

Soft Soil Brazilian Review

A complexidade e as consequências da interação solo-água-estrutura.

Eng. M.Sc. Joaquim Rodrigues

A interação solo-estrutura.

A importância do desempenho do processo deformativo à ser imposto à obra.

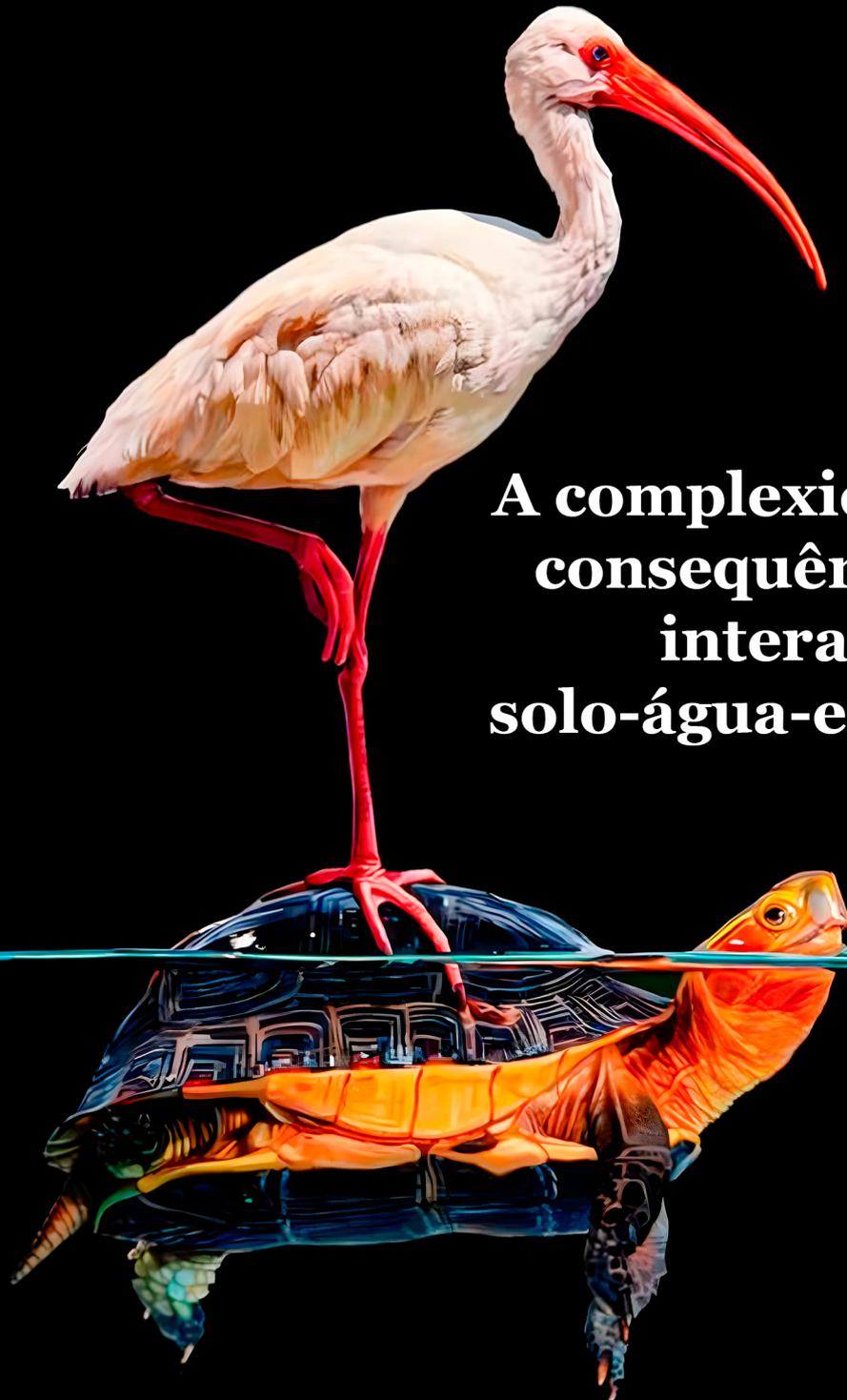
Eng. ^a Patricia Tinoco

Como resolver os problemas da interação solo-estrutura.

Eng. Roger Kim

Consulta

Qual a importância do conhecimento da interação solo-estrutura, para a construção de uma edificação e a possível surgência de recalque?



**A complexidade e as
consequências da
interação
solo-água-estrutura.**

PROGRAMA

3 A COMPLEXIDADE E AS CONSEQUÊNCIAS DA INTERAÇÃO SOLO-ÁGUA-ESTRUTURA.

10 A INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA. A IMPORTÂNCIA DO DESEMPENHO DO PROCESSO DEFORMATIVO À SER IMPOSTO À OBRA.

20 - CONSULTA

QUAL A IMPORTÂNCIA DO CONHECIMENTO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA, PARA A CONSTRUÇÃO DE UMA EDIFICAÇÃO E A POSSÍVEL SURGÊNCIA DE RECALQUE?

28 COMO RESOLVER OS PROBLEMAS DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA.



3



10



28

EDITORIAL

A interação solo-estrutura é o conhecimento de evolução da rigidez do sistema de fundação a ser empregado (relação carga-deslocamento) em relação à introdução das cargas da estrutura, de forma repetida, até a convergência do recalque e dos esforços obtidos nos parâmetros “estruturais” e modelos geotécnicos. Torna-se obrigatória, em qualquer processo construtivo, pois informa como será a reação do solo, na medida em que leva em conta suas propriedades e comportamento. Como consequência, adequar o projeto a desejada realidade do local, torna o dimensionamento mais refinado e otimizado, com o rotineiro advento da simulação numérica, utilizando-se modelagens, que fazem o acoplamento de formulações diretas ao método dos elementos de contorno (MEC), aplicado ao meio semi-finito, com outra do método dos elementos finitos (MEF) aplicado, por exemplo, aos elementos de fundação rasa (sapatas, radiers, etc). O assunto interação solo-estrutura tem proporcionado, há tempos, debates em inúmeras linhas de pesquisas, desde a avaliação do processo do recalque na construção, de diversas partes e sobre diversos tipos de solos, passando pela avaliação dos efeitos do temido recalque diferencial em sua estrutura. A região do solo, que cerca o sistema de fundação da construção sofre deformações, impondo recalque,

e causando a redistribuição dos esforços atuantes. A interação solo-estrutura avalia os efeitos desta redistribuição dos esforços atuantes e, principalmente, a forma e a intensidade do consequente recalque diferencial, tornando o projeto bem próximo da condição real. Edificações tornam-se cada vez mais esbeltas, com maiores vãos e balanços e, da mesma forma, a criação de softwares inteligentes que auxiliam na resolução de problemas complexos. Portanto, é de suma importância entender este assunto, saber interpretar, compreender e analisar o comportamento que uma estrutura terá, devido a imposição das cargas distribuídas ao longo de toda a construção, e que serão transmitidas à sua fundação e, conseqüentemente, descarregadas no solo. A maioria dos problemas na geotecnia, portanto, envolve a interação solo-água-estrutura, que pode ser estudada e avaliada a partir de perspectivas diferentes. O objetivo desta edição, de nossa revista, neste início de ano, é promover pesquisa sobre este tópico, objetivando diferentes aspectos do problema. Em todos os casos, as consequências desta interação controlam o comportamento do solo, a estabilidade das construções e, finalmente, a segurança de nossas comunidades.

Boa leitura.

SEÇÕES



A interação entre o solo e uma estrutura, seja geotécnica ou não, também conhecida como interação solo-estrutura ou ISE, é a maneira como o solo e a fundação interagem entre si, tendo efeitos no projeto, como a distribuição das cargas atuantes, na medida em que a rigidez da estrutura aumenta, e a resposta do solo com as fases elástica e plástica. A ISE é importante ser considerada em projetos de estradas, com obras de arte e em áreas portuárias, que combinam cais e plataformas de terra. Estes são apenas dois exemplos.

Figura 1 – Na construção deste galpão logístico, o projetista pecou por não considerar a interação solo-estrutura. A presença de um aterro com cerca de 2m de profundidade, seguido de solo argiloso mole e, finalmente areia compacta, não podia permitir fundação direta, sem melhoramento do solo, o que foi feito. Ainda durante a obra, os pilares perderam prumo, interrompendo-se a construção. Serviços de melhoramento do solo, com geoenrijecimento, sob as sapatas foram realizadas, consolidando-se o solo e corrigindo-se o prumo dos pilares.

A COMPLEXIDADE E AS CONSEQUÊNCIAS DA INTERAÇÃO SOLO-ÁGUA-ESTRUTURA.



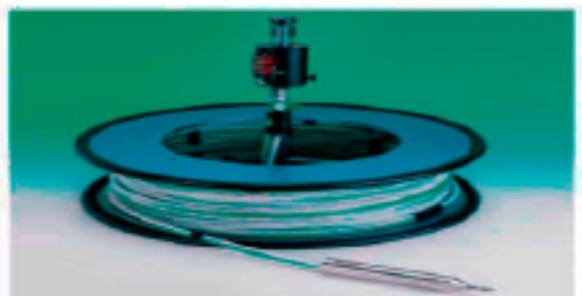
A geotecnia é, inerentemente, caracterizada por situações que envolvem a interação solo-água-estrutura, e exemplos relevantes da importância deste relacionamento, em obras geotécnicas, são a estabilidade das obras de barragens ou de taludes fluviais, submetidos a alterações significativas do rio e/ ou do lençol freático, assim como deslizamentos de terra induzidos pelo trinômio chuva-percolação-erosão. A interação entre

partículas do solo e a água intersticial, pode ser investigada na microescala, pela interação eletroquímica entre grãos sólidos e a água, especialmente em solos predominantemente argilosos, observando-se a alteração em sua consistência, misturada com diferentes conteúdos d'água, o que nos conduz aos conhecidos limites de atterberg. Na mesoescala, considerada como a do volume elementar representativo, o comportamento mecânico do solo é caracterizado pela interação

da água intersticial e grãos. No nosso conhecido solo saturado, o famoso princípio das tensões efetivas de terzaghi, estabelece que a tensão total aplicada à mistura é dividida entre a poropressão da água e a tensão efetiva no esqueleto sólido, responsável por todos efeitos mensuráveis no solo. A interação entre a água e o ar, presente nos interstícios do solo, é controlada pela tensão superficial da água e pelas forças capilares resultantes no contato entre partículas, o que permite o desenvolvimento da sucção

PERFILÔMETRO DE RACALQUES

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



Para maiores informações, acesse: Rogertec.com.br
ou envie um e-mail para: atendimento@rogertec.com.br



que, aliada ao grau de saturação, regem o comportamento mecânico dos solos não saturados. O processo de erosão interna, consequência do modo de percolação, também é resultado da interação água-solo, ao nível de suas partículas. De um modo geral, o comportamento hidromecânico do solo é totalmente associado, significando que qualquer mudança ou alteração na pressão da água, gera modificações na tensão efetiva e, portanto, deformações no solo. Por outro lado, deformações no solo, geram alterações na pressão da água. Estes são os motivos pelos quais necessita-se quantificar as tensões, que atuam no esqueleto sólido, e a própria poropressão, significando que as equações que regem ambas as fases, bem como a interação devem ser consideradas.

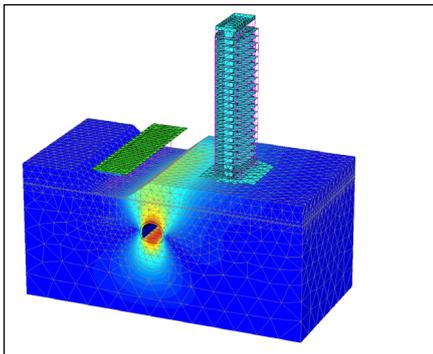


Figura 2 – O programa Plaxis 3D permite realizar análises tridimensionais de deformação, para a interação solo-estrutura, além da estabilidade no domínio geotécnico.

