

Soft Soil Brazilian Review

3
Rutura de taludes por liquefação estática.
| *Eng.º Msc. Joaquim Rodrigues*

18
A liquefação estática, cíclica e a pós liquefação.
A resposta do solo arenoso.
| *Eng.º Patrícia Tinoco*

30
Estudos recentes sobre a liquefação estática
de barragens de rejeitos. O que se sabe?
| *Eng.º Roger Rodrigues*

42
O que há de mais recente para neutralizar este
sério problema.
| *Eng.º Thomas Kim*

25 - Consulta

Como podemos determinar o potencial ou as chances de liquefação em um solo?

NOVAS ESTRATÉGIAS PARA EVITAR A LIQUEFAÇÃO ESTÁTICA.

Um sério problema ainda não
entendido.



3

RUTURA DE TALUDES POR LIQUEFAÇÃO ESTÁTICA.

18

A LIQUEFAÇÃO ESTÁTICA, CÍCLICA E A PÓS LIQUEFAÇÃO. A RESPOSTA DO SOLO ARENOSO.

30

ESTUDOS RECENTES SOBRE LIQUEFAÇÃO ESTÁTICA EM BARRAGENS DE REJEITOS. O QUE SE SABE?

42

LIQUEFAÇÃO DO SOLO. O QUE HÁ DE MAIS RECENTE PARA NEUTRALIZAR ESTE SÉRIO PROBLEMA.



03



18



30



42

Editorial

Rejeitos de mineração são misturas de areia, silte, argila, metal, reagentes químicos e água de processamento empregados durante a extração do metal, usualmente armazenados em vales com presença de barragens. Geralmente são depositados em estado fofo saturado, onde mesmo uma pequena perturbação, beirando condição não drenada, pode causar rutura progressiva, comumente denominada liquefação estática. Liquefação estática é, ainda, um daqueles grandes problemas não entendidos pela comunidade geotécnica brasileira, devido a sua complexidade, a ordem de prejuízos causados e por acontecer, seja em barragens de rejeitos, de Minas Gerais, seja nos taludes fluviais de nossa região norte. Acompanhamos os recentes resultados e pesquisas pelo mundo afora, com resultados controversos e polêmicos, em particular aqueles que apontam a influência de siltes argilosos, no solo predominantemente arenoso, suspeito número um da culpa da liquefação, assim como os métodos de melhoria do solo sujeitos ou que sofreram liquefação. Para entender este seríssimo problema, estuda-se com uma grande variedade de solos, predominantemente arenosos, como referência. Testes triaxiais cíclicos, não drenados, são realizados para investigar diversos fatores que influenciam a ação da liquefação, como a densidade relativa, a pressão confinante e

a razão de sobreadensamento. Os resultados evidenciam que estes três fatores, em particular, têm influência significativa no processo. Os resultados evidenciam também que, alguns solos, predominantemente arenosos, são mais susceptíveis à liquefação do que outros. Por exemplo, amostras com o mesmo índice de vazios inicial, mostram que a resistência à liquefação estática diminuiu para uma certa quantidade de material siltoso/ argiloso, depois aumenta-se quando adiciona-se mais finos Procuramos abordar estudos e serviços de melhoramentos de solos, os mais recentes realizados, principalmente com a influência do grau de saturação que, com a cravação de geodrenos e a imposição de pressão de confinamento imposto ao solo melhorado, via expansão de cavidades, do geoenrijecimento, aumenta drasticamente a resistência à liquefação. Analisamos, também, questões inerentes à estabilidade e à análise da confiabilidade para barragens de rejeitos, com o método da superfície de resposta, desenvolvida com base em simulações com elementos finitos, utilizando-se geometria simples para barragens, empregando-se o modelo constitutivo NORSAND, que pode detectar o comportamento do amolecimento, avaliando o fator de segurança, com base na densidade relativa das camadas de rejeitos e do lençol freático. Acoplamos estes dois sistemas para calcular a desejada probabilidade de rutura.

Boa leitura

Seções

3 RUTURA DE TALUDES POR LIQUEFAÇÃO ESTÁTICA.

18 A LIQUEFAÇÃO ESTÁTICA, CÍCLICA E A PÓS LIQUEFAÇÃO. A RESPOSTA DO SOLO ARENOSO.

25 COMO PODEMOS DETERMINAR O POTENCIAL OU AS CHANCES DE LIQUEFAÇÃO DE UM SOLO?

CONSULTA

29 AGENDA

30 ESTUDOS RECENTES SOBRE LIQUEFAÇÃO ESTÁTICA EM BARRAGENS DE REJEITOS. O QUE SE SABE?

42 LIQUEFAÇÃO DO SOLO. O QUE HÁ DE MAIS RECENTE PARA NEUTRALIZAR ESTE SÉRIO PROBLEMA.

RUTURA DE TALUDES POR LIQUEFAÇÃO ESTÁTICA.



Joaquim Rodrigues

Fig. 1 - A liquefação estática sempre presente nos taludes fluviais da Amazônia.

Solos predominantemente arenosos saturados são susceptíveis à instabilidade devido à liquefação estática. As consequências de um talude instável, em termos de mobilidade de massas são catastróficas, o que pode ser demonstrado e quantificado em laboratório, onde uma pequena rutura realizada, em um bolsão liquefeito propaga-se, levando o movimento para longe de seu início. Análises de ruturas com deslizamentos podem,

perfeitamente, serem simuladas para condições já ocorridas, de modo a se prever a condição futura, avaliando-se o risco existente e, claro, o melhoramento necessário do solo. Antes de mais nada, define-se o termo instabilidade, como um comportamento caracterizado por grandes e rápidas deformações plásticas, de um elemento do solo, devido a sua incapacidade de sustentar cargas, que promovam um determinado estado de tensões, chegando-se ao conhecido envelope de rutura, com

deslizamento tipificado de grande mobilidade. Solos predominantemente arenosos, na condição de fofos, como os solos dos taludes da Amazonia e de barragens de rejeitos, são susceptíveis à instabilidade, resultando em significativo amolecimento deformativo desviador e na conhecida e sinistra liquefação estática, com deslizamentos na forma de solos fofos liquefeitos saturados, seja de um talude em direção a um rio, seja o de uma barragem, conforme ilustrado nas figuras a seguir.

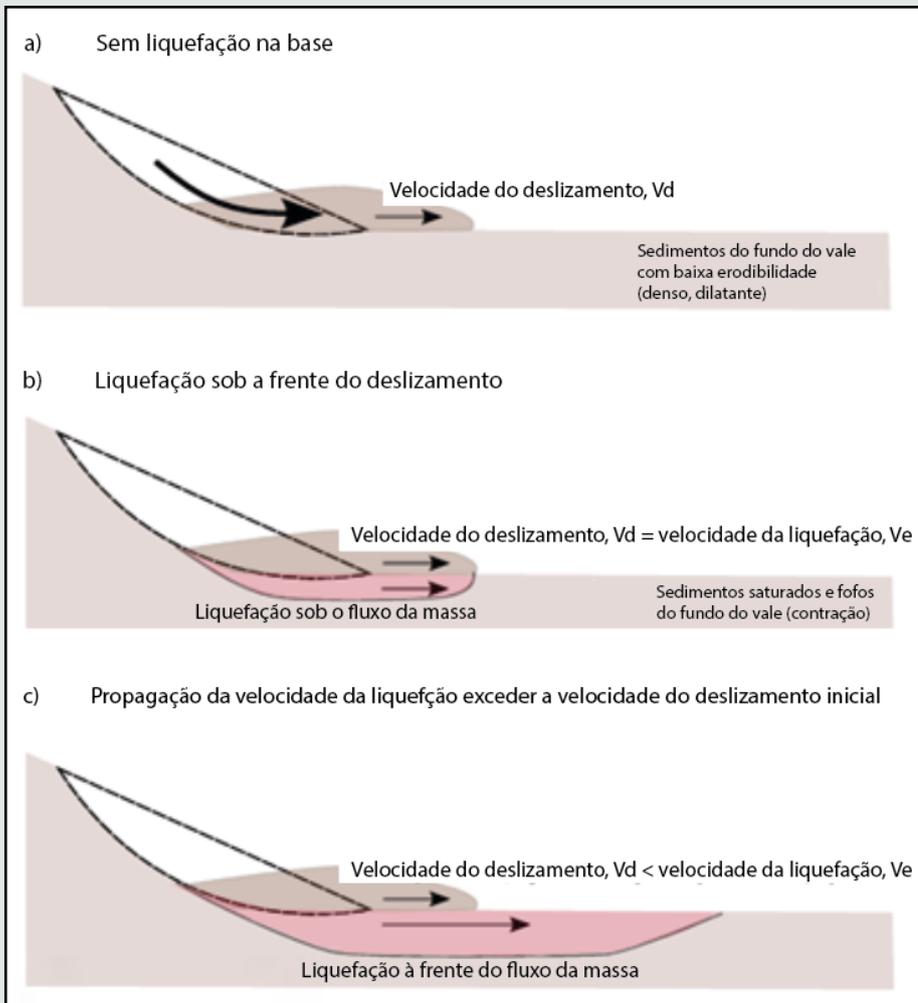


Fig 1 - Cenários que ilustram a influência da liquefação do solo em fundos de vale na mobilidade do deslizamento. A) Se não ocorrer liquefação, a mobilidade do solo restringir-se-á a sua reologia. B) Caso em que a liquefação ocorre apenas sob a frente deslizante ($V_d = V_e$). C) Caso hipotético em que a velocidade de propagação da instabilidade excede a velocidade inicial do deslizamento, desencadeando a liquefação ($V_e > V_d$).

Nestas figuras, especificamente, observa-se rutura com deslizamento, desencadeada pelo pé do talude, na condição de fluido sobre um terreno com solo dilatativo (não liquefeito), sem problemas de erodibilidade. Se o terreno resistir ao processo de arrastamento imposto pelo fluxo, que escoar, seu alcance será função de sua reologia. Este cenário é o mais considerado em modelagens físicas e numéricas, no escoamento de deslizamentos, sendo super adequado para simular movimentos de ruturas de talude/ barragens de rejeitos que possam ocorrer, baseado em situações passadas. Um cenário mais complexo, para o contexto de fluxos de solos/ rejeitos, é apresentado na figura 1B, acima, onde o solo, na base do talude, imediatamente abaixo da massa deslizante, liquefaz-se e é arrastado/ incorpo-

rado ao fluxo principal. Neste contexto, o arrastamento pode ser o resultado do mecanismo convencional de “varredura” basal, observado comumente em ruturas com fluxos caracterizados pelo atrito ou colisão. Interessante comentar a recente tentativa de reprodução do mecanismo de liquefação estática por impacto, em laboratório (Hu, 2023), mostrando que solos/ rejeitos secos podem liquifazer e promover um verdadeiro processo de aração no terreno, revolvendo-o e arrastando-o. Sensores de poropressão, introduzidos neste modelo de ensaio físico, registraram excessos de poropressão positivos, durante o processo de cisalhamento, de intensidade insuficiente para liquifazer o solo do terreno de base para a condição do teste. Estas observações ilustram

a complexidade do mecanismo da liquefação estática, por impacto. Efetivamente, reconhece-se que a modelagem física da rutura do solo por liquefação estática, é difícil de ser concebida ou realizada. No entanto, recentemente, idealizou-se que a presença de camada de solo, predominantemente arenoso fofo, na base de um deslizamento/ rutura, ou seja, na base do talude, introduz uma região do solo muito propensa a liquefação, viabilizando critérios exigidos para a instabilidade da pré-rutura:

- a) Solo arenoso fofo contrativo
- b) Solo completamente saturado
- c) Um processo cisalhante desencadeador, ou seja, sendo sobreposto pelo deslizamento.

Nestas circunstâncias, o deslizamento sobrepõe-se ao solo fofo com contração e, se declararmos que o processo de arrastamento ocorre imediatamente sob a frente do procedimento de rutura, a velocidade da propagação da instabilidade manifestar-se-á, sendo limitada pela rapidez do deslizamento que se impõe. Assim, se supormos a inclusão do processo de arrastamento, em análises dinâmicas de deslizamentos/ ruturas, poder-se-á pressupor que a rapidez de propagação da instabilidade poderia, sob certas circunstâncias, exceder a velocidade do impulso cisalhante inicial, ou seja, na rutura do pé do talude. A velocidade da onda cisalhante no solo, para pequenas deformações, medida com a tomografia por imagem, é da ordem de centenas de metros por segundo. Em contraste, a liquefação estática é um grande e fenomenal processo de deformação. É, portanto, provável que a velocidade de propagação da onda cisalhante, de grande amplitude, imposta pelo impulso cisalhante do deslizamento, seja limitado a uma velocidade radicalmente

mais lenta. Assim, se for possível que a velocidade de propagação do processo de instabilidade exceda a velocidade da ruptura, a taxa de crescimento da dimensão do deslizamento poderá exceder a velocidade em qualquer ponto da massa deslizante, conforme figura abaixo. Com este cenário, o trajeto máximo do deslizamento não seria, simplesmente, função da reologia do solo/ rejeitos mas, também, da velocidade do processo de instabilidade. Com este panorama, haveria consequências significativas nos parâmetros reológicos, derivados de retro análises de rupturas passadas, influenciando previsões de futuros eventos. O fluxo de trabalho, típico da calibração de parâmetros de modelos de deslizamentos, apresenta-se na figura abaixo, inspirados na abrangente revisão do atual

conforme a figura abaixo, identificando-se combinações de parâmetros que resultem na melhor correspondência. Estas combinações de parâmetros poderiam ser refinadas ainda mais, se dados ou evidências de campo, sobre a velocidade do deslizamento em um ponto estivessem disponíveis. No entanto, se for tecnicamente possível que a velocidade do processo de instabilidade (V_i), no solo base, exceda a velocidade inicial do deslizamento (V_d), os parâmetros derivados desta retroanálise não serão representativos da verdadeira reologia do solo. Embora as evidências de campo indiquem que a liquefação por impacto possa ocorrer, faltam dados mais robustos acerca do seu exato mecanismo. De forma específica, na falta de quaisquer dados que traduzam a velocidade de propagação do processo de instabilidade em ru-

velocidade relativa e a propagação do processo de instabilidade, desenvolvendo-se o modelo, a condição de contorno imposta e a instrumentação utilizada para medir e comparar V_d com a V_i , conforme observado na medição dos excessos de poropressão com densa rede de sensores piezométricos. Desta forma, poder-se-á utilizar estas duas fontes de dados para explorar sua importante correspondência.

O modelo físico

Modelos físicos, em escala reduzida, de processos de estabilidade de taludes, não representam o comportamento na escala real do campo, quando a poropressão sobrepõe-se as tensões geradas pelo peso próprio (ou seja, o efeito do castelo de areia e a possibilidade de taludes verticais, de solo não saturado, sem qualquer suporte). A técnica da modelagem centrífuga, na qual as tensões desenvolvidas pelo peso próprio do solo, em um modelo de pequena escala, com profundidade, oferecem mecanismo único para superar esta limitação, recuperando o perfeito equilíbrio entre estas tensões. A capacidade de controlar, com precisão, as condições de contorno, fez desenvolver modelos centrífugos de processos de deslizamentos/ rupturas, utilizados com objetivo de um melhor entendimento dos mecanismos que contribuem para eventos catastróficos de movimentos de massa. Por outro lado, trabalhos recentes demonstram que a presença de camadas saturadas fofas, na base de um talude, aumenta sobremaneira a susceptibilidade para um processo de liquefação estática, assim como a distância da ruptura/ deslizamento em um talude de 20° , pode, em certas circunstâncias, exceder a inclinação de 30° , já que o primeiro exige menos fluxo do NA para desencadear a liquefação.

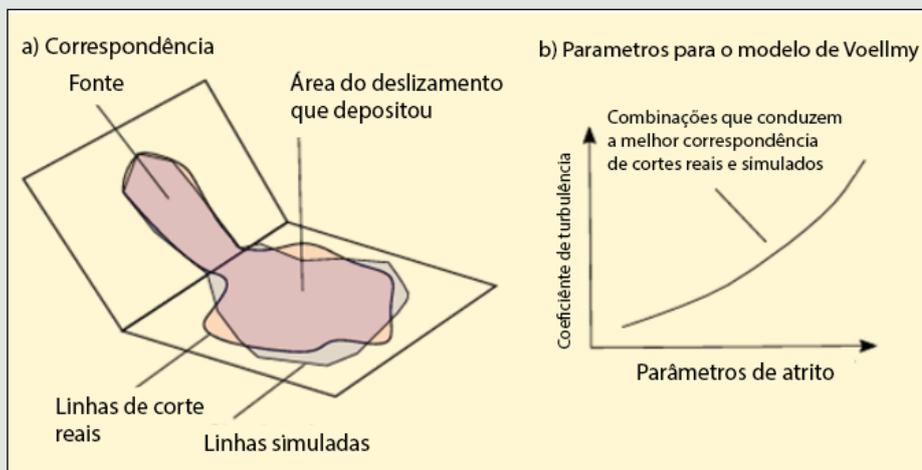


Fig 3 – Calibração do desvio dos modelos de deslizamento, com base na correspondência de eventos passados. A) Podem ser usadas linhas de corte reais e simuladas, para quantificar a correspondência em cada um dos conjuntos de parâmetros da simulação. B) Intervalos de parâmetros identificados que fornecem a melhor correspondência.

estado da arte, em desafios enfrentados pelas previsões de deslizamentos/ rupturas idealizadas por McDougall, 2017. Utilizando-se a reologia de Voellmy, comumente empregada como exemplo, as tensões cisalhantes atuantes na base de um elemento de um deslizamento, pode ser descrito como função dos coeficientes de atrito e turbulência. Combinações destes dois parâmetros podem ser utilizados, de forma semi-empírica, para se obter a linha de corte do modelo com o solo/ rejeitos de deslizamentos observados,

turas/ deslizamentos por liquefação estática, a possibilidade de V_i ser diferente de V_d permanece uma hipótese não testada. Considerando as importantes implicações desta hipótese, para a análise do desejado desenvolvimento, torna-se importante realizar testes com modelos físicos, em uma centrífuga geotécnica, onde poder-se-á desencadear deslizamentos/ rupturas do solo, por liquefação estática, a partir de um bolsão envolvente de ruptura inicial, em camada arenosa fofa, no pé do talude, investigando-se sua



SOLO MOLE NO SEU PROJETO?

NÃO TRABALHE COM TÉCNICAS
ALTERNATIVAS OU ADAPTADAS

FAÇA MELHORAMENTO DE SOLO

MELHORAMENTO DE SOLOS MOLES É
GEOENRIJECIMENTO*

**100% TEORIA DO ADENSAMENTO DA ARGILA*

 facebook.com/engegraut

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

 www.engegraut.com.br

VISITE NOSSO SITE: WWW.ENEGRAUT.COM.BR

Da mesma forma, o efeito de chuvas prévias e seu processo de infiltração, no comportamento do NA, para o desencadeamento do regime de instabilidade. Os resultados indicam que o nível do NA, pouco abaixo do necessário para causar um processo de rutura, desencadeia deslizamentos três vezes mais distantes que de um talude idêntico apenas sob chuva. A geometria do modelo, da figura abaixo, representa na fina camada de solo (50mm)

revestimento anti atrito, antideslizante e impermeável, utilizando-se massa de vedação perfeitamente moldada, de modo a assegurar um contorno sem qualquer possibilidade de fluxo entre a janela de visualização e as chapas de alumínio. A geometria do modelo inclui uma camada horizontal de solo no pé do talude, de modo a fornecer uma camada basal, de solo predominantemente arenoso fofo, suscep-

momento do desencadeamento da rutura/ deslizamento, impondo alto grau de saturação. O desencadeamento do processo de instabilidade no modelo foi, então, conduzido com a introdução de um fluxo d'água subterrâneo através do topo do talude, conforme a figura, utilizando-se uma bomba com medição para controlar, com precisão, a vazão d'água. A água, proveniente da bomba, fluiu através do tubo, até a crista do talude, infiltrando-se no solo, fazendo contato com um bolsão estrategicamente posicionado, de maneira que a água fosse distribuída uniformemente ao longo da largura do solo, no modelo, considerando-se uma leve curva no campo da aceleração da centrifuga. A água, que percorreu o solo foi, então, drenada pelo pé do talude, saindo pela câmara da centrifuga. O fluxo de água subterrâneo no modelo foi, então, aumentado de forma gradativa, resultando em um NA avolumado. Durante cada incremento, o fluxo aumentou quando a condição de equilíbrio foi alcançada, com base na estabilização das leituras dos sensores de poropressão, inseridos na base do modelo, exatamente na interface do solo arenoso fofo com a camada competente. O fluxo continuou, através do modelo, até o desenvolvimento da rutura/ deslizamento

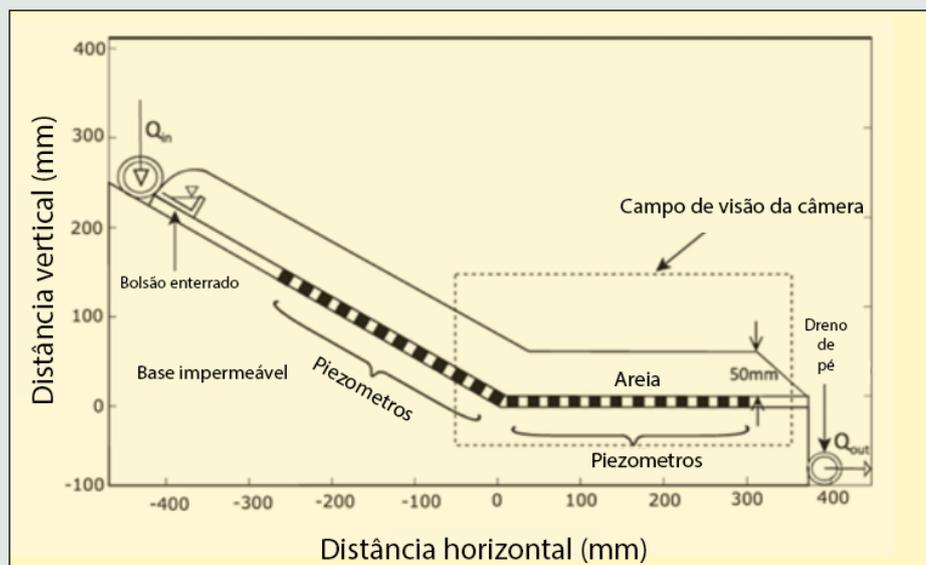


Fig 4 – Modelo de centrifuga, na qual uma fina camada de solo será levada a rutura com nível d'água aflorado. O fluxo d'água freático, Q_{in} , é fornecido no topo da porção inclinada de 30° do modelo, e o solo da região horizontal do fundo do vale servirá como camada dilatante ou a liquefazer. Uma densa rede de sensores de poropressão foram instalados para promover a propagação da velocidade da instabilidade e informar visualmente o comportamento do talude utilizando-se uma câmera de alta velocidade.

inclinada à 30° , em relação a horizontal, sobrepondo uma camada firme impermeável. Quando testado com 20gr, o modelo corresponde a uma camada de solo com espessura de 1m, em uma escala de protótipo. A camada competente consiste de uma placa de alumínio, tratado com

tível a liquefação estática. A mudança no gradiente hidráulico, da porção inclinada do modelo, até a base do talude, garante que a altura do fluxo d'água subterrâneo, na camada basal, com predisposição para sofrer liquefação, será igual ou próximo a camada do topo no

Medidor de Recalques com Alta Sensibilidade

O medidor de recalques com alta sensibilidade consiste em uma série de vasos contendo sensores de nível de fluido interligados por um tubo cheio de líquido. Um vaso de referência é posicionado em um local de referência estável associado a sensores adicionais posicionados em locais diferentes, aproximadamente na mesma elevação. O recalque diferencial, ou levantamento, entre qualquer um dos sensores, resulta na variação de nível do líquido dentro dos tubos. O sistema é particularmente apropriado para situações críticas onde altas resoluções são necessárias. É possível detectar oscilações de elevação de até 0,02mm, aproximadamente.



