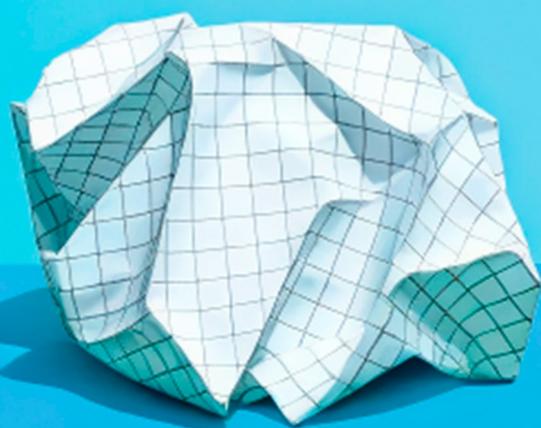


Soft Soil Brazilian Review[®]

*Construções
Logísticas e a
interação
solo-fundação.*



Modelagem numérica e conceitos avançados de deformação do solo, com IA, oferecem orientação para projetos mais econômicos e seguros.

iBSM**INSTITUTO
BRASILEIRO
DO SOLO MOLE**

EDITORIAL

Esta edição, de nossa revista, fornece uma análise abrangente da interação solo-sistemas de fundação, ISF, componente chave para a resolução dos desafios complexos da engenharia geotécnica, em meio ao rápido processo de urbanização e alteração ambiental, que nos submetemos, particularmente no meio logístico. Apresenta os princípios teóricos e as implicações práticas da ISF, enfatizando seu papel na criação de soluções sustentáveis e resilientes. O conteúdo explora a resposta do solo, em diferentes cenários de carregamento, destacando o impacto na confiabilidade e na integridade das estruturas logísticas. A narrativa inclui exemplos reais que demonstram a aplicação prática dos princípios da ISF, defendendo sua integração em metodologias de construções logísticas, de modo a melhorar a economia e a segurança desse tipo de construção. Também apresentamos estratégias inovadoras, de modo a enfrentar os desafios relacionados a ISF, com o emprego de materiais e modelos computacionais mais avançados, sempre objetivando a questão logística. No final das contas, buscamos soluções

voltadas para resistir ao difícil teste do tempo. Percebe-se a necessidade crucial de se trabalhar sobre o solo superficial, mesmo havendo presença de camadas de solos moles. É aí que entra a ISF e o melhoramento do solo, ampliando-se nosso conhecimento com análises numéricas para aplicações geotécnicas complexas. Observa-se um aprimoramento contínuo dos modelos computacionais, para a interação solo-fundação, o que nos ajuda a projetar sistemas de fundação mais econômicos. A medida em que tornam-se mais precisos e versáteis, permite-nos prever e gerenciar melhor o complexo comportamento do solo, principalmente os moles, e da estrutura a ser projetada. A integração da inteligência artificial (IA) e do aprendizado de máquina (AM), na geotecnia do melhoramento do solo, apresenta-se como uma realidade cada vez mais promissora, com ferramentas digitais super avançadas, que auxiliam enormemente na previsão (precisa) do comportamento do solo, na otimização do projeto de fundação e no monitoramento contínuo de seu desempenho.

Boa leitura.

**3**

A INTERAÇÃO SOLO-FUNDAÇÃO EM EMPREENDIMENTOS LOGÍSTICOS. COMPREENDENDO E ELIMINANDO PROBLEMAS.

**16**

O RECALQUE DIFERENCIAL E O EFEITO DO PISO LOGÍSTICO APOIADO NO SOLO.

**24 - CONSULTA**

GOSTARIA DE ENTENDER A INTERAÇÃO SOLO-FUNDAÇÃO, SUA ABRANGÊNCIA E OS LÍMITES EXISTENTES.

**30**

ANÁLISE NUMÉRICA DA INTERAÇÃO SOLO-FUNDAÇÃO (ISF) PARA EMPREENDIMENTO LOGÍSTICO.



A INTERAÇÃO SOLO-FUNDAÇÃO EM EMPREENDIMENTOS LOGÍSTICOS. COMPREENDENDO E ELIMINANDO PROBLEMAS.

Figura 1 – Com o conhecimento da interação solo-fundação, em empreendimentos logísticos, com a presença de solos moles, entende-se perfeitamente as dificuldades inerentes, estabelecendo-se condição para utilização de fundação direta.

A interação solo-fundação é conceito crucial na engenharia geotécnica, contemplando a influência recíproca do solo sobre o qual se apoiam estruturas, encapsulando esta emergência mútua, tornando-se essencial para projetar construções resilientes ou sensíveis a vários tipos de carregamento. Avanços tecnológicos, quase que diários, fazem parte do arsenal das empresas que lidam com a geotecnia do solo mole, particularmente devido a variabilidade e heterogeneidade inerente do solo de fundação, os tipos de estrutura que construímos e a diversidade de carregamentos. Procuramos,

nesta matéria, abordar dificuldades e complexidades da ISF, fornecendo uma visão geral dos aspectos teóricos, discutindo os modelos computacionais avançados e suas aplicações, explorando as práticas sustentáveis na geotecnia do solo mole. O objetivo desta matéria e das anteriores, nas edições 39 e 40, é contribuir para o diálogo e a compreensão tanto no campo como para pesquisas futuras, alertando a comunidade da geotecnia do solo mole para as complexidades da ISF.

Os aspectos teóricos da ISF

Os aspectos teóricos da ISF abrangem uma ampla gama de tópicos, devido a complexa interação entre

engenharia estrutural e a geotecnia. Alguns aspectos importantes são:

- O fundamento básico principal é a interação mútua entre estrutura e solo, onde o comportamento da primeira impacta o estado tensão-deformação do solo, enquanto que a deformação e o movimento do solo influenciam o comportamento da estrutura.
- A ISF pode ser amplamente categorizada em interações de movimento e inércia, onde a primeira refere-se à influência da deformação do solo na estrutura, enquanto a inercial refere-se ao impacto das cargas estruturais no solo.

- O impacto na Resposta Estrutural refere-se em como a estrutura responde ao carregamento. O efeito da ISF torna-se particularmente pronunciado em estruturas posicionadas sobre solos moles, como galpões logísticos, barragens, edificações e estradas.
- A ISF envolve o comportamento não linear do solo e a interface estrutura/ solo, abrangendo ações deformativas complexas.
- Os efeitos da ISF modificam significativamente forças e deformações atuantes em uma estrutura, comparando-a com uma análise 100% rígida, o que resulta em um projeto mais complexo.

Observa-se, então, que a compreensão teórica da ISF é intrincada, envolvendo técnicas de modelagem numérica sofisticadas e conceitos avançados da dinâmica do solo e estrutura. Utilizam-se diversos modelos matemáticos, desde os lineares simplificados até os não lineares para representar o solo, a estrutura e sua interação, geralmente utilizando-se métodos computacionais como a análise de elementos finitos. Os aspectos teóricos da ISF abrangem ampla gama de princípios e conceitos, desenvolvidos ao longo de muitos anos de pesquisa e aplicações práticas, tornando evidente como estruturas e solo interagem, oferecendo orientação para projeto e construção de estruturas seguras e eficazes. A teoria da ISF geralmente inclui a avaliação da distribuição das tensões no solo, a estimativa da deformação e o consequente recalque, considerando a natureza tridimensional tanto da estrutura, quanto do solo, considerando suas propriedades não lineares,

| Aspecto | Desconsiderando a ISF | Considerando a ISF |
|---------------------|--|---|
| Resposta Estrutural | A resposta estrutural pode ser superestimada, considerando-se a compreensão imprecisa do comportamento da estrutura sob carga. | A consideração da ISF conduz a uma estimativa mais realista da resposta da estrutura com diferentes condições de carga. |
| Margem de Segurança | Ignorar a ISF pode superestimar a margem de segurança, considerando-se projetos inseguros. | Incluir a ISF pode fornecer margem de segurança realista, aumentando assim a confiabilidade do projeto. |
| Custos | Desconsiderar a ISF pode resultar em superdimensionamento e despesas desnecessárias. | Considerar ISF pode levar a um projeto mais eficiente, reduzindo potencialmente os custos de construção e manutenção. |

Tabela 2 – Comparação entre considerar e desconsiderar a ISF.



Figura 2 – A homogeneização do solo de fundação com o melhoramento do solo é a melhor opção para neutralizar deformações na estrutura.

res, anisotrópicas e inelásticas para o comportamento da estrutura. As principais considerações na ISF incluem o tipo e a profundidade da fundação, a estratificação e as propriedades do solo, além do tipo e da intensidade das cargas. Por exemplo, fundação direta, tipicamente utilizada em estruturas leves, como condomínios logísticos, estradas, etc, dependem de conceito da capacidade de carga, de modo a garantir a segurança estrutural. Por outro lado, fundação profunda, com estaqueamento, tipicamente utilizado em estruturas mais pesadas, tem seu conceito de resistência tanto a do atrito lateral quanto pela ponta do elemento de fundação, e seu projeto e análise envolvem a compreensão da interação estaca-solo, sob diferentes condições de carga.

Avaliando a interação solo-fundação

Com a compreensão e a apreciação dos fundamentos da ISF, a fase subsequente dever-se-á concentrar nos

métodos de avaliação, incorporando abordagens tanto experimentais quanto computacionais, ajudando a obter insights sobre o complexo comportamento do solo e da estrutura, quando da presença de solos moles e de seu melhoramento. As etapas principais da avaliação são:

- A etapa inicial para a avaliação da ISF é compreender as características do solo e do local, envolvendo investigação geotécnica para determinar o tipo de solo, as camadas e suas propriedades como rigidez e sua densidade.
- Torna-se necessário definir as propriedades da estrutura, como sua massa e rigidez.
- Subsequentemente, analisar a interação entre a estrutura e o solo, torna-se o próximo passo crucial, envolvendo vários métodos, que variam de simplificados a mais sofisticados, modelado todo o sistema solo-estrutura. A escolha do método, dependerá das especificidades da estrutura e do local, da importância da estrutura e dos recursos disponíveis para análise.
- Os resultados da análise da interação, necessitam ser interpretados para entender suas implicações no projeto da construção, verificando-se a resposta em relação aos critérios de projeto relevantes, considerando os efeitos

| Técnica de Modelagem | Aplicações |
|---------------------------------------|--|
| Método de Elementos Finitos (MEF) | Ideal para simular problemas complexos da ISF, com diversas propriedades do solo e restrições geométricas. |
| Método de Elementos de Contorno (BEM) | Eficiente na modelagem de regiões de solo sem limitação, reduzindo o esforço computacional em grandes problemas da ISF |
| Métodos Semianalíticos | Oferece soluções rápidas para problemas simplificados da ISF, permitindo a compreensão da física subjacente sem grandes cálculos |

Tabela 1 – Diferentes técnicas de modelagem da ISF e suas aplicações.



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

tos da ISF, e avaliando-se a necessidade do melhoramento do solo.

- Dependendo dos resultados da análise da interação, pode ser necessário reanalisar o projeto da estrutura, envolvendo alterações no projeto, da fundação ou, até mesmo, na preparação do solo.
- A etapa final é a verificação e a validação da análise da interação, envolvendo comparar o comportamento previsto com o observado em estruturas ou locais semelhantes ou utilizar outras formas de verificação, como revisão por pares ou análises adicionais.

Ao se avaliar meticulosamente a ISF, poder-se-á projetar estruturas mais resilientes, com ambientes construídos mais seguros e sustentáveis.

Abordagem Computacional

A abordagem computacional, para avaliar a ISF, envolve a utilização de métodos numéricos para simular o comportamento do solo e da estrutura. O Método dos Elementos Finitos (FEM) e o Método das Diferenças Finitas (FDM) são amplamente utilizados devido à sua versatilidade na modelagem de geometrias e solos complexos. No entanto, podem ser exigentes em termos computacionais, especialmente para problemas de grande escala ou complexos. Na realidade, emprega-se métodos simplificados, como os métodos da subestrutura e o da linearização equivalente, para aplicações práticas de projeto, aproximando o comportamento da ISF com um grau aceitável de precisão, enquanto reduzem significativamente o custo computacional. A escolha da abordagem computacional depende da especificidade do problema, incluindo a natureza do solo e da estrutura, o tipo de carga e o nível de detalhe necessário na análise, como na tabela a seguir.

| Abordagem Computacional | Descrição | Vantagens | Limitações |
|---------------------------------------|--|--|--|
| Método de elementos finitos (FEM) | Técnica numérica para encontrar soluções aproximadas para problemas de valor de contorno em equações diferenciais, subdividindo grandes sistemas em partes menores e mais simples, chamadas elementos finitos. | Modelagem de geometrias complexas e materiais heterogêneos. Podendo trabalhar com comportamento não linear. | Computacionalmente intenso, especialmente para sistemas grandes ou para problemas não lineares, exigindo uma seleção cuidadosa de tipos de elementos e refinamento da malha. |
| Método de elementos de contorno (BEM) | Método numérico computacional para solucionar equações diferenciais parciais lineares, formuladas como equações integrais. Pode ser aplicado em várias áreas da engenharia | Menos intensivo computacionalmente do que o FEM para muitos problemas. Apenas contorno da região precisa ser malhada. | Não é adequado para problemas envolvendo não linearidade ou heterogeneidades. |
| Método das diferenças finitas (FDM) | Método numérico para resolver equações diferenciais, ao aproximar derivadas com diferenças finitas. | Simples de implementar e entender. Menos intensivo computacionalmente do que o FEM para muitos problemas. | Talvez não lide tão bem com geometrias complexas ou materiais heterogêneos quanto o FEM. |
| Método de elementos discretos (DEM) | Técnica numérica que calcula a interação de um grande número de partículas (como solos). | Ideal para problemas com grandes deslocamentos e rotações, e onde a estrutura do material evolui durante a carga (como solo granular). | Pode ser intensivo computacionalmente para sistemas com um grande número de partículas. |

Tabela 2 – Abordagem computacional para se avaliar a interação solo-fundação: Visão geral, vantagens e limitações.



Figura 3 – Empreendimentos logísticos portuários, invariavelmente sobre solos moles, com a ISF, ganham mais rigidez e economia em sua execução.

Success Factors
SIG WORKSHOP

Image courtesy of Adviseurs in Bouwtechniek (ABT)

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

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

PLAXIS: Simulating Soil Lab Tests

www.bentley.com

Dear User,

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

The agenda for the one-hour session encompasses:

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

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

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



Figura 4 - Melhoramento com homogeneização de solos moles em área portuária fluvial para receber carga de contêineres.

Apesar da disponibilidade dessas abordagens, a avaliação da ISF está repleta de dificuldades, resultante da interação entre o comportamento não linear e histérico do solo, com o comportamento da estrutura, tornando difícil a modelagem e a análise. Além disso, as incertezas nas propriedades do solo e seu movimento, influenciam significativamente o resultado da avaliação. Consequentemente, há necessidade urgente de métodos que possam acomodar adequadamente as incertezas. Observa-se, portanto, que a avaliação da ISF é um empreendimento complexo, que abrange várias dificuldades, incluindo, mas não se limitando a:

- Complexidade na modelagem, pois a ISF envolve a interação entre diversos tipos de materiais como concreto, aço e inúmeros tipos de solo, que apresentam comportamento não linear, dependente da avaliação dos parâmetros do solo, assim como da trajetória de tensões.
- A estrutura e sua fundação, pode ter geometria complicada, assim como as camadas do solo, como camadas moles que apresentam complexidade geotécnica, especialmente em locais com estratigrafia irregulares. Essa complexidade pode tornar a análise mais difícil.
- Na maioria das vezes existe incerteza significativa nas propriedades do

solo, na condição de carregamento e nos parâmetros da modelagem, tornando difícil fazer previsão precisa sobre o comportamento do sistema a ser construído.

- 4. A análise da ISF pode exigir grande esforço computacional, especialmente para sistemas grandes ou complexos, ou quando o comportamento não linear é incorporado ao modelo, limitando a viabilidade de realizar análises detalhadas, particularmente para trabalhos de projetos menores.
- 5. Pode ser difícil validar o modelo computacional utilizado na análise da ISF devido à dificuldade em realizar testes em escala real e às incertezas envolvidas na interpretação de seus resultados.

As dificuldades relatadas tornam necessário uma combinação de modelagem computacional sofisticada, interpretação cuidadosa de dados de testes de campo e laboratório, além da participação de empresa especializada em melhoramento de solos.

O que tem de atual na avaliação da ISF.

Recentes avanços em tecnologias e nos métodos computacionais, abriram novos caminhos para a avaliação da ISF. A computação de alto desempenho abriu caminho para simulações

da ISF, mais complexas e realistas. Paralelamente, novos avanços nos métodos numéricos, como o desenvolvimento de modelos de solo não lineares e métodos de análise estocástica, aumentaram a precisão e a confiabilidade da avaliação da ISF. Além disso, técnicas inovadoras, como os sensores de sistemas microeletromecânicos (MEMS) e a correlação de imagem digital (DIC), aprimoraram a precisão e expandiram o alcance das medições da ISF, ampliando os dados disponíveis para validar modelos computacionais. Embora ofereçam caminhos promissores, simultaneamente ressaltam a importância da pesquisa e do desenvolvimento contínuo para refinar ainda mais o estado da arte na avaliação da ISF.