Na prática, estes aspectos complexos podem, às vezes, ser simplificados, assumindo-se a condição drenada ou não drenada. Outro aspecto relevante na geotecnia, relaciona-se ao fato de que, comumente, lidamos com solos predominantemente arenosos que, sob certas condições, podem apresentar fase de transição, significando que mesmo completamente secos, podem se comportar como sólidos ou líquidos, dependendo do índice de vazios e dos estados de tensão-deformação. Esta condição pode

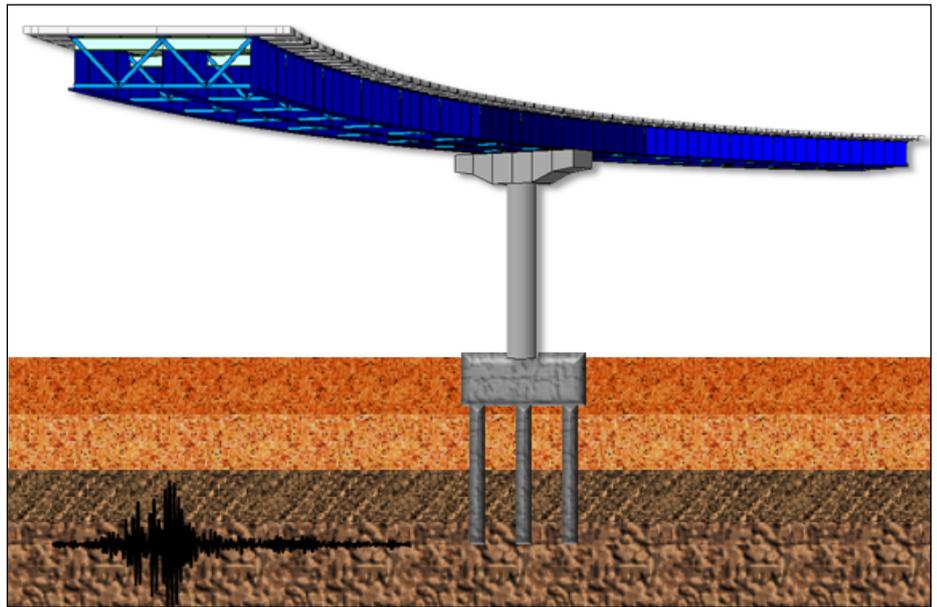


Figura 3 – Em uma primeira etapa, a interação solo-estrutura, modifica as propriedades originais projetadas, com base não deformável. Na figura, a interação solo-estrutura para pontes apoiadas sobre solos moles.

ser observada em deslizamentos de terra, em forma de fluxo onde, inicialmente, o solo comporta-se como sólido, durante o estágio de pré-rutura, quando a massa do solo apresenta-se no modo estático. Com o desenvolvimento da superfície de rutura, aumenta o cenário ou a situação cisalhante do solo, que comporta-se como um líquido escoando, ladeira abaixo, parando em uma área de deposição, recupe-

rando a condição de sólido. Um outro exemplo de comportamento do solo, na condição líquido, é a liquefação estática, que ocorre devido os efeitos da percolação d'água, muito comum em barragens de rejeitos e nos taludes fluviais da Amazônia, conforme edições anteriores desta revista. Uma das explicações para esta transição de fase, relaciona-se à natureza do estado, ao arranjo ou mesmo à compactação precária do



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 Weight Deflectometer"



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



4.100.035 - Penetrômetro Dinâmico Eletrônico para Solos Panda

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

solo e ao fato de que solos com alguma presença de areia, na condição de fofa, tendem a contrair ou sofrer colapso interno, quando cisalhado. A idéia de se obter um modelo de solo constitutivo, capaz de ter estas características ainda é um enorme desafio, mas caminha-se nessa direção. Além da natureza multifásica do solo, problemas geotécnicos são caracterizados, de forma frequente, pela interação com a estrutura da construção, que pode ser abordado em diferentes escalas. Voltando a microescala, a interação solo-estrutura pode ser tratada como problema de contato, ou seja, esta interface é afetada pela composição e tamanho das partículas do solo, a estrutura e a presença da água além, claro, do tipo de solo ser predominantemente arenoso, argiloso ou na condição de fofa ou mole. Este problema torna-se importante para fundações profunda e rasa, onde o atrito na interface relaciona-se aos quase comuns problemas de preparação do solo e, claro, da capacidade suporte das estruturas de contenção que, cada vez mais, afetam nossa infraestrutura civil. Novamente na macroescala, a interação solo-estrutura pode ser interpretada como a resposta entre a estrutura e seu sistema de fundação. Esta interação solo-estrutura é bastante ampla, englobando estruturas geotécnicas, como barragens de todo tipo e encontros de pontes. A mecânica da interação solo-água-estrutura, é bastante complexa, devido ao contato multicorpo e a não linearidade do solo. No contexto do melhoramento efetivo do solo argiloso mole-muito mole, com geoenrijecimento, utilizando-se o CPR Grouting, lida-se com grandes deformações impostas ao solo, durante o processo de compressão radial, via expansão de cavidades, tornando sua modelagem numé-

rica extremamente complicada. Empresas geotécnicas como a Engegraut, que detém a patente do geoenrijecimento, trabalha com ferramentas numéricas avançadas dentro do contexto das mecânicas contínua (A mecânica contínua, na geotecnia, é o campo de estudo que aplica os princípios dos meios contínuos para analisar o comportamento do solo que, embora seja composto por partículas discretas, podem ser tratados como meios contínuos em uma escala macroscópica, para simplificar a modelagem e a análise) e discreta (A mecânica discreta, na geotecnia, estuda o comportamento do solo, composto por partículas individuais ou elementos discretos. Diferentemente da mecânica con-

tínua, que trata o solo como um meio homogêneo e contínuo, a discreta reconhece a natureza granular do solo e os efeitos da interação entre suas partículas), que estão sendo desenvolvidas para abordar desafios como este, particularmente para a validação dessas ferramentas, essencial quando os dados experimentais são limitados. É desnecessário dizer que a compreensão geral desta interação é importante e necessária para melhorar projetos de sistemas geotécnicos, em um mundo cada vez mais globalizado e submetido a agentes externos mutantes que, cada vez mais, afetam nossa infraestrutura civil.



Figura 4 – Neste depósito de bobinas de chapa metálica, o projetista idealizou um espesso radier, duplamente armado para suportar (sem deformações) tensões da ordem de quase 3kg/cm^2 . A questão é que havia 20m de solo mole abaixo. O radier deformou, seguindo o solo mole abaixo, até o momento em que começou a desaprumar os pilares, paralisando a ponte rolante. O aumento da rigidez do solo, assim como sua resistência, foram obtidos com melhoramento do solo, utilizando-se o geoenrijecimento.

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

CONHECIMENTO

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

COMODIDADE

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



Um exemplo da interação solo-estrutura. O desempenho de uma fundação rasa.

Trata-se de uma estimativa probabilística de rutura, em termos da capacidade de carga do solo e, como consequência, um processo de recalque de uma fundação direta, submetida a carregamento lateral, em solo argiloso mole. Problema geotécnico clássico - o desempenho da fundação direta – que fornece um contexto numérico para se avaliar a incerteza nas propriedades do solo, para diferentes orientações de carregamento, tipicamente assumidas constantes, utilizando-se modelos constitutivos simples. Adotou-se um modelo de elemento finito 3D, em combinação com um modelo constitutivo Cam Clay avançado e modificado, tendo um envelope de tensões limitado e influenciado pelo comportamento e degradação do solo argiloso. A carga é aplicada linearmente, em condição quase que estática, até que ocorra o primeiro escoamento do solo. Os efeitos da argila mole, nos resultados, são incorporados utilizando-se formulação hidrodinâmica totalmente associada. Avaliou-se, com simulações de Monte Carlo (Técnica estatística utilizada para analisar incertezas associadas a problemas geotécnicos, como a estimativa das propriedades do solo, estabilidade de taludes ou a segurança de fundações, é particularmente útil quando há variabilidade ou limitação nos parâmetros do solo), os efeitos da distribuição espacial aleatória, das principais propriedades deste tipo de solo, ou seja, sua alta compressibilidade, quase nula permeabilidade e ângulo de atrito crítico, comparando-se com uma distribuição constante e linear. Acelerou-se o algoritmo utilizando-se uma amostragem de um hipercubo latino (técnica esta-



Figura 5 – Na Amazônia é comum utilizar-se elementos de fundação profunda, como estacas e colunas, seja de jet-grouting ou solo cimento para “conter” empuxos de terra, provocados por volumosos excessos de poropressão, gerados pelo rápido abaixamento dos rios. Completamente em vão. A única solução é o aumento da rigidez e resistência do solo com geoenrijecimento, que possibilita a adequada interação solo-estrutura-água, possibilitando a eternização das margens amazônicas.

tística utilizada para gerar amostras de variáveis de entrada, em simulações explorando o espaço de entrada de um modelo matemático ou de um experimento com várias variáveis, reduzindo-se a quantidade de amostras necessárias para se obter uma cobertura uniforme do espaço de variáveis). Os resultados mostraram que, tanto a capacidade de carga quanto o processo de recalque, seguiram distribuição gaussiana, apesar do comportamento não linear excessivo do solo. Além disso, concluiu-se que a capacidade de carga do solo e o processo de recalque aumentaram com a lateralidade do carregamento imposto, enquanto a incerteza dos resultados permaneceu a mesma.

A interface solo-estrutura é parte

Um outro exemplo de interação solo-estrutura.

O solo no contato com a fundação.

vital em qualquer projeto, exatamente por que é ali que há a transferência da carga da construção para o solo. É a região onde ocorre ou se desenvolve as maiores tensões e deformações, muito embora com espessura bem reduzida, da ordem de poucas vezes o diâmetro das partículas do solo. A linha de pesquisa procurou estabelecer o papel do solo argiloso, no comportamento mecânico das misturas com areia e, também, o da interface solo-fundação, com base em testes de cisalhamento direto. O resultado, infelizmente identificou a falta de dados, considerando-se a limi-

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

ou cinzenta. Para torná-lo rijo faça

MELHORAMENTO DE SOLO

Solicite informações
www.softsoilbrazilianreview.com.br

tação existente do comportamento mecânico da interface, utilizando-se solos argiloso e arenoso com o concreto armado. Outro aspecto relevante é a falta de conhecimento sobre como o teor de argila influencia o comportamento mecânico desta interface, juntamente com o arranjo do solo. O estudo conclui que testes de cisalhamento direto, com várias condições de carregamento, com misturas de solos arenoso-argiloso, destacando-se a influência da fração argilosa, para a melhor condição do solo na interface, é um excelente caminho já que, no laboratório, poder-se-á estabelecer ou otimizar a melhor dosagem.

A interação solo-estrutura e a importância dos limites de atterberg.

A plasticidade do solo argiloso é extremamente dependente, em uma micro-escala, da interação hidromecânica da água intersticial com as partículas da argila, caracterizado pelos limites de liquidez e plasticidade. Na realidade, existem limitações pertinentes à determinação 100% confiável dos limites de consistência. A norma brasileira NBR 6459 padroniza o ensaio do limite de liquidez com a

utilização do aparelho de Casagrande, no qual o LL é o teor de umidade, em percentual, correspondente a 25 golpes necessários para fechar a ranhura de 13mm de comprimento. A desvantagem deste método consiste na forte dependência do operador. Em todo o mundo, por outro lado, o método mais popular, empregado para a determinação do LL, é o Fall Cone (cone de penetração), no qual o cone de massa 60gr,



Figura 6 – Em áreas com grande deposição de solos argilosos moles, como a baixada de Jacarepaguá, no Rio de Janeiro, o aumento da rigidez destes solos só é possível com geoenrijecimento, na medida em que promove sua compressão/ drenagem, confinamento e consolidação.

com ângulo de 60° cai em queda livre. O LL, neste ensaio, é o teor de umidade, em percentual, correspondente à penetração de 10mm. Pesquisas mostram que, em média, o LL Casagrande = 0,86LL Fall Cone, ou seja, o LL obtido no aparelho Casagrande é 14% menor do que o obtido com o Fall Cone. O objetivo principal, no entanto, é

apresentar um referencial comparativo da resistência do solo com seu conteúdo d'água, utilizando-se os limites plásticos obtidos com o Fall Cone.

