda cisalhante, que informa o grau de melhoramento do solo, correlacionando aos níveis de resistência e de rigidez do solo. O uso desta moderna técnica, torna-se cada dia mais frequente complementando, efetivamente, sondagens tradicionais com pressiômetro, para a certificação do geoenrijecimento. A aceitação do solo melhorado, é feita com a confirmação, obtida em campo, dos parâmetros de resistência e rigidez concebidos no projeto. Para a certificação das técnicas de geoforço, considera-se que as cargas verticais sejam direcionadas às colunas e, também, ao solo argiloso mole contribuinte de cada coluna. Evidentemente, a força resistente não é dividida igualmente entre os dois materiais. Para incorporar esta condição, na análise de cálculo, considera-se o conceito de célula unitária. De acordo com o Ground Improvement Methods do NYSDOT (New York State department of transportation), "para propósitos da análise de recalque e estabilidade, é conveniente associar a área contribuinte do solo envolvente de cada coluna, conforme certificação do tratamento do solo com geoforço, na figura no canto direito superior acima.



Nesta modelagem numérica, utilizada em análise 2D e 3D verifica-se: a) Modo de deformação, b) deformação incremental e c) perfil do deslocamento horizontal (embarrigamento da coluna). De um modo geral, as tensões ocasionadas pelo carregamento são bem superiores à tensão de confinamento imposto pelo solo mole-muito mole, razão pela qual o recalque perdura.



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)



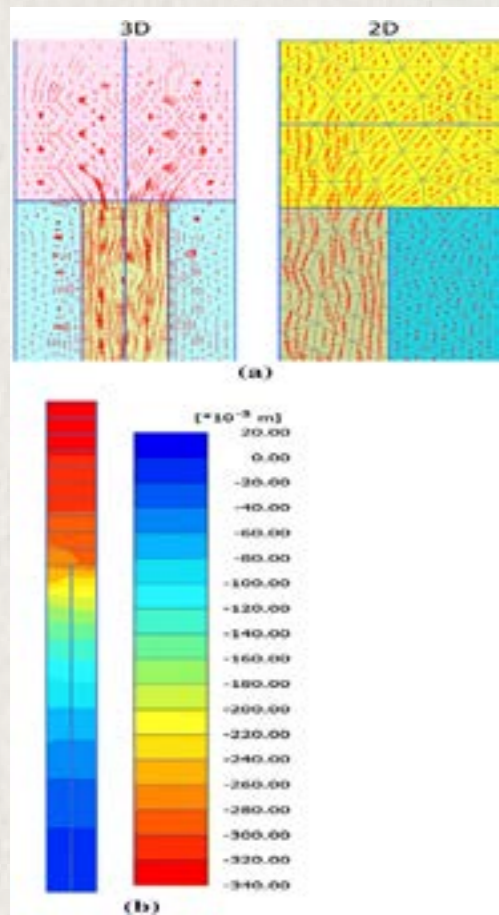
4.688.020 - Sistema hidráulico para realização de ensaio CPT em diversos tipos de Solos



4.100.300 - LWD "Light Weight Deflectometer"



4.100.035 - Penetrômetro Dinâmico Eletrônico para Solos Panda



a) Orientação das tensões principais
b) Cores do deslocamento total

Apesar da área contribuinte formar um hexágono regular superior, pode ser considerada como um círculo equivalente com mesmo diâmetro. O cilindro equivalente resultante, com diâmetro D_e , envolvendo o solo contribuinte e a coluna formará a célula unitária". Portanto, a célula unitária estabelece o "modus operandi" do geoforço. Da mesma maneira que no geoenrijecimento, torna-se evidente que qualquer sondagem penetrométrica, realizada no solo envolvente, nada informará acerca do tratamento com geoforço. Ainda de acordo com o Ground Improvement Methods, do NYSDO, "a necessária avaliação do geoforço, com coluna, deve ser feita com teste na obra, de modo a se avaliar o efeito do tratamento do solo, em relação ao solo original". Neste caso, subentende-se um aterro teste sobre a célula unitária representativa. Jie Han, em seu livro "Principles and Practice of Ground Improvement" (2015), sugere, com base na norma ASTM D1143, "Método para teste de fundações profundas sob carga compressiva axial estática", que sejam realizados testes de carga sobre placa, para se determinar a capacidade de carga e o recalque em colunas individuais e no solo compósito representativo.

No teste individual da coluna, deve-se-á utilizar uma base ou chapa metálica com o mesmo diâmetro da coluna. No

teste da coluna, mais solo contribuinte (solo compósito), deve-se-á utilizar placa metálica com as dimensões da área considerada. Assim, para o caso do teste representativo do solo compósito, a área da chapa metálica deverá ser igual ao número de colunas, sob a chapa, multiplicado pela área contribuinte da célula unitária. Em todos os testes, a área analisada deverá estar cercada por, pelo menos, uma linha de colunas, de modo a estabelecer a condição representativa. Segundo Jie Jan, 2015, caso se considere apenas o teste da coluna, deve-se-á leva-la à ruptura. Se, por outro lado, a análise for para projeto, a carga a ser aplicada será

Melhoramento do solo mole, com geoenrijecimento, após um trecho estradal com início de processo de rutura, devido a construção do aterro de sobrecarga.



limitada a 1,5 vezes a carga de serviço. No caso de análise do solo compósito, deve-se-á utilizar a norma americana ASTM D1196, "método para testes não repetitivos de carga em solos sobre placa e componentes de pavimentos flexíveis, para avaliação e projeto de aeroportos e outros estudos". A aceitação do solo tratado, com geoforço deverá atender, portanto, os parâmetros de resistência e rigidez estabelecidos em projeto.