Para maiores informações, acesse: www.rogertec.com.br ou atendimento@rogertec.com.br



Fig 5 – Rutura por liquefação estática na zona portuária de Manaus. Um problema rotineiro que ocorre no período de vazante máxima do rio.

ou a vazão das bombas fosse excedida. Em testes centrífugos, a relação da escala com o tempo é considerada como dependente do fenômeno que está sendo investigado. Para processos da difusão da propagação como o de consolidação de um solo, o tempo é considerado na escala $1/N^2$ (onde o N é o nível g), enquanto para o comportamento inercial ou dinâmico é, tradicionalmente, interpretado em escala como $1/N$. O conflito entre as escalas de tempo, para eventos dinâmicos e de difusão são, normalmente, superados em modelagens centrífugas, quando se investiga cargas dinâmicas, com substituição da água como fluido poroso com outro de viscosidade N vezes maior. A magnitude do excesso de poropressão, durante um carregamento dinâmico, em um solo saturado, foi normalizado por ser reduzido devido a alta taxa de dissipação em relação a sua geração. Em contrapartida, o modelo de solo saturado, com fluido viscoso em seus poros, experimentou o maior excesso de poropressão e, conseqüente, liquefação sob o idêntico carregamento dinâmico. A liquefação estática difere, de forma significativa, da dinâmica, com relação à escala de tempo, durante a qual a poropressão é gerada dentro de um único

evento monotônico, ao invés de um acúmulo gradual com número crescente de ciclos de carga dinâmica. Considerando-se as implicações resultantes da modelagem centrífuga, em eventos de liquefação estática, propôs-se que a escala do tempo de geração do excesso de poropressão seja, provavelmente, definido na escala dos grãos/partículas do solo, na medida em que a instabilidade do esqueleto do solo é que impulsiona o aumento monotônico da poropressão para a liquefação estática. Trabalhos recentes, que exploram esta hipótese, argumentam que o tempo de geração do excesso de poropressão, devido ao colapso da estrutura do solo é $N_{0,5}$ vezes mais lento que o tempo de dissipação, na escala dos grãos do solo sob a aceleração Ng . É, portanto, impossível ter um modelo de centrífuga, na qual a resposta da poropressão detone o evento (ou seja, percolação transitória) e durante sua dissipação, após a liquefação, sejam idênticos em relação a escala de cam-



Fig 6 – Outra região, também na zona portuária de Manaus com rutura.

po. Neste estudo, a importância do conflito com o efeito da escala, é minimizado com baixo nível de aceleração $N = 20$ mantendo-se, ao mesmo tempo, os benefícios práticos operacionais com utilização de água como fluido para a poropressão (ou seja, a possibilidade de vaziar água na câmara centrífuga, sem qualquer restrição ao volume utilizado para gerar regime de percolação constante, etc). Portanto, testes de modelos físicos, explorando processos de liquefação estática, utilizando-se água como fluido de poropressão, irá promover dissipação e, conseqüentemente, estabilização mais rápida do que o comportamento equivalente na escala de tempo. Com toda esta discussão, com relação aos fatores de escala, interessante por sinal, fica cla-

ro que o foco deste artigo é sobre o desencadeamento da liquefação estática, em um único impulso cisalhante, provocando rutura/ deslizamento e não a distância do fluxo deslizante pós evento, pois seria:

1- *Fortemente impactado pela rápida taxa da dissipação artificial da poropressão, através da decisão de utilizar água como fluido.*

2- *Sujeito às complexidades adicionais associada com corpos movendo-se em um quadro de referência giratório (ver Cabrera et al 2020)*

3- *Inconveniente, devido a distância do desenvolvimento do evento, significativamente enquadrado pelas limitações físicas da câmara de teste.*

Desta forma, de acordo com estudos mais recentes sobre liquefação estática, com utilização de água (por exemplo Ng et al, 2022), deve ser visto como uma criação de um limite inferior para a modelagem da liquefação estática

A condição do solo

O solo é predominantemente arenoso fino, com graduação uniforme, assemelhando-se aos inúmeros estudos de liquefação em todo o mundo, com ângulo de atrito a volume constante de 31°. Antes da elaboração de cada modelo, as amostras de solo foram secas em estufa, de modo a remover toda a água residual. A seguir, adicionou-se uma certa quantidade de água de modo a fazer com que o solo tivesse nível suficiente de sucção, para alcançar a condição de extremamente fofo. Neste estado, o solo foi passado na peneira ASTM n°05, com abertura de 4mm, controlando-se a altura de queda, de

Resumo do teste

Teste número	Índice de vazios inicial	Espessura para 1g (mm)	Espessura para 20g (mm)	Fluxo na rutura (ml/min)	Resultado
Fofo 1	1.45	52.6	37.3	382.4	Liquefação
Fofo 2	1.62	56.7	37.7	259.4	Liquefação
Fofo 3	1.17	50.3	49.7	416.3	Liquefação
Fofo 4	1.79	58.8	36	222.7	Liquefação
Denso 1	0.7	49.9	49.9	450.2	Erosão do pé
Denso 2	0.79	49.9	49.9	517.9	Erosão do pé

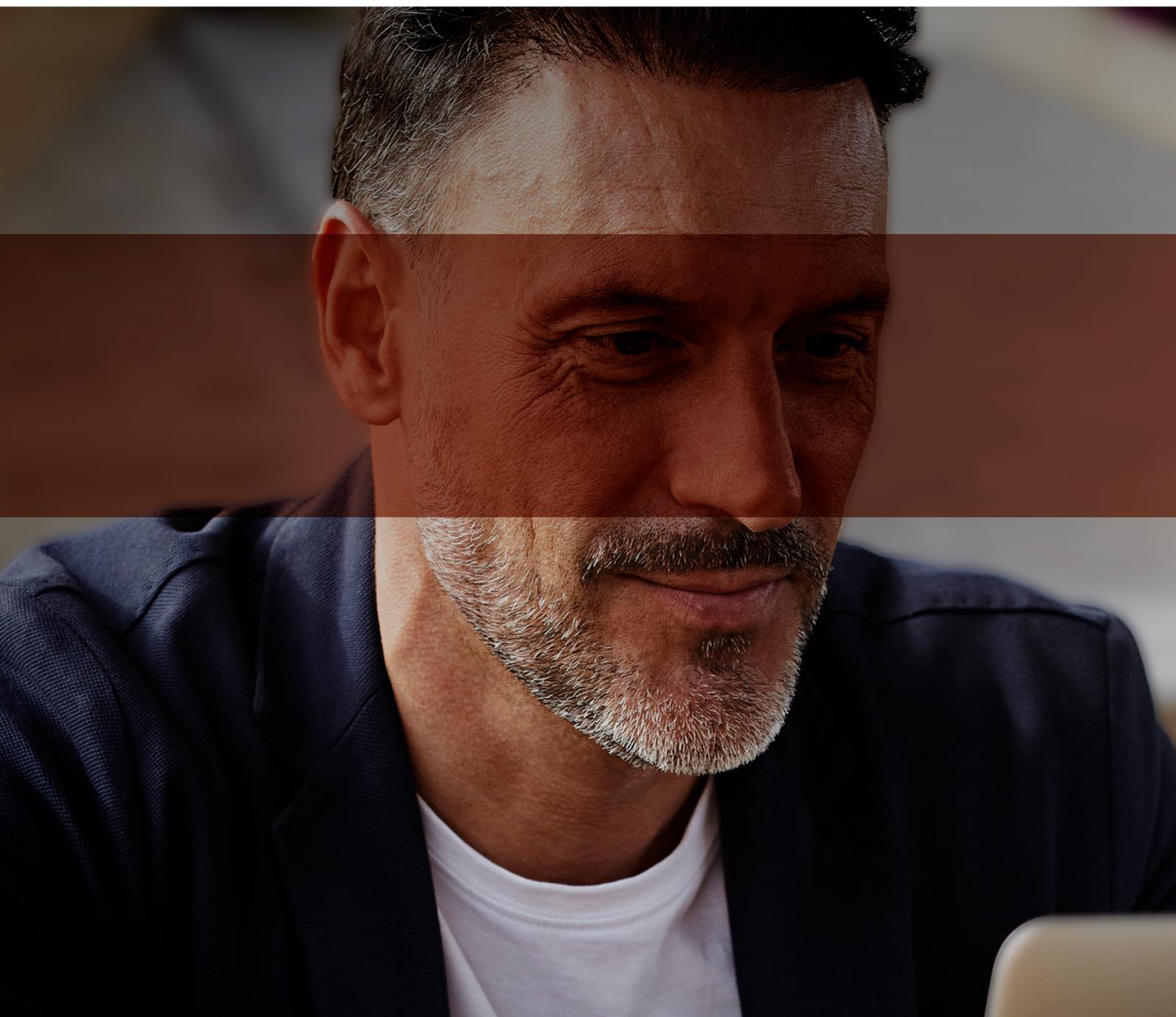
modo a atingir a condição com índice de vazios inicial desejado para cada teste, criando-se quatro modelos de solo fofo, com índice de vazios superior a 1,1, e dois mais densos, com índices de vazios de 0,7 a 0,9 conforme tabela acima. O objetivo de incluir tanto modelo de solo, com contração e com dilatância nos experimentos, foi analisar o efeito logo após o início da rutura/ deslizamento.

Medindo-se a velocidade

Instalou-se uma câmera SONY RX10M2, com alta velocidade, de modo a medir a velocidade instantânea de todos os pontos do solo submetidos a rutura/ deslizamento, utilizando-se a técnica de processamento da correlação de imagem digital (CID), possibilitando capturar a sequência da rutura, através da parede lateral transparente, a 960 quadros por segundo, com resolução de 1920x1080 pixels em níveis g de até 20gr. A câmera posicionada (veja figura 3) para capturar um grande campo de visão (494x300mm), observando-se tanto a porção do talude submetida a rutura inicial, desencadeada no pé do talude e todo o comprimento do solo base, propenso à liquefação, capturando a velocidade da instabilidade na camada crítica, conforme figura 3.

A instrumentação para observar a liquefação

Utilizou-se uma ferramenta digital, precisamente o software DIC, com correlação de imagem digital, com código geo PIV, com velocidade por imagem de partículas, com objetivo de analisar o processo de deformação e deslocamento, sob diferentes cargas ou condições e com excelente integração com os experimentos do laboratório, propiciando precisão e detalhamento, capturando e analisando processos dinâmicos em tempo real, o que permite compreensão aprofundada do comportamento do solo sob várias condições. Com a circunstância da areia ter cor clara e ser uniforme, tingiu-se de preto uma pequena quantidade de areia, introduzindo-se seletivamente no limite transparente do aparato, com objetivo de criar uma textura de imagem com alto contraste, melhorando o resultado com o DIC que, embora meça a rapidez relativa do processo inicial de rutura, no pé do talude, e a deformação no solo base, as medições da velocidade da instabilidade devem basear-se na observação do desenvolvimento dos excessos de poropressão, induzidos pelo processo crítico de cisalhamento no solo. Para tal, instalou-se uma densa rede linear de sensores piezométricos, para análise da poropressão, ao longo de todo o com-



:: NOTÍCIAS EM TEMPO REAL;

:: ANÁLISES EM PROFUNDIDADES;

:: CONSENSO DE OPINIÕES SOBRE SOLUÇÕES;

:: GRÁFICOS E FERRAMENTAS ANALÍTICAS

Os principais dados e informações, antes disponíveis apenas por especialistas, agora estão abertos pra você também tomar as melhores decisões na hora de projetar e fazer negócios. Em um só lugar, um serviço completo com a chancela da instituição especialista em melhoramento de Solos moles, com quase 50 anos de experiência.

CHEGOU SUA
VEZ DE TER

VISÃO

MAIS PROFISSIONAL
DA GEOTECNIA
DO SOLO MOLE.



SSBi SOFT SOIL
BRAZILIAN
INSTITUTE

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



primento do modelo, exatamente em cada um dos quadrados pretos indicados na geometria do modelo, conforme figura, objetivando-se observar primeiro, o momento em que os excessos de poropressão, induzidos pelo cisalhamento, começaram a se desenvolver, segundo sua intensidade. A primeira observação, combinada com o conhecimento da posição do piezômetro, permitiu medição direta da velocidade da instabilidade, à medida em que se desenvolvia através da camada saturada fofo. A última observação informou se o solo, em cada posição, liquefez-se. Com esta abordagem, e com densa rede de sensores piezométricos, além do total controle do modelo, caracterizou-se a condição real, que seria extremamente cara e com elevado prazo. No modelo em escala reduzida, portanto, instalou-se sensores a cada 30mm, ao longo de todo talude e em sua base (23 sensores). Antes do teste e depois da saturação dos sensores, instalou-se um fino metal sobre cada um, atuando como barreira porosa, permitindo fluxo contínuo de água no modelo, ao mesmo tempo em que impedia que, qualquer sujeita entupisse os sensores. De modo a proporcionar certeza e confiança nas leituras, foram instaladas, sete sensores de poropressão GE Druck PDCR-81, ou seja, equipamento extremamente preciso para utilização em testes com centrífugas.

Promovendo a liquefação estática

O comportamento observado, em um teste realizado em talude, com presença de solo arenoso fofo, tendo espessura inicial de 52mm e $e=1,45$, experimentou considerável recalque com aceleração de 20g. A geometria da camada de solo, sob 20g, apresentou espessura bem reduzida de 37,3mm conforme figura 7. As bombas de

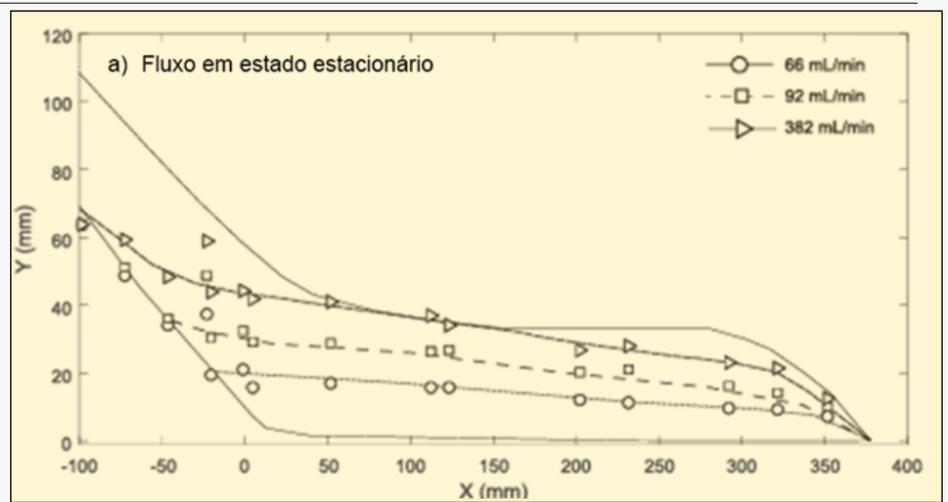


Fig 7 – Esta é a resposta da poropressão no teste fofo 1 (L1) durante o aumento gradual do fluxo de percolação, com estado estacionário, o que gerou lenta zona saturada de solo liquefeito no fundo do vale.

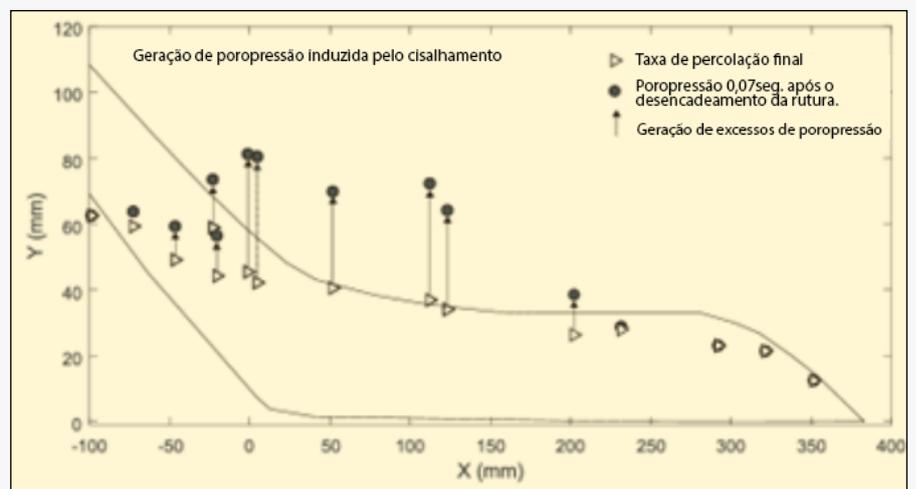


Fig 8 - Resposta da poropressão no teste fofo 1 (L1) com geração contínua e dissipação da poropressão induzida pelo cisalhamento imposto, durante os 0,13seg. subsequentes.

fornecimento do fluxo d'água foram, então, ligadas induzindo-se um lençol freático inicial no modelo. A figura acima evidencia nível constante d'água, medido no contato do solo fofo com o solo competente. Em outras palavras, os dados da poropressão analisados em cada sensor, são organizados com um nível freático na escala do modelo, na localização x de cada sensor. Existem algumas lacunas, na densa rede de sensores menos categorizados. O fluxo de água subterrânea (66ml/min) em estado constante promove um alto gradiente hidráulico ao longo da porção mais inclinada do talude, eliminando a possibilidade do desenvolvimento de grandes espessuras de fluxos d'água. Em

contraste, o gradiente hidráulico, significativamente reduzido ao longo da base horizontal, permite que a água seja retirada do solo antes de escoar para o dreno, na extremidade direita do modelo. Aumentos graduais no fluxo freático, elevam seu nível a partir do solo base, até que a superfície freática intercepte a superfície do solo no pé do talude, imediatamente antes da rutura. Um incremento adicional, no fluxo freático, desencadeia rutura localizada no pé do talude e continuando como zona de poropressão para a liquefação do solo, é apresentada nos instantes de tempo 0,07s e 0,20s após o desencadeamento, conforme apresentado na figura 7 anterior e nas 8 e 9. No instante

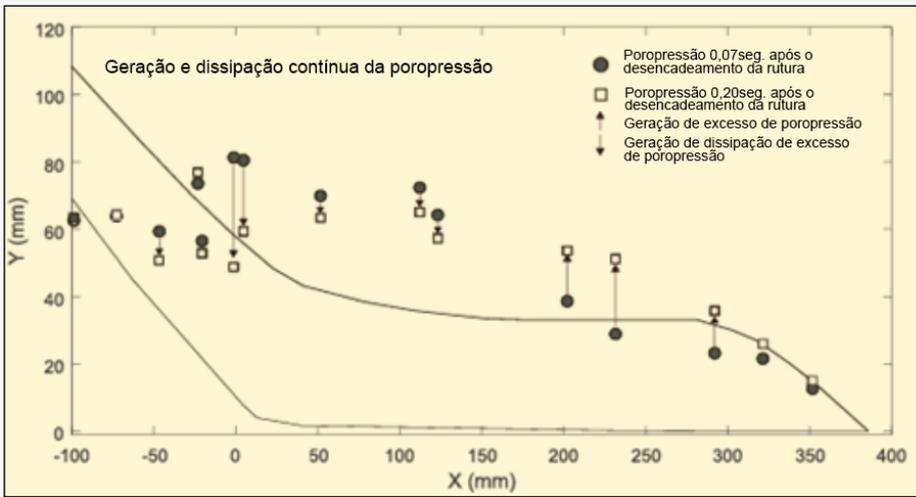


Fig 9 – Na figura acima, resposta da poropressão no teste fofo 1 (L1) durante a poropressão transitória nos primeiros 0,07 seg. da liquefação do solo do vale (superior).

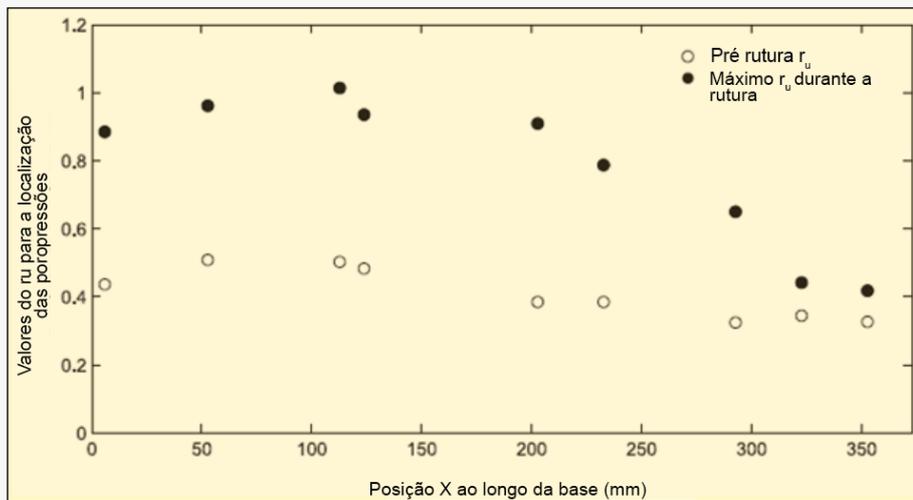


Fig 10 – Avaliação da intensidade dos excessos da poropressão imediatamente antes e após a instabilidade mascarada como razão da poropressão r_u , em relação à medição ao longo da base horizontal do modelo. Valores iguais ou próximos da unidade, durante o processo de instabilidade, confirmaram a liquefação do solo no fundo do vale.