REFERÊNCIAS

- Joaquim Rodrigues é engenheiro civil M.Sc. Formado no Rio de Janeiro em 1977, pós-graduado pela COPPE na Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1999. Diretor do Soft Soil Group e da Engegraut Geotecnia e Engenharia, associada à ABMS e ao American Society of Civil Engineers desde 1994. Desenvolveu duas técnicas de tratamento de solos moles, sendo motivo de patente o GEOENRIJECIMENTO, utilizada hoje em todo o Brasil.
- Savvides, A.A.; Papadarakakis, M. Probabilistic Failure Estimation of an Oblique Loaded Footing Settlement on Cohesive Geomaterials with a Modified Cam Clay Material Yield Function.
- Akehashi, H.; Takewaki, I. Critical Analysis of Nonlinear Base-Isolated Building Considering Soil-Structure Interaction under Impulsive and Long-Duration Ground Motions.
- Abbasimaedeh, P.; Ghanbari, A.; O'Kelly, B.C.; Tavanafar, M.; Irdmoosa, K.G. Geomechanical Behaviour of Uncemented Expanded Polystyrene (EPS) Beads-Clayey Soil Mixtures as Lightweight Fill. Geotechnics 2021, 1, 38–58.
- Alba Yerro and Francesca Ceccato Soil-Water-Structure Interactions
- O'Kelly, B.C. Review of Recent Developments and Understanding of Atterberg Limits Determinations. Geotechnics 2021, 1, 59–75. [CrossRef]

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



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 1 – Na construção desta estrada estadual em Pernambuco, o projetista optou por promover o aterro necessário, para obter o greide do projeto, utilizando apenas uma geogrelha para estabilização, considerando-se a presença de solo argiloso mole-muito mole. O resultado foi a rutura do solo, ao longo de toda sua extensão. Para a adequação do projeto, foi necessário fazer a consolidação do solo mole, com geoenrijecimento. Na sequência das fotos: 1) A extensa estrada afundou no solo mole-muito mole; 2) A geogrelha utilizada para estabilizar o aterro sobre o solo mole, sem sucesso. 3) Os serviços de melhoramento de solo. 4) A estrada pronta.

A INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA. A IMPORTÂNCIA DO DESEMPENHO DO PROCESSO DEFORMATIVO À SER IMPOSTO À OBRA.



O projeto estrutural de uma construção aborda, de um modo geral, a hipótese de que a base de seus pilares encontra-se sobre apoios indelocáveis, enquanto os de fundação considera apenas as cargas originárias da estrutura

e características do solo. A independência entre estes projetos acaba por se distanciar da realidade, na medida em que a rigidez da estrutura afeta o comportamento da fundação, assim como sua movimentação sensibiliza a redistribuição dos esforços, provocando

o aparecimento de danos obra. Por outro lado, o projetista de fundação, preocupa-se com o perfil do solo, sua caracterização, a variabilidade de suas propriedades, a estimativa dos parâmetros geotécnicos, o processo executivo e o efeito da influencia do comportamento



Figura 1 – A solução de précarregamento com geodrenos deu em extensa rutura em uma obra de ampliação de estrada no norte do Rio de Janeiro. A presença de solo mole-muito mole promoveu rutura do longo da antiga rodovia estradal. A obtenção da rigidez necessária, assim como a resistência adequada só foi obtida com o melhoramento do solo. Na sequência 1, 2, 3, profunda rutura no aterro; 4) Os serviços de melhoramento do solo.

conjunto dos vários elementos que a compõe. Modernamente utiliza-se métodos numéricos, refinados com intuito de resolver esta questão, de modo a simplificar, juntamente com hipóteses que oferecem resultados satisfatórios. A interação solo – estrutura (ISE) gera efeitos na redistri-

buição dos esforços entre elementos estruturais, principalmente as cargas nos pilares, e a uniformização dos recalques, consequência da solidarização dos elementos que agregam rigidez à estrutura. A instrumentação do processo de recalque em edificações, durante o

processo construtivo, mostra-se importante para a avaliação do desempenho da fundação e contribui para o entendimento do tema. Em edifícios relativamente altos, torna-se necessário a análise da ISE, já que a ultima atualização da Norma de Fundações, da ABNT, NBR 6122 (2019), em seu item 5.5, preconiza

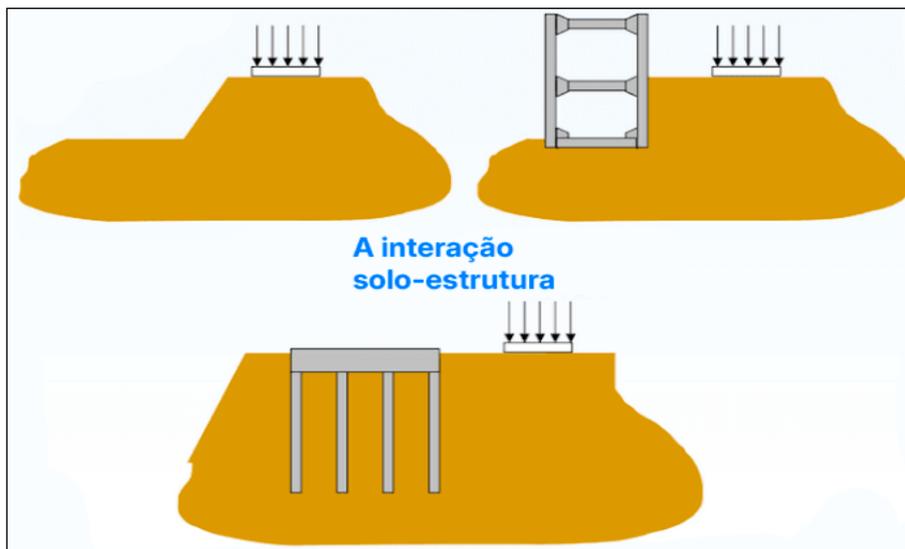


Figura 3 – A interação solo-fundação-estrutura depende do conjunto rigidez do solo, fundação e estrutura, distinguindo-se quatro modos de interação:

- Efeito do movimento do solo sobre o comportamento da estrutura;
- Ação da estrutura sobre o solo envolvente;
- Interação entre estruturas vizinhas através do solo (túneis, galerias, estacas e etc);
- Efeito do reforço imposto ao solo, como estacas, geossintéticos, ancoragens, etc.

o caso de edificações altas, em que a deformabilidade do solo pode influenciar a distribuição dos esforços.

A história desta interação.

É de 1953 o primeiro trabalho que avalia os efeitos da ISE em edificações, baseado na teoria da elasticidade, tanto para a estrutura quanto para solo, avaliando-se o recalque

total, o diferencial e os momentos fletores na fundação, chegando-se à conclusão de que a rigidez da estrutura tem grande importância frente ao recalque diferencial, sugerindo expressões para cálculo da rigidez equivalente. Posteriormente, constatou-se que a rigidez da estrutura, influencia a estimativa do recalque diferencial, tendendo a reduzir o valor da distorção, suavizando a bacia de

deformações, quando comparado aos valores do recalque calculado por métodos convencionais. Analisou-se a interação solo-estrutura, objetivando-se a comparação do efeito da progressão das cargas, em relação ao carregamento instantâneo, tanto em análises planas como tridimensionais concluindo-se que, para efeitos da ISE, a rigidez da estrutura, carregada progressivamente, pode ser estimada, aproximadamente, pela metade da rigidez da obra concluída, considerando-se o carregamento instantâneo. A instrumentação do recalque, via de regra, só ocorre quando surgem problemas visuais e funcionais na construção, razão pela qual sugere-se o monitoramento do recalque desde seu início, como forma de garantir o controle e o desempenho da fundação. Esta instrumentação nos mostra, de um modo geral, que mesmo após o fim da construção, o recalque continua a ocorrer, com magnitude média, constatando-se uniformização e redistribuição das cargas, devido a interação solo-estrutura. Ressalta-se que a não con-

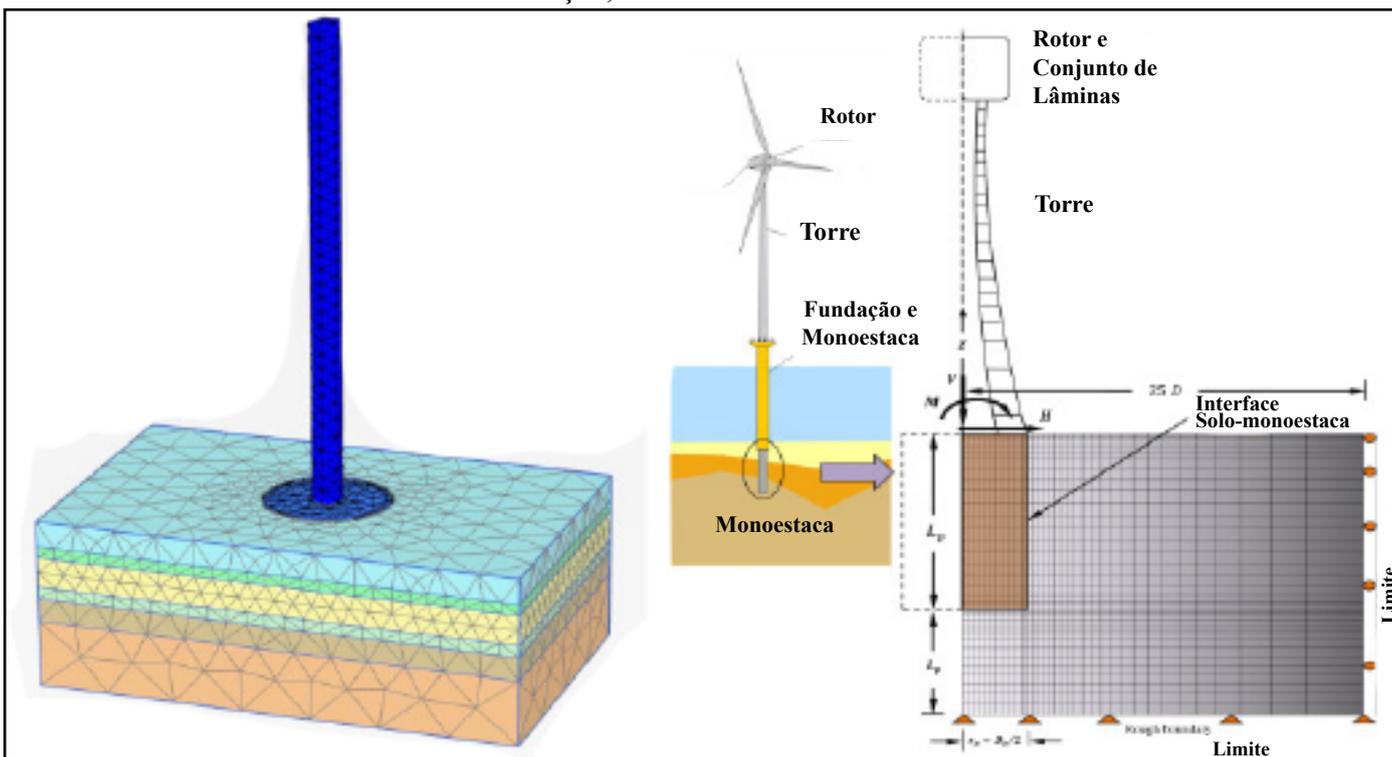


Figura 4 – A rigidez da fundação é dependente da rigidez do solo. De acordo com as curvas da figura, observa-se que qualquer alteração na rigidez do solo, irá alterar o comportamento natural de todo o sistema de fundação.

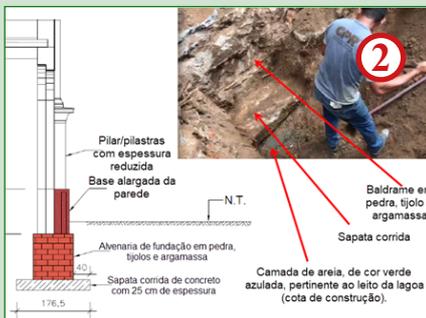


Figura 5 – Prédio histórico em Porto Alegre, RS, com mais de 100 anos, tendo quatro andares, que apresentava recalque desde o tempo da construção, devido a presença de camada de solo argiloso mole. A pouca rigidez da estrutura permitiu o desenvolvimento de grandes deformações que, de certa forma, fez sobreviver a construção. Recentemente, todo o solo de fundação foi motivo de melhoramento do solo, readequando-o a rigidez da antiga estrutura, paralisando processo de recalque. Na sequência: 1) O extenso prédio antigo com 4 andares e grossas paredes. 2) O sistema de fundação. 3) O melhoramento do solo, readequando o solo já que a fundação e o prédio foram tombados pelo Patrimônio Histórico.

sideração da sequência construtiva, pode levar o projetista a estimar o comportamento da estrutura de forma errada, diferentemente da realidade justificando que, na prática, há acréscimos de carga e rigidez de acordo com a elevação dos pavimentos e que, por consequência, o recalque e a distribuição das cargas serão diferentes, caso estes acréscimos sejam considerados instantâneos. Observa-se que nos primeiros andares, a parcela dos esforços, nos elementos estruturais, decorrentes da interação solo-estrutura, são mais significativos e que, com o aumento da rigidez, ocorre diminuição dos recalques distorcionais. Há diversos casos relatados de obras com danos, projetados sobre fundação superficial, sobre solo arenoso e solo argiloso mole, em que se analisam a grandeza e o desenvolvimento com o tempo, do recalque desenvolvido. Posteriormente, idealizou-se a interação

solo-estrutura, reproduzindo todos os problemas documentados, como trincas e fissuras. Há um caso interessante de uma edificação com 4 pavimentos, com 36 pilares ao nível térreo, assentada em horizonte arenoso, com fundação direta. Foram utilizados pinos de recalque em 10 pilares, objetivando-se acompanhar seu desenvolvimento desde o início da construção, estabelecendo-se modelos e análises para cada etapa da medição, concluindo que considerando-se a interação solo-estrutura, as cargas foram razoavelmente diferentes das apresentadas pelo calculista, que considerou apoios rígidos. O modelo mostrou tendência de transferência de carga dos pilares centrais para os periféricos e uma equalização dos recalques, estabelecendo-se que este comportamento é válido para casos de solos homogêneos horizontais.