Figura 5 - Melhoramento do solo em área portuária fluvial, necessário à construção logística.

Resolvendo as dificuldades da ISF

O objetivo da ISF é orientar o projeto e a construção de estruturas insensíveis à deformações e instabilidades. De fato, capturar com precisão, o comportamento complexo da ISF, apresenta dificuldade significativa. Portanto, há um esforço contínuo para aprimorar os modelos existentes e na criação de novos. Avanços recentes, nas técnicas de modelagem numérica, como a análise dinâmica não-linear, o método probabilístico e a simulação híbrida, mostram, atualmente, que já se pode fornecer previsão precisa para a ISF. Por exemplo, a técnica de simulação híbrida, onde uma parte do sistema é modelada numericamente e o restante experimentalmente, destaca-se como método popular para análise de problemas complexos da ISF, objetivando-se equilíbrio entre o realismo oferecido por testes experimentais e a adaptabilidade inerente à simulação numérica. Além dos avanços nas técnicas de modelagem, novos métodos e tecnologias inovadoras, para melhoramento de solos complexos também foram desenvolvidas, de modo a se eliminar os efeitos da ISF. A técnica de melhoramento do solo, objetiva readequar as propriedades do solo, eliminando seu potencial deformativo ou de instabilidade, particularmente pelo processo de heterogeneização imposto.



Figura 6 - Este empreendimento logístico começou ser executado sobre fundação direta, com presença de solos moles, sem qualquer melhoramento. Os pilares pré-moldados antes da execução da cobertura começava a apresentar desaprumo e recalques. Necessidade de melhoramento do solo sob as sapatas e todo piso.

Estes esforços, para eliminar as dificuldades da interação solo-fundação, também refletem-se em diversos códigos e diretrizes de projeto, oferecendo as empresas executoras, métodos práticos e critérios para incorporar considerações da ISF no projeto e a avaliação da estrutura. No entanto, baseiam-se em uma compreensão simplificada da ISF, podendo não considerar totalmente sua complexidade. Portanto, a pesquisa e o desenvolvimento contínuos são essenciais, para aprimorar essa necessidade e garantir que reflitam o entendimento mais recente, além dos avanços no campo da ISF. A técnica de melhoramento do solo com geoenrijecimento desempenha papel crucial na gestão dos riscos associados à ISF, visando aprimorar as características inerentes do solo, sejam arenosos fofos ou argilosos moles.



Figura 7 - Esta área industrial, com presença de solos moles e de fabricação de cartões de crédito, tinha pilares assentados sobre fundação profunda e piso sobre fundação direta. O piso, com o tempo, começou a ter problemas de recalque diferencial, necessitando de melhoramento do solo, de modo a igualar o nível de rigidez do estaqueamento...

O mercado imobiliário de condomínios logísticos/ industriais cresce vertiginosamente, consolidando-se como investimento atraente, face à boa qualidade e infraestrutura adequada para locação e venda. O ambiente industrial tem se mostrado cada vez mais competitivo e complexo, exigindo que empresas operem cada vez mais eficientes, capazes de fornecer inovações, reduções de custos, e também novas opções de serviços agregados a suas atividades fim. Com o fortalecimento cada vez maior do conceito de condomínios

industriais, investidores institucionais de galpões industriais começam a migrar pra este tipo de investimento, concorrendo com a entrada de novos investidores estrangeiros, altamente profissionais, que procuram diversificar suas operações, após consolidação de outros setores do mercado imobiliário. Neste particular, estas grandes áreas estratégicas situam-se, invariavelmente, sobre solos problemáticos, sejam argilosos moles, expansivos ou cársticos que, a nível de custo, tornam-se atraentes. No entanto, o solo necessita de melhoramento específico. O CPR Grouting, técnica de melhoramento exclusiva para solos argilosos moles que, por ser inerente a este tipo de solo, apresenta custo-benefício extremamente adequado, rápido e 100% seguro. O dimensionamento do CPR Grouting é feito com parâmetros do solo e do projeto previsto, através de software específico, oferecendo todas as diretrizes executivas, tornando o solo rígido, adequado ao projeto. De um modo geral, constitui-se da cravação de malha de geodrenos, intercalada com malha de verticais de bulbos de compressão e adensamento do solo com geogROUT, via expansão de cavidades, de baixo para cima, escalonadamente, a partir do solo resistente, para cada metro de profundidade, promovendo a consolidação do solo e, ao mesmo tempo, impondo níveis de rigidez bem superiores às exigências de projeto. Toda a mecânica executiva é acompanhada com monitoramento do excesso e dissipação da poropressão causada que, com os módulos pressiométricos, indicam o grau de consolidação e rigidez impostos. O resultado é o aumento substancial da resistência efetiva e da rigidez do solo mole, ao



Figura 8 - A medida em que o solo mole de fundação era melhorado, o piso era renovado para a condição original.

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

● **Conhecimento**

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

● **Comodidade**

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

● **Feedback**

Tire todas as dúvidas com profissionais do mercado, gratuitamente.

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

Para mais informações, acesse: softsoilgroup.com.br

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



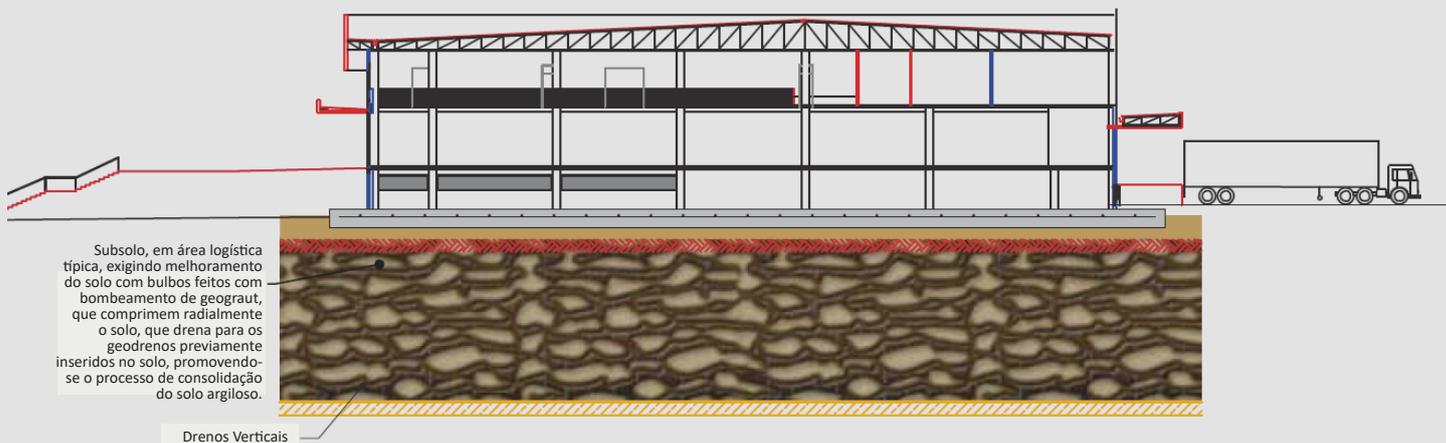


Figura 9 - Esquema executivo de melhoria de solo em galpões logísticos com presença de solos moles.

longo de toda a sua profundidade. Um dado interessante é que o solo reforçado passa a trabalhar, imediatamente, como solo homogêneo rígido. Todas as cargas de projeto, a serem impostas, serão distribuídas sobre a camada de aterro de maneira uniforme, sem os inconvenientes causados por soluções a base de estacas e colunas, que impõe transferência de cargas, estabelecendo recalques diferenciais nas áreas não tratadas.

Interação solo-fundação. A boa gestão

Gerenciar os efeitos da ISF, exige a implementação de uma estratégia abrangente, que considera todos os fatores mencionados anteriormente. Esta estratégia pode incluir investigação detalhada do local, análise geotécnica, design estrutural adequado e utilização de tecnologia para melhoria do solo. O papel da modelagem numérica também é vital na gestão da ISF. Modelos numéricos, que simulam o comportamento do solo e da estrutura, sob diferentes condições de carga, fornecem valiosos insights sobre o impacto da ISF, orientando o projetista e a construtora, ajudando a eliminar todos os seus efeitos. Embora as dificuldades impostas pela ISF sejam consideráveis, podem ser efetivamente gerenciadas por meio da combinação de técnicas de engenharia e práticas de design inovadoras. Pesquisa e desenvolvimento contínuos nesta área, permitirão ampliar o entendimento



Figura 10 - Melhoramento do solo mole de fundação em todo o piso do empreendimento logístico, devido a presença de solo mole.

sobre a ISF, orientando o desenvolvimento de soluções mais eficazes para eliminar seus efeitos. O campo da ISF é uma área vital de estudo, que possui potencial significativo para melhorar a resiliência e a segurança da futura estrutura, especialmente em regiões com solos complexos. Na sequência, alguns trabalhos que destacam dificuldades impostas pela ISF, em projetos reais, bem como abordagens utilizadas para enfrentá-las, fornecendo exemplos concretos

dos princípios e técnicas apresentadas. Realizou-se uma variedade de estudos de casos para entender as implicações da ISF, em circunstâncias reais. As principais descobertas desses estudos de caso são apresentadas à seguir.

Caso 1 - Modelos computacionais na interação solo-fundação



Figura 11 - Construção logística, onde a ISF viabiliza solução de fundação mais segura e econômica.

O campo da interação solo-fundação, revolucionado por avanços computacionais e tecnologias próprias, permitem modelos computacionais mais sofisticados e precisos, de modo a se prever o comportamento do solo e da estrutura a ser construída sob condições variadas, facilitando a compreensão das complexidades da ISF, oferecendo base quantitativa para projetar e avaliar soluções geotécnicas. Utilizam-se, frequentemente, métodos de elementos finitos (FEM) e métodos de elementos de contorno (BEM) para analisar problemas da ISF, permitindo que repliquemos o comportamento intrínseco do solo e da estrutura, em ambiente computacional, gerando insights sobre sua interação, sob carregamentos diversos. Outros modelos computacionais inovadores, como o método de elementos distintos (DEM), também são utilizados devido



Figura 12 - A interação solo-fundação é cada vez mais utilizada para projetar soluções geotécnicas realistas e mais adequadas.

à sua capacidade de simular a natureza granular do solo com mais precisão, minimizando custos e incertezas associadas à abordagem tradicional e empírica.

Caso 2 - Aterros de Rodovias

O segundo caso refere-se à construção e a ampliação de aterros rodoviários, sobre solos moles compressíveis, como parte de um amplo projeto de melhoria de rodovias no sul do país, devido à enorme probabilidade



Figura 13 - Melhoramento do solo para execução de aterro de encontro necessário a uma ponte na BR-265 próximo a Ervália, MG.

de recalque e instabilidade, sob o peso dos aterros. Projetistas utilizam abordagem inovadora, incorporando a única técnica efetiva de melhoria do solo, para readequar as propriedades do solo, homogeneizando-o. A solução foi iniciada com a cravação de geodrenos, de modo a possibilitar o processo de drenagem nas camadas argilosas moles. Na sequência, realizaram-se verticais, por onde a tubulação de bombeamento faz os

bulbos com graut, via expansão de cavidades, para comprimir radialmente o solo, induzindo sua consolidação com parâmetros de rigidez e resistência pré-estabelecidos. O projeto também beneficiou-se de investigação geotécnica abrangente, que permitiu à equipe ajustar o design da obra, de melhoria do solo, garantindo sua eficiência. A modelagem numérica, ajudou a entender o comportamento do solo sob as cargas dos aterros. Ao longo do projeto, a equipe monitorou atentamente qualquer surgência de recalque, assim



Figura 14 - A elevação do aterro, após o melhoramento do solo, para a construção de viaduto na BR-470, em Itajaí, SC.

como a estabilidade dos aterros. Essa abordagem proativa, permitiu a identificação precoce de possíveis problemas e a implementação de medidas corretivas necessárias. O projeto foi concluído com sucesso, demonstrando o desempenho sob as cargas dos aterros executados, enfatizando a impor-

ROCTEST

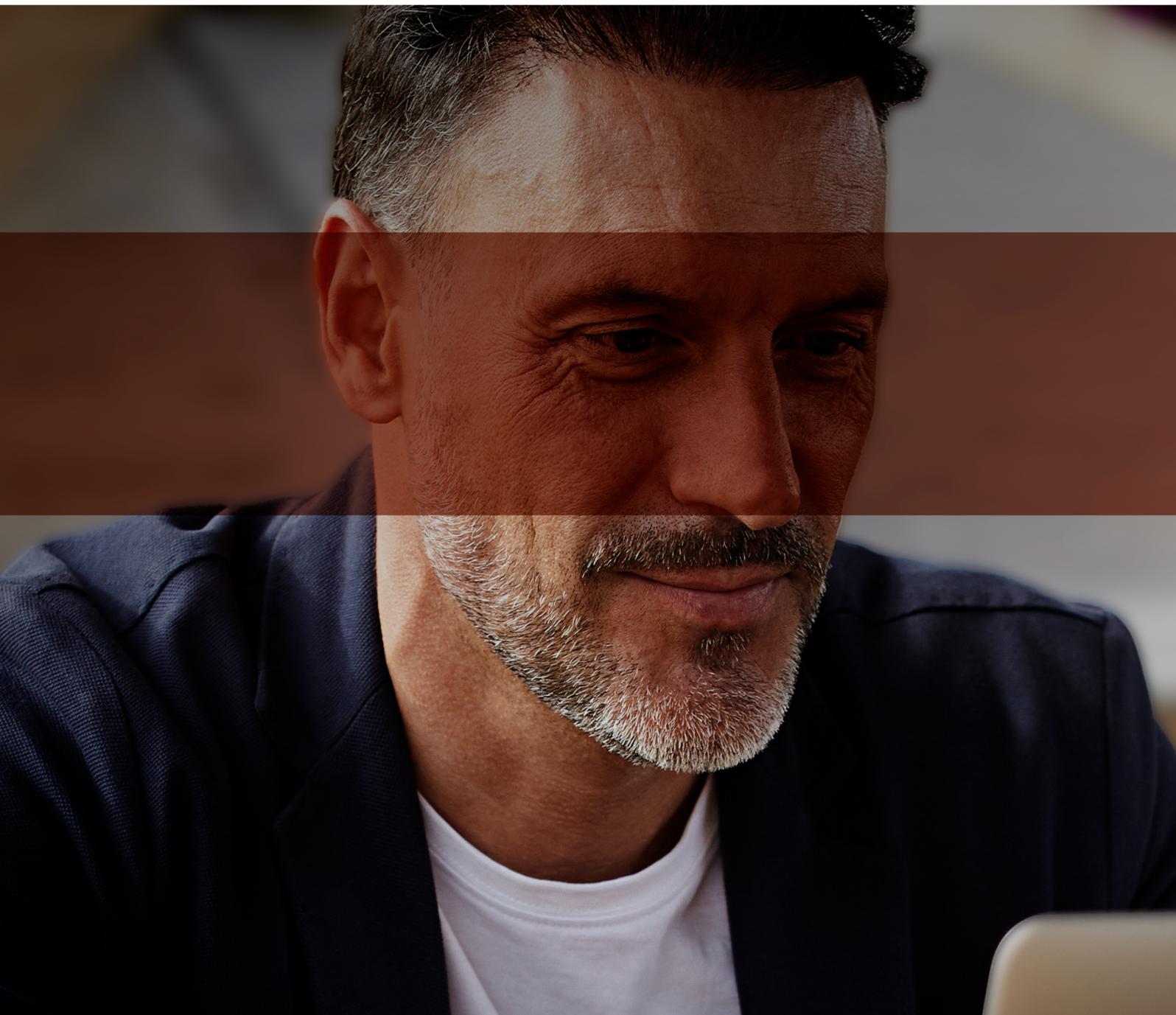


PIEZÔMETRO AUTOCRAVÁVEL (PWP)

A série PWP de piezômetros de corda vibrante (autocraváveis) foi projetada para medir, com precisão, a poropressão em depósitos de solos moles. Suas características são:

- **ROBUSTEZ**
- **PRECISÃO**
- **CONFIABILIDADE**

Representante exclusivo no Brasil: **3GEO TECNOLOGIA LTDA**
+55 21 2718 3968 / vendas@3geotecnologia.com / www.3geotecnologia.com



:: 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](https://softsoilbraziliangroup.com) E ESCOLHA
A EDIÇÃO IDEAL PARA SUA PESQUISA.



tância de entender e gerenciar a interação solo-fundação, durante o projeto e a construção da infraestrutura.