0,07s, após o desencadeamento, a região entre $x=0$ e 150mm, experimenta valores de poropressão significativos, induzidos pelo cisalhamento, enquanto que o solo em sua base, $x>225$ mm, ainda não respondeu. Um incremento de tempo de 0,13s, conforme figura acima, ilustra que esta região mais distante, começa a cisalhar, enquanto que a região anterior cisalhada volta a cisalhar, evidenciando dissipação da poropressão. Desta forma, conforme visto nas figuras anteriores, a onda da propagação espacial, da poropressão induzida pelo cisalhamento, está passando pelo solo da base do talude. Devemos, portanto, primeiro atentar para a intensidade típica da poropressão induzida pelo cisalhamento imposto, para confirmar se a liquefação

estática realmente ocorreu. A taxa de poropressão, r_u , definida como a relação entre a poropressão e a tensão vertical total em um ponto é um indicador útil do estado de liquefação. A medida que r_u se aproxima de 1, a tensão efetiva confinante aproxima-se de zero. Nesta condição, as forças que resistem ao cisalhamento são reduzidas de tal forma, que grandes acelerações podem ocorrer em um talude, devido ao desequilíbrio imposto. Os dados da poropressão, observados no teste L1 são apresentados em termos de valores de r_u , na figura a seguir, com a relação da poropressão e percolação no estado estacionário antes da rutura em aproximadamente 0,5. Durante o evento da rutura, grandes valores de r_u (0,8 a 1) significam que a base liquefez-se, e o pro-

cesso de liquefação estendeu-se ao longo de sua maior parte. Uma descrição visual, do processo de rutura de um solo arenoso fofo típico é apresentado na figura 11, para um teste L1, em incrementos de três centésimos de segundos. Durante os primeiros 0,03s, os vetores incrementais de deslocamento, evidenciam uma rutura rotacional localizada no pé do talude, conforme figura 11. Isto, então, aumenta a velocidade, ilustrado pelo tamanho dos vetores, e a zona de rutura aumenta rapidamente, até que toda a camada horizontal do solo fofo saturado esteja cisalhando, conforme figura a seguir. Com a dissipação da poropressão, a zona do solo onde inicialmente a rutura começou, cessa seu movimento, antes da frente cisalhante parar, distante da camada de solo horizontal, conforme figura 11. Considerando-se que o movimento de deslizamento na camada basal fofo saturada é predominantemente horizontal, o aumento da poropressão, observado ao longo da base desta camada, ocorre com espessura quase constante, não representando o resultado da altura de solo acumulado sobre os sensores mas, sim, indicativo de excessos de poropressão reduzidos pelo cisalhamento. Os deslocamentos típicos, de cada local monitorado, durante a rutura/ deslizamento desenvolvido no talude e em seu solo base, são apresentados na figura 12. O deslocamento da região do talude, cuja localização e apresentada na figura acima, como S1, é a parte da rutura inicial do pé do talude, começando a se movimentar primeiro, deslocando-se em um total de 33mm no modelo em escala. Uma região de base B1, localizada dentro da rutura inicial, experimenta o mesmo comportamento. Interessante observar que uma região de 100mm afastada, B2, fora do alcance de separação de 33mm, pertinente a rutura inicial, no pé do talude, sofre cisalhamento,

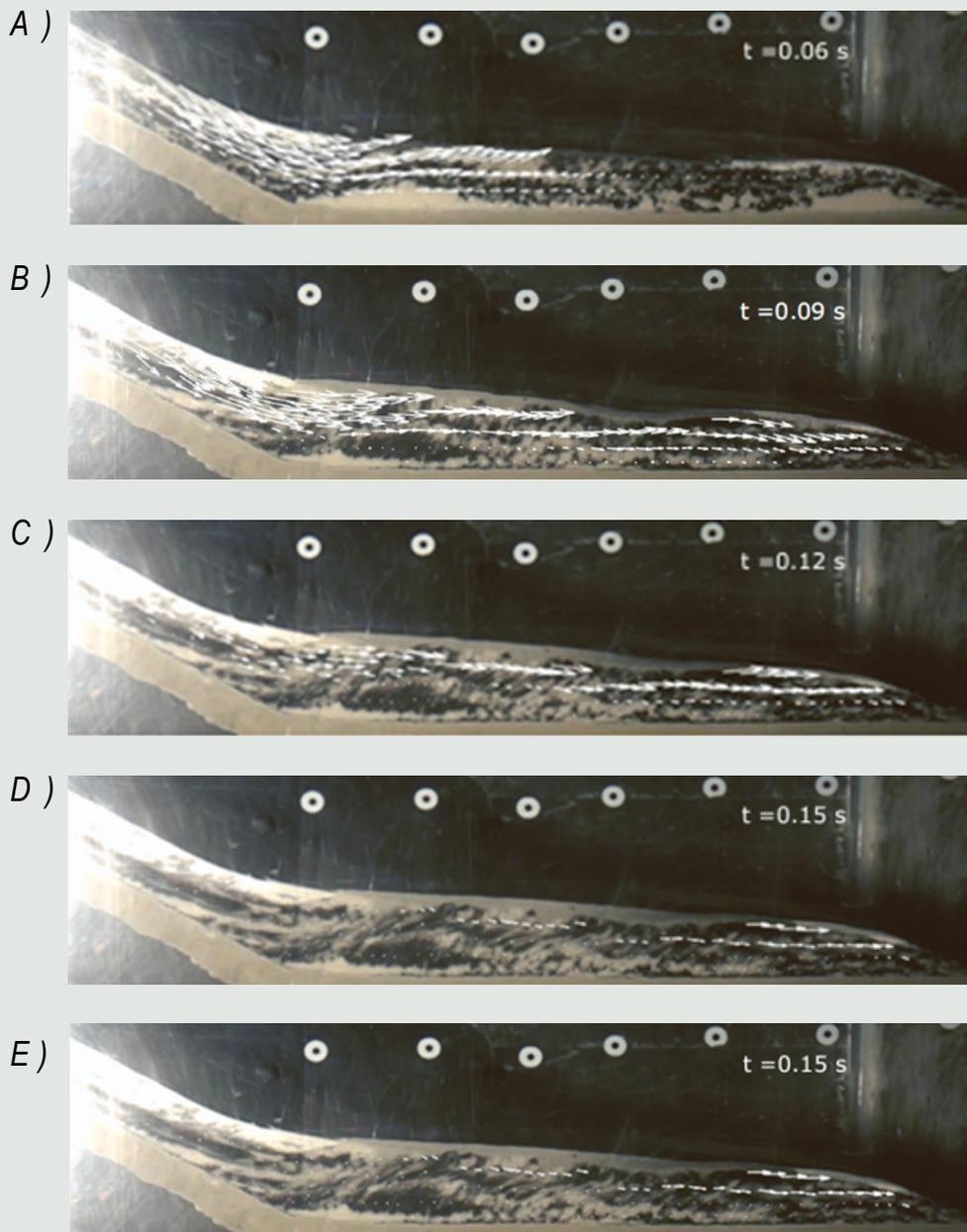


Fig 11 - Descrição visual da rutura, utilizando-se análises DIC de imagens de câmeras de alta velocidade, tiradas a cada 3 centésimos de segundos, durante o desencadeamento da instabilidade seguido da liquefação do solo do fundo do vale. Os vetores representam o deslocamento incremental entre intervalos de tempo.

indicando que a velocidade de propagação da instabilidade ali é maior. Velocidades calculadas, utilizando-se o software DIC, destes três subconjuntos, são evidenciados na figura anterior, confirmando que a velocidade de rutura no pé do talude foi da ordem 0,5m/s. Posicionou-se subconjuntos DIC, na superfície do solo, a cada 30mm, ao longo da base da calha, de modo a ficar coincidente com a localização dos sensores da poropressão, objetivando-se comparar a velocidade da propagação da onda de liquefação no solo base. O tempo de retorno da onda cisalhante foi, então, definido tanto como de chegada do deslocamento do

fluxo do DIC, como o da rápida geração da poropressão induzida pelo cisalhamento. Deve se observar que utilizou-se estratégia onde o tempo de chegada, em cada caso, foi definido como momento em que o valor do deslocamento ou da poropressão excedeu 20% do seu valor máximo eventual. Realizou-se a seleção de 20% (comparando-se com 10 ou 30%, por exemplo), com base na observação de que, passado todo esse tempo, em cada teste, obteve-se velocidades constantes de fluxo e taxas de excessos de poropressão. Este processo de seleção é apresentado na figura 13, em três locais ao longo do comprimento da camada horizontal com valor t_{20} , em um grande círculo aberto. O tempo de chegada, tanto do deslocamento do fluxo como do início da rápida geração da poropressão, induzida pelo cisalhamento pode, então, ser posicionada como a coordenada x do local de sensoriamento da definição da velocidade de propagação da onda de cisalhamento. Os dados de todos os quatro testes aleatórios, com pequenas e variadas espessuras iniciais, assim como dos índices de vazios, conforme a figura 14, indicam velocidade de propagação

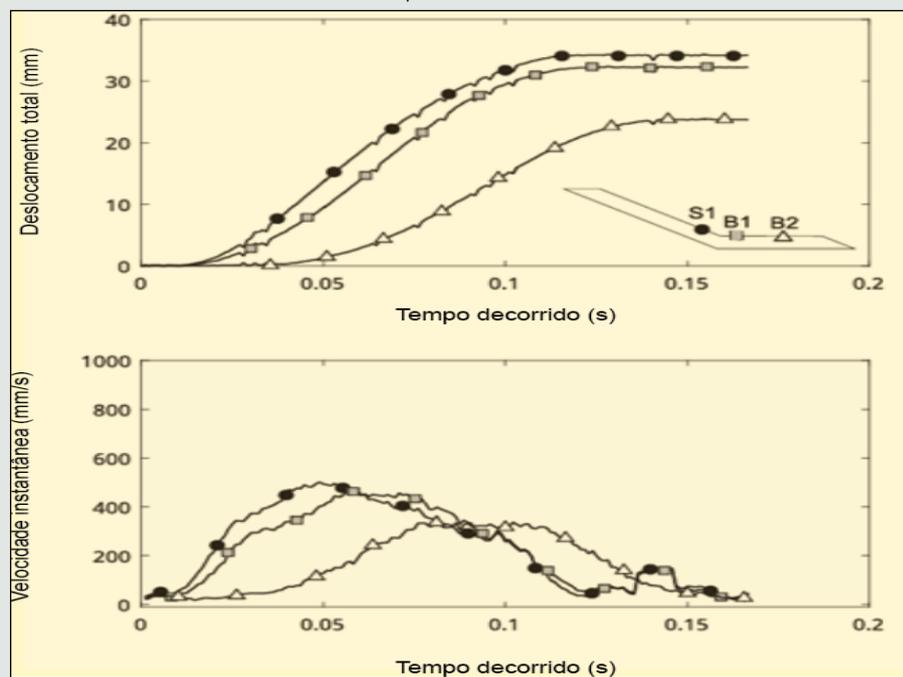


Fig 12 - Mobilidade de 3 subconjuntos DIC, definidos no talude (S1) e no solo do fundo do vale próximos do desencadeamento da rutura inicial no pé do talude (B1) e distante (B2) em forma de deslocamento e velocidade.



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!**

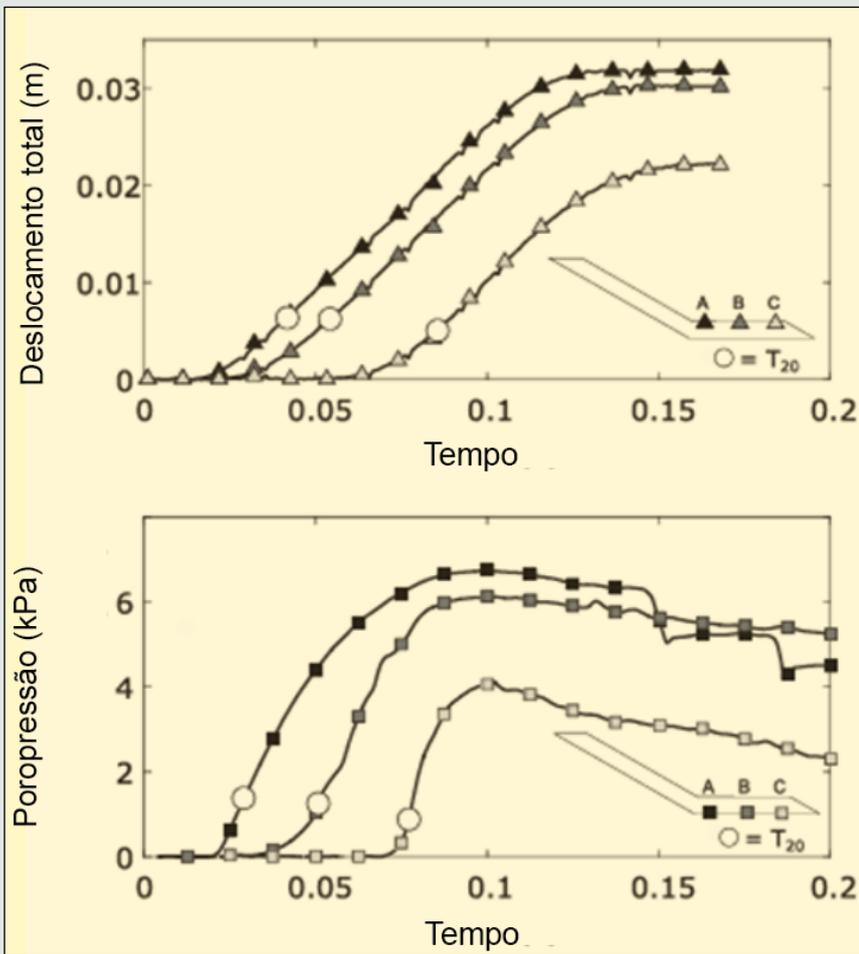


Fig 13 – Tempo de chegada dos deslocamentos e dos excessos de poropressão induzidos pelo cisalhamento, definido no momento em que excedeu-se 20% do seu valor máximo eventual em cada coordenada X, correspondente a localização de um piezômetro ao longo da base do modelo

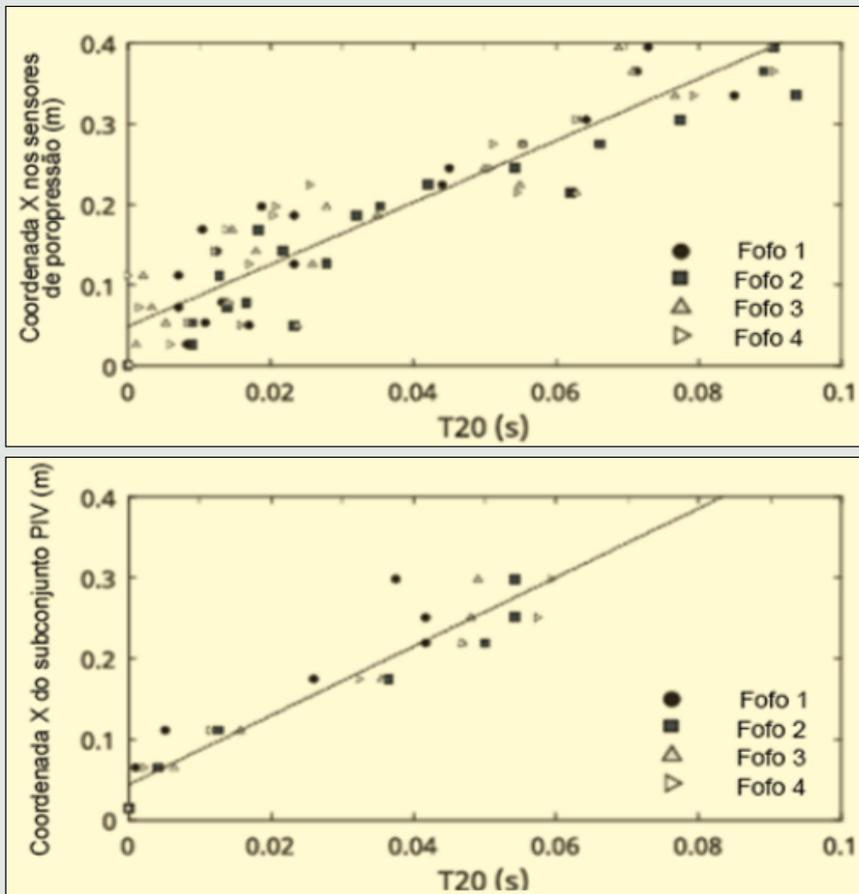


Fig 14 – Velocidade de propagação da frente de liquefação, calculada a partir do tempo de chegada dos deslocamentos e dos excessos de poropressão induzidos pelo cisalhamento em 4 testes com a condição de fofo. Em todos os casos, a velocidade mais adequada de 4,3m/seg (linha de regressão pontilhada) excede a velocidade de 0,5m/seg da rutura inicial do talude, desencadeando instabilidade.

em todos os modelos, de 4,2 a 4,3m/s. Comparando-se estes números, com as velocidades das ruturas iniciais (0,5m/s), e de acordo com a condição dos testes, a frente da instabilidade deslocou-se a uma velocidade de ordem de magnitude maior que o evento inicial desencadeador, confirmando a hipótese de que, para determinadas circunstâncias, a velocidade da instabilidade pode ser mais rápida que qualquer deslizamento/ rutura. Em outras palavras, a velocidade do crescimento e arrastamento do volume da rutura/ deslizamento pode exceder a velocidade máxima de qualquer partícula de seu fluxo.



REFERÊNCIAS

- Joaquim Rodrigues é engenheiro civil M.Sc. em 1977, pós-graduado pela COPPE na Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1999. Diretor do Soft Soil Group e da Engenharia de Solos, associada à ABMS e ao American Society of Civil Engineers. Desenvolveu duas técnicas de tratamento de solos, com patente o GEOENRIJECIMENTO, utilizada em obras de infraestrutura.
- Askarinejad, A., Beck, A., Springman, S.M., 2015. Failure mechanism in geocentrifuge and centrifuge tests: characterization of an unsaturated silty sand. *Int. J. Geotech. J.* 52, 708–720.
- Baki, et al., 2012. Linkage between static and dynamic liquefaction with a range of fines contents. *Can. Geotechn. J.* 59, 103–115.
- Beddoe, R.A., Take, W.A., 2015. Influence of slope and distal reach of hydraulically-induced flow on liquefaction. *Int. J. Geotechnol.* 12(2), 251–264.
- Beddoe, R.A., Take, W.A., 2016. Loss of slope stability: comparison of 1g and centrifuge landslide flow. *Int. J. Geotechnol.* 13(2), 251–264.
- Bryant, S.K., Take, W.A., Bowman, E.T., 2005. Numerical modelling of dry granular flows under gravity. *Int. J. Geotechnol.* 65(3), 188–200.
- Cabrera, M.A., Leonardi, A., Peng, C., 2020. Geotechnical centrifuge acceleration field. *Geotechnique* 70(1), 1–12.
- Choi, C.E., Nikooei, M., 2023. Revealing the hidden dynamics of geophysical mass flows: Depth-averaged analysis. *Geotechnique* 73(10), 1051–1060.
- Choi, C.E., Song, P., 2023. New unsaturated flow model: effects of flow particle size and debunking the existing theory. *Eng. Geol.* 315, 107024.
- Chu, J., Leroueil, S., Leong, W.K., 2003. Unsaturated flow: implication for slope instability. *Can. Geotechn. J.* 50, 103–115.
- Engineering Geology 334 (2024) 107523.
- Chu, J., Wanatowski, D., Loke, W.L., Leong, W.K., 2005. Liquefaction of sand under dilatancy rate controlled conditions. *Int. J. Geotechnol.* 2(4), 414–424.

Crie sua própria **Planilha de Dimensionamento de Geoenrijecimento** para solos moles escaneando o QR Code abaixo!

MEMORIA DE CÁLCULO v. 1.0

Dados de Entrada

1.1 Tipo de geoenrijecimento	1	Tubo
1.2 Espessura da camada de solo mole	H =	10,0 m
1.3 Resistência não drenada	$c_u =$	10,0 kPa
1.4 Coeficiente de adensamento	$e =$	2,5 em 7 anos
1.5 Índice líquido	$I_L =$	1,000 kPa
1.6 Coeficiente de drenagem	$d_r =$	diapla

CPR Geotecnica

2.1 Tipo de material	2	Quadrado
2.2 Espaçamento de geotêxtil	$S_{geot} =$	3,00 m
2.3 Valor de geotêxtil por metro de profundidade	$G_{geot} =$	900 kPa
2.4 Resistência à compressão de geotêxtil	$\sigma_{cs} =$	5,5 MPa
2.5 Coeficiente de estado volumétrico em adensamento	$e_{cs} =$	0,65
2.6 Profundidade de geoenrijecimento	$Z =$	10,0 m
2.7 Espaçamento entre verticais	$S_v =$	3,00 m
2.8 Espalho de substituição	$R_s =$	10,0%

Dados Calculados: solo estabilizado

3.1 Resistência não drenada	$c_{un} =$	43 kPa
3.2 Índice líquido	$I_L =$	3,275 kPa
3.3 Coeficiente de adensamento equivalente	$e_{eq} =$	50,6 mm ² /ano
3.4 Velocidade admissível	$V_{adm} =$	1,20 kg/cm ²
3.5 Valor de redução de recalques	$\delta =$	3,3

Copyright © 2018 Engegraut Ltda - Todos os direitos reservados.
A Engegraut não se responsabiliza pelo uso incorreto desta planilha eletrônica.
Qualquer dúvida, por favor, entre em contato.



Para mais informações acesse: Engegraut.com.br

Ou envie um e-mail para: Atendimento@engegraut.com.br

FIQUE POR DENTRO DE TODAS AS NOVIDADES DO MEIO GEOTÉCNICO SOLICITANDO SEU WEBNAR

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

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

Feedback
Tire todas as dúvidas com profissionais do mercado, gratuitamente.



Solicite seu webinar através do numero: (21) 99359-9105

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



A LIQUEFAÇÃO ESTÁTICA, CÍCLICA E A PÓS LIQUEFAÇÃO. A RESPOSTA DO SOLO ARENOSO.

Eng^a. Patrícia Tinoco.



Patrícia
Karina Tinoco

Fig 1 – Rutura por liquefação estática na zona portuária de Manaus.