A importância da relação solo-estrutura

A rigidez de uma fundação é muito menor que a de sua estrutura, principalmente as aporricadas, observando-se que o recalque diferencial, além de ser muito influenciado pela compressibilidade do solo é, também, dependente da rigidez da estrutura, razão pela qual sugere-se expressões para a estimativa de sistemas aporricados, recomendando-se a possibilidade em uma análise iterativa, da substituição de uma estrutura real por outra mais simples, com rigidez equivalente. A metodologia proposta por pesquisadores, possibilita análises tridimensionais de uma fundação, baseadas no cálculo matricial, considerando-se a interação estrutura – fundação – solo, através de duas equações que relacionam o comportamento da estrutura, com o recalque na



Figura 6– Estacionamento de uma rede de Supermercados construído sobre solo mole em Recife. O pavimento sofreu recalque diferencial, com valores que chegaram a 60cm, causando verdadeiras lagoas quando chovia. Foi realizado melhoramento do solo para estabelecer a rigidez necessária ao solo de fundação. Na sequência: 1) O grande estacionamento não coberto; 2) O estacionamento coberto e 3) O melhoramento do solo fora e 4) Sob o estacionamento coberto.

1. Calcula-se as reações nos apoios, considerados indeslocáveis;
2. Estas reações são aplicadas nos elementos de fundação e calcula-se o recalque do grupo;
3. Calculam-se os coeficientes rigidez (coeficiente de mola) dos apoios, dividindo-se a reação por seu respectivo deslocamento;
4. Aplicam-se molas na estrutura e recalcula-se as reações;
5. O procedimento é repetido até que ocorra a convergência do recalque e/ou reações.

Efeitos da interação Solo-estrutura

Ao se considerar, nas análises, a interação solo-estrutura, ou seja, apoios que aceitam a deformação do solo, a estrutura ao tentar movimentar-se, será parcialmente impedida pela rigidez de suas ligações. Desta forma, ocorre uma redistribuição dos esforços e uma suavização do recalque diferencial, quando comparado à análises convencionais (Figura abaixo). Com o desenvolvimento de estudos paramétricos, com fatores influen-

fundação, chamadas de equações da interação estrutura – fundação, agregando-se outra relacionando o comportamento da fundação com o solo. Há um estudo de um modelo simples de transferência de carga, de uma estaca isolada para o maciço do solo, variando-se para blocos com grupos. Para considerar a interação solo-estrutura, propôs-se um roteiro interativo resumido à seguir:

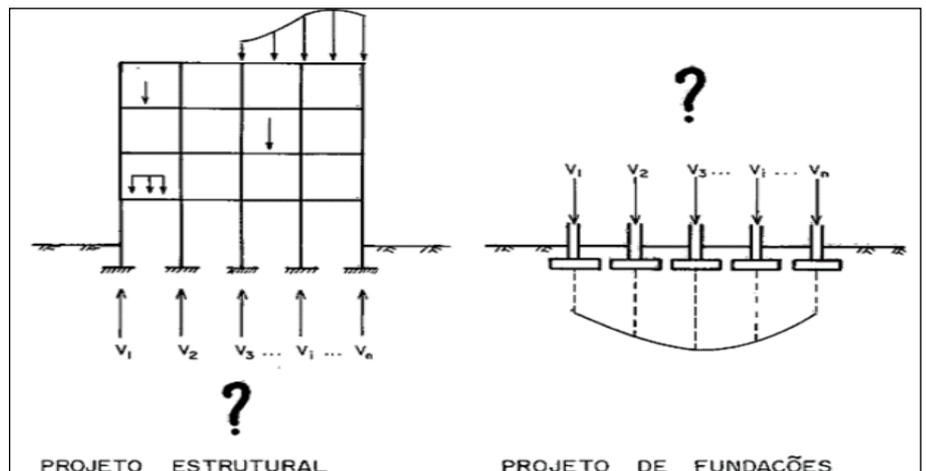


Figura 7 – Projeto convencional: O da estrutura e o de fundações.

tes, observa-se tendência à uniformização do recalque, ao se considerar a interação solo-estrutura, já que o desempenho da edificação é governado pela rigidez relativa estrutura-solo e que o recalque diferencial é mais influenciado pela ISE que o recalque absoluto. Análises em edifícios, com sistemas distintos, considerando a rigidez do solo, mesmo que elevada (rígido), mostrou influenciar bastante alguns elementos estruturais, quando comparado a apoios fixos, ressaltando-se que edifícios com sistema de laje-cogumelo apresentam maior sensibilidade à fundações flexíveis do que edifícios com sistema clássico, laje-viga-pilar. Há casos da ISE que relacionam a rigidez da estrutura com o comportamento do solo e o tempo, aproximando-se de elástico quando o

recalque ocorre rapidamente. Em situações em que o recalque é muito lento, a estrutura tende a um comportamento viscoso e, desta forma, deve-se investigar o fenômeno da fluência do solo. Há uma metodologia, para análise de vigas contínuas sobre apoios viscoelásticos, que permite o estudo da interação solo-estrutura, entendendo que os esforços, tanto nas vigas como nos apoios, variam ao longo do tempo e que a não consideração do comportamento viscoelástico pode gerar erros contra a segurança.

Influencia do numero de pavimentos e do processo construtivo

Com o aumento do numero de pavimentos da edificação, o con-

junto estrutural torna-se gradativamente mais rígido, no entanto, observa-se que o ganho de rigidez não apresenta linearidade, ou seja, os primeiros pavimentos contribuem de maneira muito mais significativa que os andares mais altos. Observa-se que aumentando progressivamente o numero de pavimentos, a rigidez da estrutura tende a um valor limite, passando a não influenciar a parcela dos esforços nos pilares, devido à interação solo-estrutura. Além disso, o recalque, a partir deste momento, torna-se dependente apenas do carregamento.

PRESSIÔMETRO
Um ensaio geotécnico completo realizado no campo
Fácil de operar e 100 % viável

ROCTEST

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



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

Influência da vizinhança

Há estudos sobre a questão da influência das construções vizinhas, tipificando quatro situações distintas de movimentos da edificação:

a) Em edificações construídas simultâneas, há ocorrência de maiores recalques na região central, devido à superposição das tensões, havendo movimentação dos edifícios em direções opostas. (Figura 8a)

b) Em edificações construídas em momentos diferentes, a primeira construção provoca um pré-adensamento no solo na região próxima. O segundo edifício, ao ser construído, gera acréscimo de tensões no solo que, na região central, ocorrerá superposição induzindo um aumento no processo de recalque. Porém, como o segundo prédio será assentado em solo pré-adensado, o recalque afastado ao vizinho será maior que o da região próxima. Com isto, a movimentação do conjunto poderá ocorrer na mesma direção. (Figura 8b);

c) Em prédios construídos entre outros já existentes, o primeiro provoca acréscimo de tensões nas regiões centrais entre os vizinhos. Desta forma, os demais poderão se movimentar na direção da última construção. Sendo simétrico, o prédio central não sofrerá desaprumo. (Figura 8c);

d) Em Edifícios construídos próximos a um já existente, que já promoveu pré-adensamento no solo, possibilitará que o processo de recalque, na região mais afastada, seja maior. Sendo simétricos, o prédio central não sofrerá movimentação. (Figura 8d)

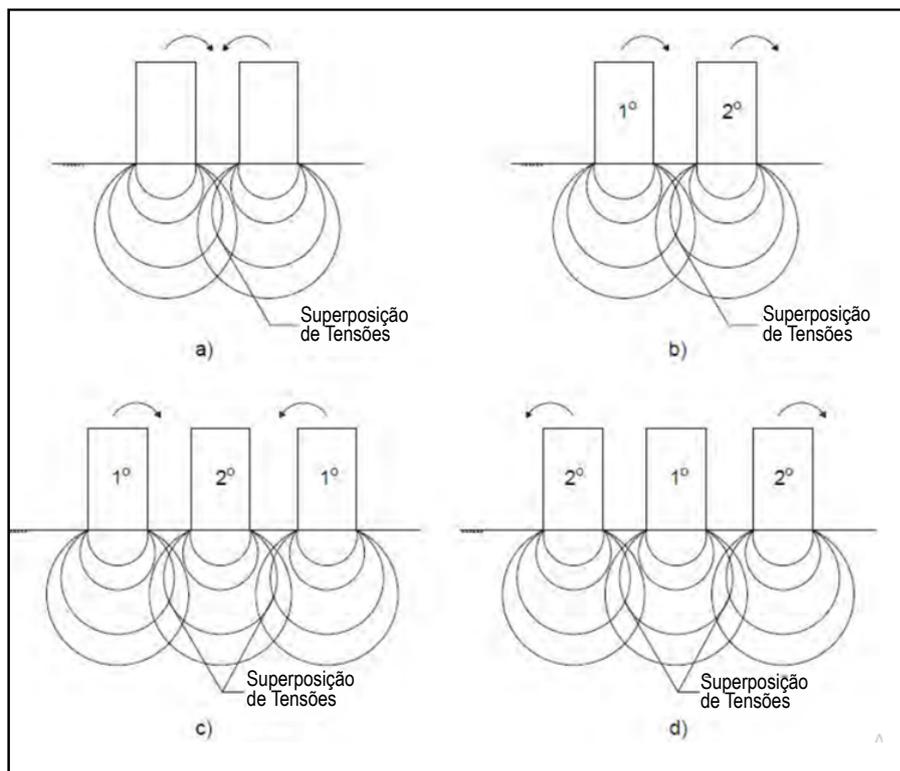


Figura 8 – Efeito de construções vizinhas.

A modelagem do solo

Para se modelar o solo, considerando-se a ISE, a representação adequada do seu comportamento, é tarefa imprescindível, para se obter bons resultados. Existem dois modelos, o de Winkler e o do meio contínuo. Winkler propôs o solo sendo substituído por um sistema de molas, independentes entre si e com rigidez equivalente (Figura 9). Desta forma, as cargas geram deslocamentos somente no ponto de aplicação, não sendo considerado os efeitos de continuidade do meio, impondo-se um comportamento elástico ao solo. É notável que o modelo de Winkler é simples, permitindo considerar a fundação como apoio móvel. A Equação, a seguir, representa a descrição matemática do comportamento de cada mola do sistema.

$$Q = kv \cdot w$$

Onde:

kv é o módulo de reação do solo (coeficiente de reação vertical)

w é o deslocamento sofrido pela mola

Q é a carga na mola

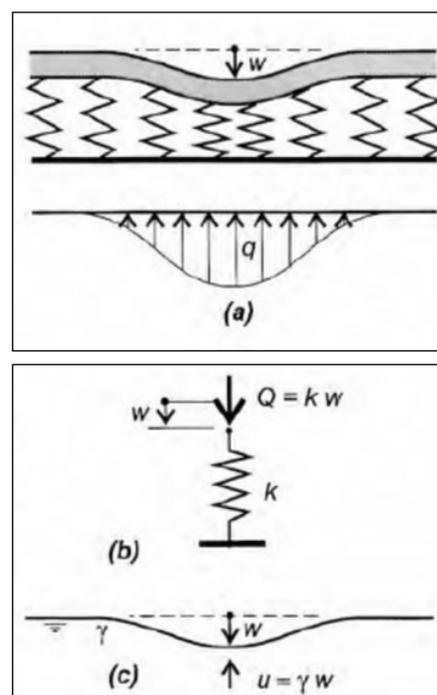


Figura 9 – Modelo de Winkler: (a) – (c). VELLOSO E LOPES (2010)

Observa-se, devido à simplificação, que o modelo por não contemplar a continuidade com o solo, torna-se pouco representativo, não considerando a influência entre fundação e vizinho. Dependendo do problema a ser analisado, o resultado pode ficar muito distante da realidade. A Figura 10 mostra, graficamente, a comparação entre o modelo de Winkler e a realidade.