Caso 3 - Implementando fundação sustentável em construções urbanas

A liquefação do solo representa grande ameaça à região amazônica, clara e evidente, devido os grandes deslizamentos que ocorreram na região portuária de Manaus, em 2010, causando danos estruturais substanciais, onde quase um quilometro de extensão veio abaixo, com grandes perdas de áreas (portuárias), equipamentos e vidas. Até então, todo tipo de contenção para taludes tinha sido empregado, como estaqueamento, muros de contenção, colunas de jet grouting, paredes estaqueadas, tirantes, etc, sem sucesso. A análise da ISF, permitiu entender o fenômeno das terras caídas, possibilitando idealizar solução específica com melhoramento do solo, utilizando o CPR Grouting, eliminando de vez o risco de liquefação do solo não só em Manaus, mas como em outros municípios da Amazônia. Este estudo de caso, exemplifica como uma combinação de práticas de engenharia geotécnica, fundamentada pela compreensão aprofundada da interação solo-fundação, pode proteger estruturas e, mais importante, salvar vidas em regiões propensas a liquefação do solo.

Caso 4 - Lidando com solos expansivos

Solos expansivos, que sofrem alterações consideráveis de volume, ou seja, contração e expansão, devido à variações no seu teor de umidade, é problema frequente na engenharia geotécnica, resultando em danos significativos à fundações e estruturas. Um exemplo foi encontrado durante a construção de um empreendimento logístico, no município de Cabo, em Pernambuco, onde o solo argiloso expansivo apresentou riscos substanciais. A estratégia de solução envolveu melhoramento do solo

com CPR Grouting e projeto do sistema de fundação com sapatas e pavimento em concreto armado capaz de eliminar alterações volumétricas do solo expansivo subjacente. Com o melhoramento do solo, o condicionamento da umidade específica do local foi radicalmente eliminado, acabando com futuras mudanças de volume. Durante as etapas de projeto e execução do sistema de fundação, considerações cuidadosas sobre a interação solo-fundação (ISF) foram fundamentais. A conclusão bem-sucedida deste projeto destacou a importância de entender e solucionar a ISF ao lidar com solos expansivos.

Caso 5 - Fundações de pontes em áreas propensas a enchentes

Construir pontes em áreas propensas a enchentes exige atenção especial devido ao impacto potencial da erosão provocada pelos rios na estabilidade das fundações. As dificuldades

relacionadas à interação solo-fundação (ISF) foram claramente apresentadas durante o projeto do aterro de encontro de uma ponte, sobre o Rio Itajaí-Açu, em Santa Catarina. Para garantir a estabilidade, contra cargas laterais devido aos efeitos potenciais da erosão, todo o maciço sob o aterro de encontro, inclusive envolvendo o estaqueamento foi protegido com melhoramento do solo. O projeto exigiu modelagem numérica complexa, para entender a ISF, sob a influência combinada de camadas de solo mole, do fluxo do rio e da erosão potencial. A conclusão bem-sucedida deste projeto, destacou o papel crucial da ISF no projeto na construção da fundação de pontes, em ambientes críticos, ressaltando que compreender a ISF é essencial para gerenciar diversos desafios na engenharia de fundações, que podem diferir significativamente com base nos atributos específicos do local e da estrutura.



Figura 16 - Execução da base de uma rodovia estadual no norte do Rio de Janeiro, após o melhoramento do solo e a construção do aterro para obtenção do greide de projeto.



Figura 14 - Neste projeto que envolve o melhoramento do solo na borda da lagoa de Jacarepaguá, para a construção do evento “Rock in rio”, utilizou-se areia dragada da lagoa, como insumo para o melhoramento do solo mole local.

Reutilização de solo escavado, dragado e contaminado.

Outra prática sustentável, na engenharia do melhoramento do solo para fundações, é o reaproveitamento de solos, sejam escavados, dragados ou contaminados que, ao invés de tratá-los como resíduos, o que é problemático, podem ser processados e reutilizados em projetos de melhoramento de solos de fundação. As técnicas de melhoramento do solo, com CPR Grouting ou Compaction Grouting podem utilizar estes “solos” como insumos para promover o melhoramento do solo de fundação. Práticas sustentáveis como esta, na engenharia de fundações, tem imenso potencial para enfrentar diversos desafios relacionados à interação solo-fundação. À medida que os avanços neste campo continuam a ocorrer, espera-se que a integração de princípios sustentáveis na geotecnia torne-se cada vez mais comum no futuro.

O que nos espera

Compreender a complexidade da interação solo-fundação, é essencial para projeto e construção de estruturas seguras e confiáveis. Como

mostrado nos estudos de caso apresentados, a gestão da ISF exige abordagem multidisciplinar, envolvendo unir investigação geotécnica, modelagem numérica avançada, solução de melhoramento do solo, além de monitoramento contínuo de desempenho. Olhando para o futuro, os desafios associados ao ISF, sem dúvida, continuarão. Mudanças climáticas, urbanização e avanços tecnológicos são apenas alguns dos fatores que impulsionarão essa transformação. Geotécnicos precisam se manter atualizados com esse desenvolvimento, ajustando-se sua prática conforme necessário. Há um vasto potencial para se aproveitar tecnologias avançadas, afim de melhorar nossa compreensão e gestão da ISF, incluindo sensores para monitoramento em tempo real do comportamento do solo e da estrutura, técnicas avançadas de investigação geotécnica, aplicação de inteligência artificial e aprendizado de máquina para otimizar o design de fundações e sua previsão de desempenho. A sustentabilidade é outra tendência importante, sendo essencial que projetistas considerem os impactos ambiental e social, buscando maneiras de minimizá-los por meios sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- Joaquim Rodrigues é engenheiro civil M.Sc. Formado no Rio de Janeiro em 1977 e pós-graduado pela COPPE na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Diretor do Instituto Brasileiro do Solo Mole e da Engenraut Geotecnia e Engenharia, associada à ABMS e ao American Society of Civil Engineers desde 1994. Desenvolveu duas técnicas de melhoramento de solos moles, sendo motivo de patente o GEOENRI-JECIMENTO, utilizada hoje em todo o Brasil.
- Ali Akbar Froozi - 2023. *Soil Structure interaction: Undestandy and mitigation challenges.*
- Magi M, Froozi AA, 2020, *A review: Study of integral abutment bridge with consideration of soil structure interaction.*
- Pan Y. Zhang L. 2021: *Rules of artificial intelligence in construction engineering and management. A critical review and future trends.*
- Gue, S.S., Tan, Y.C. 2004. *Prevention of failures related to geotcnical works on soft ground.*
- BREBBIA, C.A.; TELLES, J.C.E. WROBEL, L.C. (1983). *Boundary Element Techniques*

O RECALQUE DIFERENCIAL E O EFEITO DO PISO LOGÍSTICO APOIADO NO SOLO.

Figura 1 - Neste empreendimento logístico, com presença de solos moles, os pilares foram assentados sobre fundação profunda (desnecessário) e o piso diretamente no solo, após o melhoramento do solo, que estabeleceu o mesmo nível de rigidez do estaqueamento.

Todos sabemos da complexa dificuldade em se prever processos de recalque, na fundação de empreendimentos logísticos, já que dependem das características do solo, da fundação empregada e da própria estrutura logística. Ou seja, trata-se de um problema indeterminado, devido a exata distribuição das tensões de contato sob a fundação, que admitem três métodos para cálculo:

1º A análise convencional

Neste método, as tensões de contato representam a distribuição das ações verticais na interface do piso logístico com o solo de fundação, determinadas a partir da equação do equilíbrio e das dimensões da fundação, desprezando-se as deformações do solo. A fundação é considerada rígida, inicialmente, de modo que as tensões de contato va-

riam, dependendo de diversos fatores, como:

- Rigidez da estrutura do piso, ou seja, pisos mais rígidos tendem a distribuir melhor as cargas, resultando em uma distribuição mais uniforme das tensões de contato;
- Características do solo de fundação, como sua compressibilidade e heterogeneidade;
- Carga aplicada pela estrutura, incluindo-se o peso próprio e as cargas externas.

Procuramos analisar diferentes configurações de rigidez para uma base de fundação (flexível, semirrígida e rígida), avaliando-se como influencia a forma como a carga é transmitida ao solo, ou seja, como variam as tensões de contato ao longo desta base. Duas observações importantes são apresentadas:

- Em pisos rígidos, a tensão de contato tende a ser mais uniforme, o que reduz o recalque diferencial.
- Em pisos flexíveis, a carga não se

distribui de forma homogênea, concentrando tensões em determinadas áreas, o que leva a maiores tensões de contato localizadas e, consequentemente, maior recalque diferencial.

Em termos geotécnicos, na análise da interação solo-estrutura, as tensões de contato funcionam como condição de contorno superior. Quando o piso é considerado rígido, muitas vezes admite-se uma distribuição uniforme das tensões, no entanto, na realidade (ou em modelos mais refinados), pode ser muito mais complexa, dependendo da deformabilidade tanto da fundação quanto do solo. O plano de contato, sob o sistema de fundação, permanece nivelado após a aplicação da carga, considerando-se movimentos de translação e rotação apenas. A reação do solo de fundação, segue com distribuição linear ao longo da base (hipótese simplificada para modelagem sobre solos compressíveis), enquanto a resultante das tensões de contato, entre o solo e a fundação, coincide com a linha de ação da força resultante de to-



das as cargas que atuam. Muito comumente, utiliza-se a equação de Navier, (sugestão do comitê ACI 436, 1966), para modelar a distribuição das tensões de contato entre a fundação e o solo, já que é clássica na teoria da elasticidade, descrevendo comportamento de placas sobre fundações elásticas, ou seja, como um piso (logístico) se deforma e transmite carga para o solo subjacente. Esta equação é utilizada para avaliar a influência da rigidez do piso de concreto, apoiado diretamente no solo, ou do

Preparação da base do pavimento logístico para ser apoiado diretamente no solo.

sistema de fundação e a distribuição das tensões de contato. Quando o piso de concreto for mais rígido, tende a “redistribuir” a carga de forma mais uniforme, evitando ou minimizando recalques diferenciais. Quando for mais flexível, a

tensão de contato acompanha mais diretamente a deformação do solo, o que intensifica recalques diferenciais. Todas estas preocupações tornam-se nulas quando promove-se o melhoramento do solo com geoenrijecimento.

AS CARGAS QUE ATUAM NA FUNDAÇÃO

Quando uma fundação transmite carga ao solo, é distribuída ao longo de sua base, como pressão de contato, podendo ser:

- Uniforme, se a fundação é perfeitamente rígida e a carga é controlada.
- Linear (com forma trapezoidal ou triangular) se houver momento fletor ou excentricidade.
- Assimétrica, se o solo for heterogêneo ou a fundação for flexível.

A resultante das tensões de contato, entre o solo e a fundação, chamada de centróide de pressão no solo, deve coincidir com a linha de ação da carga resultante, aplicada pela estrutura, caso contrário haverá momentos de tombamento e surgirá rotação ou/ e recalques diferenciais. Se a

fundação recebe uma carga centrada verticalmente, a pressão de contato será simétrica, e o centróide coincidirá com o centro geométrico da base. Se, por outro lado, houver uma excentricidade (carga deslocada), o centróide da pressão desloca-se em direção apostada, gerando momento de rotação, com pressões maiores de um lado e menores (ou nulas) do outro.

Formação em Gestão de Riscos

ALTO

MÉDIO

BAIXO



Gestão de Riscos 1

CLIQUE AQUI!

Curso introdutório, necessário para refletirmos e nos questionarmos de como devemos interagir com o que nos rodeia e para transformar riscos em aliados.



Gestão de Riscos 2

CLIQUE AQUI!

Um curso prático para aquelas pessoas que tem objetivos na vida e desejam viver melhor, sem riscos. É um curso completo para preparar o aluno para ter disciplina e perseverança na sua profissão e na identificação e gestão de riscos continuamente.



Gestão de Riscos 3

CLIQUE AQUI!

Um curso avançado para aquelas pessoas que querem ir além, que gostaram do tema gestão de riscos e querem aprender a estimar probabilidade, impacto e conhece a terceira dimensão. O tempo até o impacto.

+1.5k

Alunos Treinados ao longo dos anos.

Prof. Fernando Affonso
Especialista em Riscos

Sobre o Curso

Em um mundo dinâmico e repleto de incertezas, a capacidade de identificar, avaliar e gerenciar riscos é essencial para o sucesso de qualquer pessoa ou organização. A Formação em Gestão de Riscos foi desenvolvida para oferecer um conhecimento sólido e prático sobre estratégias de mitigação de riscos, independentemente do setor de atuação.

Composta por três cursos complementares, esta formação proporciona uma visão ampla e aplicada sobre os principais conceitos, ferramentas e metodologias utilizadas na gestão de riscos. Seja você um empreendedor, profissional de qualquer área ou alguém que deseja aprimorar sua tomada de decisões, este programa é ideal para fortalecer sua capacidade de antecipação e resposta a desafios, garantindo maior segurança e eficiência em seus projetos e negócios.

QUERO SER UM ESPECIALISTA EM
GESTÃO DE RISCOS

2º - A teoria da reação vertical ou do subleito (modelo de winkler)

É um modelo simplificado, que representa o solo como um conjunto de molas independentes, onde cada ponto da fundação está apoiado sobre uma mola que:

- Resiste proporcionalmente ao recalque local (compressão).
- Não interage com molas vizinhas (cada uma atua independente).

A equação que representa esta teoria é $q = Ks \cdot W$, onde q é a tensão de contato no ponto considerado, Ks é o coeficiente de reação vertical ou do subleito, também chamado de módulo de reação do solo, em KN/m^3 ou Tf/m^3 , e W é o recalque no ponto considerado. A interpretação prática desta teoria é que, se o solo for mole, o recalque W será maior, e o modelo calcula uma tensão de contato menor, a menos que a fundação seja mais rígida. Se, por outro lado, o solo for mais rígido, “empurra de volta”, e a tensão de contato, q , será maior para o mesmo recalque. Trata-se de um modelo bem simples, servindo para se utilizar em pisos e lajes de concreto, sejam industriais ou logísticos, apoiados diretamente no solo, ou apoiados em sapatas rígidas. É a base de softwares de análise de fundações elásticas (tipo SAP 2000, SAFE, etc). Como limitação, ignora o comportamento tridimensional real do solo, não considerando a interação entre pontos vizinhos (na realidade o solo distribui cargas lateralmente), e o KS não é uma constante do solo, pois depende da geometria da fundação, da profundidade, rigidez do piso, etc.

Análise numérica com aplicação de diferentes leis ou modelos constitutivos

Devido à limitação dos métodos acima, torna-se necessário um que possa avaliar a transmissão cisalhante do solo, otimizando a distribuição das tensões de contato. Recomenda-se, portanto, utilizar modelos mais realistas sabendo-se, de antemão, que sua complexidade os torna menos atraente do que os métodos mencionados. Recomenda-se,

então, uma análise numérica, utilizando diferentes modelos constitutivos, o que permitirá considerar o efeito da rigidez da fundação sobre as tensões de contato. A figura 2, abaixo, mostra solução numérica para as tensões de contato, sob fundação em meio elástico, com diferentes rigidezes, onde K representa o coeficiente de rigidez da sapata, tornando-se complexa quando

a estrutura é modelada com sapatas. O método dos elementos finitos, portanto, é o mais recomendado para estudar a interação solo-fundação, simulando-se o solo e a estrutura, com elementos de malha, utilizando-se diferentes modelos constitutivos, com modelos elásticos ou plásticos, onde o principal conceito do cálculo é a equação de compatibilidade.

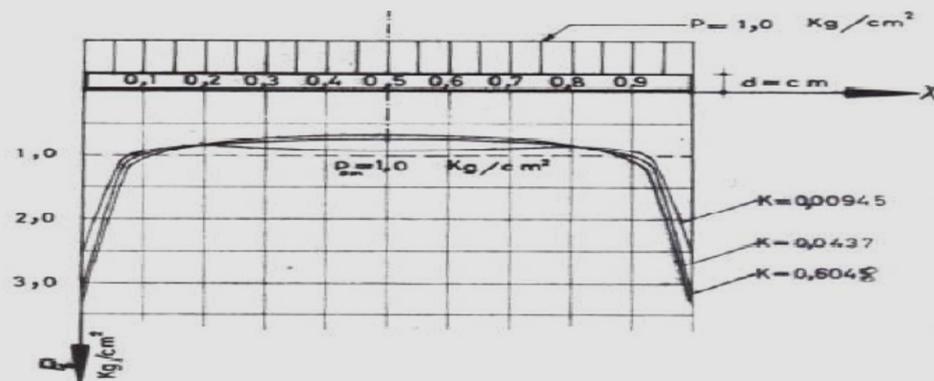


Figura 2 - Solução numérica para as tensões de contato na fundação em meio elástico com diferentes rigidezes.

MODELOS CONSTITUTIVOS E SOFTWARES

A utilização de modelos matemáticos, para descrever o comportamento do solo, quando submetido a tensões e deformações, torna-se crucial em simulações de fundações, exatamente pelo fato de que, na realidade, não se comporta como um material elástico ideal, sendo que diferentes solos reagem de formas muito distintas. Os modelos constitutivos são equações que relacionam tensão σ , e deformação, ϵ , característicos do solo. Com a análise numérica, é possível considerar o efeito da rigidez da fundação e as tensões de contato. Os tipos de modelos constitutivos aplicados, na análise numérica geotécnica, são os seguintes:

• Modelo Linear Elástico (Hooke)

- Simples, assume resposta reversível e proporcional entre tensão e deformação;
- Não representa bem o comportamento real de solos moles ou plásticos;
- Útil para uma primeira aproximação e solos rígidos.