Liquefação do solo é um dos fenômenos mais complexos do campo da engenharia geotécnica, devido a perda da resistência e rigidez do solo. Este fenômeno é comum em barragens de rejeitos e nas áreas ribeirinhas da Amazonia, onde ocorrem depósitos de solos saturados, predominantemente arenosos, sob o efeito de carregamentos monotônicos e/

ou cíclicos. Os danos causados pela liquefação estática, demandam alternativas inovadoras para neutralizar seus efeitos, havendo eventos relevantes nestas últimas duas décadas, particularmente visando reduzir/ eliminar o crescimento da poropressão, aumentar o confinamento do solo e o nível de rigidez de depósitos de solo arenosos. A técnica mais utilizada, com 100% de sucesso, particularmente na Amazônia, é a do geoenrijecimento, seja com

CPR Grouting, seja com Compaction Grouting. O fenômeno da liquefação do solo ocorre em condições de solos saturados, submetidos a carregamento não drenado, incluindo condições monotônicas, como por exemplo, infiltrações, aumento do nível d'água ou sobrecarga rápida e, no modo cíclico, como vibrações de grandes guindastes, ações do trânsito em ferrovias e etc. Uma vez que o solo se liquefaz, desenvolve características e

comportamento semelhantes a de um fluido não newtoniano. Fisicamente, a liquefação causa perda do contato entre partículas do solo. Qualquer solo capaz de gerar aumento da poropressão, é susceptível de desencadear liquefação. Classifica-se a susceptibilidade à liquefação através de quatro grandes critérios, de acordo com a figura abaixo,

uniforme ou mal graduado, são os mais propensos à liquefação, típicos de regiões aluviais e coluviais, onde há uma adequação ótima, como o tamanho dos grãos, o formato das partículas e sua curva granulométrica. Estes três fatores também podem restringir bastante a predisposição à liquefação, já que podem re-

areias finas e mal graduadas são mais aptos, enquanto que solos predominantemente siltosos e areias grossas são mais vulneráveis, fatores estes pertinentes aos relatórios identificadores das causas do rompimento das

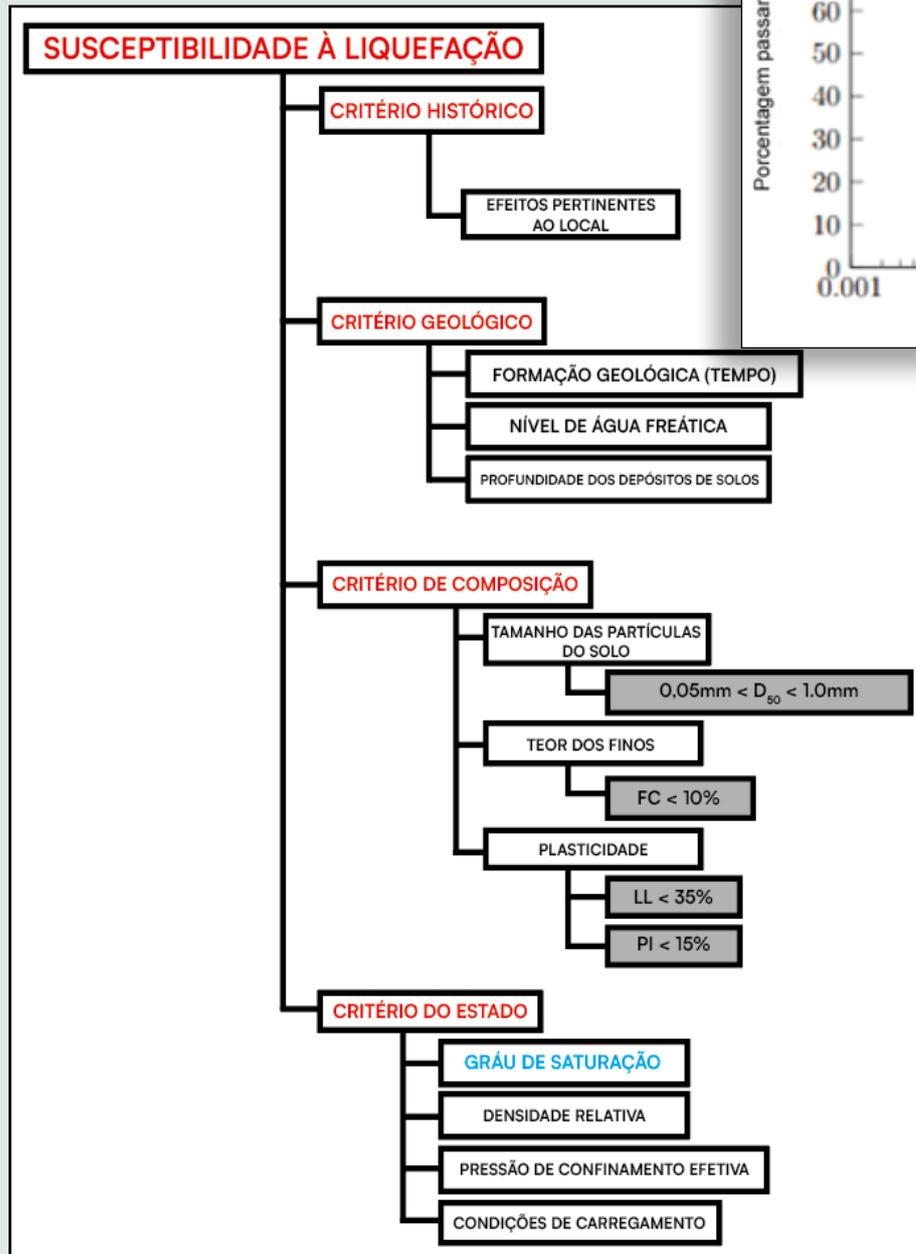


Fig 2 – Critérios para a susceptibilidade à liquefação

Observando-se que o ambiente geológico desempenha papel relevante para a susceptibilidade. Camadas de solo predominantemente arenoso fofo, com distribuição granulométrica

duzir alterações de volume do solo e controlar o desenvolvimento dos excessos de poropressão, necessários para seu desencadeamento. Mais recentemente, confirmou-se que

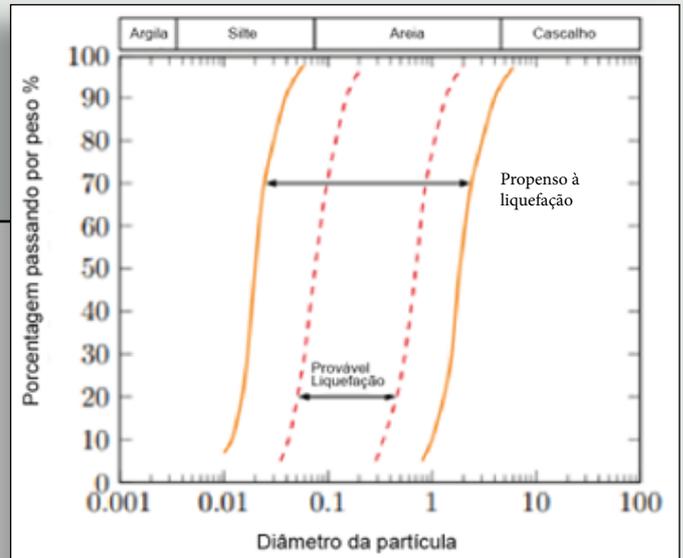


Fig 3 – Limites de tamanhos de grãos para a susceptibilidade à liquefação.

barragens de rejeitos em Minas Gerais, conforme exposto por Cambridge e Shaw, em 2019. Estes fatores, mostram excelente concordância com o critério de composição, em termos de vulnerabilidade à liquefação, para condições de carregamento estático e cíclico. Contudo, o índice de plasticidade, IP, é melhor indicador da susceptibilidade à liquefação do que a presença de finos. Em números, poder-se-á dizer que solos siltosos arenosos e/ ou argilosos, com $IP < 12\%$ são bem susceptíveis à liquefação, enquanto que com $12\% < IP < 18\%$ haverá, também, disposição para tal. Destaca-se, deste contexto que, naturalmente, solos arenosos grossos, ou mesmo cascalhos, são muito pouco propensos para desencadear liquefação, devido a sua alta permeabilidade, o que permite fácil drenagem, eliminando totalmente o desenvolvimento dos excessos de poropressão. Dentro deste cenário, poder-se-á afirmar que a presença de

PRESSIÔMETRO

Um ensaio geotécnico completo realizado no campo

Fácil de operar e 100 % viável



ROCTEST

Representante exclusivo no Brasil

+55 21 2718 3968


TECNOLOGIA

vendas@3geotecnologia.com

www.3geotecnologia.com

estados de tensão e a condição densa de um solo arenoso, indicarão seu comportamento de dilatância e de contração, definindo-se o parâmetro de estado, Ψ , para estabelecer este comportamento, à engenharia da mecânica do solo para estados críticos, incorporando-se o índice de vazios do solo e o índice de vazios no estado crítico, considerando-se tensões médias, e medindo-se a distância vertical entre o estado inicial do solo e seu estado crítico final. O comportamento do solo arenoso, representado pelo Ψ , poderá fornecer informações relevantes sobre sua susceptibilidade à liquefação, uma vez que haverá informações importantes sobre o desenvolvimento de excessos de poropressão. Mais recentemente, também, demonstrou-se que a redução do grau de saturação tem influencia relevante para a liquefação, devido a presença de ar nos vazios do solo, podendo-se deduzir o seguinte:

- 1- O processo de sucção aumenta a tensão efetiva inicial do solo;
- 2- Haverá menor capacidade de geração de excessos de poropressão durante carregamentos.

A presença da água do solo

O solo é estruturado por conjuntos de grãos que formam seu esqueleto, e material fluido, na forma líquida ou gasosa, preenchendo os poros do esqueleto. Em depósitos naturais, o solo pode apresentar-se seco, não saturado, parcialmente ou totalmente saturado, de acordo com o volume de água presente em seus poros. Solos totalmente saturados estão localizados abaixo do nível

freático, com seus vazios preenchidos com água. Assim, o grau de saturação em solos parcialmente saturados é relativamente baixo, embora os vazios estejam preenchidos com água, as bolhas de ar, presas no fluido não tem contato direto entre a parte sólida e o gás. A figura abaixo, mostra os estados de saturação em camadas de solos, evidenciando como a resistência à liquefação aumenta da condição saturada

Como realmente neutralizar a liquefação de forma eficiente e sem riscos

As técnicas para neutralizar processos de liquefação em solos arenosos, objetivam melhorar sua estrutura, modificando seu estado. Há dois problemas principais:

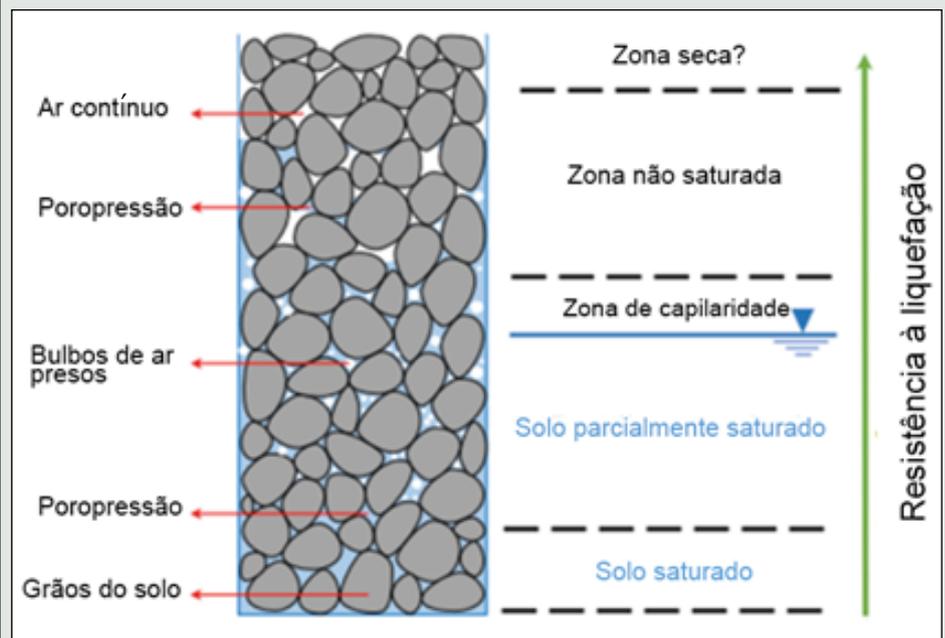


Fig 4 – O estado de saturação do solo

para a seca. Solos secos e completamente saturados compreendem apenas duas fases, incluindo esqueleto, o gás e o líquido, que estão em fase contínua, interagindo diretamente com os grãos do solo. A figura abaixo, mostra a distribuição das fases em solos parcialmente e não saturados.

- 1- Como proceder o melhoramento do solo, sem lidar com o alto risco natural, particularmente quando há estruturas vulneráveis?
- 2- Como proceder o melhoramento do solo, em grandes áreas, com custo acessível? A tabela abaixo, apresenta lis-

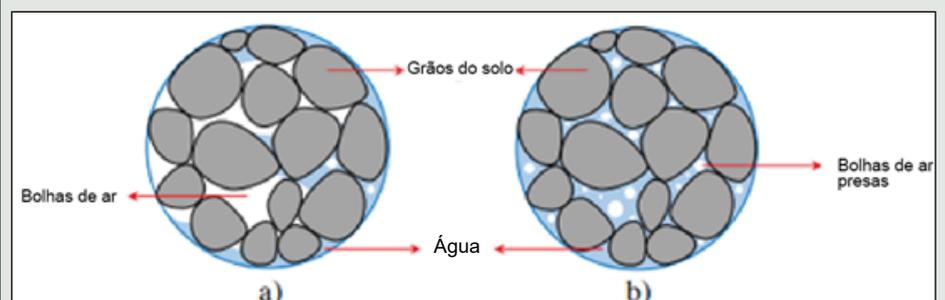


Fig 5 – A presença dos bolsões de ar em diferentes estados do solo.

- a) não saturado
- b) parcialmente saturado

ta de fatores relevantes para se decidir sobre a neutralização do processo de liquefação.

FATORES	NIVEL DE IPORTANCIA	PESO	DETALHES
CONDIÇÕES DO SOLO	MUITO IMPORTANTE	18,20%	EXISTE CAMPO DE LIVRE E HÁ ESTRUTURAS NO LOCAL
TIPO DO SOLO	MUITO IMPORTANTE	18,20%	O TIPO DE SOLO EXIGE MELHORAMENTO COM GEOENRIJECIMENTO
ESTRATIGRAFIA	MUITO IMPORTANTE	9,10%	TORNA ESPECIFICO O MELHORAMENTO DO SOLO
PROFUNDIDADE DO TRATAMENTO	MUITO IMPORTANTE	18,20%	TORNA ESPECIFICO O MELHORAMENTO DO SOLO COM GEOENRIJECIMENTO
TAMANHO DA ÁREA	MENOS IMPORTANTE	4,50%	CONTROLA O CUSTO ECONÔMICO DO MELHORAMENTO DO SOLO
FUNDAÇÃO	MENOS IMPORTANTE	4,50%	O MELHORAMENTO DO SOLO DEVERÁ SER FEITO POR EMPRESA MUITO ESPECIALIZADA, EXIGINDO TÉCNICAS ESPECÍFICAS
RESTRICÇÕES DE PROJETO	IMPORTANCIA MÉDIA	9,10%	EXIGE MELHORAMENTO DO SOLO COM DETALHAMENTO ESPECÍFICO PERTINENTE À RESTRICÇÕES NO LOCAL, COMO PÉ DIREITO, ACESSO AOS LOCAIS, ESTRUTURAS ADJACENTES. HÁ NECESSIDADE DE NÍVEL DE MONITORAMENTO INTENSO DEVIDO A POSSIBILIDADE DE DANOS.
DIFICULDADES NO SOLO DE FUNDAÇÃO	IMPORTANCIA MÉDIA	9,10%	A PRESENÇA DE CAMADAS DE LIXO IMPACTAM O DESENVOLVIMENTO DO SERVIÇO, EXIGINDO SUA REMOÇÃO PRÉVIA.
COMPATIBILIDADE AMBIENTAL	IMPORTANCIA MÉDIA	9,10%	PODE EXIGIR COMPLEMENTAÇÃO DO SERVIÇO COM OBRA DE CONTENÇÃO, COLCHÃO ANTI-EROSÃO E DRENAGEM

Fig 6 – Fatores influenciadores para a decisão de neutralizar o processo de liquefação.

Para se discutir, de forma adequada e específica sobre a neutralização de processos de liquefação no solo, em determinado local, torna-se essencial identificar seu mecanismo de disparo, a capacidade do solo de se liquefazer (seja com sondagens no local ou em laboratório) e os procedimentos para se avaliar a resistência à liquefação do solo de fundação. A tabela, a seguir apresenta uma visão dos recentes avanços em relação à neutralização da liquefação. Baseado neste estado da arte, poder-se-á classificar a estratégia de trabalho de neutralização dos efeitos da liquefação estática da seguinte maneira:

- Melhorando o solo com geoenrijecimento, utilizando CPR Grouting, ou seja, há necessidade de instalação prévia de geodrenos.

- Melhorando o solo com geoenrijecimento, utilizando Compaction Grouting, ou seja, não há necessidade de geodrenos, muito embora qualquer for-

ma de drenagem, permita a rápida dissipação de excessos de poropressão, particularmente em camadas rasas de solo fofo, com profundidade inferior a 10mts. A tabela abaixo, apresenta uma associação entre estes processos de liquefação do solo, fornecendo compreensão sobre os fundamentos para sua neutralização.

PROCESSOS PARA LIQUEFAÇÃO	PRINCIPIOS PARA SUA NEUTRALIZAÇÃO
PARTÍCULAS DO SOLO COM ARRANJO FOFO	COMPACTAÇÃO/ DENSIFICAÇÃO
DESARANJO DAS PARTÍCULAS EM GRANDES VAZIOS	COMPACTAÇÃO/ DENSIFICAÇÃO
MOVIMENTO CICLICO DAS PARTICULAS	CONFINAMENTO/ COMPACTAÇÃO
MUITO TEMPO NECESSÁRIO PARA DRENAGEM	INTALAÇÃO DE GEODRENOS POSSIVELMENTE EM MALHA MENOR QUE O USUAL
INCOMPRESSIBILIDADE DA POROPRESSÃO	GEODRENOS/ CONSOLIDAÇÃO

Obs: As duas técnicas de geoenrijecimento promovem efetivamente a densificação, a compactação e a consolidação de solos propensos a liquefação.

Fig 7 – Princípios da neutralização da liquefação

Em resumo, os processos de melhoramento de solos, seja consolidando-os ou compactando-os, são os mais efetivos para modificar seu estado, principalmente devido a quase ausência de riscos inerentes a sua execução. Os dois métodos promovem, seja em solos predominantemente arenosos ou siltosos/

argilosos arenosos, o aumento da resistência cisalhante, ao mesmo tempo em que cresce dramaticamente sua rigidez, na medida em que efetivam forte confinamento no solo, paralelamente a sua drenagem (neutralização da poropressão), acompanhado de sua consolidação/ compactação, praticamente sem vibrações. O melhoramento

do solo, com geoenrijecimento, tem sido amplamente utilizado para neutralizar os efeitos da liquefação estática, em uma enorme variedade de situações, envolvendo portos, aeroportos, industrias, áreas logísticas e taludes fluviais em toda a Amazonia, desde 2010.

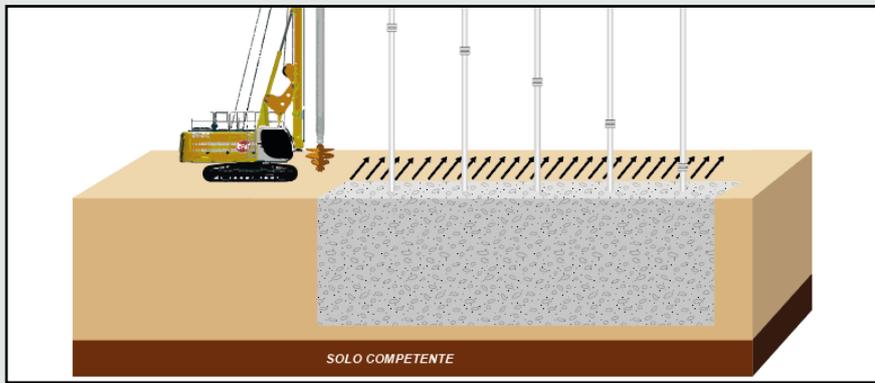


Fig 8 – Esquema do geoenrijecimento com Compaction Grouting.