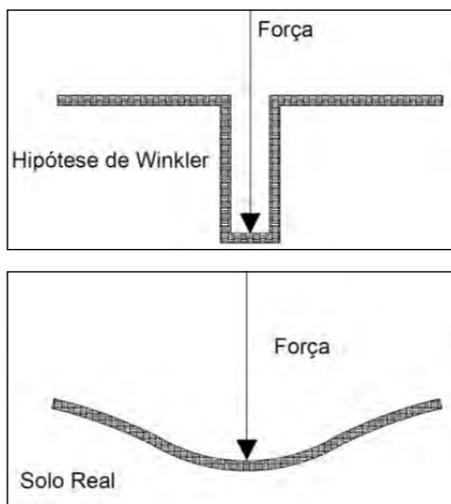


Figura 10 – Comparação do modelo de Winkler e o solo na realidade.

O modelo contínuo elástico é uma aproximação da representação comportamental do solo, contendo mais informação acerca das tensões e deformações. O modelo é regido pela teoria da elasticidade, tendo como parâmetros de entrada o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν) (Figura 11a). Mesmo o solo não sendo um material elástico, há bons resultados, desde que haja pequenas deformações e que sejam escolhidos parâmetros condizentes com suas propriedades mecânicas. Um grande diferencial ao se considerar o solo como um meio contínuo, é a aplicação das cargas gerar deslocamentos em pontos distintos. Desta forma, sendo contemplada a influência recíproca, entre os elementos da fundação, o recalque gerado resultará da carga ali aplicada e, também, das demais que se encontram próximas. A surgência do modelo contínuo elastoplástico

co para representar, de forma mais consistente, o comportamento do solo, preenche algumas deficiências dos modelos apresentados anteriormente. O solo, ao ser carregado inicialmente, deforma elasticamente e, ao se ultrapassar uma determinada tensão, passa a sofrer deformações plásticas, ou seja, permanentes. Por este modelo ser mais complexo, o solo necessita ser caracterizado por mais parâmetros, como o Módulo de elasticidade, o Coeficiente de Poisson, a coesão e o ângulo de atrito (Figura 11b). A solução destes problemas é de difícil conclusão na mecânica do contínuo, sendo necessária uma aproximação numérica, utilizando

por exemplo, o Método dos Elementos Finitos.

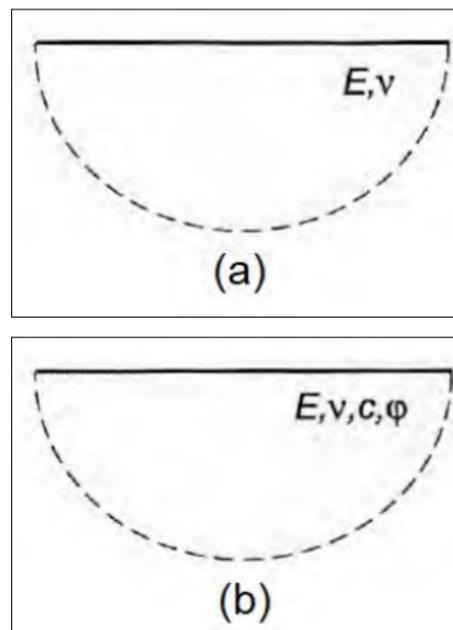


Figura 11 – Modelo do meio contínuo (a) Elástico; (b) Elastoplástico (VELLOSO E LOPES (2010)).

REFERÊNCIAS

- Patricia Karina Tinoco é engenheira geotécnica. Trabalha com melhoramento de solos moles.
- BERARDI, R.; LANCELLOTTA, R. Stiffness of granular soils from field performance. *Geotechnique*, Vol. 41 Issue 1, Março, pp.149–157, 1991.
- BURLAND, J. B.; BURBIDGE, M. C. Settlements of foundation on sand and gravel. In: *Institution of Civil Engineers*, 1985, London. *Proceedings...* London: Institution of Civil Engineers, 1985.
- COLARES, G.M. Programa para análise da interação solo-estrutura no projeto de edifícios. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- IWAMOTO, R. K. Alguns Aspectos dos Efeitos da Interação Solo-estrutura em Edifícios de Múltiplos Andares com Fundação Profunda, Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2000.
- Enzo Cosenza Zucchi - INTERAÇÃO SOLO x ESTRUTURA. ANÁLISE DE UM CASO DE OBRA COM ACOMPANHAMENTO DOS RECALQUES
- MENDONÇA, F.R.S. Avaliação do efeito da interação solo – estrutura sobre o comportamento estrutural de edificações em aço e mistas (aço-concreto) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2012.
- POULOS, H.G. Settlement Analysis of Structural Foundation Systems. *Proc. of IV South-East Asian Conference on Soil Engineering*, vol.4, Kuala Lumpur, pp. 52-52, 1975.
- SANDRONI, S. S. “Young Metamorphic Residual Soils”. *Proc. IX Panamerican Conf. on S. M. F. E.*, Viña del Mar, V.4 pp. 1771-1778, 1991

Are you looking for a soil improvement in portuguese?

BEST SELLER

MELHORAMENTO DO SOLO MOLE E O GEOENRIJECIMENTO



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

QUAL A IMPORTÂNCIA DO CONHECIMENTO DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA, PARA A CONSTRUÇÃO DE UMA EDIFICAÇÃO E A POSSÍVEL SURGÊNCIA DE REGALQUE?



1

Figura 1 – Neste condomínio de casas de luxo, estaqueou-se apenas as construções e atterrando-se o resto. A presença de solo mole provocou o efeito Tschebotarioff nas estacas. Ausência da interação solo-estrutura. O melhoramento do solo corrigiu o problema. Na foto maior o melhoramento do solo sendo executado. Na fotos 2 e 3, o efeito Tschebotarioff nas estacas e a região com o solo todo melhorado.



2



3

Fundações são classificadas, basicamente, em rasas (direta ou superficial) ou profundas, diferenciando-se por sua profundidade e a forma de transmissão dos esforços ao solo, conforme Figura 2. A definição de fundação profunda, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 6122, 2019, p. 5, define:

Elemento de fundação que transmite a carga ao terreno pela base (resistência de ponta) ou por sua superfície lateral (resistência do fuste) ou por uma combinação das duas, sendo sua ponta ou base apoiada em uma profundidade superior a oito vezes a sua menor dimensão em planta e no mínimo 3,0 m; [...]

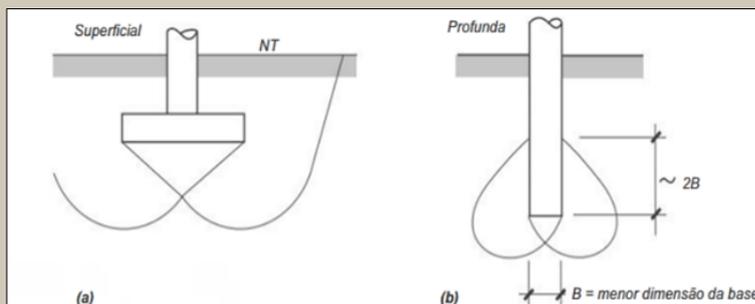


Figura 2 – Tipos de fundação: (A) Superficial; (B) Profunda.

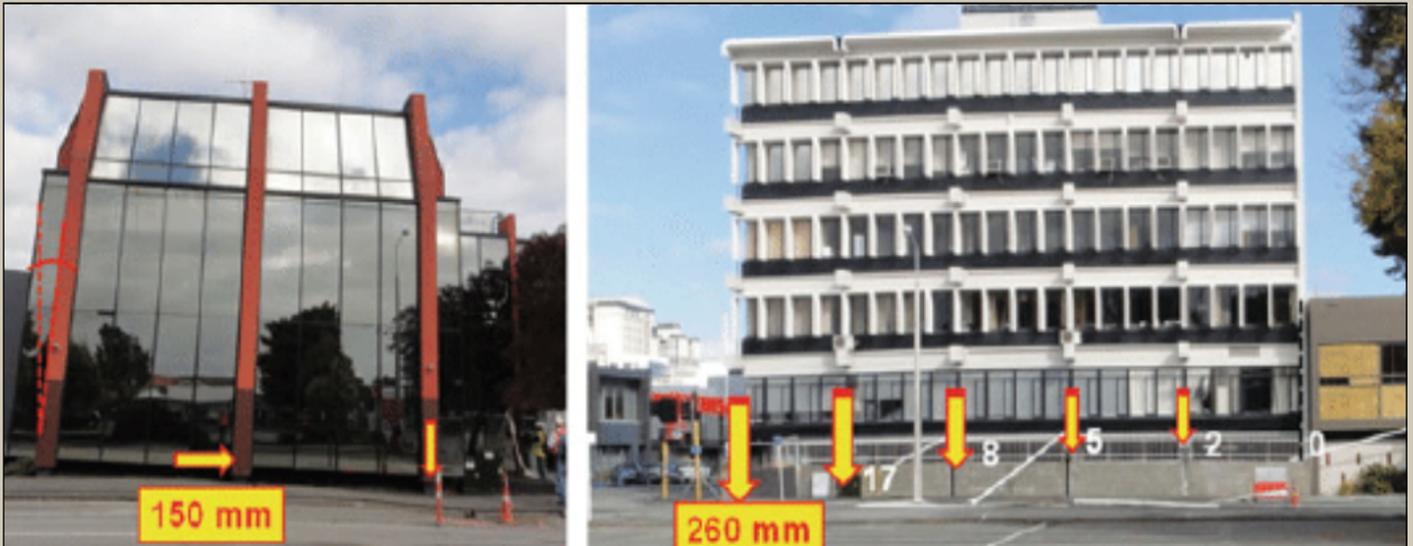
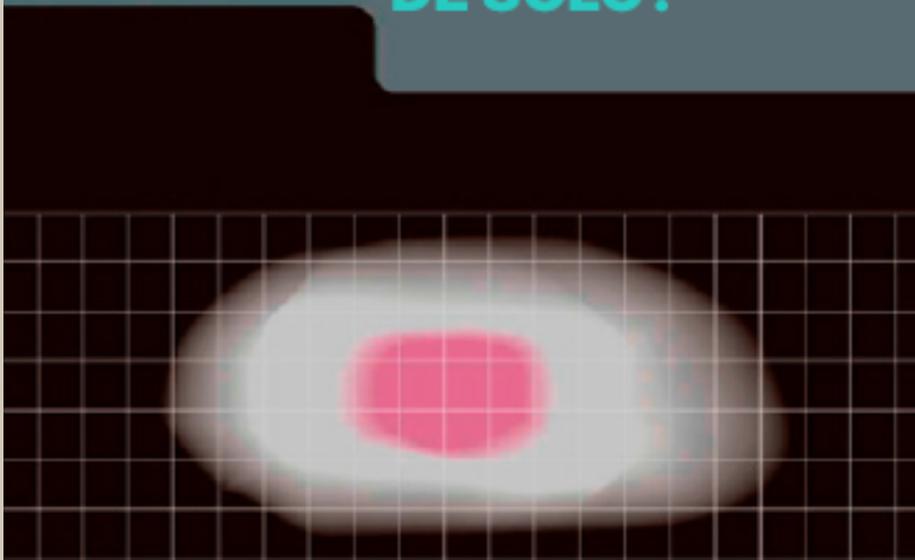


Figura 3 – Recalque diferencial em edificações.

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.