• Modelo Elasto-Plástico (Mohr-Coulomb)

- Considera que o solo se deforma elasticamente até um

certo ponto (limite de escoamento);

- Depois entra em regime plástico, com deformações permanentes;
- Inclui parâmetros como coesão (c), atrito (ϕ) e ângulo de dilatância;
- Muito usado em simulações de encostas, fundações e contenções.

• Modelo Hardening Soil (HS)

- Rigidez que varia com a tensão de confinamento;
- Comportamento de adensamento e plastificação progressiva;
- Ideal para solos moles e argilosos;
- Exige mais parâmetros laboratoriais (E_{so} , E_{ur} , E_{oe}^d , etc.).

• Modelo Cam-Clay ou Modified Cam-Clay

- Específico para argilas normalmente adensadas;
- Baseado em conceitos de plasticidade crítica;
- Reproduz bem os ciclos de carga-descarga.

A análise do recalque diferencial

Para demonstrar o efeito da rigidez da laje na obtenção do recalque total e diferencial, introduziu-se a taxa de recalque, que relaciona o recalque em qualquer ponto, com um valor máximo sob a fundação. A Figura (4) mostra a taxa do recalque, sob a fundação, para a estrutura com paredes fixas, e a Figura (5) apresenta a taxa de recalque para a estrutura com paredes articuladas. Observa-se que o recalque diferencial, do modelo com parede articulada, diminui com o aumento da espessura da laje, relacionado à redistribuição das cargas, devido a rigidez do piso, que atua aumentando a reação externa e diminuindo a interna. No modelo de parede fixa, observa-se que a interação não é clara, tornando-se necessário entender a relação entre o recalque diferencial e a rigidez do piso. A Figura (6) mostra a relação entre o recalque diferencial adimensional com o coeficiente de rigidez (K_f). Calculou-se, pela equação abaixo, o recalque diferencial adimensional, entre a largura média do canto e a fundação interna nas diferentes espessuras da laje. O recalque apresenta relação positiva com a carga atuante, logo o recalque adimensional deve ser dividido pela carga. Enquanto isso, o módulo de Young tem relação inversa com o recalque, o que faz com que o

Ao se modelar fundações, com diferentes rigidezes e interações solo-estrutura, o modelo constitutivo escolhido, influencia diretamente o resultado da tensão de contato e do recalque diferencial. Fundações sobre solos moles, por exemplo, reagem de forma não linear, exigindo modelos mais robustos. Na prática, com a utilização de softwares comerciais, poder-se-á selecionar o tipo de solo e o modelo constitutivo, resolvendo as equações com base na geometria, cargas e parâmetros de entrada, obtendo-se um resultado final mais realista e ajustado ao solo de interesse. Estes softwares implementam os modelos acima, oferecendo ferramentas

específicas para simular fundações com diferentes rigidezes:

- **Plaxis 2D/ 3D**
É especializado em geotecnia e excelente

para interação solo-fundação.

- **Abaqus**
É mais geral e poderoso, permitindo o uso do UMAT para modelos constitutivos avaliados.
- **Ansys**
É amplo, mas tem capacidade geotécnica limitada se comparado ao Plaxis. É específico quando o foco está mais na rigidez da estrutura.

Os exemplos de análises possíveis são:

- Variação do módulo de reação vertical (ou do subleito) KS, em função da rigidez da fundação.
- Análise de recalques diferenciais entre fundações rígidas e flexíveis.
- Comparação entre fundação do tipo sapata corrida (flexível) e radiers (rígida).

A título de exemplo, podemos imaginar a modelagem de uma estrutura logística com o PLAXIS 2D V2 012, com 2 vãos de 10m, tendo 7m de altura, conforme figura 3 abaixo. Os elementos internos da fundação direta, apresentam-se na forma de sapatas, com 4m de largura e 1m de espessura, enquanto que as sapatas de canto tem 2m de largura e 1m de espessura. As paredes de canto e internas, com 45cm de espessura, permitem rotação na fundação. A laje logística

foi modelada com diferentes espessuras, tendo 20, 40, 60, 80, 100 e 120cm, com uma carga distribuída de 10kPa. Desconsiderou-se o peso próprio das paredes e lajes, simulando-se com modelos de conexão articulada e fixa. Na conexão articulada, não se permitiu a translação da laje na direção x, para o quesito da estabilidade. Com os dados apresentados na figura, modelou-se o solo arenoso, utilizando-se o modelo constitutivo elástico linear.

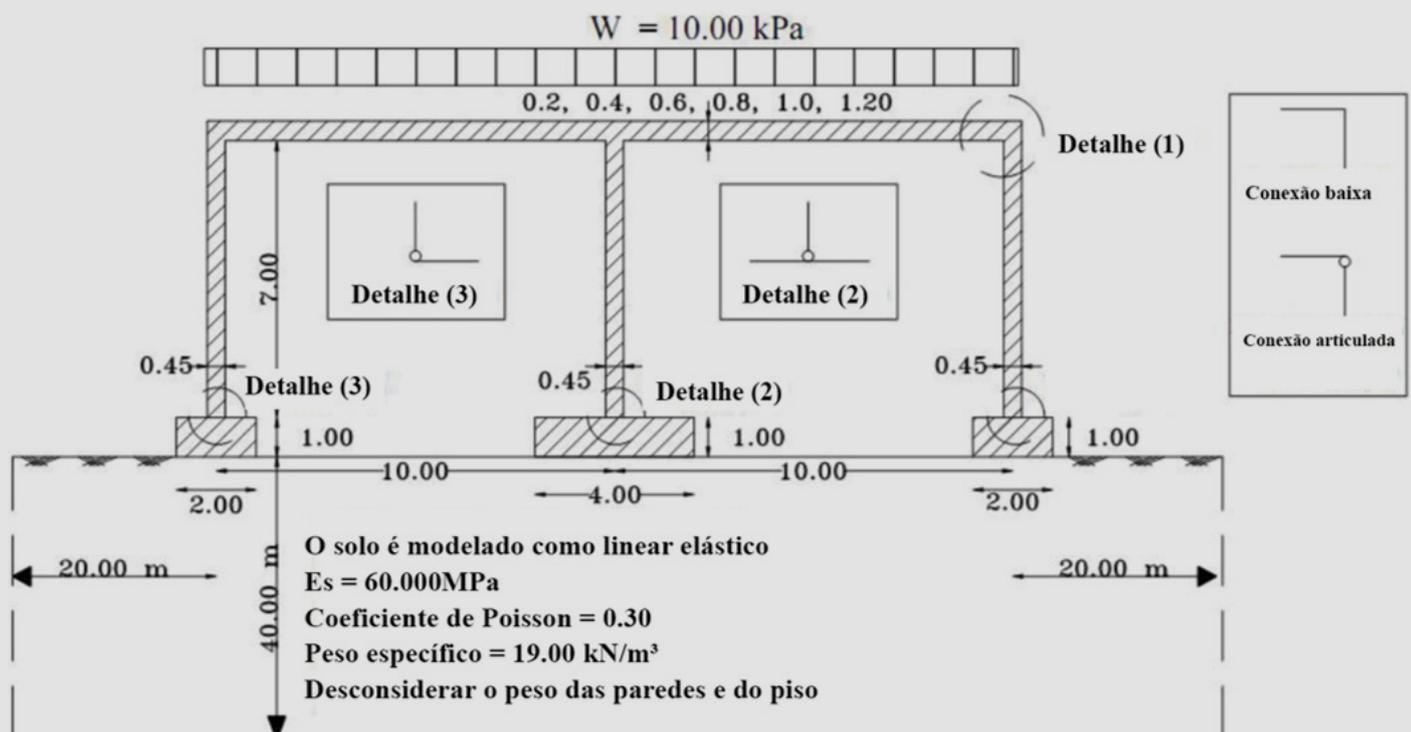


Figura 3 - No contexto de modelo estrutural e geotécnico deste projeto, ou seja, um modelo de interação solo-estrutura, com pórtico de 2 vãos, se incluirmos o peso das paredes e lajes, pode complicar o modelo com novas variáveis, sem alterar de forma significativa o resultado esperado, o que é comum em análises paramétricas ou em modelagens onde o foco está no comportamento do solo ou da fundação.

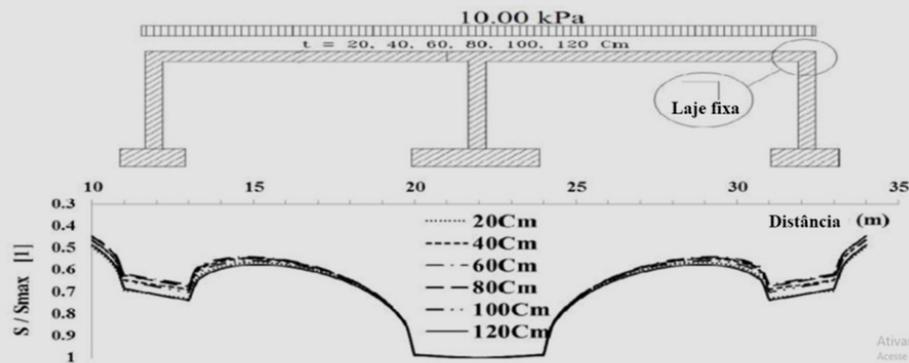


Figura 4 - Taxa do recalque sob a fundação para a estrutura com parede fixa

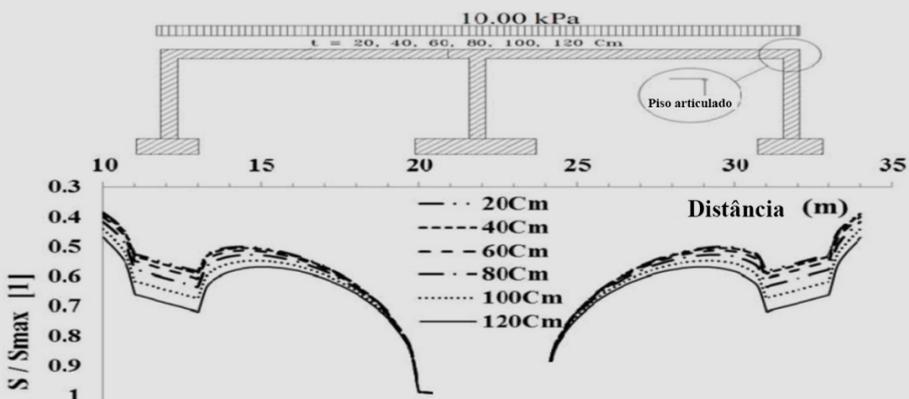


Figura 5 - Taxa do recalque sob a fundação para a estrutura com parede fixa

recalque diferencial adimensional seja multiplicado pelo módulo de Young do solo.

$$\Delta = \left(\frac{\Delta\sigma}{L}\right) \times \left(\frac{E\sigma}{P_S}\right)$$

Onde:

L é a distancia entre o ponto médio da fundação do canto e o ponto médio da fundação interna = 10,00m
 ES é o módulo de Young do solo = 60,00MPa
 OS é a carga distribuída atuando sobre as lajes = 10,00kPa

O coeficiente de rigidez, do solo de fundação, é calculado pelas Normas DIN (2005), através da equação.

$$K_F = \left(\frac{ds}{L}\right)^2 \times \left(\frac{E_S}{12E_S}\right)$$

Onde:

Kf é o coeficiente adimensional da rigidez do solo de fundação, ds é a espessura da laje
 L é o comprimento total da laje = 20,00 m
 Ec é o módulo de elasticidade do concreto = 2,10E+04 MPa
 Es é o módulo de elasticidade do solo = 60,00 Mpa

O fenômeno explicado com a Figura (5). Com pisos flexíveis, com baixa rigidez, a fixação entre piso e parede não

está totalmente estabelecida. Portanto, a carga da parede interna aumenta a uma taxa maior do que a do aumento da carga na parede externa com o aumento da espessura do piso. Essa má distribuição das cargas, aumenta o recalque diferencial. Com o aumento da rigidez do piso, aumenta o grau de fixação entre piso e parede, reduzindo o recalque diferencial. Neste caso, a laje redistribui as cargas para as paredes internas e externas, e a taxa de aumento da carga, na parede externa, é maior do que na parede interna. O ponto de deflexão da curva é o limite entre rigidezes de piso flexível e semi-rígido. A Figura também mostra que, a estrutura da parede fixa, resulta sempre em menor recalque diferencial do

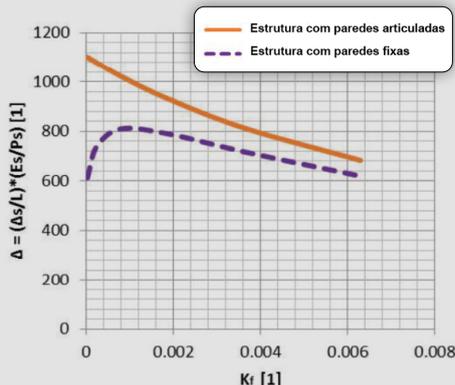


Figura 6 - Efeito da rigidez do piso com o recalque diferencial

que a estrutura da parede articulada. A diminuição do recalque diferencial, em ambas as estruturas, pode ser assumido como uma relação linear.

As Tensões de Contato

As tensões de contato, são obtidas na interface solo-fundação, a partir da força normal, que lá atua, obtendo-se a tensão de contato adimensional em relação à tensão de contato média. Consta-se que a tensão de contato adimensional, é quase a mesma para cada fundação, independentemente do sistema estático das paredes. Obviamente, as tensões de contato adimensional nas bordas, é maior sob as sapatas internas do que sob as externas. A Figura (7) mostra a distribuição das tensões de contato adimensional, sob a fundação interna e externa para uma laje de 1 metro. A influência ou o efeito da rigidez do piso, nas tensões de contato, precisa ser qualificada.

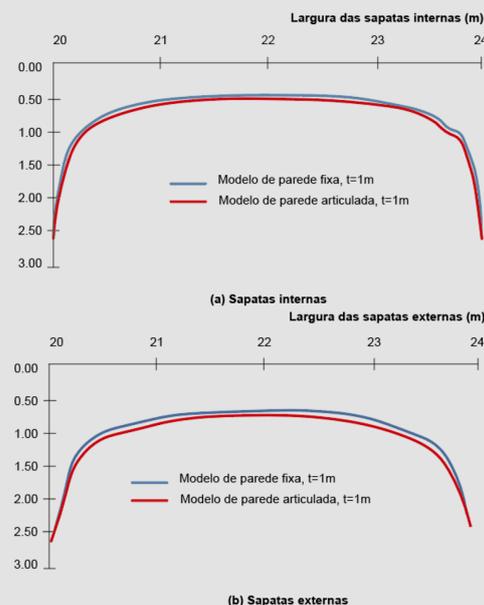


Fig. 6. Distribuição das tensões de contato adimensional para laje de um metro

A Figura (8) mostra a relação entre tensões de contato médias (Psm) sob a fundação interna e externa, considerando-se o coeficiente de rigidez (KV). No modelo articulado, evidencia-se que a tensão de contato média (Psm), sob a fundação externa aumenta, e as Psm sob a fundação interna, diminuem com o aumento da rigidez do piso. Além disso, o modelo fixo segue o fenômeno do recalque diferencial. As Psm, sob a fundação interna, aumentaram e, depois, diminuíram ao

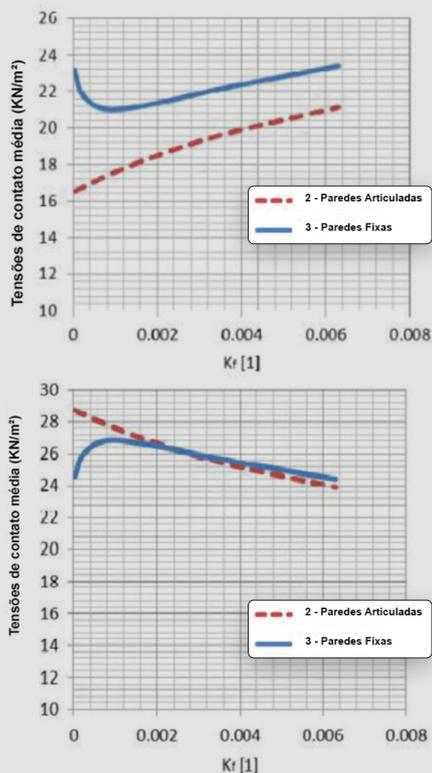


Fig 7. Tensões de contato adimensional sob as fundações externas e internas

passar pelo ponto de deflexão da curva. Enquanto isso, as Psm sob a fundação externa, diminuiram e, depois, aumentaram ao passar pelo ponto de deflexão da curva. Com todas estas informações pode apresentar 12 conclusões/ recomendações.