A complexidade dos mecanismos envolvidos no melhoramento do solo, objetivando-se neutralizar a liquefação estática em solos, pode representar um desafio para geotécnicos que, na maioria das vezes, preferem técnicas conservadoras absolutamente inoperantes para o fenômeno. Os métodos de análise de projetos podem variar de estáticos equivalentes simplificados a dinâmicos e complexos a três dimensões, dependendo das particularidades de cada solicitação. A profunda geometria da infraestrutura a ser criada, com a realização do efetivo melhoramento do solo, com geoenrijecimento, e sua configuração combinada com respostas altamente não lineares de solos candidatos a liquefeitos, além dos processos de confinamento, compressão e consolidação impostos, normalmente é muito difícil de aproximar com qualquer método de análise, seja simplificado ou intrincado. O projeto final é, normalmente, afetado por incertezas associadas ao desempenho previsto, de modo que a pesquisa sobre os mecanismos fundamentais e os procedimentos de projeto, continuam a ser necessários, como parte do avanço para a utilização eficaz do melhoramento efetivo do solo, com geoenrijecimento. Uma ampla gama de configurações, objetivando-se o melhoramento do solo, com geoenrijecimento, tem sido utilizada para diferentes sistemas de infraestruturas, conforme ilustrado nas figuras a seguir, onde poder-se-á utilizar geodrenos, seguido da formação de verticais

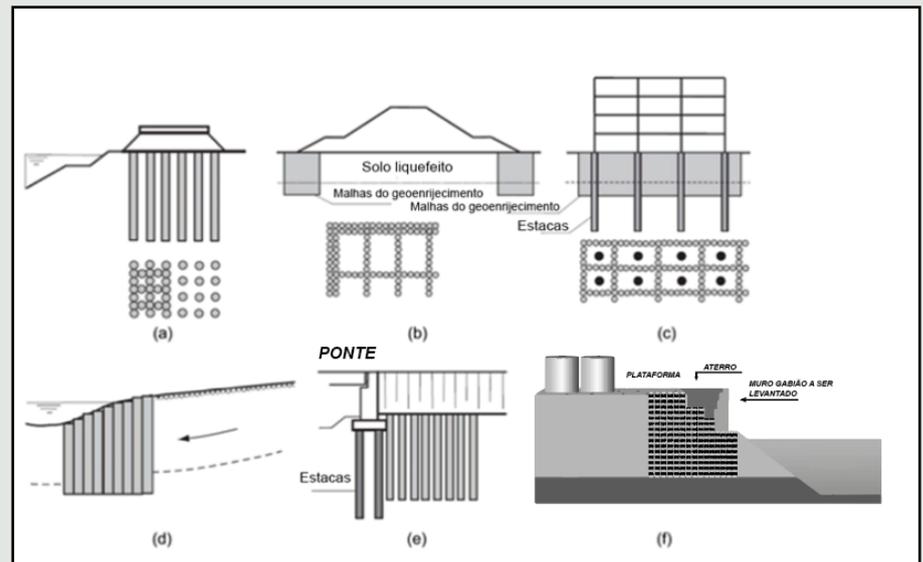


Fig 9 – Exemplos da aplicação do geoenrijecimento. A) Aterro de estradas à beira do rio ou mar B) Diques ou barragens. C) Melhorando a fundação com estacas. D) Contenções de expansão lateral. E) Encontros de pontes. F) Taludes fluviais e marítimos

onde são expandidos bulbos de argamassa seca, metro a metro, do impenetrável à superfície, utilizando-se malhas com espaçamento variável (figura 9a), paredes e painéis que podem ser realizados em grades ou treliças (figura 9b e c), blocos sólidos ou em arranjo composto. O geoenrijecimento pode ser utilizado para apoiar estruturas em áreas niveladas (figura 9c), em taludes instáveis ou em aterros com problema de deformação lateral (figuras 9a, b,d), ou mesmo em estruturas suporte, protegendo contra deformação laterais no solo (figuras 9 e, f). Nos casos onde movimentos laterais permanentes do solo sejam grandes e improváveis (figura 9c), o projeto do geoenrijecimento precisa considerar oscilações transitórias do solo liquefeito. Casos onde deformações

laterais permanentes de solo sejam provavelmente maiores do que o aceitável, como casos também envolvendo taludes significativos ou com três faces, devem ser analisados. Em todas estas configurações e desenvolvimentos, observa-se a diferença conceitual e executiva em relação às técnicas de formação de colunas com DSM, jet-grouting e coluna de brita, onde o solo original continua

ao redor das colunas, perpetuando o problema, particularmente o desenvolvimento e migração da poropressão, na medida em que a condição original do solo ainda se mantém.

A questão dos solos predominantemente siltosos com presença de argilas.

Recentemente, realizou-se grande pesquisa com testes triaxiais cíclicos, objetivando-se avaliar os efeitos do conteúdo de finos e a plasticidade no desenvolvimento de excessos de poropressão, tanto em número de ciclos de carregamento necessários para se obter a liquefação inicial, como em termos da quantidade de deformação necessária para se obter certo nível de excessos de poropressão. Diversas condições foram obtidas neste estudo:

1- A taxa de carregamento é definida como o número de ciclos imposto, relacionando-o a obtenção do processo inicial de liquefação.

2- Se for analisada a geração da poropressão, nos diversos solos arenosos, com silte, em termos de taxa de carregamento imposto, descobriu-se que se encaixa em uma pequena faixa, cuja forma e posição dependem se são vulneráveis à liquefação por fluxo ou à mobilidade cíclica, sendo independente do teor de silte presente.

3- Para qualquer taxa de carregamento, o desenvolvimento do excesso de poropressão é maior para solo susceptível à mobilidade cíclica do que para o vulnerável à liquefação por fluxo.

4- A taxa do excessos residual de poropressão é medida durante o ponto zero da tensão desviadora.

5- A avaliação da deformação necessária, para atingir algum nível de excesso de poropressão, é gerada pelo teor limite de silte, relacionado à densidade relativa específica do solo e ao nível de poropressão.

6- A deformação necessária para solos arenosos, com finos não plásticos, abaixo do teor limite de silte, está relacionado à densidade relativa específica do solo e ao nível de poropressão.

7- A geração de excessos de poropressão, em solos arenosos com finos plásticos, é independente do teor de finos, quando analisado em termos da deformação necessária para atingir um nível residual especificado. A deformação necessária cresce com os aumentos do limite de liquidez, do índice de plasticidade e da atividade.



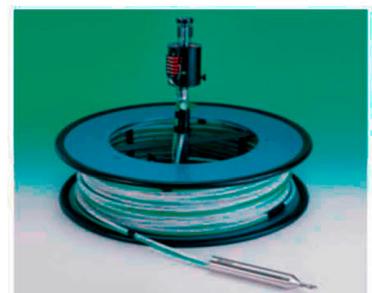
Fig 10 - A rápida e intensa variação da altura dos rios da Amazônia, provoca ruturas periódicas de seus taludes ribeirinhos, particularmente os portuários.

REFERÊNCIAS

- Patricia Karina Tinoco é engenheira geotécnica. Trabalha com melhoramento de solos moles.
- Solid II. Higher Frequency Range. Journal of the Acoustical Society of America, 28:179–191, 1956b. doi: 10.1121/1.1908241.
- Bishop, A. W. and Blight, G. E. Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partly Saturated Soils. Géotechnique, 13(3):177–197, 1963. doi: 10.1680/GEOT.1963.13.3.177.
- Bray, J.D. and Sancio, R.B. Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Fine-Grained Soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132(9):1165–1177, 2006. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:9(1165).
- Brennan, A. J., Thusyanthan, N. I., and Madabhushi, S. P. Evaluation of Shear Modulus and Damping in Dynamic Centrifuge Tests. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 31(12):1488–1497, 2005. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:12(1488).
- Cabrera, M.A., Caicedo, B., and Thorel, L. Dynamic actuator for centrifuge modeling of soil-structure interaction. Geotechnical Testing Journal, 35(4):539–547, 2012. doi: 10.1520/GTJ104353.
- Caicedo, B. and Thorel, L. Centrifuge modelling of unsaturated soils. Journal of Geo-Engineering Sciences, 2(1-2):83–103, 2014. doi: 10.3233/JGS-130013.
- Caicedo, Bernardo. Geotechnics of Roads: Fundamentals. CRC Press/Balkema, 2019. ISBN 9780429025914.

Perfilômetro de Recalques

O **Perfilômetro de Recalques** permite medir recalque e estabelecer um perfil contínuo ao longo de um tubo instalado horizontalmente. Para tanto é instalado um tubo PEAD (Polietileno de Alta Densidade) no aterro por meio de escavação rasa no sentido transversal. O princípio de funcionamento do sensor baseia-se na pressão de um líquido contido num reservatório sobre uma membrana, a qual está solidária a um fio de aço tensionado. A variação da tensão no fio é proporcional à variação da frequência de vibração do fio. A calibração efetuada em laboratório fornece a relação entre a altura de coluna d'água e a frequência de vibração. As leituras estão isentas de variações barométricas, uma vez que o sensor é ventilado.



Para maiores informações, acesse: www.rogertec.com.br
ou atendimento@rogertec.com.br

Soft Soil
Group

COMO PODEMOS DETERMINAR O POTENCIAL OU AS CHANCES DE LIQUEFAÇÃO EM UM SOLO?

A obtenção de amostras indeformadas em solos arenosos é extremamente difícil, devido a pouca ou nenhuma coesão, com isso, a utilização de ensaios de campo, particularmente o CPTu, passa a ser uma boa alternativa. A primeira proposição de um sistema de classificação de solos com base em ensaios CPTu, conforme observado na Figura abaixo, a partir de dados da resistência de ponta normalizada, relação de atrito lateral normalizado e a razão da poropressão:

- 1) Solos sensíveis finos,
- 2) solos orgânicos,
- 3) argilas/argilas silto-sas,
- 4) mistura de solos silto-sos,
- 5) mistura de solos arenosos,
- 6) areias.

Há uma metodologia de avaliação do potencial de liquefação, por meio de correlações da resistência de ponta normalizada, oriundas de ensaios CPTu, realizados nos casos de rupturas históricas. Observa-se que existem diversas propostas de envoltórias, que delimitam o comportamento dilatante e contrativo do solo (Figura 2), recomendando-se a determinada pela teoria dos estados críticos e ensaios de laboratório que, para sua elaboração, utilizou-se 33 casos históricos de ruptura por liquefação, que continham informações suficientes das condições pré-ruptura. As tensões verticais são médias, de-

terminadas antes da ruptura, enquanto as que são encontradas na envoltória recomendada, obedecem a uma Equação (especifica abaixo). Já a ponta q_{c1} , resistência de ponta corrigida pelo fator C_q , é um fator de correção para o nível de tensões do ensaio.

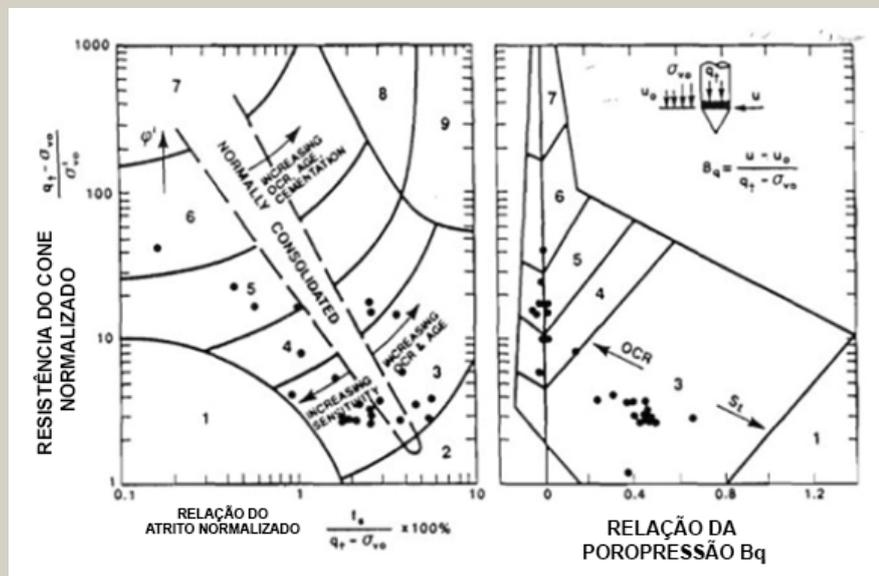


Fig 1 - Classificação de solos baseadas em ensaios CPT

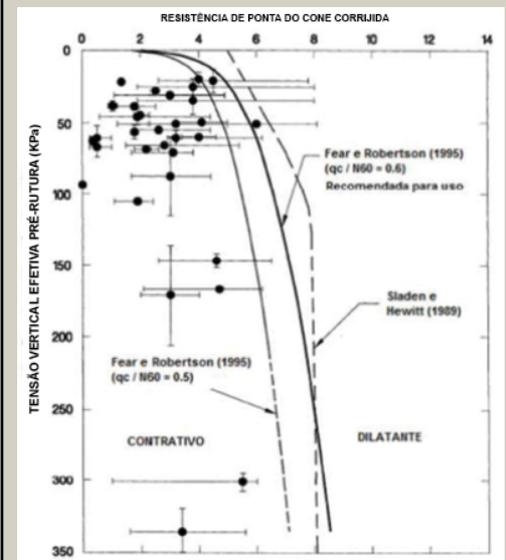


Fig 2 - Potencial de liquefação estática

$$\sigma'_{v,env} = 1,1047 \times 10^{-2} [(q_{c1})]^{4,7863}$$

$$q_{c1} = C_q \times q_c = \frac{1,8}{0,8 + \frac{\sigma'_{v0}}{p_a}} \times q_c$$

Os solos foram divididos em categorias, variando de extremamente sensível (resistência não drenada amolgada menor que 0,5 kPa) até não sensível (resistência não drenada amolgada maior que 2 kPa). Como mostrado na Figura 3, os pontos se

espalharam por diferentes regiões do gráfico, onde que os eixos representam: N_m – Resistência de ponta normalizada, R_f – Resistência de atrito normalizada e B_q – razão de poropressão, as mesmas apresentadas na Figura 1. As críticas existentes baseiam-se no fato de que os solos finos sensíveis estariam localizados na área 1 do gráfico, e o que foi observado, é que argilas sensíveis encontram-se nas áreas 1, 3 e até mesmo 4, sendo essas argilas/argilas siltosas e misturas de solos siltosos, respectivamente. A inadequação do sistema de classificação para argilas sensíveis foi atribuída as incertezas nos parâmetros normalizados, onde os valores da resistência de ponta são tão baixos que a precisão passa a ser questionada; a medida mais confiável passa a ser a poropressão. Com o passar dos anos, apresentou-se algumas modificações no sistema de classificação do solo sendo, várias delas, concentrando-se em mudanças nos parâmetros adimensionais, propondo-se o parâmetro I_c , (ver equação abaixo), raio dos círculos concêntricos, que determinam os limites de cada tipo de solo. Aplicaram-se modificações no sistema de classificação, para que fosse possível avaliar a liquefação no solo. Para tal, propôs-se modificação do parâmetro adimensional de resistência de ponta do cone, que passa a considerar, em sua parcela, a pressão atmosférica e um expoente n .

$$I_c = [(3,47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1,22)^2]^{0,5}$$

$$Q_{tn} = [(Q_t - \sigma_{v0})/p_a](p_a/\sigma'_{v0})^n$$

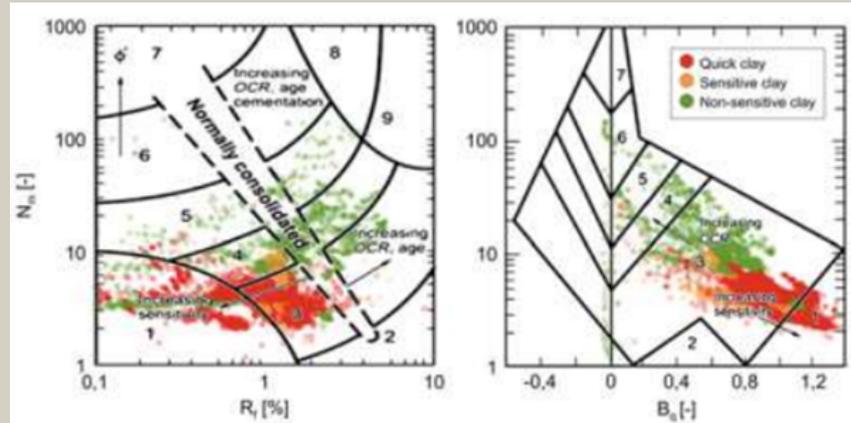


Fig 3 - Classificação para solos argilosos.

Notar que quando o expoente n se iguala a 1, Q_{tn} volta a ser o valor de Q_t inicial, sugerindo-se que o expoente n pode ser estimado pelo valor de I_c , da equação abaixo. Valores de n próximo a 0,5, são valores típicos da zona 6, do gráfico, areias limpas, enquanto que valores de n próximo de 1, estão mais próximos da zona 3, argilas. O gráfico de classificação do solo passa a ser o ilustrado na Figura abaixo.

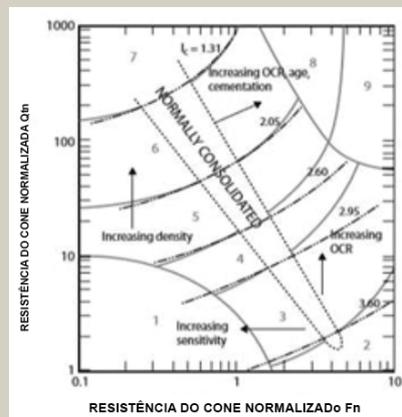


Fig 4 - Classificação modificada baseada em CPTu

Em 2010, modificou-se a sua proposta de classificação, de forma a determinar áreas onde os solos classificados seriam passíveis, ou não, à ocorrência da liquefação. Nesta modificação, o ábaco que correlaciona os parâmetros normalizados, relativos à resistência de ponta e atrito lateral, é subdividido em quatro áreas distintas, A1, A2, B e C, como ilustra a Figura 5. As zonas A1 e A2 delimitam solos não coesivos, ou seja, arenosos. Na zona A1, o solo é suscetível à liquefação por carregamento dinâmico, a depender do nível e duração do carregamento. Já na zona A2, os solos têm potencial de ruptura por liquefação tanto por carregamento dinâmico quanto por liquefação estática. As zonas B e C representam solos coesivos. Nestas zonas, os solos podem sofrer liquefação, em presença de carga dinâmica,

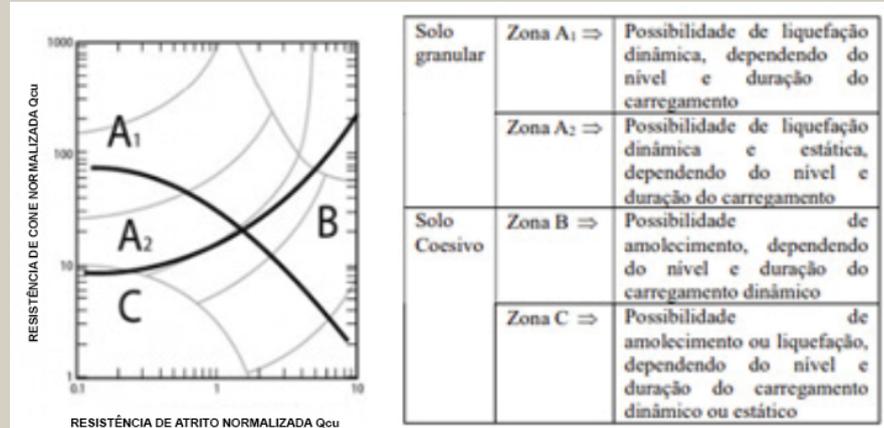


Fig 5 - Caracterização de solos baseada em ensaios CPTu

dependendo também da duração e magnitude do carregamento. Contudo, os solos na zona C são solos argilosos moles, tendendo a sofrer amolecimento por conta de sua sensibilidade. Ainda no mesmo espaço, propôs-se outras modificações para determinar o potencial de liquefação do solo. A primeira foi combinar o ábaco com o Parâmetro de Estado (ψ), onde o valor nulo do parâmetro representa a fronteira entre o comportamento contrativo e dilatante do solo, assim como sinaliza a possibilidade ou não de ocorrência da liquefação. Existem outros critérios, como por exemplo, o critério que representa a fronteira entre dilatante e contrátil de solos arenosos limpos, cujo valor de Fr é tipicamente menor que 1%, abrangendo uma pequena área do gráfico. Para simular o comportamento das areias siltsosas, é necessário a utilização de um fator que o correlaciona com solos arenosos limpos, a resistência normalizada $Q_{tn,cs}$ (Equação (a seguir)). O $Q_{tn,cs}$ é baseado no valor Q_{tn} , mas multiplicado por um fator corretivo K_c , dependente da porcentagem de finos, sua mineralogia e plasticidade. Um valor de $Q_{tn,cs}$ entre 50 e 70, provavelmente representa a fronteira entre contrativo e dilatante para uma vasta gama de solos. O contorno de $Q_{tn,cs}$ e o do parâmetro de estado, levam a interpretações análogas. Logo, solos onde o valor de $Q_{tn,cs}$ constante tem essencialmente parâmetro de estado similar e consequentemente a mesma resposta ao ser carregado. Por fim, utilizando-se dados de 36 rupturas, possibilitou-se verificar qual das curvas de $Q_{tn,cs}$ representava a melhor a região limite entre contrativo e dilatante, e consequentemente, a mais

adequada para sinalizar o potencial de liquefação. Os dados foram divididos em classes. Pela Figura 6, é possível perceber que onde a curva $Q_{tn,cs}$ é igual a 70 representa e abrange a maioria dos casos de ruptura. Ressalta-se, ainda, a utilização de dados de argilas sensíveis, propensas à ruptura por liquefação por fluxo, encontram-se na região abaixo da curva de $Q_{tn,cs}$. Nas zonas, os solos podem sofrer liquefação, em presença de carga dinâmica, dependendo também da duração e magnitude do carregamento. Contudo, os solos na zona C são solos argilosos moles, tendendo a sofrer amolecimento por conta de sua sensibilidade. Ainda no mesmo espaço, propôs-se outras modificações para determinar o potencial de liquefação do solo. A primeira foi combinar o ábaco com o Parâmetro de Estado (ψ), onde o valor nulo do

parâmetro representa a fronteira entre o comportamento contrativo e dilatante do solo, assim como sinaliza a possibilidade ou não de ocorrência da liquefação. Existem outros critérios, como por exemplo, o critério que representa a fronteira entre dilatante e contrátil de solos arenosos limpos, cujo valor de Fr é tipicamente menor que 1%, abrangendo uma pequena área do gráfico. Para simular o comportamento das areias siltsosas, é necessário a utilização de um fator que o correlaciona com solos arenosos limpos, a resistência normalizada $Q_{tn,cs}$ (Equação (a seguir)). O $Q_{tn,cs}$ é baseado no valor Q_{tn} , mas multiplicado por um fator corretivo K_c , dependente da porcentagem de finos, sua mineralogia e plasticidade. Um valor de $Q_{tn,cs}$ entre 50 e 70, provavelmente representa a fronteira entre contrativo e dilatante para uma

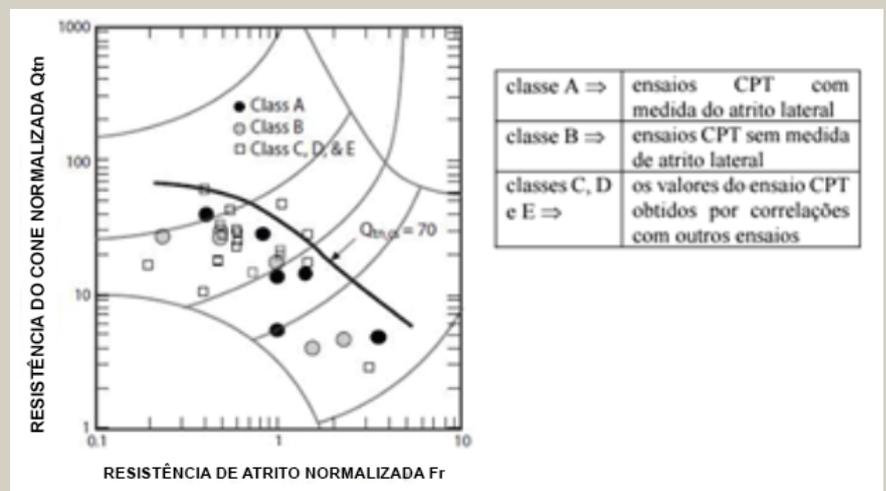


Fig 6 - Correlação de ensaios CPTu com potencial de liquefação, baseado em casos históricos

$$Q_{tn,cs} = K_c Q_{tn}$$

Onde:

$$K_c = 1,0 \text{ se } I_c \leq 1,64$$

$$K_c = 5,58I_c^3 - 0,4301I_c^4 - 2163I_c^2 + 33,75I_c - 17,88 \text{ se } I_c > 1,64$$

vasta gama de solos. O contorno de $Q_{tn,cs}$ e o do parâmetro de estado, levam a interpretações análogas. Logo, solos onde o valor de $Q_{tn,cs}$ constante tem essencialmente parâmetro de estado similar e conseqüentemente a mesma resposta ao ser carregado. Por fim, utilizando-se dados de 36 rupturas, possibilitou-se verificar qual das curvas de $Q_{tn,cs}$ representava a melhor a região limite entre contrativo e dilatante, e conseqüentemente, a mais adequada para sinalizar o potencial de liquefação. Os dados foram divididos em classes. Pela Figura 6, é possível perceber que onde a curva $Q_{tn,cs}$ é igual a 70 representa e abrange a maioria dos casos de ruptura. Ressalta-se, ainda, a utilização de dados de argilas sensitivas, propensas à rutura por liquefação por fluxo, encontram-se na região abaixo da curva de $Q_{tn,cs}$.