ENEGRAUT
 Enegraut.com.br

De um modo geral, fundação profunda pode ser realizada com estacas, de diversos tipos (madeira, metálica, pré-moldada etc.), podendo ser executada por cravação, escavação ou de forma mista. A utilização deste tipo de fundação, deve-se à baixa capacidade do solo superficial suportar elevadas cargas, ou que estejam sujeitas a processos de erosão, quando existir possibilidade de haver escavação próxima à obra. Toda estrutura precisa trabalhar como elemento único, para haver o mecanismo de interação solo-estrutura, o que costuma ser desprezado, visto que o projeto estrutural é realizado com a hipótese do apoio indeslocável. Em contrapartida, no projeto de fundação, considera-se apenas o carregamento resultante do projeto estrutural e as propriedades do solo, estimando-se o recalque com a hipótese de que cada elemento de fundação deslocar-se-á independentemente. Em projetos estruturais convencionais, considera-se a hipótese de que apoios em estruturas hiperestáticas, adaptam-se de forma mais simples à deformações do solo

mas, embora este procedimento apresente resultados satisfatórios, está longe da realidade, ficando mais evidente em edifícios mais altos. Torna-se necessário ter uma visão mais abrangente, dos diferentes materiais empregados, de forma que integre o sistema estrutural e o solo, os quais formam um conjunto de elementos, que ocupam de forma contínua, um espaço físico delimitado na superfície do terreno e do indelocável. A interação solo-estrutura é responsável pela distribuição dos esforços gerados pelos pilares, onde os mais carregados distribuem seus esforços para os menos solicitados, podendo causar esmagamento destas peças devido à sobrecarga não prevista. Consequentemente, implica na alteração dos recalques, afetando principalmente o recalque diferencial.

Efeitos da Interação Solo-Estrutura

Diversos pesquisadores demonstram que ao considerar os efeitos da interação, os esforços variam do modelo calculado pela hipótese dos apoios indelocáveis, razão pela qual diversos estudos utilizam o modelo de estrutura tridimensional, para demonstrar a importância da interação solo-estrutura, na análise global, considerando-se a contribuição da rigidez transversal à flexão das lajes, a existência da excentricidade das vigas em relação aos pilares, e a hipótese do diafragma rígido no plano horizontal, para cada pavimento, concluindo-se que os esforços devido ao mecanismo ISE, são maiores nos primeiros

Medidor de Recalque com Alta Sensibilidade

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



Para mais informações, acesse: Rogertec.com.br ou Atendimento@rogertec.com.br

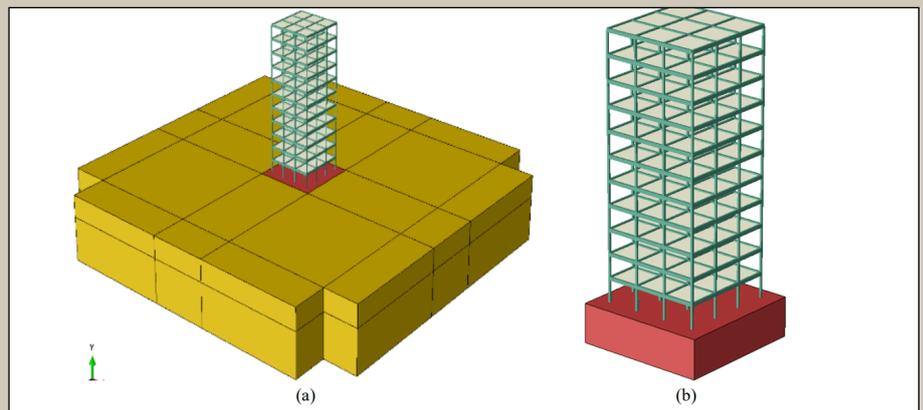


Figura 4 – Modelagem no Abaqus 3D para uma edificação considerando: a) a interação solo-estrutura; b) Com base fixa.

pavimentos e que a diminuição do recalque diferencial e da distorção angular são influenciados pela rigidez da estrutura. Ao considerarmos a influência do mecanismo ISE, no comportamento da estrutura em concreto armado, poder-se-á analisar a redistribuição dos esforços horizontais e dos momentos fletores na base dos pilares e a estabilidade global da estrutura, concluindo-se que há tendência para a uniformização do deslocamento horizontal. Poder-se-á elaborar, também, um programa computacional para análise da estrutura, considerando a ISE, onde o diferencial é a modelagem da estrutura constituída de forma única, eliminando a necessidade de realizar interações. Como exemplo, acompanhou-se o desempenho estrutural

de um edifício, em concreto armado, com 26 pavimentos, onde a fundação foi executada com estacas em hélice contínua, monitorando-se o recalque e toda a deformação imposta nos pilares. Este monitoramento permitiu que o programa elaborado fosse validado, servindo como parâmetro de comparação entre os esforços com/sem o mecanismo ISE. Com a utilização de fundação profunda, observa-se que a anisotropia do solo possui baixa influência sobre a rotação com estacas flexíveis e alta influência com estacas rígidas, detalhe este observado com a utilização do método de camadas finitas, para analisar o comportamento das estacas carregadas lateralmente, em solos transversalmente anisotrópicos, verificando-se sua in-

fluência. Este importante estudo considerou as propriedades básicas do solo argiloso. Em relação à deflexão, o modelo anisotrópico apresenta valores menores, quando comparado ao modelo isotrópico, sendo menor para estacas flexíveis.

O resultado do modelo anisotrópico, assemelha-se ao que acontece na realidade, prevendo-se valores relativamente menores para momentos fletores do que considerando a isotropia do solo, com exceção próximo à superfície.

Outro fator importante, que deve ser considerado, é o efeito da deformabilidade do solo, onde a redistribuição dos esforços tende a ser superior, conforme a deformabilidade do maciço do solo de fundação, ocasionando uniformização das cargas na fundação e

Soft Soil Group
Apresenta



WEBINAR SOLOS MOLES

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



uma suavização do recalque. Este efeito possui integral influência em edifícios mais baixos, com seis a oito pavimentos, enquanto a partir do décimo pavimento a influência da deformação tende a reduzir, conforme o aumento do número de pavimentos.

Fatores que Influenciam a Interação Solo Estrutura

Com a utilização dos exemplos básicos apresentados (figura 5), é possível representar prováveis comportamentos da estrutura, conforme o sistema e/ou materiais utilizados.

1- Para que a distribuição das tensões, de contato nos apoios, seja menor no centro e maior nos extremos, considera-se estruturas infinitamente rígidas que apresentem recalques uniformes. Um exemplo apresentado, para este caso, é um edifício alto com fechamento de paredes resistentes, que trabalhe com a estrutura.

2- A velocidade de progressão do recalque, não interfere na rigidez que uma estrutura perfeitamente elástica possui. Neste caso, o recalque diferencial será menor que na estrutura com rigidez nula (caso 4) e a distribuição das tensões de contato variam menos durante o processo de recalque. Estruturas em aço possuem este comportamento.

3- Em uma estrutura visco-plástica, a velocidade de progressão do recalque diferencial irá interferir em sua rigidez, pois apresentando recalque em um cur-

to espaço de tempo/imediato, terá comportamento elástico (caso 2). Caso a progressão do recalque ocorra em um espaço de tempo maior, o comportamento desta estrutura é comparado a um líquido viscoso (caso 4). Estruturas em concreto armado tendem a apresentar estas características, devido à fluência do concreto que ocasiona a redistribuição das tensões para outras peças menos carregadas.

4- Quando a estrutura não apresenta rigidez ao recalque diferencial, adapta-se facilmente às deformações do solo, já que a distribuição das tensões existentes não se altera, conforme a velocidade da progressão do recalque. Estruturas que apresentam este comportamento, são isostáticas e estreitas.

O sistema de interação solo-estrutura utiliza a modelagem numérica elástica (caso 2) considerando recalques imediatos.

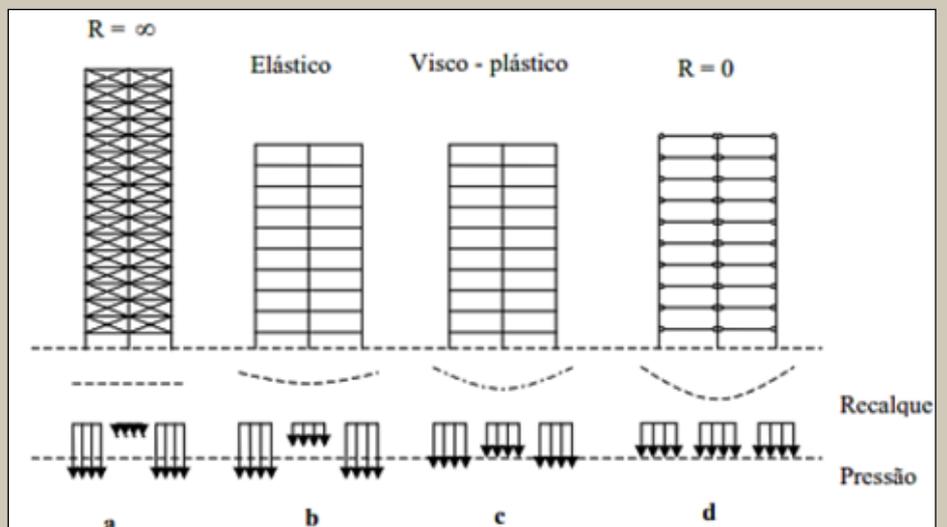


Figura 5 – Casos de interação solo-estrutura.

Quanto maior o número de pavimentos de uma edificação, mais rígida a estrutura global será, entretanto, a relação entre o número de pavimentos, comparando-se à rigidez global, não apresenta linearidade pelo fato dos pavimentos inferiores sofrerem maior influência da interação solo-estrutura que os últimos pavimentos.

A estrutura do edifício fica mais rígida, à medida que em que a edificação aumenta seu número de pavimentos, tornando-se importante considerar a sequência da construção do edifício, na análise da interação solo-estrutura. Muitas vezes, por simplicidade, a análise é feita assumindo-se que todo o carregamento só começa quando o edifício está concluído. Na realidade, as cargas são aplicadas à construção à medida que cada andar é construído, de forma

incremental. Observa-se que o processo de recalque possui a tendência a um comportamento uniforme, conforme se desenvolve a construção devido ao aumento de sua rigidez em relação à altura, embora não haja um crescimento linear conforme o número de pavimentos. Ao se analisar o comportamento do recalque em uma edificação de 14 pavimentos, demonstra-se dois modelos de hipóteses, o primeiro é que ao não se considerar a interação solo-estrutura e os efeitos construtivos,

o recalque diferencial acaba por ser superestimado, pelo fato da rigidez da estrutura não ser considerada. No segundo modelo, considera-se a interação solo-estrutura, porém o carregamento é aplicado de imediato, ou seja, o recalque diferencial é subestimado, o que induz a maior rigidez da estrutura do que a real. Desta forma, o modelo que mais se assemelha a da realidade é a consideração da interação solo-estrutura e a aplicação progressiva do carregamento, onde a rigidez modifica os elementos da estrutura, a cada etapa construtiva. Objetivando-se simular numericamente a sequência construtiva, realizou-se um processo de análise para a construção de cada pavimento, considerando-se somente o carregamento aplicado no último pavimento, com todas as barras construídas até então. A determinação dos finais se dá pela soma dos esforços calculados para cada etapa. Ao respeitar esta sequência construtiva, tem-se que o deslocamento diferencial, entre os nós de um mesmo pavimento, diminui nos andares superiores, tendo seu pico de máximo a meia altura da construção.