1. O recalque diferencial, da estrutura com paredes articuladas, diminui com o aumento da rigidez do piso.
2. Com baixa rigidez do piso, para estruturas com paredes fixas, a fixação com a parede não é estabelecida, aumentando assim o recalque diferencial.
3. Com o aumento da rigidez do piso, para estruturas com paredes fixas, estabelece-se a fixação entre o piso e seus suportes, diminuindo assim o recalque diferencial.
4. As tensões de contato adimensional, (q), não são afetadas pela rigidez do piso.
5. Para o modelo com paredes articuladas, as tensões de contato média, (Psm), sob as sapatas de canto, crescem com o aumento da espessura da laje, enquanto as Psm diminuem sob as sapatas internas.
6. O modelo fixo, segue o fenômeno do recalque diferencial, onde

as Psm sob as sapatas internas aumentam e depois diminuem. Enquanto isso, as Psm, sob as sapatas externas diminuem e depois aumentam.

7. Não utilize rigidez flexível para piso. A junta posicionada entre pilares e pisos, geralmente, é parcialmente fixa, ou seja, semi-rígida. Elementos rígidos ajudam a reduzir o recalque diferencial. Elementos flexíveis tendem a aumentar o recalque diferencial.
8. Sugere-se aumentar a dimensão dos pilares e da própria fundação mais que o calculado. As tensões de contato são afetadas pelas cintas de amarração, que conectam fundação e a rigidez do piso. Ambos os efeitos, levam ao aumento das tensões de contato sob a fundação de borda e canto.
9. Sugere-se utilizar programa geotécnico, de elementos finitos, que possa representar a estrutura com a fundação e o solo, de modo a obter ações de deformação adequadas para as peças da estrutura.
10. Os elementos do piso precisam de reforço adicional. As ações de deformação secundárias, resultantes da interação estrutura-solo, induzem ao aumento das tensões atuantes.

11. Se o solo for de baixa capacidade suporte, recomenda-se projetar pisos rígidos com cintas de amarração rígidas, de modo a conectar a fundação, para resistir ao recalque diferencial previsto.

12. Havendo presença de solos moles, faça melhoramento do solo para utilização de fundação direta.

REFERÊNCIAS

- Patricia Karina Tinoco é engenheira geotécnica. Trabalha com melhoramento de solos moles.
- *Egyptian Code of Practice, Geotechnical Engineering and Foundations (2001), Part (3), Shallow Foundations, P:10-20.*
- *Hany Farowk, 2014, Effect of floor rigidity on contact stress and differential settlement.*
- *El-Kadi, F. and El-Nahhas, F. (1985b), Some Analytical Aspects of Soil-Structure Interaction of Shallow Foundations. Proceedings of Tenth International Congress for Statistics, Computer Science, Social and Demographic Research, vol.4, PP.65-82.*

PRESSIÔMETRO

Um ensaio geotécnico completo realizado no campo

Fácil de operar e 100 % viável

ROCTEST

Representante exclusivo no Brasil
3Geo TECNOLOGIA
 +55 21 2718 3968
 vendas@3geotecnologia.com
 www.3geotecnologia.com

Are you looking for a soil improvement in portuguese?

BEST SELLER

MELHORAMENTO DO SOLO MOLE E O GEOENRIJECIMENTO



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



GOSTARIA DE ENTENDER A INTERAÇÃO SOLO-FUNDAÇÃO, SUA ABRANGÊNCIA E OS LIMITES EXISTENTES.

Fig 1. A presença de espessas camadas de solo mole, com até 28m de profundidade, quase inviabilizou a construção de uma fábrica de automóveis em Santa Catarina. O estudo da ISF otimizou a solução técnico econômica para o projeto, promovendo o melhoramento do solo.

O comportamento real de uma estrutura, em contato com o solo, envolve um processo interativo, que se inicia na fase da construção, terminando com um perfeito estado de equilíbrio, após período de ajustamento das tensões e deformações, tanto na estrutura quanto no solo suporte. Edificações, galpões logísticos, tanques de armazenamento, aterros de encontro de pontes, tubulações enterradas de água, esgoto e sistemas de contenção, invariavelmente sobre solos moles, experimentam efeitos, interativos. Estruturas de contenção são exemplos clássicos de problemas de deformação, com efeitos dependentes do tempo, causando alterações na pressão do solo, bem como da resposta da fundação e da estrutura. De um modo geral, há decisões subjetivas de projetistas, que ignoram o mecanismo do comportamento da interação solo-fundação, que ocorrerá, sendo seus efeitos geralmente maiores do que o previsto. A decisão de projetar estruturas de forma isolada, na maioria das vezes, resulta em solução satisfatória, desde que:

- . O solo consiga suportar as cargas previstas, com deformações aceitáveis, ou
- . O solo seja melhorado efetivamente (CPR Grouting) para ter rigidez e resistência apropriadas.

A solução com fundação profunda, muitas vezes, é utilizada para fornecer um nível alto de rigidez, permitindo que a estrutura seja projetada de forma isolada, no entanto, embora confiável, essa solução nem sempre é econômica, resultando em projetos excessivamente conservadores. Torna-se cada vez mais necessário, entender os problemas da interação, exceto nos casos em que a rigidez e a resistência do solo de fundação, ou da estrutura, sejam claramente dominantes. Existem situações em que a interação resulta da simples presença da estrutura no local, e não propriamente de seu peso sobre o solo. A movimentação do solo, causada por efeitos da poropressão, assim como o aden-

samento e o recalque são exemplos típicos. O comportamento real da estrutura, relaciona-se à variação espacial inerente do solo, devendo-se considerar que nem sempre é identificável por sondagens ou ensaios de laboratório.

Categorias da interação

A interação solo-fundação pode ser dividida em duas partes, refletindo as principais categorias de correspondência, ou seja, a estrutura suporta o solo, onde informa-se diretrizes para projeto de diferentes tipos, e as que o solo suporta estruturas, onde trata-se o inverso.



Figura 2 - Utilização de fundação direta, em um grande centro de distribuição, após o melhoramento do solo, na região de Suape, PE.



Estruturas suportadas pelo solo

É importante distinguir dois objetivos amplos, ao se realizar análise da interação solo-fundação. O primeiro, e talvez o de maior preocupação, é a necessidade de estimar a forma e a intensidade do deslocamento relativo, de modo a se avaliar a probabilidade de danos, investigando-se os méritos das diferentes soluções, seja estrutural ou geotécnica. O segundo é a exigência, mais específica, de calcular a distribuição das forças e tensões que atuarão, o que exige grau de precisão e complexidade bem maiores.

Estruturas flexíveis

Em regiões onde o terreno tem solo de fundação estável e indeformável, projeta-se estruturas de forma relativamente isolada, adotando-se a abordagem simples para prever a compatibilidade solo-fundação, onde a estrutura é considerada flexível, aplicando-se cargas de maneira uniformemente distribuída sobre áreas específicas. Se o cálculo geotécnico indicar deslocamentos que possam ser absorvidos pela estrutura básica, como alvenarias, vedações, divisórias e acabamentos, torna-se desnecessário considerar efeitos interativos. Caso contrário, deve-se garantir que, projeto e seus detalhes construtivos, reconheçam essa condição. A decisão de que a estrutura possa acomodar deslocamentos previstos, só pode ser tomada com base em experiência anterior similar, ou em critérios reconhecidos.

A DIFICULDADE DE LIDAR COM A INTERAÇÃO SOLO-FUNDAÇÃO, OU SEJA, ENTENDER PARTICULARMENTE A DEFORMAÇÃO DO SOLO.

Quando se projeta uma estrutura sobre solo, que deforma-se de forma significativa (como solos moles, por exemplo), surgem movimentos verticais e horizontais que acabam afetando-a. O projetista necessita avaliar se a estrutura conseguirá acomodar esses deslocamentos, sem sofrer danos ou perda da funcionalidade. Não é uma decisão simples nem puramente teórica. Na realidade, exige critérios bem estabelecidos ou experiência prática. É nesse ponto que entram os critérios de Burland e Wrath (1975), que apresentam um conjunto de fundamentos quantitativos, relacionando níveis aceitáveis de deslocamento (geralmente recalques diferencial ou total) com o tipo de estrutura, utilizados como referência empírica para avaliar duas condições:

- Se a estrutura é flexível o suficiente, para suportar recalques sem sofrer

danos, ou

- Se deve melhorar o solo ou modificar o projeto fundação/estrutura.

Essas duas condições podem envolver três importantes critérios, são eles:

- Os limites de recalque diferencial (ex: 1/300 ou 1/500 da distância entre apoios),
- Os limites absolutos para o recalque total (ex: não ultrapassar 50 mm),
- E a tolerância a problemas de inclinação ou distorção angular.

Se projetamos uma estrutura, seja uma estrada, uma contenção ou uma edificação, e há presença de camadas de solo mole, pode-se avaliar o comportamento esperado do solo (ex: através de ensaios ou modelagem numérica), comparar os deslocamentos previstos

com os limites de tolerância estrutural apresentados anteriormente ou tomar decisões técnicas, tipo se a estrutura tolera recalques, por exemplo, mantendo-se o projeto. Agora se não tolera, dever-se-á melhorar o solo, com CPR Grouting, ou adotar soluções estruturais mais rígidas. Como exemplo, imaginamos um galpão logístico, com pilares afastados 10 m. Se os critérios indicam estrutura tolerando distorção angular de no máximo 1/500, então o recalque diferencial máximo permitido, entre dois pilares, será de $10\text{m}/500 = 0,02\text{m} = 2\text{cm}$. Agora, se a análise geotécnica indicar que o recalque diferencial poderá ultrapassar esse valor, haverá duas condições:

- A estrutura não pode acomodar os deslocamentos, e

- Será necessário, considerando o nível das cargas de no máximo $10\text{ ton}/\text{m}^2$, melhorar o solo com CPR Grouting e jamais utilizar fundação profunda.

A limitação ao uso do empirismo, em projetos, evidencia-se por situações em que surgem problemas decorrentes de

desvios em relação ao projeto estrutural tradicional, com cargas bem comuns e condições de solo conhecidas.

A interação de vedação e divisórias, com estrutura básica, não deve ser esquecida, pois esses elementos secundários podem modificar significativamente a resposta estrutural às cargas. Se for decidido que a estrutura não pode acomodar os movimentos previstos — assumindo-se a condição flexível —, poder-se-á introduzir juntas de dilatação para permitir articulação e flexibilidade global. Torna-se necessário cuidado em detalhar essas juntas, nos elementos estruturais, na fundação, nas vedações e divisórias, permitindo deslocamentos relativos sem comprometer a aparência, a durabilidade e a estanqueidade. A estrutura pode ser adaptada para acomodar deslocamentos, dentro do limite da funcionalidade e da estética, por meio da introdução de juntas e da utilização de materiais construtivos adequados.

Estruturas rígidas

De forma alternativa, estruturas com requisitos funcionais semelhantes, podem ser projetadas para redistribuir cargas e assim reduzir o recalque diferencial a níveis aceitáveis. Nestes casos, o projeto estrutural é relativamente mais complexo e exige hipóteses razoáveis sobre modelos físicos para análise. Se a rigidez estrutural puder ser avaliada adequadamente, considerando-se modificações introduzidas pelas fases progressivas

da construção, e se os módulos de rigidez do solo forem bem definidos por uma investigação apropriada, é possível fazer previsões razoáveis das forças e dos deslocamentos. Técnicas analíticas avançadas estão disponíveis para projetistas mas, ainda, há escassez de dados provenientes de ensaios em escala real, bem conduzidos, que permitam distinguir, com confiança, diferenças entre o modelo idealizado e a realidade.

Reforço da fundação ou readequação do solo

O sucesso, ao se corrigir problemas existentes em uma fundação, motivado pelo comportamento do solo, exige conhecimento da distribuição oculta das tensões e das deformações, além da condição específica do apoio no solo. Os caminhos da transferência das carga, primários e



Figura 2 - Empreendimento logístico em sua fase inicial, com problemas de recalque. O melhoramento do solo readequou-o.

GEOKON

TRUSTED MEASUREMENTS®

EQUIPAMENTOS GEOTÉCNICOS

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



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

Conheça hoje mesmo esta moderníssima tecnologia (com preço atrativo)

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



SENSORES DE RECALQUE



**CÉLULAS DE PRESSÃO
PARA ATERROS**

GEOKON

TRUSTED MEASUREMENTS®

EQUIPAMENTOS GEOTÉCNICOS



**CÉLULAS DE PRESSÃO
CRAVÁVEIS NO TERRENO**



PIEZÔMETROS

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

Representante Exclusivo no Brasil



G5 Engenharia LTDA

Tel: (41) 3402-1707

g5engenharia.com.br

secundários, devem ser plenamente definidos em qualquer estrutura problemática, assim como a provável concentração de tensões e deformações existentes, enquanto se encontra em condição passiva. Também é importante identificar a causa do recalque de uma estrutura, que passa a apresentar movimentação, e em especial saber se o problema pode ser contido apenas com a readequação do solo (melhoramento). Medidas de reforço estrutural podem ser necessárias junto com o melhoramento do solo, de modo a se estancar o movimento, o que pode não ser necessário se o problema for causado por fenômeno já ocorrido, sendo que o deslocamento não compromete o estado natural de equilíbrio da estrutura. A transferência das cargas da estrutura para os elementos de fundação, deve ser cuidadosamente checada, e o seu mecanismo de distribuição das cargas deve ser identificado e controlado de acordo com a simplicidade ou complexidade da operação e da necessidade da restrição do movimento.

Estrutura de pontes

Estruturas de pontes são plataformas capazes de suportar cargas diversas, e seu limite de serviço é diferente daqueles exigidos em outras estruturas. Por exemplo, estruturas logísticas são construções, que oferecem suporte estrutural e um ambiente adequado para ocupantes ou/e armazenamento de materiais. Fundação profunda, em pontes, não elimina problemas quando há solos moles e compressíveis, pois o carregamento assimétrico, gerado pelo alto aterro, atrás das estacas, induzem elevadas tensões cisalhantes no solo mole e causam deslocamentos laterais significativos. Deve-se considerar problemas específicos de interação em pontes, e a suposição de apoios rígidos nos encontros e pilares, não devendo ser feita apenas por simplicidade no cálculo. O melhoramento do solo é a melhor opção para os encontros.

Tanques de armazenamento

Tanques são usados para armazenar líquidos, com diferentes propriedades e ampla faixa de temperatura. Aço e concreto são, geralmente, utilizados sendo que a ductilidade do aço e a relativa fragilidade do concreto, exigem limites de serviço e formas estruturais distintas. Tanques de aço, geralmente cilíndricos, com base em chapeamento fino, repousando sobre solo muito mole, impõem in-

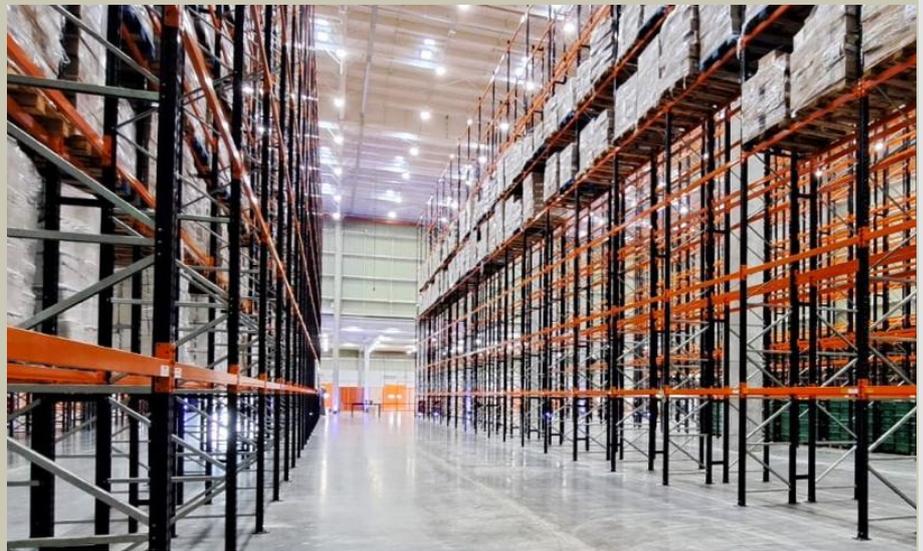


Figura 3 - Piso logístico assentado diretamente sobre o solo, havendo presença de camadas de solos moles. O melhoramento do solo possibilitou obter níveis de rigidez altíssimos.

tensidades de carga próximas ao limite do solo, resultando em grandes deformações plásticas. São comuns grandes distorções no chapeamento metálico das bases e paredes do tanque. O projeto exige consideração cuidadosa sobre a intensidade e a taxa de recalque, bem como a distorção admissível dos elementos estruturais. Trata-se, geralmente, de uma interação entre estrutura de casca fina e solos moles, sendo impossível evitar efeitos interativos em projetos econômicos. O melhoramento do solo é a melhor solução, já que adequa o solo às necessidades estruturais.

Solo suportado por estruturas

Contenções



Figura 4 - Melhoramento do solo necessário à construção de contenção em gabião.