Só para informação final, a determinação em laboratório, do potencial de liquefação é feita a partir da realização de ensaios triaxiais não drenados.

REFERÊNCIAS

- CORRÊA, A. A.; COELHO A. S.; SAYÃO A. S. F. J.; SANDRONI S. S.; Moldagem e Ensaios Triaxiais em areias fofas, XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Salvador, 2018
- DAVE, K. K.; JOSHI, N. H.; PATEL, G. N.; SANTWANI, P. K. Development of Colloidal Silica Grout Using Different Reactants. In: Indian Geotechnical Conference, 16-18 Dez, Bombay, 2010.
- DAVIES, M.; MCROBERTS, E.; MARTIN, T. Static Liquefaction of Tailings - Fundamentals and Case Histories. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/237553405_STATIC_LIQUEFACTION_OF_TAILINGS_-_FUNDAMENTALS_AND_CASE_HISTORIES. Acesso em: 12 de Jun. de 2016. AMEC Earth & Environmental, Vancouver e Edmonton, 2002.
- ESPINOZA, L. H. Avaliação do Potencial de Liquefação de Solos Coluvionares do Rio de Janeiro. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- FERNANDES, E. A.; SANTOS H. I. Análise da Operação da Barragem de Rejeitos da Mineração Serra Grande S.A., Município de Crixás, Goiás. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2008.



Success Factors
SIG WORKSHOP



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!



JUNHO

JULHO

AGOSTO

SETEMBRO

OUTUBRO

NOVEMBRO

DEZEMBRO

Sondagens - Inovações, Problemas e soluções de sondagens no Brasil

Local: Hotel Transamérica, BH
Data: 07/06/2024

Conferência SuperPile 24

Local: São Francisco, Califórnia
Data: 12/06/2024

DFI Online Course: Working Platform Design & Verification (sessão 1)

Local: Deep Foundations Institute
Data: 27/06/2024

Concrete Show 2024

Local: São Paulo Expo
Data: 06/08/2024

12 - Congresso Luso-Brasileiro e 8as Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia

Local: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)
Data: 23/08/2024

18 - Conferência Europeia de Mecânica de Solos e Engenharia Geotécnica

Local: Altice Arena, Lisboa
Data: 26/08/2024

GeoenvironMeet 2024

Local: Portland, Estados Unidos da América

Data: 08/09/2024

Cobramseg 2024
Local: Balneário Camboriú, Santa Catarina

Data: 24/09/2024

5th European Conference on Physical Modelling in Geotechnics

Local: Delf, Holanda
Data: 02/10/2024

17 - Conferência Pan-Americana de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (PANAM-GEOCHILE2024)

Local: La Serena, Chile
Data: 12/11/2024

GeoMandu 2024

Local: Kathmandu, Nepal
Data: 28/11/2024

International Conference on Transportation Geotechnics 2024

Local: Sydney, Austrália
Data: 18/12/2024

AGENDA GEOTÉCNICA 2024

Eng.º Roger Kim.

ESTUDOS RECENTES SOBRE LIQUEFAÇÃO ESTÁTICA EM BARRAGENS DE REJEITOS. O QUE SE SABE?



Roger Rodrigues

Figura 1 - Ruturas periódicas por liquefação estática em áreas ribeirinhas na Amazônia.

A indústria mineira produz, a cada ano, volumes cada vez maiores de rejeitos, que são depositados hidráulicamente como uma mistura de sólidos e água (lama) em lagoas. Para se conter estes rejeitos, lançados hidráulicamente, constroem-se bar-

ragens e aterros combinados com confinamento natural. A forma como estes rejeitos são armazenados, faz com que os depósitos fiquem em estado fofo e propensos à liquefação. Existem diversos exemplos recentes de rutura de barragens, onde a liquefação estática ou dinâmica foi a causa direta ou consequência da rutura. A liquefação estática ou por fluxo,

está associada ao comportamento do amolecimento não drenado do solo. Para um solo saturado fofo, o amolecimento não drenado, com perda significativa da resistência, ocorre após o pico do carregamento ser atingido (comportamento contrativo do solo arenoso). Existem diversos desencadeadores da liquefação estática, conforme apresentado abaixo:



- Alteração no desenvolvimento dos excessos de poropressão, induzidos por aumentos constantes no nível do reservatório.

- Ritmo excessivo de carregamento, devido ao rápido aumento do nível do reservatório.

- Remoção/ alteração na base dos taludes (barragens)

- Movimentos rápidos no solo de fundação, suficientes para criar carregamentos não drenados dentro do reservatório.

Ou seja, fica claro que o rejeito saturado, em estado fofo, encontra-se em condição altamente instável, que até mesmo um pequeno desencadeador pode causar rutura progressiva, devido ao amolecimento deformativo. A análise do equilíbrio limite tradicional, comumente utilizado para estimar a estabilidade de barragens de rejeitos, pode ignorar este tipo de rutura. O método de elementos finitos (MEF), acoplado a um modelo constitutivo adequado, pode reproduzir um comportamento de amolecimento deformativo e, portanto, o início da liquefação estática em barragens de rejeitos, fornecendo estimativa do fator de segurança contra ruturas. O fato é que existem grandes incertezas nos parâmetros de entrada, devido as condições existentes no campo e na forma como calculamos o fator de segurança contra ruturas. Sabe-se que, nestes casos, que os métodos baseados em riscos e probabilidades, fornecem mais informações do que análises determinísticas, razão pela qual procura-se utilizar a superfície de resposta acoplada ao método de confiabilidade de segunda ordem (MCSO). Os métodos probabilísticos complementam os determinísticos, fornecendo informações adicionais sobre os efeitos das incertezas para a segurança de barragens de rejeitos. Com a implementação da ISO 31.000, ou seja, um protocolo de gerenciamento de riscos para gerir barragens de rejeitos, cresceu ainda mais a necessidade de uma estrutura para permitir o estudo probabi-

lístico da rutura por liquefação estática, em barragens de rejeitos. Atualmente, a maioria dos programas numéricos geotécnicos não possui função de análise probabilística. Com este cenário, o método da superfície de resposta (MSR) é cada vez mais útil para análises de confiabilidade, exatamente por que pode integrar a avaliação da estabilidade numérica e a confiabilidade da análise. Procuramos, nesta matéria, apresentar uma abordagem probabilística, onde o comportamento físico de uma barragem de rejeito simples, é representada pela superfície de resposta (SR) e pelo método de confiabilidade de primeira ordem (MCPO). O SR é desenvolvido com base em simulações numéricas realizadas utilizando-se o software comercial de elementos finitos PLAXIS. A simulação MEF, combinada como a análise SR-MCPO fornecem uma visão profunda do efeito de incertezas nos parâmetros de entrada, para o fator de segurança, o que demonstra a capacidade de um sistema computacional eficiente de calcular a probabilidade de rutura de uma barragem de rejeitos.

A simulação numérica

Um grande volume de rejeitos, em um reservatório, promove tensões cisalhantes que podem ser superiores à resistência não drenada presente, o que conduz a uma condição de estado instável, fazendo com que um pequeno desencadeador cause rutura progressiva por amolecimento deformativo, frequentemente denominada liquefação estática. Este tipo de rutura não é assimilada por análises tradicionais de equilíbrio limite

Are you looking for a soil improvement in portuguese?

BEST SELLER

MELHORAMENTO DO SOLO MOLE E O GEOENRIJECIMENTO



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

A geometria de uma barragem de rejeito

Simulamos, numericamente, na figura 2 ao lado, uma geometria específica, ao invés de um talude real de uma barragem de rejeitos. O talude possui 50mts de altura, uma inclinação lateral de 1V:3H e uma berma de 10mts de largura, situada a 25mts, tornando a inclinação media geral de 1V:3,2H. Considerou-se uma linha Freática inicial situada à montante, com 30mts, chegando a 26mts. A condição inicial, portanto, simula uma barragem de rejeitos no final de uma deposição, havendo a possibilidade do aumento da superfície freática, devido ao recomissionamento ou mesmo à degradação da estrutura de gestão das aguas superficiais.

O perfil do solo da barragem de rejeitos

Utilizou-se, para definir os parâmetros do material do rejeito, dados públicos do rompimento da barragem do fundão, em Minas Gerais, em 2015. Considerou-se três perfis de dados de sondagens CPTu, para representar a condição saturada e não saturada, abaixo e acima da linha freática, respectivamente e, também, para interpretar a densidade in situ em termos do parâmetro de estado ($\Psi = e - ec$, onde e é o índice de vazios in situ e ec é o índice de vazios critico para a mesma pressão media p). Empregou-se as correlações com CPTu para determinar-se Ψ , conforme figura 2.

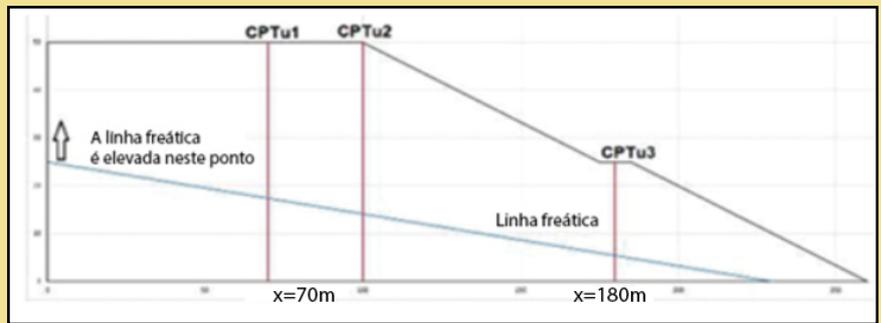


Fig 2 - Geometria da barragem de rejeitos com a condição freática inicial.

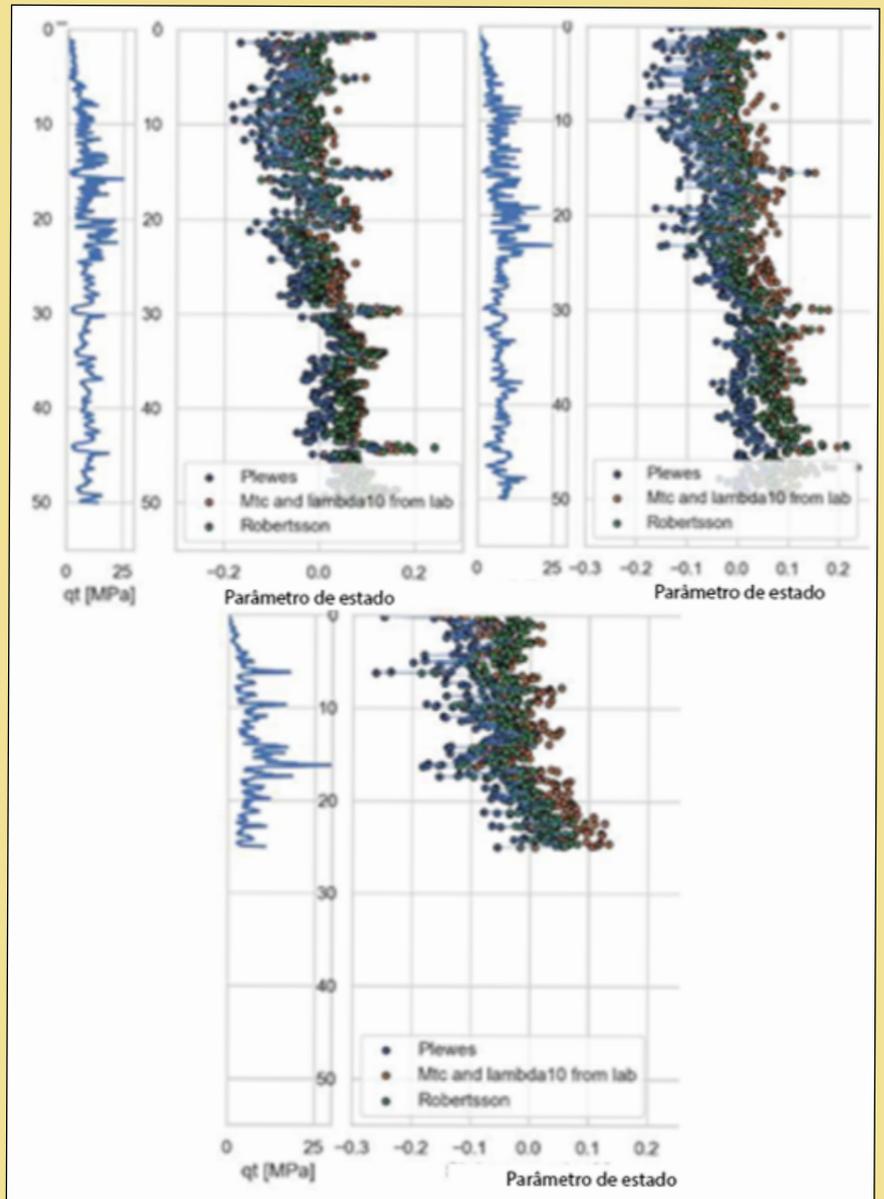


Fig 3 - Parâmetro de estado interpretado a partir do CPTu 1 (esquerda), CPTu2 (meio) e CPTu3 (direita) utilizando-se diferentes métodos.

Observou-se, acima da linha freática, um peso unitário volumétrico Ψ não sat = $20\text{KN}/3\text{m}^3$ e, abaixo, $\Psi_{\text{sat}}=22\text{KN}/\text{m}^3$, juntamente com $K_0=0,7$. O parâmetro de estado, interpretado de várias correlações, em fun-

ção de profundidade, é visualizado na figura 2, ficando evidente a enorme dispersão dos resultados, o que serviu de forte motivação para conduzir o estudo com uma abordagem probabilística. Escolheu-se o

parâmetro de estado, avaliado com base nas correlações de Jefferies e Been, 1992, discretizando-se a barragem em 4 camadas, conforme figura 3. A média e o desvio padrão, para cada camada, foram avaliadas de acordo com a tabela abaixo. A dispersão de dados, da primeira camada, é alta, tornando difícil determinar se o solo é dilatante ou contrativo, o que torna claro a necessidade da análise de barragens de rejeitos com enfoque probabilístico.

Camada	Média (M)	Desvio padrão Ψ (D)
Camada 1	-0.01756	0.04513
Camada 2	0.05206	0.03794
Camada 3	0.07968	0.02977
Camada 4	0.07968	0.02977

Tab 1 - Média e desvio padrão de parâmetro de estado para cada camada

O modelo constitutivo para rejeitos

Modelou-se o comportamento constitutivo do rejeito utilizando-se o modelo NORSAND, elastoplástico, baseado na teoria do estado crítico, adequado para representar o comportamento do rejeito, exigindo como entrada do modelo um parâmetro inicial do estado para definição da condição do rejeito. Os parâmetros do modelo NORSAND, para rejeitos, são um conjunto de dados mesclados do estado crítico, baseado nos relatórios da barragem do Fundão conforme tabela abaixo. Observa-se, executando-se o parâmetro do estado para as 4 camadas, que os demais são constantes em todas as simulações.

Parâmetro	Valor
Γ	0.92
λ_c	0.021
M_{tc}	1.45
ϕ'_{cs}	36
N	0.3
χ	6.3
H	125-690 ψ
G_0	50 MPa

Tab 2 - Parâmetros do modelo NORSAND para barragens

A modelagem numérica com PLAXIS

As análises de estabilidade foram realizadas no PLAXIS, utilizando-se o modelo NORSAND, dividindo-se em 4 camadas de modo a considerar a variabilidade tanto do parâmetro de estado como da linha freática, conforme figura abaixo.

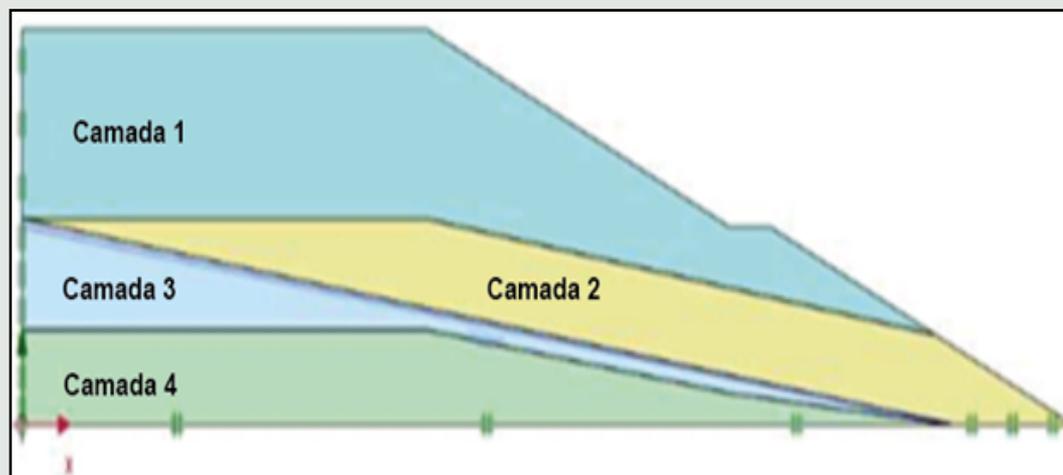


Fig 4 - Modelo PLAXIS 2D de barragens de rejeitos com 4 camadas e linha freática

O limite inferior do modelo é completamente fixo, enquanto os limites verticais são fixados na direção lateral. O modelo foi discretizado com 15 nós e elementos triangulares. A linha freática para o caso inicial foi definida a 26mts no limite esquerda do modelo, conforme figura acima. A simulação foi segmentada para as 5 seguintes fases:

1) Fase de abertura

As tensões iniciais são introduzidas em condições de Ko, calculando-se as tensões verticais iniciais, considerando-se a profundidade e o peso unitário do solo, seguido do cálculo das tensões horizontais. O equilíbrio não é calculado.

2) Fase de equilíbrio

Como a superfície do solo não é horizontal, o procedimento Ko conduzirá a existência de forças desiguais ou ao desequilíbrio das forças iniciais dentro da maciço do solo o que, obviamente, não é correto. Nestes casos, para se manter o equilíbrio, desenvolvem-se tensões dentro do maci-

ço. Portanto, a etapa Ko é acompanhada por um procedimento com carregamento por gravidade no PLAXIS, que calcula as tensões, garantindo o equilíbrio.

3) Fase drenada

Todas as camadas do solo são drenadas

4) Fase não drenada

As camadas do solo, abaixo da linha freática, são classificadas como não drenadas, checando-se o equilíbrio do sistema.

5) A fase de perturbação

O sistema fica submetido a um aumento no carregamento, de modo a simular qualquer perturbação repentina que possa fazer com que o sistema comporte-se em condição não drenada. Neste estudo, esta simulação é realizada aumentando-se gradualmente a carga de gravidade no sistema. É importante entender que a massa de rejeitos pode apresentar alteração repentina de comportamento drenado, para o não drenado o que, com uma perturbação que seja, pode ocorrer rutura do sistema, como mencionado anteriormente. Consequentemente, os cálculos do coeficiente de segurança, sob condição completamente drenada, não seriam capazes de considerar esta condição de rutura por liquefação estática. Neste estudo, aplicou-se gravidade adicional para simular esta perturbação. A gravidade adicional (acima de 1) necessária para conduzir ao rompimento da barragem é denominado FoS.

Resultado do modelo numérico: a liquefação estática

O resultado da simulação capturou a rutura da barragem, por liquefação estática, utilizando-se um modelo constitutivo adequado, desencadeado por sua perturbação, com base em um pequeno aumento da gravidade na barragem (menor que 5%) sob condição não drenada. A simulação capturou o comportamento do amolecimento (a deformação cisalhante aumenta com o decréscimo da tensão imposta, devido a poropressão, provocada pelo cisalhamento) da massa de rejeitos, fundamental para simular a liquefação estática, conforme figura abaixo.

deformativo foi observado imediatamente após o estado do rejeito passar da condição drenado para não drenado. A redução da tensão efetiva média, p' , passa para o ponto A, devido ao crescimento dos excessos de poropressão, conduzindo o talude para a condição de rutura. Estes cenários foram simulados, variando-se os parâmetros de estado das camadas de rejeitos, juntamente com o FoS correspondente a cada caso, conforme tabela a seguir. Observa-se que os parâmetros de estado, para cada cenário, foram escolhidos baseados na média e no desvio padrão de cada camada, conforme apresentado na tabela 1 anterior. A elevação da superfície freática, na extremidade esquerda do modelo, variou conforme apresen-

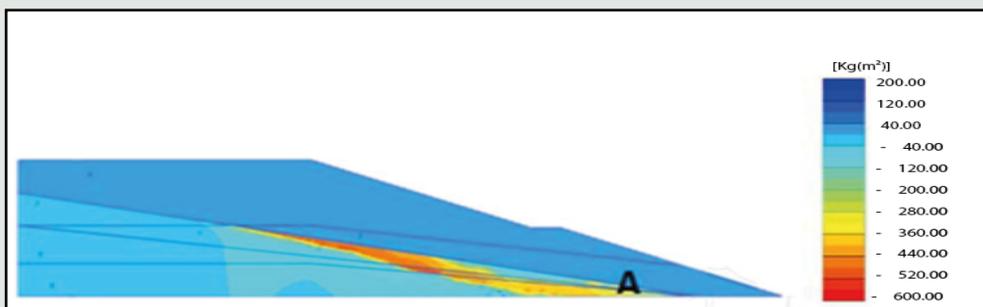


Fig 6 – A liquefação representando os contornos dos excessos de poropressão e amolecimento no pé da barragem.