Métodos para análise da interação solo-estrutura

Por exemplo, um conjunto de estacas, muito próximas entre si, formam um complexo sistema, já que interagem com o solo altamente hiperestático, devido a sua condição de contorno e, no topo, é ligado a um bloco rígido, que usualmente também está em contato com o solo. A transferência dos esforços irá depender de como as estacas serão carregadas, seja por esforço axial, lateral, de torção ou pela combinação. As estacas recebem cargas de compressão,

Medidor de Recalques com Alta Sensibilidade

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

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



dissipando-as para o solo de duas maneiras:

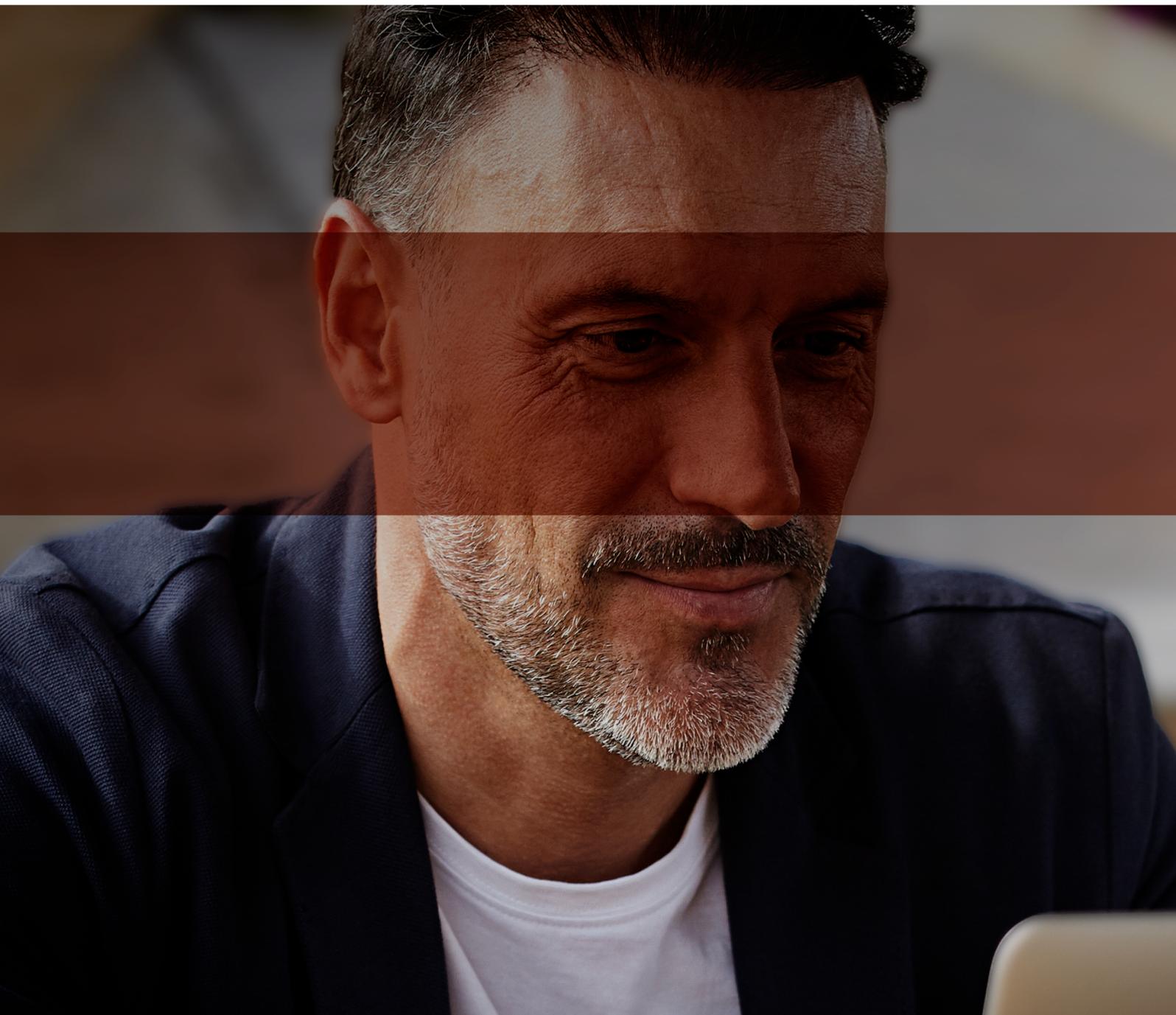
- Ao Longo do Fuste Aplicando o carregamento ocorre um pequeno movimento entre estaca-solo ocasionando tensões de cisalhamento, dando origem a reação (força) *PL*;
- Na Base da Estaca seu movimento gera pressão devido ao conta-

to com o solo, provocando tensões que dão origem a reação (força) *PP*.

O módulo da interação solo-estrutura considera carregamentos axiais e esforços de compressão para estacas verticais e com pequena inclinação. Para a parte da análise da interação solo-estrutura, o programa estima a ruptura do sistema estaca-solo por dois métodos: Aoki-Velloso (1975) e Decourt-Quaresma (1978).

REFERÊNCIAS

- GABRIELA ZEMOLIN RIGHI. ANÁLISE DE INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA EM EDIFÍCIO DE CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO2000. Universidade Federal do Pampa, 2023.
- IWAMOTO, R. K. Alguns Aspectos dos Efeitos da Interação Solo-estrutura em Edifícios de Múltiplos Andares com Fundação Profunda, Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2000. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Engineers, 1985.
- LOPES, Francisco de Rezende; GUSMÃO, Alexandre Duarte. On the Influence of Soil-Structure Interaction in the Distribution of Foundation Loads and Settlements. In: 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1991, Firenze. Anais: 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Itália, 1991. v.2. p. 475-478.
- MELO, Jaciara de Moraes de. Estudo da Interação Solo-Estrutura em Estruturas com Fundações Profundas. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.
- MOTA, Magnólia Maria Campêlo. Interação Solo-Estrutura em Edifícios com Fundações Profundas: Método Numérico e Resultados Observados no Campo. 2009. Tese (Doutorado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- RUAS, Matheus Dias. Análise da Interação Solo-Estrutura em Edifícios de Concreto Armado com Fundações Profundas. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015.
- SANTOS, Marcell Gustavo de Chagas. Análise Estrutural dos Efeitos dos Deslocamentos dos Apoios de Edifícios de Parede de Concreto Moldadas no Local. 2016. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.



:: 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.



SOFT SOIL
BRAZILIAN
INSTITUTE

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



COMO RESOLVER OS PROBLEMAS DA INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA.



Figura 1 – Melhoria da rigidez e resistência do solo para receber a estrutura de um aterro de 12m de altura, necessário a execução de uma rodovia marginal à via Anhanguera (SP - 330). Nas fotos menores o melhoramento do solo e a elevação do aterro com a marginal executada.

A interação solo-estrutura (ISE) é um campo de pesquisa exaustivamente estudado, embora não pareça, definindo-se praticamente todos os efeitos possíveis em construções como edificações, portos, estradas, aeroportos e etc, apesar da abundante literatura, apoiando este fenômeno bem conhecido, muitas das vezes é esquecido por projetistas. Nesta edição da SSBR, procuramos destacar a importância da ISE, em diferentes tipos de estruturas, quando as condições da interação são apresentadas, por meio de estudos de casos que demonstram suas consequências na resposta da construção, evidenciando maneiras de avaliá-la. A ISE é um evento multifatorial, que envolve tanto a engenharia geotécnica, quanto a estrutural, rodeando fatores como a rigidez da estrutura, fundação e solo, desempenhando papel signi-

ficativo. A magnitude e o tipo de carga aplicada à construção, ou ao solo também contribuem, ocorrendo quando solos moles estão presentes, combinados com estimulação originadas em sua estrutura, resultando em deformações no solo, movimentação complexa da fundação alterando, assim, a resposta estrutural da construção,

impondo desvios à idealização de suportes físicos frequentemente considerados no projeto. Para analisar a ISE, torna-se necessário considerar fatores como geometria, rigidez da estrutura, propriedades do solo e como as cargas são aplicadas, conforme diagrama esquemático mostrado na figura abaixo.

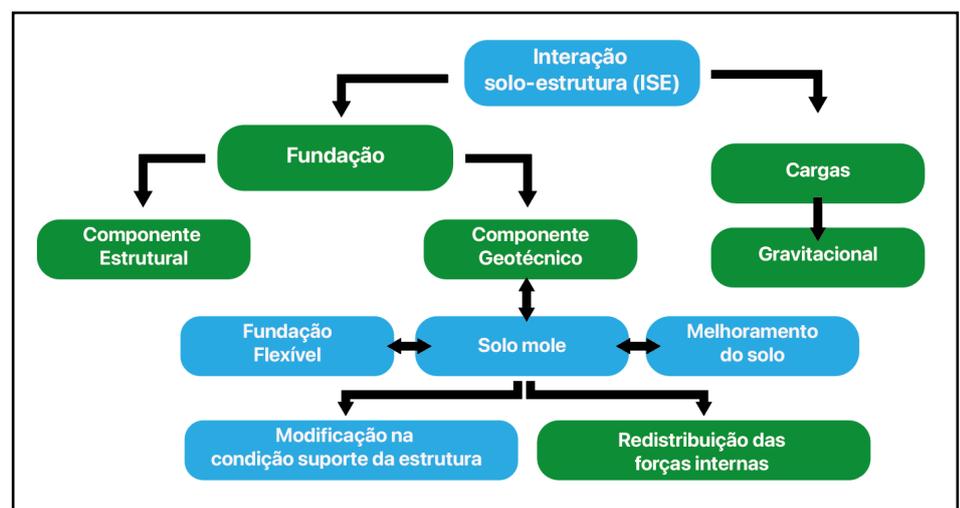


Figura 2 – Fatores e consequências da interação solo-estrutura.



Nestes últimos anos desenvolveu-se vários métodos de análise da ISE, divididos pelos métodos direto, que analisa o solo e a construção como um todo, exigindo modelagem numérica do problema, o que torna cara a pesquisa, e o da subestrutura, que simplifica o modelo, dividindo a estrutura e o solo, separando-os, podendo combinar a modelagem numérica da construção com métodos analíticos pertinentes ao solo. A figura, ao lado, mostra as possíveis combinações que podem surgir em soluções para problemas de ISE. Ao se analisar um projeto de uma construção, verifica-se que seus apoios são considerados perfeitamente fixos, assumindo-se uma conexão contínua entre os elementos verticais de apoio e sua fundação, desconsiderando-se possível rotação e deslo-

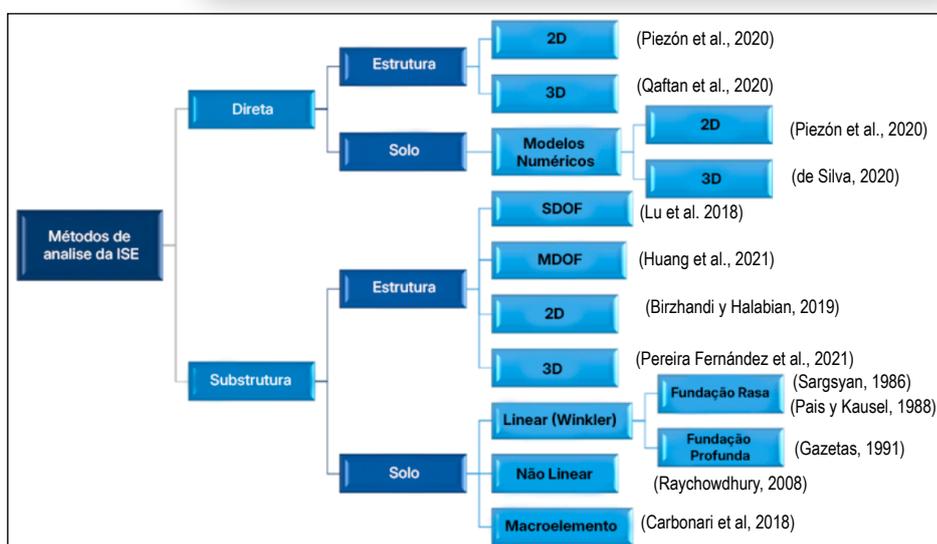


Figura 3 – Métodos de análise da ISE.

camentos que possam ocorrer no solo de fundação. Portanto, este critério só será válido quando os elementos de fundação da construção estiverem apoiados em solo rígido ou competente. Quando essa condição não ocorre, deslocamentos e rotações ocorrem, promovendo fortes alterações na

condição dos apoios da estrutura, conduzindo à uma redistribuição imprevista das tensões e deformações, resultando em imprecisão no projeto estrutural. É exatamente por isso que diversos pesquisadores propõem que a suposição de bases fixas somente é válida quando a rigidez do solo

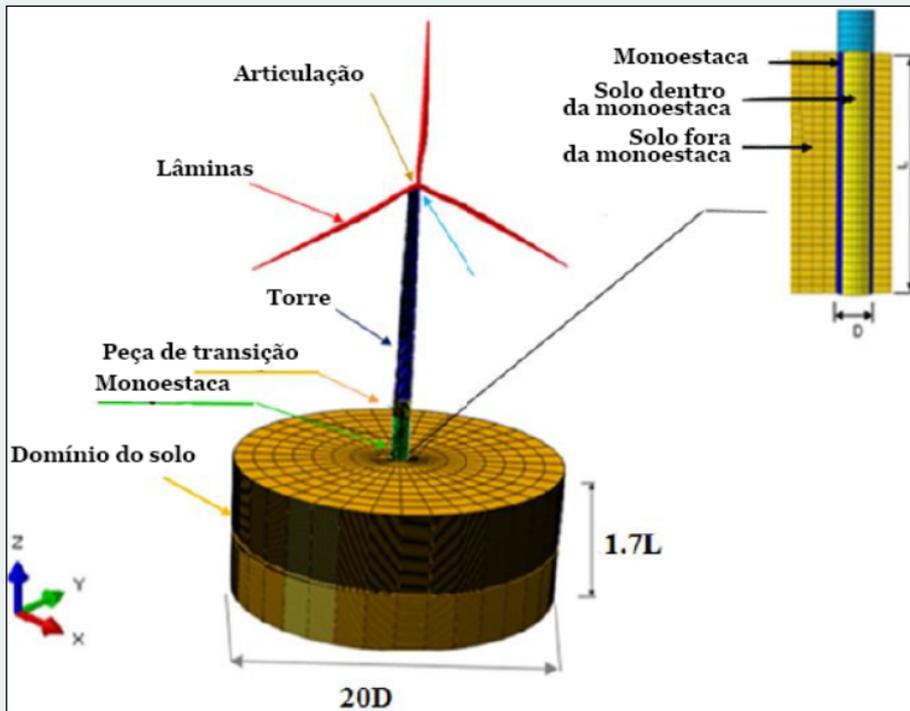


Figura 4 – Modelo de elemento finito tridimensional de uma turbina eólica, considerando-se a interação solo-estrutura

formar dois métodos de análises, o da aproximação da subestrutura e o direto.