São estruturas específicas por terem suas paredes como componentes integrais do sistema solo-estrutura, obtendo carga e suporte do próprio solo. Esforços e movimentos dependentes do tempo e da deformação, causam variações na pressão do solo, fazendo com que a estrutura responda para manter o equilíbrio. Em muitas estruturas tradicionais, do tipo gravidade ou em balanço, os deslocamentos necessários para mo-

bilizar pressões ativas completas, atrás das paredes, são relativamente pequenos, o que incentivou o uso da estática em projetos mais complexos, onde os efeitos interativos exercem influência relevante. É fundamental, considerar no projeto de sistemas de contenção, tensões in situ iniciais, os efeitos modificadores dos movimentos estruturais nas pressões laterais do solo e, em especial, os efeitos da própria construção.

Estruturas enterradas

Tubulações e galerias enterradas interagem com o solo, e as tensões geradas, tanto no solo quanto na estrutura, são controladas e modificadas pelas deformações que ocorrem. Fenômenos dependentes do tempo, contribuem significativamente para as variações de tensão durante a vida útil da estrutura. Tubos e galerias, com paredes finas, dependem de efeitos interativos para seu desempenho estrutural, e as tensões são aplicadas e resistidas pelo solo ao seu redor.

REFERÊNCIAS

- *America Society of civil engineers (1974): Study of damage to a residential structure from blast vibrations.*
- *American Society of Civil Engineers (1975): Structural response to explosion induced ground motions.*
- *BRE Digest 251 (1978) : Assessment of damage in low rise buildings, Buildings research Station, Watford.*
- *BS 5930 (1981) Code of practice for site investigation, British Standards Institution, London.*
- *Burland, J.B., & Wroth, C.P., (1975) : Settlement of buildings and associated damage, state of the art review Proc conf., settlement of structures, Cambridge, Pentech Press. London p. 611*



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



 1.014.250 - Extrator Shelby de Bancada



 1.055.001 - Prensa de Adensamento



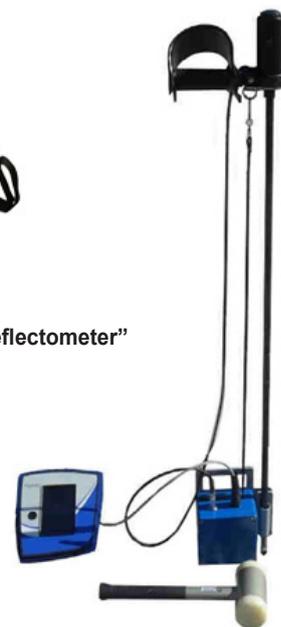
 1.022.250 - Prensa CBR / Marshall Digital Microprocessada



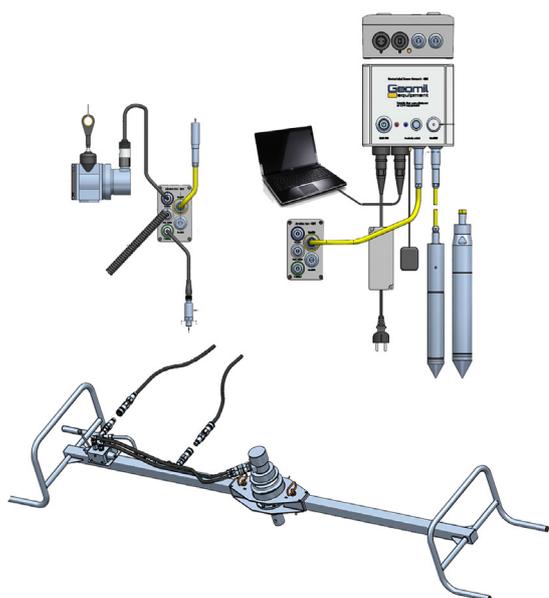
 4.100.030 - Medidor de Densidade de Solo Não Nuclear (SDG)



 4.100.300 - LWD "Light Wheight Deflectometer"



 4.100.035 - Penetrômetro Dinâmico Eletrônico para Solos Panda



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

ANÁLISE NUMÉRICA DA INTERAÇÃO SOLO-FUNDAÇÃO (ISF) PARA EMPREENDIMENTO LOGÍSTICO, CONSIDERANDO-SE O SOLO COM DIFERENTES MODELOS DE COMPORTAMENTO.

Figura 1 - Empreendimento logístico, em área com presença de solos moles, construído sobre fundação direta após o melhoramento do solo.

A compreensão do comportamento solo-fundação e sua interação, desempenha papel cada vez mais importante no estudo geotécnico, essencialmente problemas de compatibilidade de deformações, que só podem ser tratadas de forma confiável, com o conhecimento da deformabilidade do solo, de acordo com sua trajetória de tensões. O cálculo analítico da interface solo-fundação, apresenta muita dificuldade teórica e matemática. Além disso, se esse tratamento é possível para alguma configuração ideal, a solução raramente corresponde aos requisitos práticos. Nas últimas décadas, desenvolveu-se métodos numéricos para fornecer soluções aproximadas para esse tipo de problema, sendo o método dos elementos finitos a ferramenta mais utilizada neste campo. Desenvolveu-se muitos softwares (Ansys, Plaxis, Optum G2 ...) para resolver problemas de interface (ISF) pelo método dos elementos finitos. Procuramos focar um estudo de uma fundação direta e, mais particularmente, a caracterização da interface solo-fundação pelo método dos elementos finitos, utilizando o software

Optum G2. O conhecimento preciso dos módulos, que caracterizam a deformabilidade e a trajetória de tensões (do solo e da fundação) facilitou a otimização deste dimensionamento geotécnico. O principal objetivo foi a modelagem numérica, sob carga axial na fundação direta, utilizando o Optum G2, objetivando-se a influência das leis do comportamento, das características geométricas e mecânicas da fundação, além da massa do solo no comportamento de toda a interface solo-fundação. Torna-se necessário, primeiro, caracterizar o solo para elaborar o modelo de comportamento na interface solo-fundação. As áreas de contato são, geralmente, representadas por elementos de interface de camada fina. Leis constitutivas, como Mohr-Coulomb, Tresca etc., que governam o comportamento do sistema de fundação.

A modelagem do Comportamento do Solo

A simulação numérica do comportamento do solo é, geralmente, feita através de modelos reológicos, e os sofisticados, que podem representar

bem o comportamento do solo, exigem parâmetros difíceis de se determinar, a partir de um determinado número de testes, difíceis de introduzir em um cálculo numérico. Os principais tipos de leis ou modelos de comportamento, são os seguintes:

Modelo Elástico Linear

Materiais elásticos retornam à configuração original, ao serem descarregados, obedecendo à lei de Hooke. Geralmente, o comportamento é considerado elástico quando o histórico de carregamento não interfere. Um estado de tensão corresponde apenas a um de deformação. O comportamento elástico pode ser linear mas, neste caso, o de deformações é proporcional ao tensor de tensões durante o carregamento. A relação entre tensão e deformação é linear, caracterizada por dois parâmetros:

- Um módulo axial de elasticidade (módulo de Young), E , no caso de um teste de compressão ou tração simples, ou um



módulo de cisalhamento, G , para um teste de cisalhamento simples, conforme figura ao lado.

- E o coeficiente de Poisson ν .

Na realidade, esta lei comportamental não se adere bem à realidade porque, mesmo para pequenas deformações, o solo apresenta comportamento plástico. Neste contexto, as leis plásticas foram propostas para se prever o comportamento do solo.

Modelo Elástoplástico

Testes realizados em sólidos, mostram que o domínio das deformações resilientes (ou elasticidade) é relativamente limitado. A partir de um certo nível de tensões, a curva do carregamento difere da curva do descarregamento, e este tipo de comportamento macroscópico é característico da maioria dos sólidos (concreto, solo e rocha, etc.). Do ponto de vista microscópico, a origem das deformações permanentes, depende do tipo de material. Para solos, sur-



Figura 2 - Construção logística sobre fundação direta tendo, previamente, o solo melhorado e homogeneizado.

gem da modificação do conjunto das partículas sólidas, excluindo qualquer efeito de envelhecimento e da viscosidade do material.

Modelo Elástico Linear, perfeitamente elástico

Inicialmente, o modelo de comportamento elástico linear perfeito foi desenvolvido para descrever, de forma aproximada, o comportamento dos metais. No entanto, a existência de um estágio de fluxo, na curva do comportamento

tensão-deformação, de muitos materiais, sugeriu a extensão desse modelo para o concreto, o solo e a rocha. Sua aplicação para a descrição do comportamento do maciço de um solo, mostrou-se positiva, possibilitando analisar a rutura do solo em problemas práticos de fundações, estabilidade de encostas, túneis, muros de contenção, etc. Estabeleceu-se diversos critérios de rutura e, entre eles, o de Mohr-Coulomb, conforme figura abaixo (Figura 4), o mais utilizado na prática da engenharia geotécnica, para descrever, de forma aproximada o comportamento do solo

arenoso e cascalhos, além do comportamento drenado de solos argilosos saturados. O critério de ruptura de Mohr-Coulomb é esquematizado no plano de tensões de Mohr (Conforme figura 4 (a)) pelas equações:

$$\tau = \sigma' \tan \varphi + c$$

Em termos de tensões efetivas principais (σ'_1, σ'_3) conforme figura 4 (b), também é apresentado desta maneira:

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \varphi' - 2c' \cos \varphi'$$

Com:

- σ'_1, σ'_3 : tensões efetivas maiores e menores,
- φ' : ângulo de atrito interno,
- c : coesão. O comportamento elástico linear, perfeitamente plástico, com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, conforme figura 4(b) é caracterizado por uma elasticidade linear (E, ν) e um limite de plasticidade, definido pela coesão c' , o ângulo de atrito interno φ' , além do estado inicial.

Pelo menos dois testes triaxiais devem ser realizados, com pressões de confinamento diferentes, de modo a se determinar os parâmetros do modelo. A superfície de escoamento $F(\sigma_{ij})$ é expressa da seguinte forma:

$$F(\sigma'_{ij}) = (\sigma'_1 - \sigma'_3) - (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \varphi' - 2c' \cos \varphi' = 0. \quad (3)$$

Modelagem Numérica da Fundação

Diversos pesquisadores propuseram os princípios básicos do método dos elementos finitos e sua aplicação para resolver problemas como o estudo do comportamento de fundações, ao longo destes últimos vinte anos. Propõe-se vários métodos para modelar o comportamento descontínuo na interface solo-fundação, chegando-se ao desenvolvimento de várias ferramentas digitais, dedicadas ao estudo de fundações (Ansys, Plaxis, Optum G2 ...). Utilizamos o OptumG2 porque permite considerar várias leis do comportamento do solo.

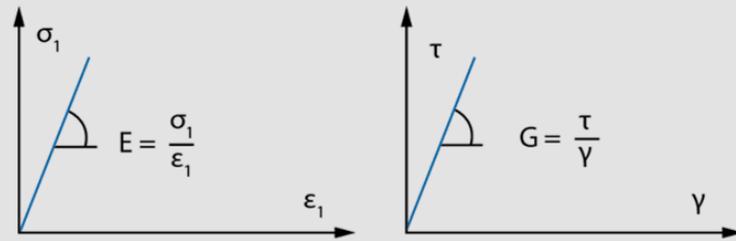


Figura 3 - Lei do comportamento elástico linear.

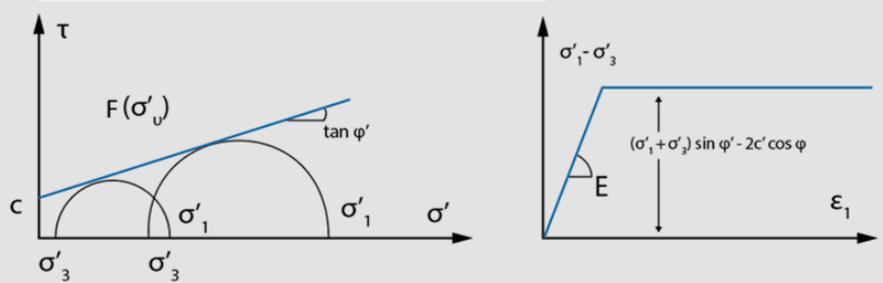


Figura 4 - Lei do comportamento elástico, perfeitamente plástico do Mohr-Coulomb.

PRESSIÔMETRO

Um ensaio geotécnico completo realizado no campo

Fácil de operar e 100 % viável



ROCTEST

Representante exclusivo no Brasil

+55 21 2718 3968

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

Apresentando o Optum

O Optum G2 é um software por elementos finitos, com muitos tipos de análise, incluindo a da deformação elasto-plástica e percolação, fornecendo integração total para análises limite, oferecendo plataforma ideal tanto para análise quanto para projeto. O Optum G2 contém uma gama de elementos finitos, incluindo os populares triângulos de 6 e 15 nós. Seu núcleo computacional baseia-se em algoritmos, de última geração, promovendo eficiência sem precedentes, independentemente da complexidade do modelo constitutivo, número de elementos na malha, etc. O Optum permite modelar trabalhos a partir de várias perspectivas de análise, como por exemplo:

- Análise limite para determinar a tensão máxima de ruptura, com deformações e deslocamentos associados,
- Análise de redução da força, para a determinação de fatores de segurança;
- Análise de infiltração para fluxos parcialmente saturados;
- Análise de tensões iniciais para determinação da tensão in situ com base no coeficiente de pressão do solo;
- Adaptabilidade da malha para diversos tipos de análise.

Além disso, uma série de materiais padrão, com parâmetros representando geomateriais comuns e elementos estruturais.

Influência do Módulo de Young (E) no Comportamento de um solo argiloso

Nesta etapa, propõe-se analisar a influência da variação do módulo de Young no comportamento de um solo argiloso. Para isso, considerou-se uma fundação de 2,5 x 1 x 0,7 m assentada em solo argiloso, submetida a uma tensão de 90 kN/m². O solo é governado por uma lei ou modelo de comportamento de Mohr-

Coulomb, utilizada para descrever solos arenoso e silto-argilosos, com longos prazos, observando-se os seguintes tópicos:

- A análise do “Multiplicador Elastoplástico” pode ser vista como uma combinação da Análise Limite com a Elastoplástica. Assim como na Limite, as cargas multiplicadoras são amplificadas as cargas fixas e a gravidade são manti-

das constantes, de maneira elasto-plástica sistemática e com deformações calculadas em cada etapa de carga.

- A “análise da consolidação” permite visualizar o grau de consolidação de acordo com a duração da aplicação das cargas.

| | |
|--|------|
| Coesão C (kPa) | 10 |
| Ângulo de atrito interno ϕ (°) | 25 |
| Densidade seca γd (kN/m ³) | 20 |
| Densidade saturada γsat (kN/m ³) | 20 |
| Coefficiente de Poisson ν | 0,25 |

Tabela 1. Parâmetros de entrada do estudo para diferentes valores do módulo de Young E= 20 MPa, E= 25 MPa e E= 30 MPa

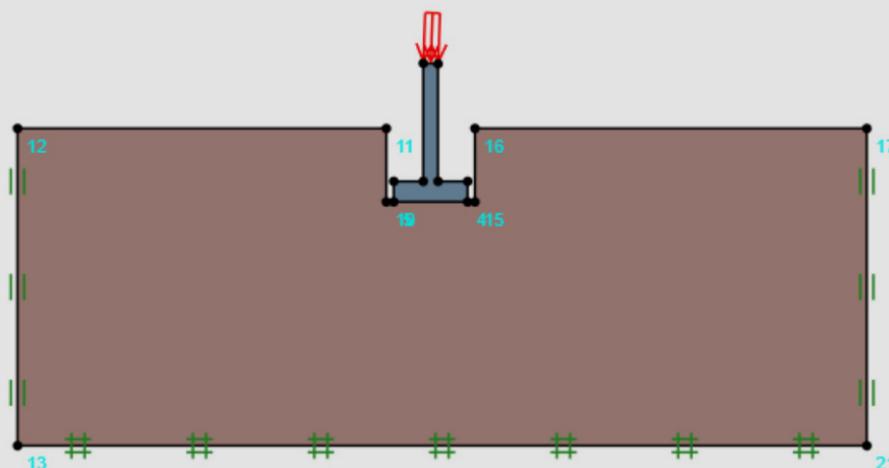


Figura 5 - Fundação retangular assentada sobre solo argiloso.