Os resultados da simulação ajudaram a identificar o momento desencadeador do início da rutura, localizado próximo ao pé do talude (letra A na figura 6), com o correspondente comportamento tensão-deformação, que apresenta-se na figura 5, informando que o processo de amolecimento

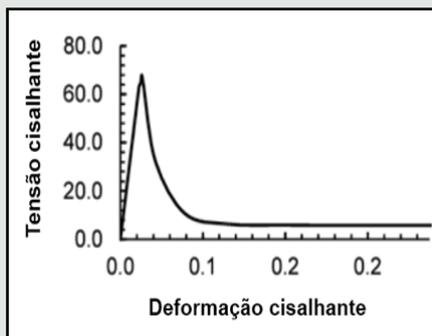


Fig 5 – Curva tensão-deformação do ponto A, representando o amolecimento do material da barragem devido a liquefação.

tado na tabela a seguir. Por exemplo, (M=0,75D) M/M/M/M/Y significa que o parâmetro de estado, na primeira camada, foi idealizado com a média +0,75 vezes o desvio padrão. Os parâmetros do estado das camadas 2-4 estão na média e a linha freática, na extremidade esquerda do modelo, está a 26mts. Fica evidente que o início da condição de amolecimento do rejeito, depende muito do parâmetro de estado, o que suscita o desenvolvimento de uma resposta utilizando-se simulações FE, de modo a se determinar a probabilidade de rutura da barragem de rejeitos por liquefação estática.

GE05

Análises Numéricas



MEF

Este programa permite modelar uma vasta gama de problemas de geotecnia, tais como: assentamento de terrenos, estabilidade de taludes, escavações, análise de túneis, percolação, análise de paredes diafragma e outras estruturas de contenção, etc. Sendo possível assumir deformações planas ou condições assimétricas. É possível realizar as análises através dos seguintes modelos: Drucker-Prager, Mohr-Coulomb, Mohr-Coulomb Modificado com o endurecimento e amolecimento, Cam-Clay Modificado e Argila Hipoplástica.



Túnel

Este módulo é uma extensão do programa MEF que contém funções úteis à modelação de túneis, tais como: gerador de revestimento, condições de carga devido a efeitos térmicos ou dilatação dos solos, método de escavação sequencial.



Consolidação

Este módulo de extensão do programa MEF realiza análises de assentamento em função do tempo, sob aterros, fundações ou devido a outras sobrecargas.



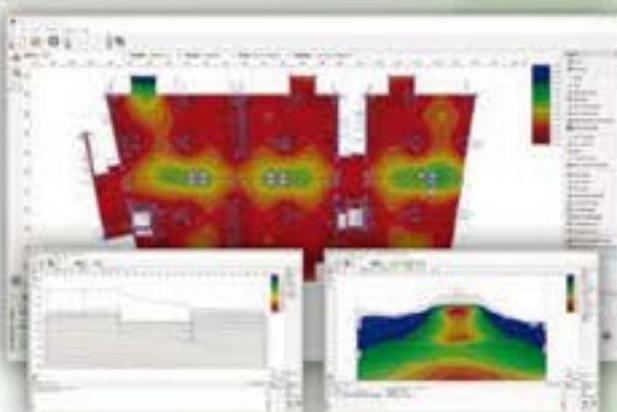
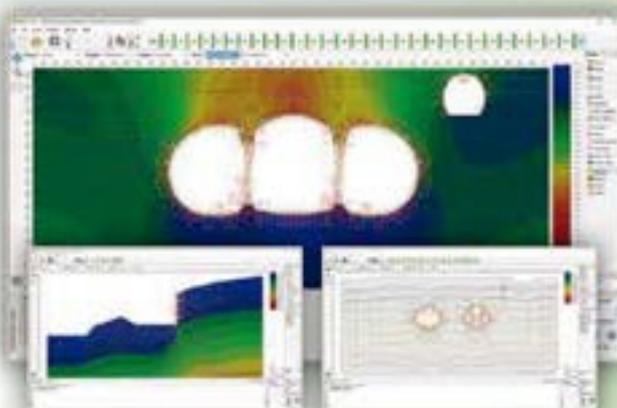
Percolação

Este módulo é uma extensão do programa MEF que permite analisar o fluxo de água em regime constante ou transitório.



Laje e radier

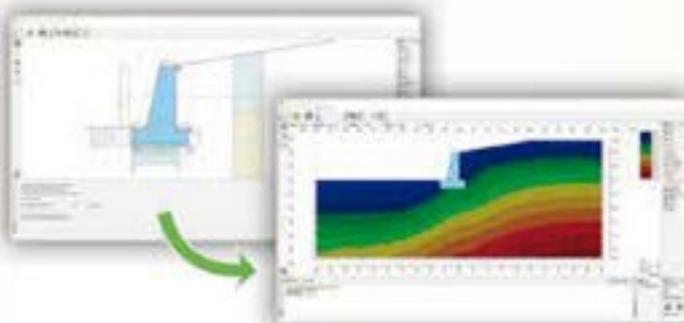
Este programa pode ser utilizado para analisar placas e lajes de fundação, independentemente da sua forma, assentes em subsolo elástico.



O que torna o GE05 único?

Combinação de Métodos Analíticos e Numéricos

Os métodos analíticos permitem dimensionar e verificar estruturas de forma rápida e eficaz, no entanto, em alguns casos, pode ser aconselhável recorrer ao MEF. O facto de o ambiente de trabalho ser comum aos vários programas e a possibilidade de transferência de dados entre programas permitem que o utilizador tire o máximo proveito do conjunto de programas GE05.



Aplicação de Várias Normas

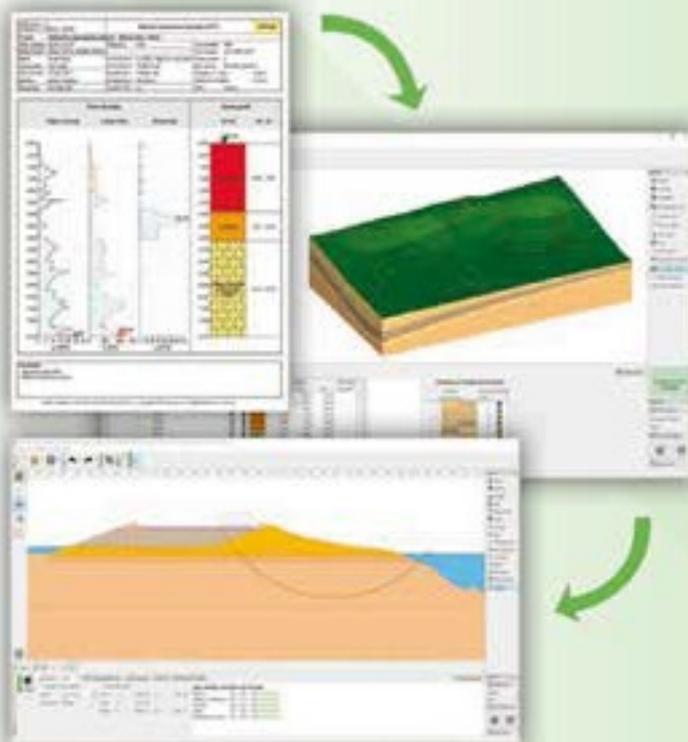
Os métodos geotécnicos aplicados pelo software GE05 são utilizados em todo o Mundo. O GE05 adota um sistema único de aplicação de normas e coeficientes parciais que são introduzidos de forma independente em relação aos dados da estrutura em análise. O GE05 possui uma base de dados de normas, sendo que também é possível que o utilizador defina as suas próprias configurações.

GE05 suporta:

- Fatores de Segurança (ASD)
- Teoria de Estados Limites (LSD)
- Eurocódigos EN 1997, incluindo Anexos Nacionais
- Load Resistance Factor Design (LRFD - USA)
- Outras normas geotécnicas (SNIP - Rússia, GB - China)
- Normas para betão armado (EN, ACI, SNIP, GB, AS, etc.)

Desde a Prospeção a Dimensionamentos Avançados

O GE05 baseia-se num conjunto de programas que fazem a conexão entre a modelação de dados geológicos com soluções para todos os tipos de problemas geotécnicos complexos.



www.finesoftware.com.br

Zaverka 12
169 00 Praha 6
Czech Republic

tel.: +420 233 324 880
fax: +420 233 321 754
e-mail: hotline@finesoftware.eu

Estão disponíveis pacotes com preços muito acessíveis acoplados com planos de manutenção e de leasing atrativos. Por favor, contacte o seu distribuidor para cotações.

O seu agente local

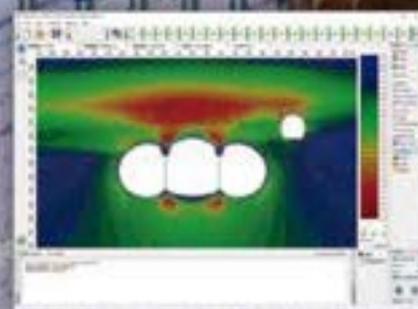
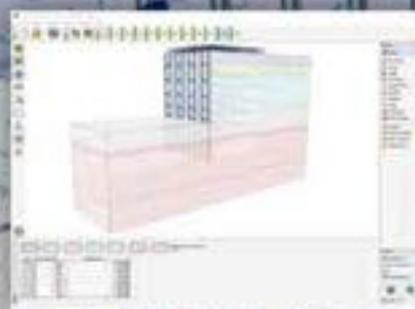
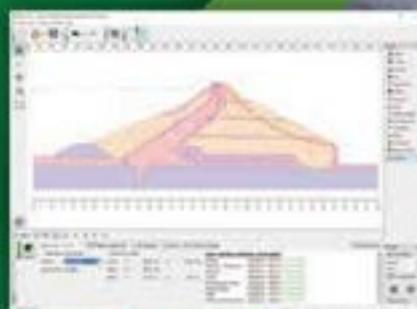
SOLUÇÕES CAD BIM

Tel.: (11) 3294-4800 | (11) 9 8995-1170
Av Nova Cantareira, 2014 - Sl 123
Tucuruvi - São Paulo/SP

GEO5

Software de Geotecnia para
uma vasta gama de análises

-  Análise de Estabilidade
-  Escavações e Contenções
-  Fundações
-  Muros e Gabiões
-  Túneis e Poços
-  Assentamentos
-  Estudos Geológicos
-  Sondagens de Solo



Com recurso ao MEF e a Métodos Analíticos

Camada/ Linha freática	Distribuição	FoS
1 (ψ)/2 (ψ)/3 (ψ)/4 (ψ)/ Y (m)	(M)/M/M/M/Y	1.051
"	(M + 0.75 D) /M/M/M/Y	1.048
"	(M + 1.5 D)/M/M/M/Y	1.044
"	M/(M + 0.75 D)/M/M/Y	1.055
"	M/(M + 1.5 D)/M/M/Y	1.051
"	M/M/(M + 0.75 D)/M/Y	1.047
"	M/M/(M + 1.5 D)/M/Y	1.042
"	M/M/M/(M + 0.75 D)/Y	1.027
"	M/M/M/(M + 1.5 D)/Y	1.009
"	M/M/M/M/ (Y-12 m)	1.078
"	M/M/M/M/ (Y+12 m)	1.031

**M = Média; D= Desvio padrão a partir da tabela 1
Y = 26m**

Tab 3 – FoS a partir das simulações para varios valores de estado.

O método da superfície de resposta (MSR)

Sabemos que as incertezas na geotecnia podem ser tanto devido a aleatoriedade natural de uma propriedade, como de variações no solo ou como de incertezas que podem ser reduzidas, coletando-se mais informações, ou mesmo, melhorando-se os métodos de medição e/ ou de cálculo. Sabemos também, que métodos probabilísticos necessitam da definição de um estado de inaceitabilidade (rutura) como de aceitabilidade (sem rutura). A função de desempenho, G, relaciona a resposta do sistema (Y, neste caso, a FoS da barragem de rejeitos) ao seu estado, considerando-se as incertezas do modelo, m, denominada como variável aleatória com uma função específica de distribuição da probabilidade, conforme

apresentado na equação abaixo, informando que se a função do desempenho for menor ou igual

$$G=MY-1$$

a zero, indica rutura, caso contrário, não há rutura. O MSR oferece uma aproximação ao comportamento de um sistema físico, com uma função à qual a análise probabilística poderá ser realizada. A relação entre a resposta, Y, e os parâmetros do modelo, XXii, é obtida com um código de computador, executando um número limitado de vezes, utilizando-se a saída para ajustar uma função aproximada. Os resultados da simulação numérica, apresentados na tabela anterior, foram utilizados como dados de entrada para definir a função de superfície da resposta, prognosticando o FoS baseado nos parâmetros de entrada, que nada mais são que os parâmetros de estado de cada camada de rejeitos e a localização da linha freática. A superfície de resposta não li-

near, Y, é especializada pela relação exponencial abaixo,

$$FoS = FoS_0 \prod_{i=1}^n (1 + a_i \tilde{x}_i + b_i \tilde{x}_i^2)$$

onde ai e bi são parâmetros de ajuste. A letra, i, é o indicador da variável aleatória, n, é o seu número total, sendo 5 neste caso. A letra, xi, representa os valores normalizados das variáveis aleatórias, de acordo com a equação:

$$xi = xi - x_{01} / Axi$$

onde, xi, é a variável aleatória, X_{01} é a média e Axi é o desvio padrão, conforme tabela 1, anterior. As variáveis aleatórias foram normalizadas para serem condicionadas e terem um conjunto de variáveis admissional, com ordem de grandeza semelhantes, onde seus valores servem como dados para o desenvolvimento da regressão da superfície de resposta, conforme equação anterior. Qualquer conjunto de parâmetros de entrada, em princípio, poderá ser utilizado podendo, frequentemente, ser $K_{01} + K\Delta_{xi}$, onde K é um número inteiro e, neste caso, utilizou-se 0,075 e 1,5 conforme apresentado na tabela 3 anterior. A equação anterior apresentada, foi utilizada para desenvolver a equação de superfície de resposta, antecipando o FoS de uma possível rutura pós liquefação estática na barragem de rejeitos.

$$FoS = 1.5066 \cdot (1 - 0.00214\tilde{x}_1 - 0.00151\tilde{x}_1^2) \cdot (1 + 0.000114\tilde{x}_3 - 0.00426\tilde{x}_3^2) \cdot (1 - 0.034254\tilde{x}_4 + 0.005076\tilde{x}_4^2) \cdot (1 - 0.02222\tilde{x}_5 + 0.003517\tilde{x}_5^2) \quad (4)$$

Onde x1 a x4 são os parâmetros normalizados de estado e x5 é a elevação da linha freática, normalizada também.



SENSORES DE RECALQUE



**CÉLULAS DE PRESSÃO
PARA ATERRÓS**

GEOKON

TRUSTED MEASUREMENTS®

EQUIPAMENTOS GEOTÉCNICOS



**CÉLULAS DE PRESSÃO
CRAVÁVEIS NO TERRENO**



PIEZÔMETROS

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

Representante Exclusivo no Brasil



G5 Engenharia LTDA

Tel: (41) 3402-1707

g5engenharia.com.br

A ocorrência da rutura

Os métodos de confiabilidade (ferramenta que possibilita a determinação da probabilidade de rutura de um talude, de acordo com a modificação aleatória de suas variáveis) de primeira e segunda ordem (FORM e SORM) fornecem estimativa super precisa da probabilidade de rutura com esforço computacional simples, transformando variáveis aleatórias em normais, tendo média zero e variância unitária, objetivando-se encontrar a menor distância entre a superfície de estado limite e a origem no espaço variável transformado. Esta distância é o índice de confiabilidade, β , e a probabilidade de rutura da barragem pode, então, ser aproximada através da equação abaixo. Onde:

$$P_f = \Phi(-\beta)$$

é a distribuição acumulativa da variável normal padrão. O FORM é mais adequado quando a superfície de estado limite for linear e o SORM quando for não linear. Utilizou-se o software comercial COMREL V 9.0, disponível para análises de confiabilidade, para realizar a análise SORM. Os parâmetros de estado, das 4 camadas de rejeitos, foram considerados normalmente distribuídos, com média e desvio padrão distribuídos conforme tabela 1 anterior. A elevação da superfície freática foi realizada em etapas pré-definidas de 1m. A figura, acima, descreve as mudanças na probabilidade de rutura, com o aumento da superfície freática, conforme SORM, observando-se que aumenta em 22% quando o nível d'água está a 50m, comparando-o com o de 26m. A figura 9, apresenta os coeficientes de influência observando-se, claramente, que o parâmetro de estado da camada 4 tem 94% de importância na confiabilidade do sistema.

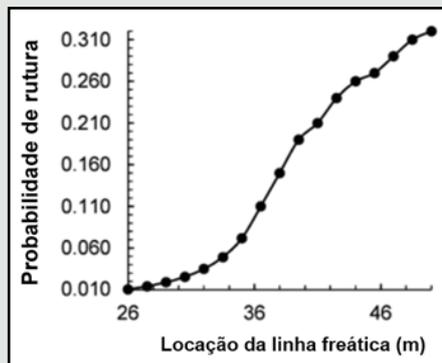


Fig 7 – Variação do P_f com parâmetros de estudo normalmente distribuídos para todas as camadas em cada localização da linha freática.

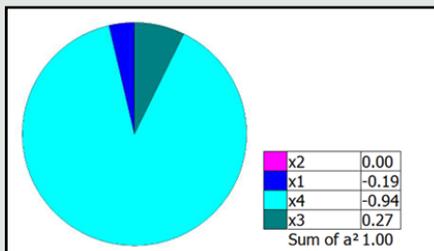


Fig 8 – Variáveis α representativas para o parâmetro de estado de cada camada de rejeitos conforme o SORM

A importância, ou o efeito da camada 4, conforme figura 9, é reduzida, ligeiramente, à medida em que sobem as linhas freáticas, deixando claro que a importância do FoS, nas camadas 1 e 3 aumenta drasticamente com a linha freática além dos 36m, deixando saturadas as camadas de rejeitos inferiores. A camada 2 não apresenta qualquer impacto. Finalizando, conclui-se que a análise do FoS, para barragens de rejeitos, depende da precisão na determinação dos parâmetros de estado, utilizando-se sondagens CPTu. Este estudo destaca a utilização de um contexto computacional bastante eficiente, que objetivou estimar a probabilidade de rutura de uma barragem de rejeitos, baseado em uma superfície de resposta, desenvolvida com simulações de elementos finitos, juntamente com sofisticados modelos constitutivos de amolecimento deformativo, de modo a detectar o trágico fenômeno da liquefação estática. Interessante, contudo, foi que os resultados com elementos finitos, tornaram evidente que rejeitos saturados fofos, na condição não drenado, pode liquefazer-se, mesmo com perturbações

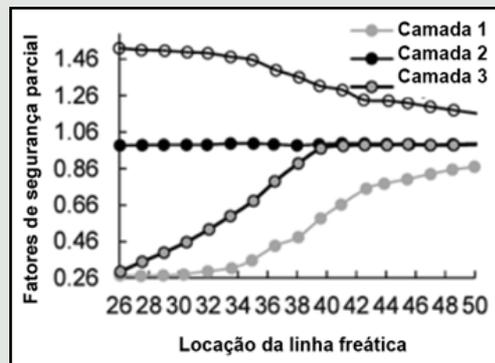


Fig 9 – Influência do parâmetro de estado de cada camada na segurança parcial da barragem com o aumento da localização da linha freática conforme SORM

diminutas, não dependendo da localização da linha freática. O aumento da superfície freática, no entanto, aumenta drasticamente a probabilidade de rutura por liquefação estática. Uma observação extremamente importante é que basta a presença de algumas camadas de material fofo, saturado, para aumentar exponencialmente o risco de rutura, ficando claro que a contribuição das diversas camadas de rejeito pode ser altamente não linear. A complexidade do fenômeno da liquefação estática, e as recentes ruturas de barragens de rejeitos, tornam obrigatória a utilização de métodos baseados na confiabilidade para atender as novas regulamentações.

Thomas Kim é engenheiro geotécnico especializado

Busch, R. A., R. R. Backer, L. A. Atkins, and C. D. F.

Charlie, W. A., T. E. Bretz, L. A. Schure, and D. O. [org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000846](http://org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000846).

Coduto, P. D. 2001. Foundation design: Principles

Cowherd, D. C., and I. J. Corda. 1998. "Seismic co State Dam Safety Officials.

D'apponia Engineering. 2009. Engineering and d

Fourie, A. B., B. A. Hofmann, R. J. Mikula, E. R. F. L. geot.2001.51.7.577.

Genes, B. E., T. O. Keller, and J. P. Laird. 2000. "Ste Vegas: ASDSO/ USCOLD.

Hegazy, Y. A., A. G. Cushing, and C. J. Lewis. 2004. Geotechnical and Geophysical Site Characterizatio

Diminuir as incertezas gera mais SEGURANÇA

As variações do clima trazem muitas incertezas e problemas para a realização de obras e são responsáveis por + de 15% dos atrasos e aumentos de custos no setor.

Sistema para gestão de risco de impacto climático no planejamento e execução de obras



Aumente a produtividade e reduza custos durante a ocorrência de chuvas com previsão personalizada e alertas de tempestade em tempo real.

NIMBUS

<https://www.nimbusmeteorologia.com.br/>

<https://www.linkedin.com/company/nimbusmeteorologia>

REFERÊNCIAS

zado em melhoramento de solos moles.

Kealy. 1975. Vol. 8062 of Physical property data on fine coal refuse. Pittsburgh: US Dept. of Interior Bureau of Mines.

Doehring. 2013. "Blastinduced pore pressure and liquefaction of saturated sand." J. Geotech. Geoenviron. Eng. 139 (8): 1308–1319. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2013\)139:8\(1308](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2013)139:8(1308)

and practices. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.

considerations for upstream construction of coal refuse dams." In Proc., 1998 Annual Conf. Las Vegas, NV, 523–534. Lexington, KY: Association of

design manual: Coal refuse disposal facilities, prepared for the US. Pittsburgh: Mine Safety and Health Administration.

ord, and P. K. Robertson. 2001. "Partially saturated tailings sand below the phreatic surface." Géotechnique 51 (7): 577–585. <https://doi.org/10.1680/jgeot.2001.51.7.577>

ady state liquefaction susceptibility of high hazard upstream-constructed coal refuse disposal facilities." In Proc., Tailings Dams 2000, 47–58. Las

. "Physical, mechanical, and hydraulic properties of coal refuse for slurry impoundment design." In Proc., 2nd Int. Conf. on Site Characterization, edited by A. Viana da Fonseca and P. W. Mayne, 1285–1292. Rotterdam, Netherlands: Millpress.

LIQUEFAÇÃO DO SOLO. O QUE HÁ DE MAIS RECENTE PARA NEUTRALIZAR ESTE SÉRIO PROBLEMA.