Método da subestrutura

Este método objetiva encontrar um sistema de reações que, quando aplicado simultaneamente aos elementos de fundações e ao solo, produz a mesma configuração de deslocamentos diferenciais entre eles. O modelo elástico, pertinente a este método, representa o solo como um sistema de molas idênticas e naturalmente desconectadas, conforme figura 6, a deformação do solo, devido às cargas aplicadas, é limitada apenas às regiões carregadas e o solo é considerado elástico. O modelo estabelece a relação entre a pressão e a deflexão dada pela fórmula abaixo, onde P é a pressão externa aplicada, K é o módulo da reação ou módulo do subleito e W é a deflexão. Uma das complexidades deste modelo é a determinação do K , razão entre a carga aplicada e o recalque (P/D), que representa a rigidez da mola idealizada para simular o solo da fundação, com testes edométricos de consolidação, CBR, placa de carga e cisalhamento triaxial. As limitações deste método restringem seu uso.

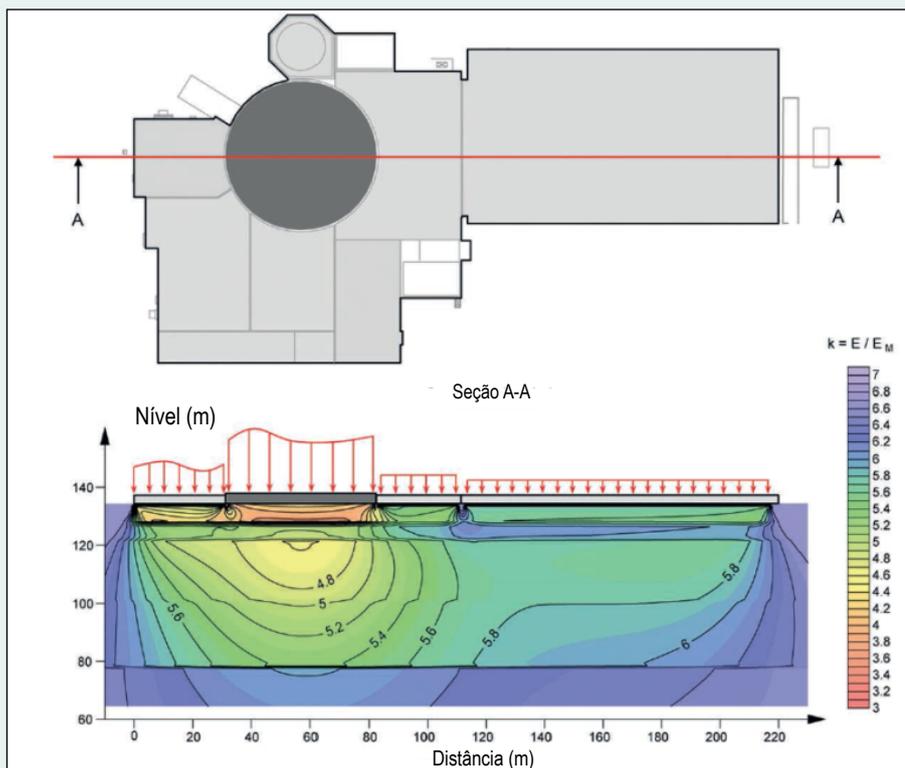


Figura 5 – A interação solo-estrutura implica no cálculo dos deslocamentos tanto para a estrutura quanto para sua fundação, razão pela qual torna-se necessário calculá-las.

de fundação for relativamente maior que a da estrutura. Ou seja, estruturas apoiadas em rocha, ou solo muito rijo, a base pode ser considerada fixa. A questão vem à tona quando surgem solos com rigidez questionável, como solos arenosos fofos ou argilosos mo-

les, onde os efeitos da ISE podem ser significativos e, de forma alguma podem ser negligenciados. Várias simplificações podem ser feitas, para considerar o efeito da ISE na análise de uma edificação, seja tanto para a estrutura quanto para o solo, combinando-se para

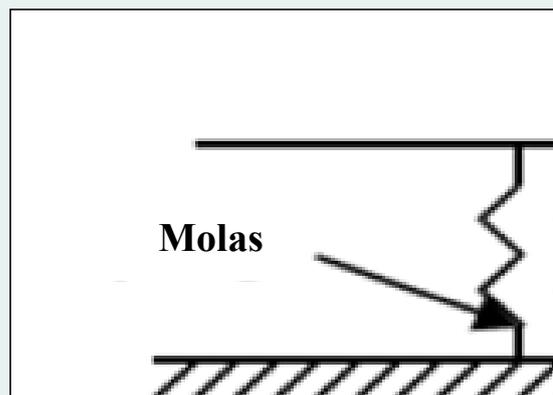


Figura 6 – Fatores e conseqüências da interação solo-estrutura

Método direto

Neste método, utiliza-se a modelagem numérica para integrar o solo e a estrutura em um único modelo, resolvendo as equações do movimento que regem todo o sistema. O solo é representado como um contínuo, e seu desempenho não linear pode ser capturado por meio de modelos de comportamento. O relacionamento fundação-solo é obtido utilizando-se elementos de interface que garantem os efeitos desta interação. As figuras abaixo representam um modelo à duas e a três dimensões.

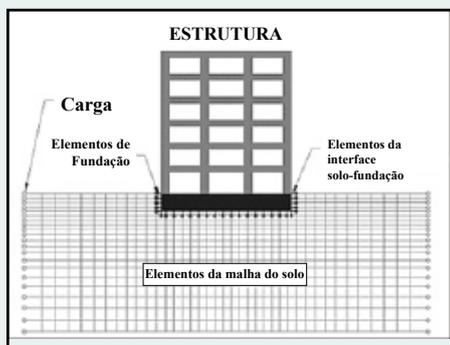


Figura 7 - Método direto para obtenção da ISE à duas dimensões.

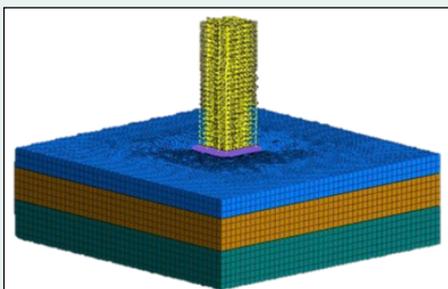


Figura 8 - Método direto para obtenção da ISE à três dimensões.

O solo é um meio contínuo, que pode ser considerado “infinito” e, para resolver este problema, utilizam-se métodos numéricos, definindo-se o solo como um domínio, discretizado em subdomínios menores, com graus finitos de liberdade para cada elemento. Obtém-se esta discretização utilizando-se varias técnicas numéricas, como o método dos elementos finitos (MEF), o método das diferenças finitas (MDF) e o método dos elementos de contorno (MEC). O processo de modelagem não é complexo, devido aos softwares de análises existentes.

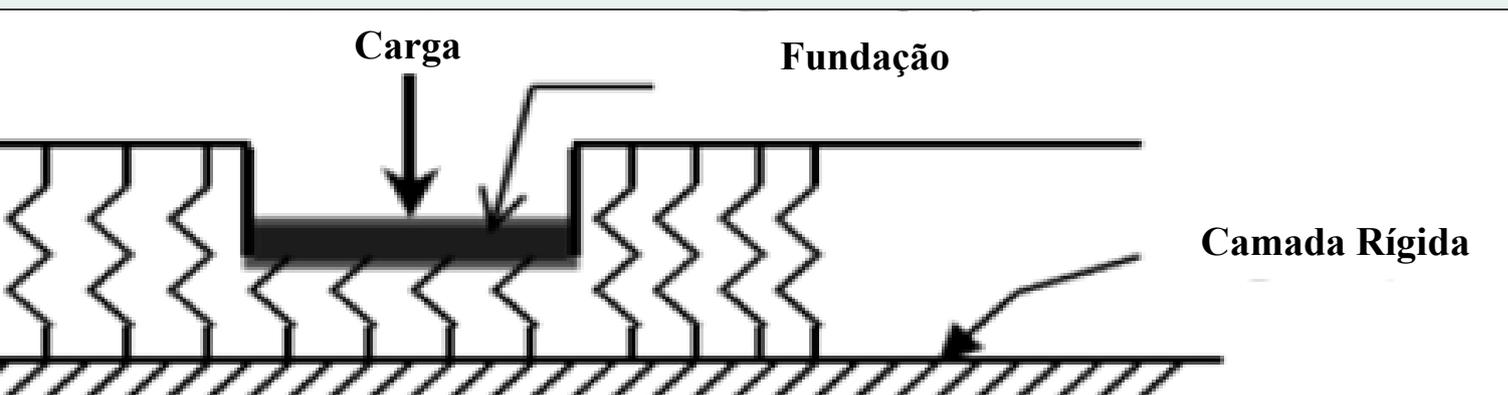
O comportamento do solo

Para se modelar um determinado solo, utilizando-se o MEF, deve-

-se fornecer as características tensão-deformação representadas por meio de modelos constitutivos, expressões matemáticas que descrevem a relação tensão-deformação de um solo. Como não é possível considerar todos os aspectos que influenciam a resposta mecânica do solo, sob condições específicas de carga, utiliza-se simplificações tanto do solo como das condições de carregamento, de modo a simplificar a expressão matemática. Seguindo este princípio, desenvolveu-se uma série de modelos elastoplásticos, considerando-se diferentes critérios de ruptura, como o de Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Tresca Model, Van Mises Model, Hoek-Brown Model.

REFERÊNCIAS

- Roger Kim é engenheiro geotécnico especializado em melhoramento de solos moles.
- Bapir, B., Abrahamczyk, L., Wichtmann, T., y Prada-Sarmiento, L. F. (2023). Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures. *Frontiers in built environment*, 9.
- SOIL STRUCTURE INTERACTION. GENERALITIES. 2023. Aldo Fernández Limés - Technological University of Havana. Dhiraj Ahiwale - Vidya Pratishthan's Kamalnayan Bajaj Institute of Engineering and Technology Bara. Mangeshkumar Shendkar - Indian Institute of Technology BHU.
- Barkan, D. (1965). Basic problems of the dynamics of bases and foundations (review of the conference on the dynamics of bases and foundations). *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2(6), 376-378. Mangeshkumar Shendkar - Indian Institute of Technology BHU.
- Kraus, I., y Džakić, D. (2013). Soil-structure interaction effects on seismic behaviour of reinforced concrete frames.



SSBI SOFT SOIL BRAZILIAN INSTITUTE

O SOFT SOIL BRAZILIAN INSTITUTE ajuda você a entender solos moles

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

softsoilbrazilianinstitute.com.br

PARCEIROS



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

EDIÇÃO
 DIRETOR EDITORIAL
 M.Sc. Joaquim Rodrigues

DIRETORES ADJUNTOS
 Engº Thomas Rodrigues
 Engº Roger Kim
 Engº Patricia Tinoco

PUBLICIDADE, ASSINATURA
 Cleide Ferreira

EDITOR DE ARTE
 Victor Peres

REPRINTS EDITORIAIS
 Mariana Tati

FALE CONOSCO
softsoilgroup.com.br
 @engegraut
 (21) 3154-3250
 atendimento@softsoil-brazilianinstitute.com.br