REFERÊNCIAS

- Roger Kim é engenheiro civil e trabalha com melhroamento de solos moles.
- [1] ABDULLAH, C.H. (2006). Evaluation of Load Transfer Platforms and Their Design Methods for Embankments supported on geopiers. Dissertação de Doutorado, University of Wisconsin.
- [2] ABDULLAH, C.H. (2006). Evaluation of Load Transfer Platforms and Their Design Methods for Embankments supported on geopiers. Dissertação de Doutorado, University of Wisconsin.
- [3] ACHARYA, B., Han, J., Thakur, J.K., and Parsons, R.L. (2012). Onsite Use of Recycled Asphalt Pavement Materials and Geocells to Reconstruct Damaged Pavements by Heavy Trucks. Final Report MATC – KU: 462, the Mid– America Transportation Research Center, Lincoln, NE.
- [4] ADAMS, M.T. and COLLIN, J.G. (1997). Large model spread footing load tests on geosynthetic reinforced soil foundations. J. Geotechn. Geoenviron. Eng., 123(1): 66-72.
- [5] ÅHNBERG, H. 2006. Effects of consolidation stresses on the strength of some stabilized Swedish soils. Ground Improvement, Vol. 10, No. 1, pp. 1-13.
- [6] ALEXIEW D, VOGEL W (2001) Railroads on piled embankments in Germany. Milestone projects, Landmarks in earth reinforcements, ed. by Ochiai et al., Swets & Zeitlinger, pp 185-190
- [7] ALEXIEW, D., HORGAN, G.J., and BROKEMPER, D. (2003). "Geotextile encased columns (GEC): Load capacity and geotextile selection." In Foundations: Innovations, Observations, Design and Practice. Thomas Telford, London.
- [8] ALZAMORA, D. E., WAYNE, M.H., and HAN, J. (2000). Performance of SRW supported by geogrids and jet grout columns. Performance Confirmation of Constructed Geotechnical Facilities, ASCE Geotechnical Special Publication No. 94, A.J. Lutenegeger and D.J. DeGroot (eds.). ASCE Press, Reston, VA 456-466.
- [9] BARATA, F. E. e DANZIGER, B. R. (1986). Compressibilidade de argilas sedimentares marinhas moles brasileiras, em Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Porto Alegre, pp. 99-112.
- [10] BERG, R. R., CHRISTOPHER, B.R., and SAMTANI, N.C. (2009). Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes. Volume I, FHWA – NHI-10-024, FHWA GEC 011 – Vol I.
- [11] BERGADO DT, CHAI JC, MIURA N, BALASUBRAMANIAM AS (1998). PVD improvement of soft Bangkok clay with combined vacuum and reduced sand embankment preloading. Geotech Eng, Southeast Asian Geotech Soc 29(1):95-121
- [12] BHANDARI, A. (2010). Micromechanical Analysis of Geosynthetic-Soil Interaction under Cyclic Loading. Ph.D. dissertation, the University of Kansas.
- [13] BINQUET, J. and LEE, K. L. (1975). "Bearing capacity analysis on reinforced Earth slabs." J. Geotech.Eng.Div., 101(12): 1257-1276.
- [13] BISHOP, A. W. (1955). "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes." Geotechnique, 5(1): 7-17.
- [14] BONAPARTE, R., HOLTZ, R. D., and GIROUD, J. P. (1987). "Soil reinforcement design using geotextiles and geogrids," Geotextile Testing and the Design Engineer, ASTM, STP No. 952: 69-116.
- [15] BRIANÇON, L., & SIMON, B. Full-scale experiments of pile-supported earth platform under a concrete floor slab and an embankment. Conference: Conference: New Techniques for Design and Construction in Soft Clays, At Guarujá Brazil, May 2010.
- [16] BRITISH STANDARD BS8006 – 1. (2010). Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and Other Fills. British Standards Institution, London.
- [17] BRITISH STANDARD BS8006 – 1. (2010). Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and Other Fills. British Standards Institution, London.
- [18] BS8006. 1995. Code of Practice for strengthened/reinforced soils and other fills. British Standards Institute.
- [19] BURKE, G.K., LYLE, D.L., SEHN, A.L. and ROSS, T.E. (2001) Soil mixing supports a deepwater bulkhead in soft soils, Proceedings of ASCE Ports Conference 2001, Norfolk, VA.
- [20] CABE, Bryan A. 2007, Ground Improvement Using The Vibro-Stone Column Technique, Department of Civil Engineering, National University of Ireland, Galway.

The logo for Soft Soil Brazilian Institute (SSBI) features the letters 'SSBI' in a bold, sans-serif font. 'SS' is green, 'B' is white, and 'I' is green, all set against a dark green rounded rectangular background.

**SOFT SOIL
BRAZILIAN
INSTITUTE**

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



GEOKON

SOLUÇÕES CAD BIM

TRUSTED MEASUREMENTS



TROGERTEC

ENGEGRAUT