Thomas Kim

Fig 1 – Taludes fluviais, em zonas portuárias na Amazônia rompem por liquefação estática periodicamente.

A liquefação do solo é um fenômeno onde o solo saturado ou parcialmente saturado submetido a um carregamento, perde sua resistência e rigidez, deixando de atuar como base sólida, transformando-se em um fluido viscoso. Este fenômeno ocorre em solos predominantemente arenosos, com presença de finos, onde há uma caracterização, no SPT, de poucos golpes, idealizando-se uma estrutura fofa e saturada, onde qualquer carregamento imposto, sem resposta da drenagem no solo, provoca aumentos na poropressão com mesma intensidade. Em um gráfico tensão-deformação, deste solo, visualiza-se

uma curva com pico, seguido de uma queda abrupta, até valores muito baixos. Diversas ruturas de barragens de rejeitos e de taludes fluviais, na Amazonia, são atribuídas à liquefação do solo, causada por todos os tipos de carregamento estático e/ ou cíclico. A cena da destruição ou desmantelamento de uma estrutura por liquefação do solo, se processa de quatro maneiras principais:

- Deslizamento de terra ou escoamento de lama
- Escoamento lateral
- Oscilação do solo

- Perda da capacidade de carga

O termo liquefação abrange todos os fenômenos de deformação excessiva, em solos predominantemente arenosos saturados, quando recebe carregamentos ou tensões diferenciadas, sua drenagem, como a passagem de grandes máquinas, o que causa redução em sua resistência e rigidez, devido ao desenvolvimento de excessos de poropressão. De forma característica, nos taludes fluviais da Amazonia, os danos causados pela liquefação resultam em escoamentos de fluxos no período de vazante de seus rios. Ao contrário do que você,

leitor, possa pensar, liquefação não é um assunto novo. Há centenas de estudos relativos a este fenômeno, onde opiniões variam particularmente com relação a presença de finos, à susceptibilidade para liquefazer, a influencia da sobrecarga e ao grau de saturação. Estranhamente, no entanto, quase não se discute métodos para se eliminar ou diminuir o risco à liquefação, mesmo com todo o cenário de desastres cíclicos recentes, que ocorrem na Amazonia, nas barragens de rejeitos de Minas Gerais, e até no navio Bulk Jupiter, com 56.000 toneladas, que afundou recentemente após a ocorrência de liquefação em sua carga de bauxita. O estado do amazonas não tem nenhuma implicação com fenômenos sísmicos, no entanto, devido a forte precipitação anual, o lençol freático é elevado, juntamente com a rápida variação do nível da água de seus rios, faz com que o risco de liquefação estática ou cíclica, causado por ação humana, não pode ser negligenciado. Felizmente, o melhoramento do solo com geoenrijecimento tem se mostrado, desde 2010, após a tragédia na área portuária de Manaus, na única solução para interromper a liquefação nos taludes fluviais da Amazonia onde, basicamente, elimina-se o crônico ciclo de excessos e dissipação da poropressão, aumentando-se a densidade e, claro, a resistência e rigidez do solo.

O comportamento mecânico do solo

A figura, a seguir, procura evidenciar a sequência do evento da liquefação, sem que haja qualquer intenção de drenagem. Com o desenvolvimento da circunstancia

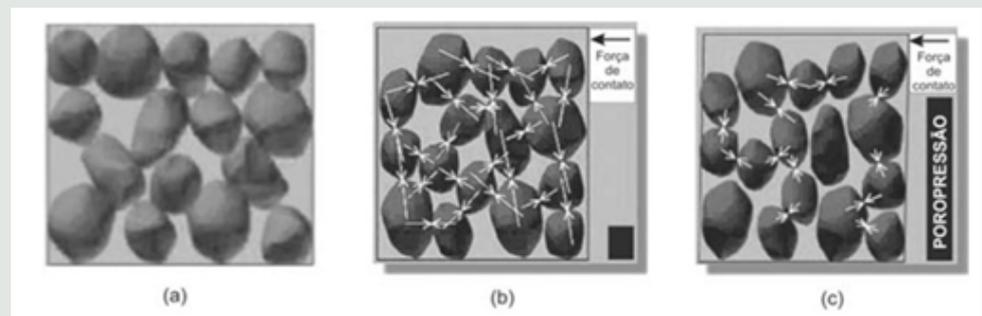


Fig 2 – Sequência do fenômeno da liquefação em solos predominantemente arenosos. (a) Solo saturado sem carregamento. (b) Início do carregamento não drenado, pequena poropressão e grande presença da força de contato. (c) Aumento da poropressão e queda da força de contato.

liquefação, a massa do solo movimentada-se desenfreadamente até conseguir recuperar sua resistência cisalhante e, finalmente, interromper seu movimento. Neste particular, há o termo rutura com fluxo liquefeito, caracterizado por deslocamento rápido extensivo.

A questão do solo ser ou não drenado

A questão comportamental do solo ser considerado drenado, é quando está sendo lentamente comprimido, sofrendo adensamento com cisalhamento, fazendo com que o excesso de poropressão desenvolvido se dissipe integralmente ($\Delta u = 0$). Na prática observa-se quando, no geoenrijecimento, cravam-se inicialmente geodrenos, seguindo-se da formação dos bulbos, que comprimem radialmente o solo, fazendo-o drenar integralmente. Por outro lado, o comportamento do solo não drenado, ocorre quan-

do comprime-se o solo sem que haja qualquer drenagem em seu interior. É o que ocorre quando aterramos um terreno, com presença de solos moles, o que faz desenvolver perigosos excessos de poropressão, que fazem diminuir a resistência do solo, podendo desencadear sua rutura.

A questão da dilatância e contração

Estes dois conceitos estão associados a deformação volumétrica irreversível à que se submete o solo. A contração corresponde a diminuição do volume do solo quando carregado e cisalhado, resultando em densificação da estrutura granular do solo, predominantemente arenoso, com redução dos vazios existentes entre seus grãos. A dilatância, por outro lado, corresponde ao aumento do volume do solo quando carregado e cisalhado. Desta forma, estes dois conceitos referem-se à condição drenada do solo, conforme figuras abaixo.

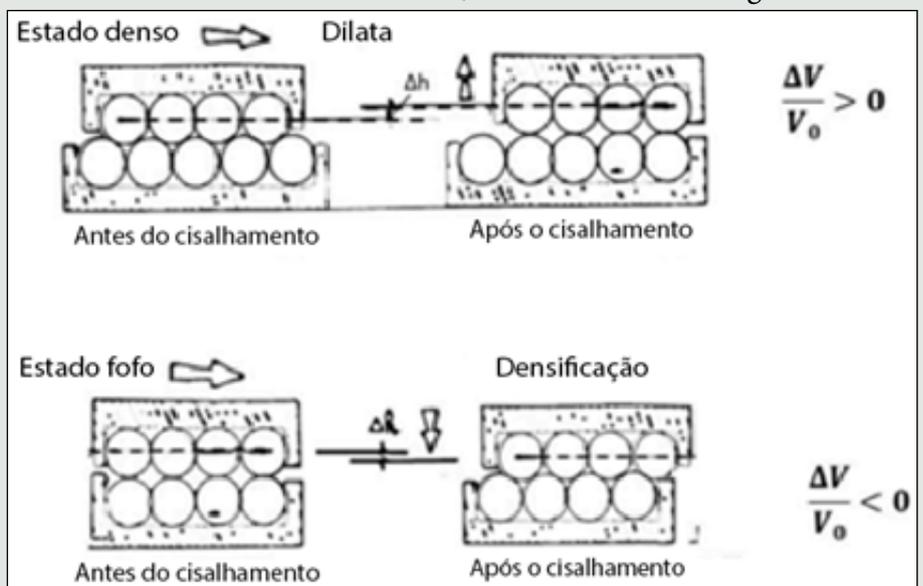


Fig 3 – Conceito de contração e dilatância.

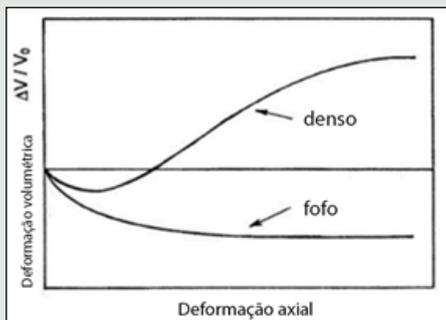


Fig 3 – Tendências volumétricas dilatantes e contratantes de solos sujeitos a carregamento cisalhante.

Para o caso de promover-se um carregamento em um terreno, com presença de solos moles, ter-se-á um caso típico de condição não drenada. Neste caso, o comportamento da contração/ dilatância traduz-se na evolução de excessos de poropressão, com redução proporcional da resistência do solo. Os excessos de poropressão positivos e negativos, correspondem ao fenômeno da contração e da dilatância respectivamente. Como se vê, estes dois conceitos, pertinentes ao comportamento volumétrico do solo, estão diretamente ligados à sua densidade inicial, assim como ao valor das tensões pertinentes ao seu adensamento. Um solo predominantemente arenoso, em estado fofo e depois adensado, apresenta estas duas condições.

A questão do estado característico

Este estado corresponde a transição ou passagem do comportamento de contração para o da dilatância em condição drenado. O estado característico é um parâmetro pertinente ao solo predominantemente arenoso, independentemente de sua densidade, granulometria e trajetória de tensões desenvolvidas. Em solos não drenados, não há alteração de volume e, consequentemente o estado característico é substituído pelo conceito de “transformação de fase”, correspondente à transformação ou modificação da direção da evolução dos excessos de poropressão.

A questão do estado crítico

Em 1936, Casagrande realizou testes de cisalhamento em diferentes amostras de solos, predominantemente arenosos, com diferentes densidades. O resultado mostrou que todos alcançaram a mesma densidade final, mas com grande variedade de deformações. Definiu este estado como o de índice de vazios críticos ou de densidade crítica. A particularidade do solo, predominantemente arenoso, “deformar à tensão e índice de vazios constantes”, passou a ser chamado de estar no estado crítico.

A liquefação estática

A liquefação estática, portanto, é um fenômeno marcado pela rápida perda de resistência do solo, predominantemente arenoso e fofo, quando saturado e submetido a qualquer forma de carregamento estático. De acordo com o mecanismo de destruição imposto, diversos pesquisadores modernamente resumem o fenômeno da liquefação de diversas maneiras: Liquefação por fluxo, estática ou verdadeira, utilizado quando há fluxos não drenados de solo saturado submetido à contração, quando tensões cisalhantes estáticas excedem a resistência residual do solo. O processo de rutura pode ser desencadeado por carregamento monotônico ou cíclico.

O Amolecimento cíclico, utilizado para descrever grandes deformações que ocorrem durante um processo de cisalhamento deformativo cíclico, devido a formações de excessos de poropressão em solos predominantemente arenosos, que tendem a dilatar com carregamento monotônico não drenado. Cesando o carregamento cíclico interrompe-se, também, o processo deformativo. Nesta condição podem ser, ainda, classificados da seguinte maneira:

- Liquefação cíclica, utilizada quando tensões cíclicas são introduzidas no solo, excedendo tensões estáticas atuantes, produzindo uma inversão de tensões. Com este cenário de grandes deformações atuantes, a condição de tensões efetivas vai a zero;

- Mobilidade cíclica, onde as cargas cíclicas não produzem inversão das tensões cisalhantes, não ocorrendo condição

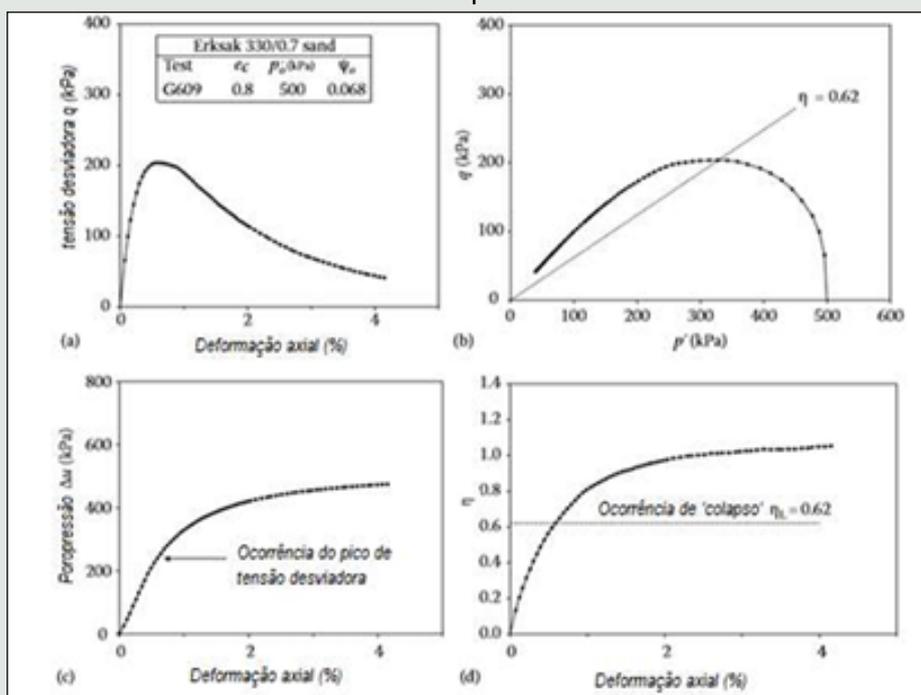
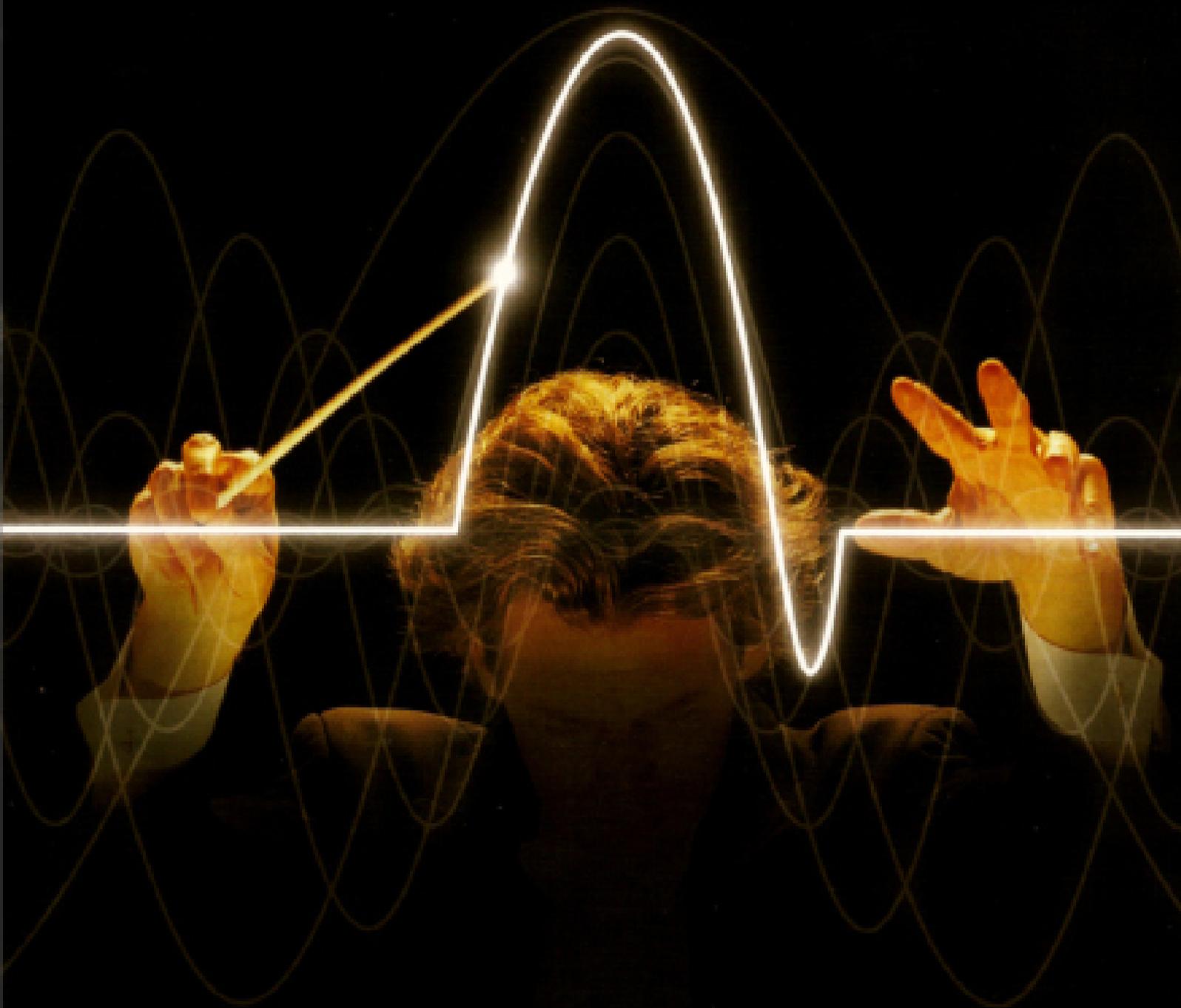


Fig 4 – Resultado de ensaios realizados em areia. (a) Tensão desviadora. (b) Trajetória de tensões, (c) Excessos de poropressão e (d) Relações de tensões no colapso.

Soft Soil Group
Apresenta



Webinars
solos moles

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

 Soft Soil
Group

dos em métodos empíricos que correlacionam sondagens SPT e CPTu com observações de ruturas por liquefação de inúmeros casos observados. Esta metodologia consiste em três etapas:

1º - identificar camadas de solo submetido à contração susceptíveis à liquefação, utilizando-se diferentes critérios conhecidos, conforme Robertson, 2010, 2016 e 2022;

2º- Realizar análise de estabilidade, utilizando-se o pico de resistência ao cisalhamento não drenado para camadas com contração;

3º- Realizar análise de estabilidade, pós-liquefação, atribuindo a resistência ao cisalhamento residual não drenado as camadas mais susceptíveis à liquefação.

Os dados coletados em testes CPT e CPTu, são utilizados para realizar o estudo do potencial de liquefação. A figura abaixo, apresenta o fluxograma da metodologia a ser empregada. Quando o solo predominantemente arenoso, submetido a um carregamento, apresenta-se em estado fofo (contração), há grande chance da presença e desenvolvimento de excessos de poropressão e, conseqüentemente, redução em suas tensões efetivas. Como resultado, as camadas com contração são definidas na etapa inicial do teste de susceptibilidade a liquefação. Neste interessante teste, estabelece-se o parâmetro do estado (Ψ), definido como a diferença entre o índice de vazios inicial (e_0) e o índice de vazios no estado crítico (e_{cc}), para um solo sob tensão confinante constante.

A utilização do parâmetro do estado é essencial, pois ajuda a explicar diversos conceitos como as propriedades do solo drenado e não drenado, o comportamento do solo sob contração e em estado de dilatância, a poropressão negativa versus positiva, assim como estabelecendo o estado inicial, frequentemente descrito em termos de densidade relativa do solo. Há um método, baseado no parâmetro de estado (Ψ), para classificar solos em zonas de contração e dilatância onde, se este parâmetro for maior que $-0,1$ ($-0,1 < \Psi$), o solo está em modo

de contração e haverá risco de liquefação subsequente. Há outro método mais conhecido, desenvolvido por Robertson (2010), da classificação da reação do solo que utiliza as tabelas do tipo de comportamento do solo. O resultado do teste evidencia que algumas seções da região analisada apresentam-se estáveis, com fatores de segurança acima do exigido de 1,2, enquanto outros mostram potencial de instabilidade. Para regiões com fatores de segurança inferior a 1,2, dever-se-á melhorar o solo com geoenrijecimento.

REFERÊNCIAS

- Thomas Kim é engenheiro geotécnico especializado em melhoramento de solos moles.
- Busch, R. A., R. R. Backer, L. A. Atkins, and C. D. Kealy. 1975. Vol. 8062 of Physical property data on fine coal refuse. Pittsburgh: US Dept. of Interior Bureau of Mines.
- Charlie, W. A., T. E. Bretz, L. A. Schure, and D. O. Doehring. 2013. "Blastinduced pore pressure and liquefaction of saturated sand." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 139 (8): 1308–1319. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000846](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000846).
- Coduto, P. D. 2001. *Foundation design: Principles and practices*. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- Cowherd, D. C., and I. J. Corda. 1998. "Seismic considerations for upstream construction of coal refuse dams." In *Proc., 1998 Annual Conf. Las Vegas, NV*, 523–534. Lexington, KY: Association of State Dam Safety Officials.
- D'appolonia Engineering. 2009. *Engineering and design manual: Coal refuse disposal facilities*, prepared for the US. Pittsburgh: Mine Safety and Health Administration.
- Fourie, A. B., B. A. Hofmann, R. J. Mikula, E. R. F. Lord, and P. K. Robertson. 2001. "Partially saturated tailings sand below the phreatic surface." *Géotechnique* 51 (7): 577–585. <https://doi.org/10.1680/geot.2001.51.7.577>.
- Genes, B. E., T. O. Keller, and J. P. Laird. 2000. "Steady state liquefaction susceptibility of high hazard upstream-constructed coal refuse disposal facilities." In *Proc., Tailings Dams 2000*, 47–58. Las Vegas: ASDSO/ USCOLD.
- Hegazy, Y. A., A. G. Cushing, and C. J. Lewis. 2004. "Physical, mechanical, and hydraulic properties of coal refuse for slurry impoundment design." In *Proc., 2nd Int. Conf. on Site Characterization, Geotechnical and Geophysical Site Characterization*, edited by A. Viana da Fonseca and P. W. Mayne, 1285–1292. Rotterdam, Netherlands: Millpress.



SSBI SOFT SOIL BRAZILIAN INSTITUTE

O SOFT SOIL BRAZILIAN INSTITUTE ajuda você a entender solos moles

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

softsoilbrazilianinstitute.com.br

PARCEIROS



SOFT SOIL
BRAZILIAN
INSTITUTE

SOFT SOIL BRAZILIAN INSTITUTE

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

EDIÇÃO

DIRETOR EDITORIAL
M.Sc. Joaquim Rodrigues

DIRETORES ADJUNTOS
Eng^o Thomas Rodrigues
Eng^o Roger Kim
Eng^a Patrícia Tinoco

PUBLICIDADE, ASSINATURA
Cleide Ferreira

EDITOR DE ARTE
Victor Peres

REPRINTS EDITORIAIS
Mariana Tati

FALE CONOSCO

softsoilgroup.com.br

@engegraut

(21) 3154-3250

atendimento@softsoil-brazilianinstitute.com.br