Os dados de entrada deste estudo estão na tabela 1 acima. Com variação do módulo de Young de 20 a 30 MPa, o solo argiloso comporta-se de maneira diferente, visualizada com o traçado das curvas de deformação e o grau de consolidação. Assim, uma boa visualização dos deslocamentos iniciais e finais também permitirão entender o aspecto da resistência do solo, com diferentes valores do E, como mostrado na Figura 6. A tabela a seguir, mostra a evolução dos valo-

res máximos da deformação, a tensão máxima, o deslocamento e o fator de carga para vários valores do módulo de Young E. Os resultados apresentados na figura 7 mostram, também, que cada valor do módulo de Young está associado às curvas tensão-deformação e da consolidação. Para a análise da consolidação, ao longo do tempo, a Figura 8, apresenta resultados para diferentes valores de E. A análise das curvas (tensões-deformações), da Figura 7, mostra que o valor do módulo

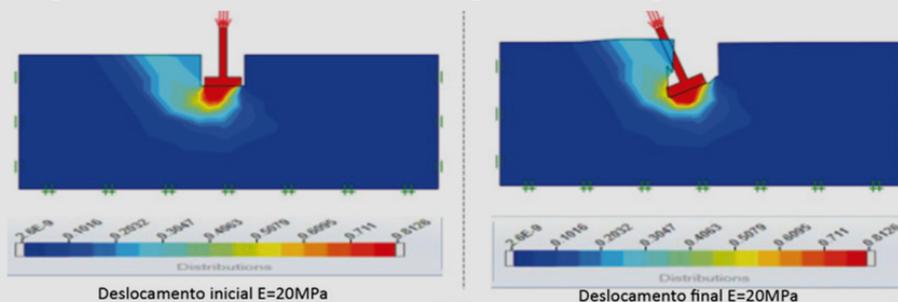


Figura 6 - Mapeamento dos deslocamentos de acordo com a variação do módulo de elasticidade.

de elasticidade, tem influência mais ou menos significativa sobre o comportamento do solo de fundação. De fato, observa-se que com a variação do módulo de elasticidade (E), a argila torna-se cada vez mais rígida e dúctil. Para um módulo de Young de 30 MPa, o deslocamento na massa da argila atinge valor máximo de 0.525 m, sob uma tensão máxima de 776 kPa, enquanto para E, variando de 25 para 20 Mpa, o deslocamento máximo passa de 0.688 para 0.813 m, sob tensões de 942.8 e 783.9 kPa respectivamente. A análise mostra que, para um determinado quadro de tensões, a diminuição das deformações, quando a ductilidade da argila aumenta (exemplo com uma carga de 2700 kN / m², a argila com módulo de Young E = 30 Mpa, apresenta deformação de 5.5 enquanto que para 25 e 20 MPa atingem valores de 6.5 e 8.00). A análise da consolidação torna-se essencial para entender o fenômeno do recalque. Assim, a Figura 8 mostra a evolução do grau de consolidação, em função do tempo de carregamento, para diferentes valores do módulo de Young. Observa-se, com um dia de carregamento, que as curvas fornecem diferentes valores do grau de consolidação. De fato, 52% para E = 20 MPa e respectivamente 42 e 40 % para E = 25 e 30 MPa. No entanto, em 10 dias com carregamento, há uma convergência dos resultados para diferentes valores de E (99 % como o grau de consolidação). Isto é explicado pelo fato de que quanto menor o módulo de Young, mais o solo é compressível, então a curto prazo a argila, com E = 20 Mpa, libera mais vazios ou água (se estiver saturada) e, portanto, as deformações são mais importantes. Da mesma forma, quanto mais a argila, com E = 20MPa é consolidada (ou seja, uma diminuição do volume dos vazios), mais evolui

| Módulo de Young E (MPa) | Tensões máximas σ (kPa) | Deformações máximas ϵ (%) | Deslocamentos máximos U (m) | Multiplicador de carga |
|-------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 20 | 783,9 | 5,307 | 0,8126 | 35,13 |
| 25 | 942,8 | 4,453 | 0,688 | 36,04 |
| 30 | 776 | 3,47 | 0,525 | 35,43 |

Tabela 2. Resultados para diferentes valores de E

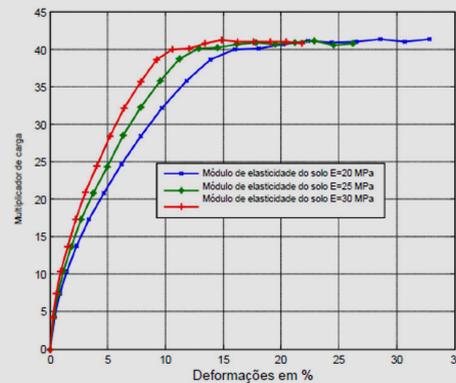


Figura 7. Deformações em relação à carga para diferentes valores do módulo de elasticidade do solo.

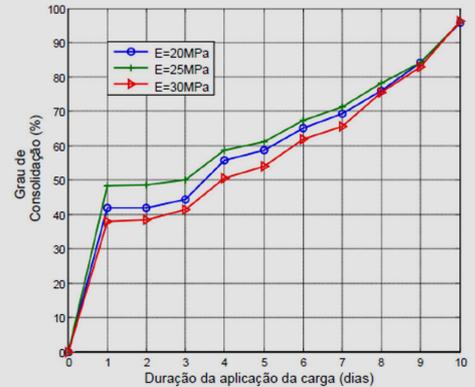


Figura 8. Evolução do grau de consolidação U (%) conforme a duração da aplicação da carga.

como aqueles com E = 25 e 30 Mpa, tornando evidente que o módulo de elasticidade do solo depende do estado de consolidação.

Influência do coeficiente de Poisson, ν , no Comportamento de um solo argiloso

Este coeficiente é um dos importantes parâmetros para estudar o comportamento do solo de fundação. De fato, permite determinar o módulo de cisalhamento do solo G e, sua variação, constitui um dos objetivos desta análise. Os parâmetros de entrada estão na Tabela 3 abaixo.

| | |
|--|----|
| Coesão C (kPa) | 10 |
| Ângulo de atrito interno ϕ (°) | 20 |
| Densidade Seca γ_{sec} (kN/m ³) | 20 |
| Densidade saturada γ_{sat} (kN/m ³) | 20 |
| Módulo de Young E (MPa) | 25 |

Tabela 3. Dados de entrada para diferentes valores do coeficiente de Poisson ($\nu=0.2$, $\nu = 0.23$ e $\nu = 0.27$)

GEOENRIJECIMENTO
100% Melhoramento de solos
Tecnologia exclusiva ENGEGRAUT.

OBRA DE AMPLIAÇÃO RODOVIÁRIA

INCONFUNDÍVEL

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

ÁREA PORTUÁRIA DE MANAUS

CUSTO BENEFÍCIO

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

engegraut.com.br

R. Correa de Araujo, 131, Rio de Janeiro, Barra da Tijuca - RJ

(21)3154-3250



Figura 9 - Empreendimento logístico com fundação direta após o melhoramento do solo.

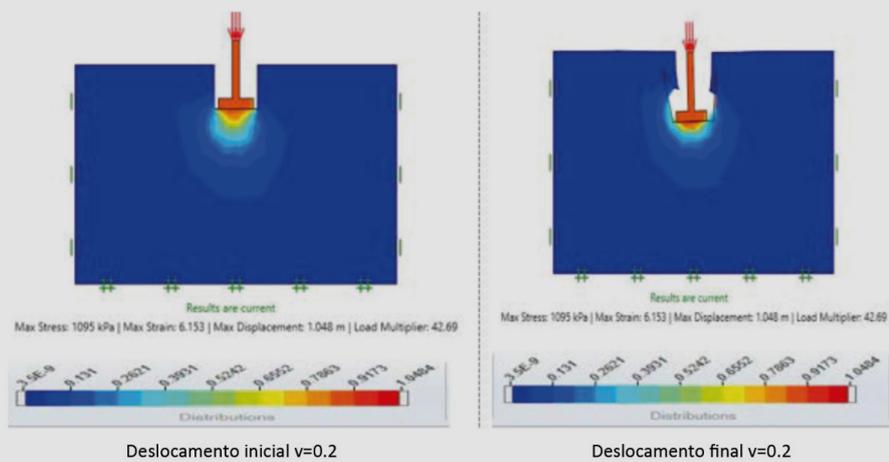


Figura 10- Mapeamento dos deslocamentos para varios valores do coeficiente de Poisson.

Repetiu-se a mesma base utilizada para estudar a influência do módulo de Young, no comportamento do solo, de modo a se analisar o efeito da variação do coeficiente de Poisson. O mapeamento dos deslocamentos é apresentada na Figura 10. A tabela abaixo, apre-

senta a evolução dos valores máximos da deformação, tensão máxima, deslocamento e fator de carga, para vários valores do coeficiente de Poisson v. A figura 11 apresenta as curvas tensão-deformação para varios valores do coeficiente de Poisson.

| Coeficient e de Poisson v | Tensões máximas σ (kPa) | Deformações máximas ϵ (%) | Deslocamentos máximos U (m) | Multiplicad or de Carga |
|---------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 0,2 | 1095 | 6,153 | 1,048 | 42,69 |
| 0,23 | 1054 | 7,546 | 1,037 | 42,79 |
| 0,27 | 1101 | 9,129 | 1,272 | 43,33 |

Tabela 4. Resultado para diferentes valores do coeficiente de Poisson

A análise do “Multiplicador Elasto-plástico” mostra uma evolução da tensão de ruptura, em relação à variação do coeficiente de Poisson. De fato, com um valor de 30 para o fator multiplicador, há ligeira variação nas deformações; 11,2%, 9,8%, 8,8%

(o que corresponde ao deslocamento respectivo de 33cm, 29,4cm e 26,4cm) para valores de v iguais a 0,2, 0,23 e 0,27. Explica-se esta pequena variação, pelo fato de que o coeficiente de Poisson não influencia as deformações, mas afeta o mó-

dulo de cisalhamento do solo, G.

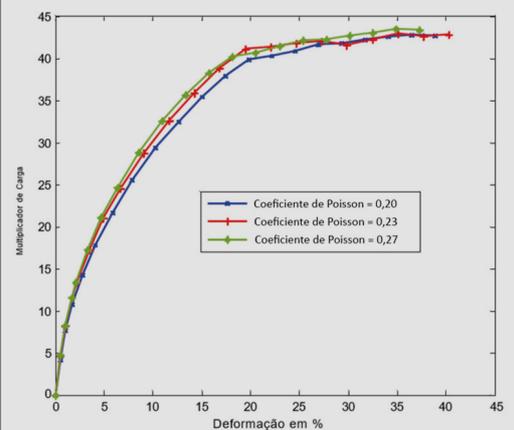


Figura 11 - Variação da deformação versus tensões para diferentes valores da razão de Poisson

Influência do Critério de Ruptura no Comportamento de um solo argiloso

Nesta etapa, analisamos o solo argiloso, sob diversos modelos de comportamento, de modo a discutir pontos fortes e limitações. Analisamos os seguintes modelos:

- O modelo de Mohr-Coulomb, utilizado para solos arenosos e para solos silto argilosos, com longo prazo.
- O modelo de Tresca, utilizado para estudar solos argilosos saturados, não drenados, com tensões totais de curto prazo, durante o qual a variação de volume é zero.
- O modelo AUS (Cisalhamento Anisotrópico Não Drenado) pode ser considerado como

outro desenvolvimento do modelo Tresca generalizado. Trata-se de um modelo de tensão total, que descreve solos argilosos e outros similares.

Os parâmetros de entrada, incluem dados de solos que podem ser determinados por testes em laboratório, não drenados. As características especiais do modelo AUS incluem:

- **Melhoramento da superfície de carga do modelo Tresca generalizado, que é uniforme em solos com comportamento friável, incluindo solos argilosos, em condição não drenada e com estado geral de tensões.**
- **Especificação direta da resistência ao cisalhamento não drenada, com compressão e expansão triaxial e cisalhamento simples.**
- **Distinção entre rigidez secante elastoplástica em compressão e expansão triaxial.**

Como um modelo de tensões totais, o modelo AUS não necessita de dados de drenagem, assim como não é necessário calcular excessos de poropressão. Os parâmetros de entrada são apresentados na tabela acima.

| Características gerais | | Características específicas | |
|--------------------------------------|---------------------|--|--|
| Modelo de material | Mohr-coulomb | Geral | |
| Resistência reduzível | sim | ID | 4 |
| Drenagem | | Tipo de peso unitário | Favorável |
| Drenagem | Drenado/não drenado | Material | |
| Cut-off de cavitação | Não | Nome | Argila Firme MC |
| Rigidez | | cor | Clique para escolher |
| E(MPa) | 20 | Modelo de material | Tresca |
| ν | 0.25 | Resistência redutível | Sim |
| Regra de fluxo | | Rigidez | |
| C (kPa) | 10 | Conjunto de parâmetros | A |
| ϕ (°) | 25 | Eu (MPa) = 20MPa | com $:\epsilon_c, 50$ (%) = 1 e $\epsilon_e, 50$ (%)=3 |
| Limite de tensão | não | Resistência | |
| Fissuras | Não | Opção | anisotrópico |
| Pesos unitários | | Su (kPa) | 30 |
| γ_{seco} (kN/m ³) | 18 | Corte de tensão | Não |
| γ_{sat} (kN/m ³) | 20 | Modelo hidráulico linear | |
| Modelo hidráulico | Linear | com $K_x = K_y = 10\text{-}5\text{m}/\text{dia}$ | |
| Condição inicial K_0 | 0.50 | | |

A Figura 12 abaixo apresenta o campo de estudo.

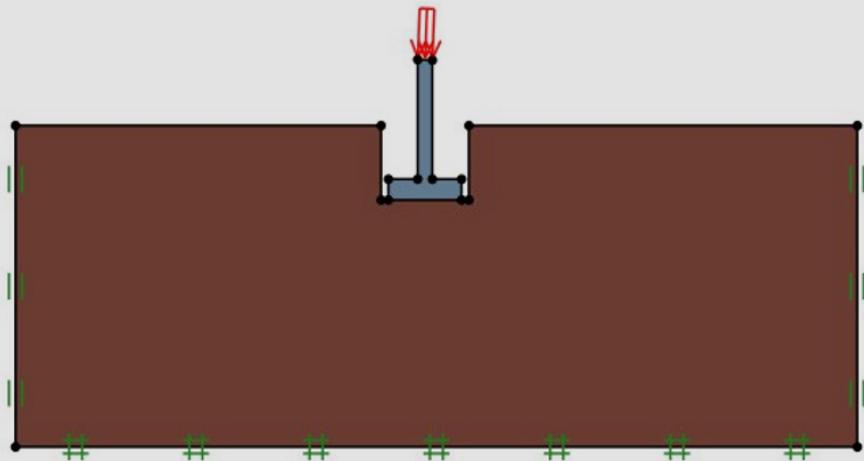


Figura 12. Fundação sobre solo argiloso

GEOKON

TRUSTED MEASUREMENTS®

EQUIPAMENTOS GEOTÉCNICOS

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



O moderníssimo inclinômetro M6180, caracteriza-se por segmentos individuais, mecanicamente conectados com juntas estilo "bola-soquete", interligadas eletricamente com conectores à prova d'água em um único cabo, tornando o conjunto extremamente leve e compacto, o que torna fácil e rápida sua instalação. Consequentemente, seu custo tornou-se muito atrativo. O modelo M6180 juntamente com nosso sistema de compartilhamento de dados, sem fio, da série GeoNet torna-se, portanto, a solução mais moderna de monitoramento para deslocamentos horizontais.

Conheça hoje mesmo esta moderníssima tecnologia (com preço atrativo)

Representante exclusivo no Brasil: **G5 Engenharia LTDA**

Contato: (41) 3402-1707 / cotacao@g5engenharia.com.br / g5engenharia.com.br

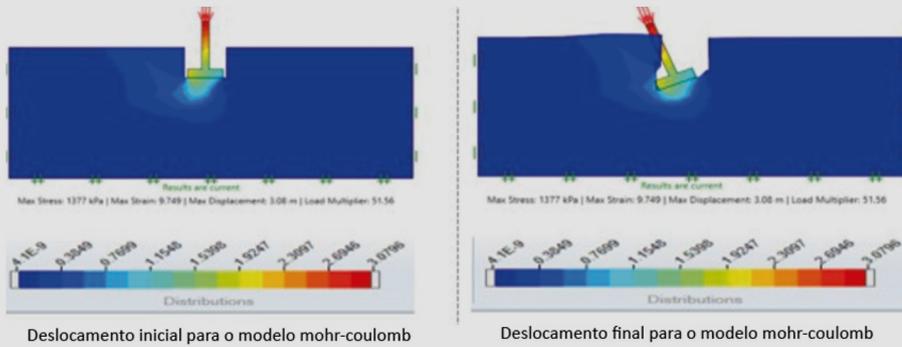


Figura 13. Mapeamento dos deslocamentos de acordo com a variação dos critérios de ruptura

| Modelo de comportamento do material | Tensões máximas σ (kPa) | Deformação máxima ϵ (%) | Deslocamento máximo U (mm) | Multiplicador de carga |
|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------|------------------------|
| Mohr-Coulomb | 1377 | 9,749 | 3,08 | 51,56 |
| Tresca | 247 | 2,323 | 0,4962 | 9,975 |
| AUS | 245,3 | 3,808 | 0,648 | 9,706 |

Tabela 6. Resultado do cálculo para diferentes modelos de solo

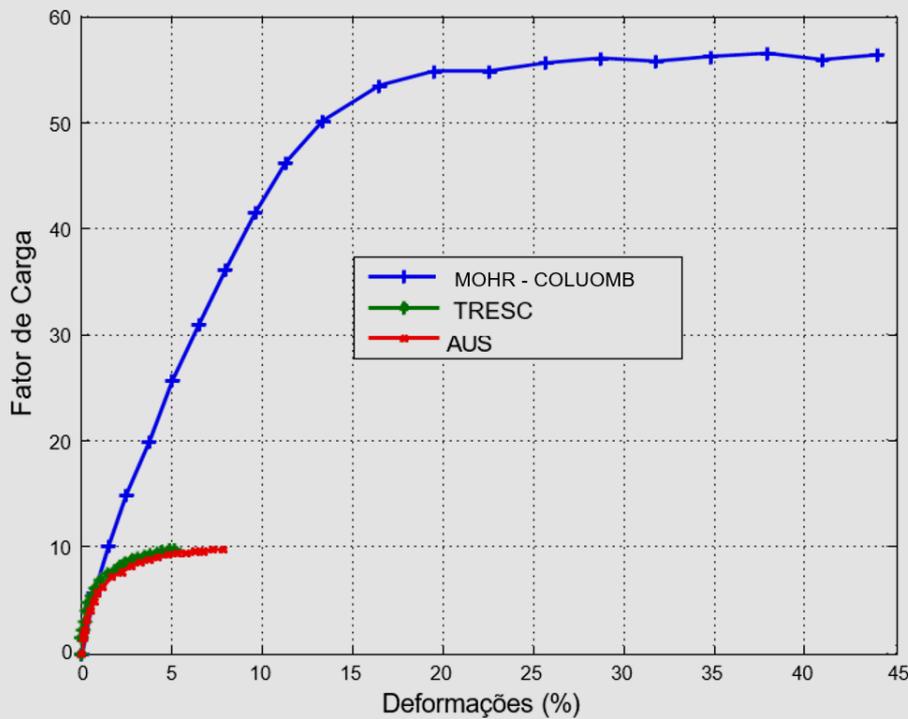


Figura 14. Curvas tensão-deformação

Os resultados mostram que para cada modelo de comportamento, a fundação reage de forma diferente. A Figura 13, apresenta o mapa de deslocamento para um modelo Mohr-Coulomb. A Tabela acima apresenta a evolução dos valores máximos da deformação, da tensão máxima, do deslocamento e do fator de carga, para vários modelos de comportamento. Os resultados obtidos (em tensão-deformação), para cada modelo constitutivo, estão na figura 14. Estes resultados evidenciam a variação do processo deformativo, conforme as cargas para diferentes critérios de ruptura. O comportamento do solo argiloso, pelos modelos

Tresca e AUS, apresenta deformações máximas relativamente baixas de 5,26 e 7,83%, enquanto o modelo Mohr-Coulomb promove deformação de 45,8%. A análise mostra que, quando o modelo Mohr-Coulomb está a 20% de sua reserva elástica, os demais modelos já chegaram na ruptura. Esta análise indica que os modelos Tresca e AUS fornecem resultados semelhantes para cada solo argiloso, não variando com a amplitude das tensões, ao contrário do critério Mohr-Coulomb. Isso significa que a tensão de cisalhamento, que induz à ruptura no solo, é muito maior no modelo Mohr-Coulomb

do que nos modelos Tresca e AUS, demonstrando que o modelo Mohr é mais adequado para estudar o comportamento de solos argilosos.

Influência da Variação do Ângulo de Atrito do Solo em sua Resistência

Modelou-se uma sapata corrida apoiada em duas camadas de solos heterogeneos, a primeira arenoso fofo e a segunda argila mole a média, conforme mostrado na Figura 15 abaixo:

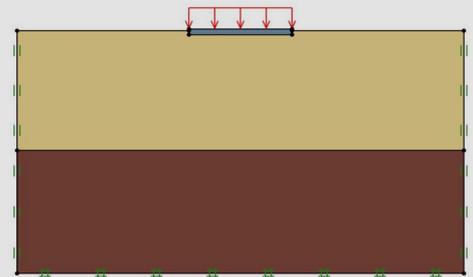


Figura 15. Esquema da modelagem com as duas camadas de solos heterogeneos.

A sapata corrida, com 12 m de comprimento é submetida a uma carga de 50 kN/m². A Figura 10 apresenta os deslocamentos inicial e final para $\phi = 30^\circ$.

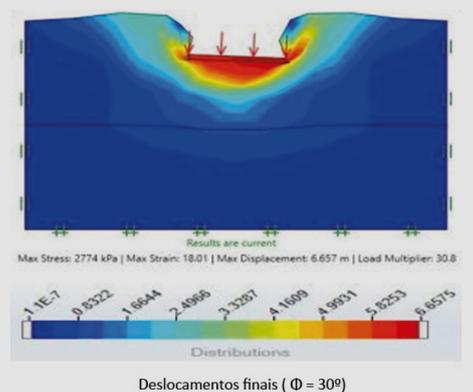
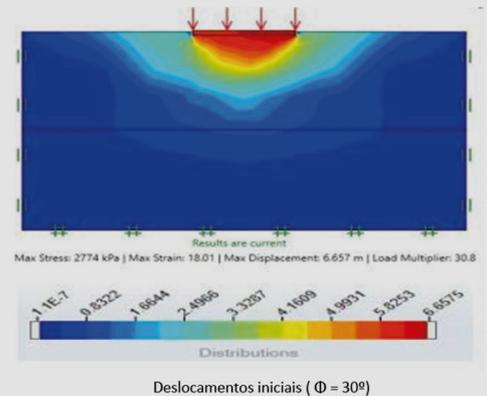


Figura 16. Mapeamento dos deslocamentos inicial e final para um determinado ângulo de atrito ϕ

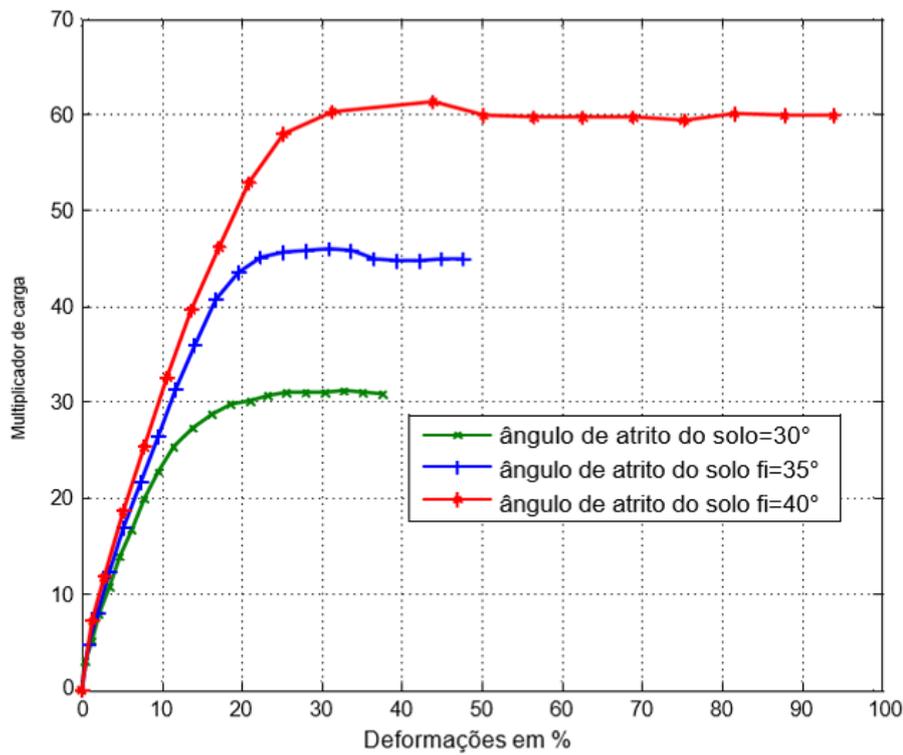


Figura 17. Carga versus deformações

| Ângulo de atrito interno (°) | Tensões Máximas σ (kPa) | Deformações Máximas ϵ (%) | Deslocamentos Máximos U (m) | Multiplicador de carga |
|------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 30 | 2774 | 18,01 | 6,657 | 30,8 |
| 35 | 3408 | 22,46 | 8,155 | 44,93 |
| 40 | 4302 | 38,39 | 15,79 | 59,85 |

Tabela 6. Resultado para vários valores de

A Tabela acima apresenta a evolução dos valores máximos da deformação, da tensão máxima, do deslocamento e do fator de carga, considerando-se diversos valores do ângulo de atrito, conforme figura 17 acima. Verifica-se que, ao variarmos o ângulo de atrito do solo arenoso, com 30°, 35° e 40°, ocorre aumento das cargas elásticas, limite bem como abertura nas fraturas decorrentes do processo deformativo. De fato, as cargas limite elásticas, são obtidas respectivamente por uma multiplicação da carga inicial de 30, 43 e 60, com deformações correspondentes de 17%, 20% e 25%. No entanto, pode ser explicado pelo fato de que a densidade relativa do solo tem influência direta no ângulo de atrito ϕ , ou seja, na sua resistência ao cisalhamento.

Influência da Coesão do Solo em sua Resistência

Mantivemos as hipóteses da simulação anterior, exceto que, em vez do ângulo de atrito da areia, variamos a coesão da camada argilosa (10, 15 e 20 kPa) e analisamos sua influência no comportamento do maciço do

solo. Os resultados obtidos, ao se variar a coesão da camada argilosa (10, 15 e 20 kPa), são apresentados na Figura 18. A tabela abaixo, mostra a evolução dos valores da deformação, da tensão máxima, do deslocamento e do fator de carga, para vários valores da coesão, C, do solo argiloso presente.

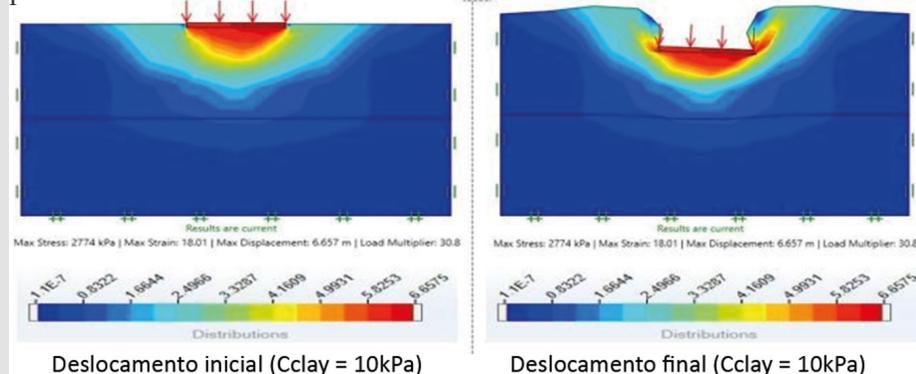


Figura 18. Mapeamento dos deslocamentos para diferentes valores da coesão C

| Coesão da argila | tensões máximas (kPa) | deformação máxima (%) | deslocamento máximo (m) | Multiplicador de Carga |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------|
| C=10kPa | 2774 | 18,01 | 6,66 | 30,08 |
| C=15kPa | 2659 | 17,47 | 6,80 | 30,55 |
| C=20kPa | 2665 | 17,96 | 6,76 | 30,29 |

Tabela 8. Resultado para diferentes valores de C

A Figura 19 a seguir, apresenta valores correspondentes ao processo deformativo promovido, em diversos níveis de carregamento, tendo variação dos valores da coesão na camada argilosa.

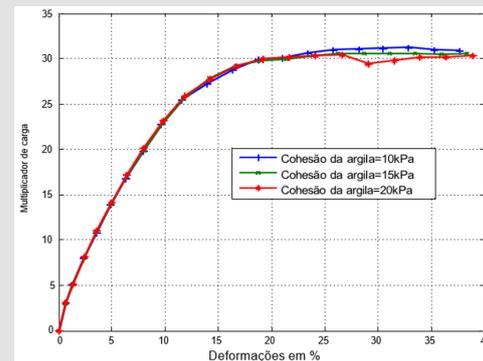


Figura 19. Multiplicador de carga - deformações para vários valores da coesão da camada de solo argiloso.

Fica evidente, então, a pouca influência de coesão no contexto da camada argilosa. De fato, esta influência é perceptível apenas no domínio plástico (no domínio elástico as curvas combinam) (Figura 19). Desta forma, o deslocamento máximo, na ruptura, para os três cenários com solos argilosos, $C = 10, 15$ e 20 kPa, varia respectivamente de 6,66, 6,80 e 6,76 m com as tensões de 2774, 2659 e 2665 kPa. Esta fraca influência, pode ser explicada pelo fato de que a interface argila-areia está um pouco distante da base da fundação (cerca de 14,30 m) e que os deslocamentos diminuem, consideravelmente nessa profundidade. Os resultados mostram, portanto, que com a variação crescente do módulo de elasticidade (E), o solo argiloso torna-se cada vez mais rijo. Para um determinado quadro

de tensões, há diminuição nas deformações, à medida que a rigidez do solo argiloso aumenta. Na análise da consolidação, observa-se que quanto menor o módulo de Young, mais compressível é o solo, ficando evidente que seu módulo de elasticidade depende do estado da consolidação. Evidencia-se, também, que a varia-

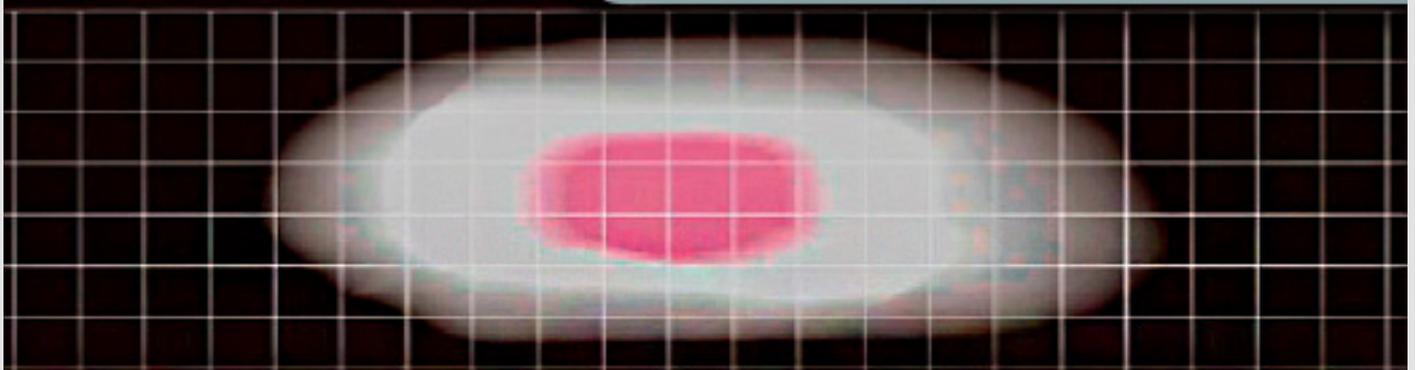
ção do coeficiente de Poisson tem influência fraca nas deformações, afetando o módulo de cisalhamento, G , do solo. Por outro lado, a tensão cisalhante, que leva à ruptura do solo, é muito maior no modelo de Mohr-Coulomb do que nos modelos Tresca e AUS, deixando claro que o modelo de Mohr-Coulomb é mais

interessante e adequado para estudar o comportamento de solos argilosos, tornando-se evidente que o modelo de comportamento, as propriedades intrínsecas da coesão, módulo de elasticidade, critério de ruptura, ângulo de atrito e a litologia do solo, condicionam o modo de ruptura da estrutura a ser construída.

REFERÊNCIAS

- Thomas Kim é engenheiro geotécnico especializado em melhoramento de solos moles.
- Hicher P. Y. (1985). Comportamento de argilas saturadas em diversos caminhos de solicitações monotônicas e cíclicas. Aplicação a uma modelagem elastoplástica e viscoplástica. Tese de doutorado de Estado, Universidade Paris VI.
- Bund H. (2009). "Um Método Melhorado para o Módulo de Fundação em Engenharia de Estradas". EJGE Vol. 14, 2009.
- Gerolymos N. (2009), "Modelagem numérica de experimentos de carga lateral cíclica em centrífuga". Engenharia de Terremotos e Vibração de Engenharia Vol.8, No.1 p 61-76.
- Hazzar L. (2014), "Análise numérica da resposta de estacas sob solicitações laterais". Tese de doutorado, universidade de Sherbrooke Canadá. p214.
- Haitem (2017). "Estudo do efeito da interação solo-estrutura ISS na resposta dinâmica das estruturas em concreto armado", Tese de doutorado universidade de Batna 2 -259 páginas.
- Sall O.A. (2015). "Cálculo analítico e modelagem de estrutura e placa – interação Solo/ Estrutura para o cálculo de fundações superficiais em forma de radier" Tese de doutorado na universidade de Thies – 164 Páginas.
- Sall O.A., Fall M., Berthaud Y., Ba M., Ndiaye M. "Influencia da interação solo-estrutura no comportamento da fundação em placa" Ope Journal of civil Engineering, 2014, 4, 71-83.
- Sall O.A, Ba M, Ndiaye M, Sangare D, Fall M., Thiam A. (2015). Influencia das propriedades mecânicas do concreto e do solo nas solicitações da fundação em placa. Open Journal of Civil Engineering, 2015, 5, 249-260.

Contaminação de solo?



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

Confie em quem tem experiência.



Engegraut.com.br



iBSM INSTITUTO
BRASILEIRO
DO SOLO MOLE

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

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



PARCEIROS



GEOKON

SOLUÇÕES CAD BIM

TRUSTED MEASUREMENTS.



ENGEGRAUT
ENGENHARIA ESTRUTURAL

