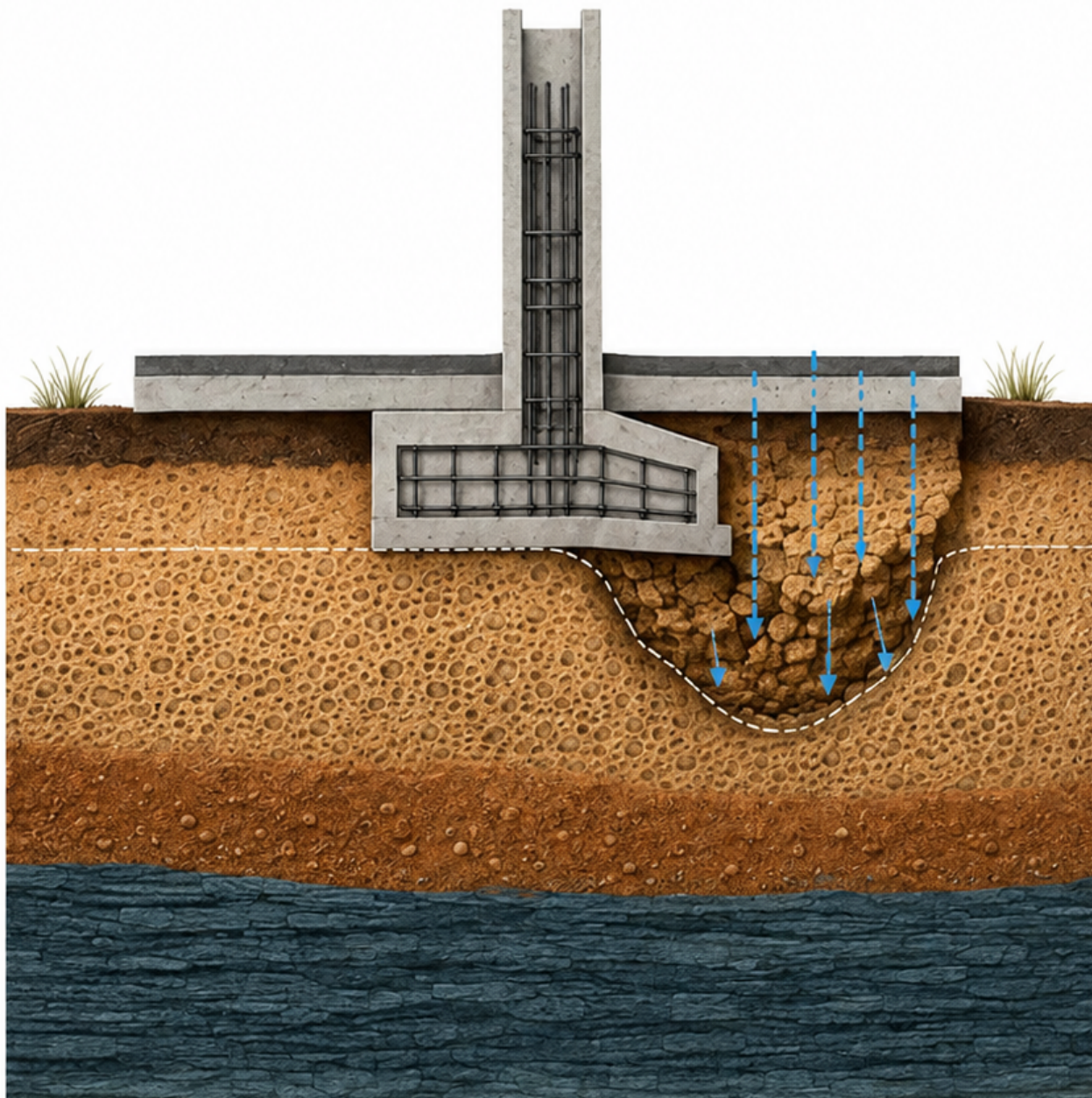


FUNDAÇÕES EM SOLOS COLAPSÍVEIS

Comportamento, riscos, investigação e soluções de projeto



ISAÍAS ANTONIO DOS SANTOS

Edição revista e adaptada para livro • 2026

FUNDAÇÕES EM SOLOS COLAPSÍVEIS



FUNDAÇÕES EM SOLOS COLAPSÍVEIS

ISAIAS ANTONIO DOS SANTOS

Belém-PA
2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Sa5s

Santos, Isaias Antonio dos.
Fundações em Solos Colapsíveis /
- Belém : Autopub Editora, 2026.

Livro em PDF
63 p.

ISBN 978-65-83093-58-5
DOI 10.46898/autopub.b2addbbb2fd3

1. Solos colapsíveis 2. Fundações 3. Recalque 4. Colapso do Solo
I. Santos, Isaias Antonio dos. II. Título.

CDD-624.151

Índices para catálogo sistemático:

1. Fundações : Solos colapsíveis

Ficha catalográfica elaborada conforme ABNT NBR 12899 / CDD 23ª ed.

Conselho Editorial

Autopub Editora

MEMBROS DO CONSELHO

Editor-Chefe

Prof. Dr. Ednilson Souza - UFOPA

Membros do Conselho

Profa. Msc. Andria Raiane Coelho Campos - SEMEC-STM

Prof. Msc. Éfrem Colombo Vasconcelos Ribeiro - IFPA

Prof. Msc. Jorge Carlos Silva - ULBRA

Profa. Msc. Vaneza Nascimento de Oliveira Mélo - FICS

Profa. Dra. Irlana Jane Menas da Silva - UEFS

Profa. Msc. Daniela Emilena Santiago Dias de Oliveira - UNIP

Profa. Dra. Rejane Harder - UFS

Prof. Msc. André de Araújo Moraes - UNESP

S U M Á R I O

NOTA EDITORIAL	6
INTRODUÇÃO	7
1 SOLOS COLAPSÍVEIS	10
<i>CONCEITOS E OCORRÊNCIA</i>	
2 FUNDAÇÕES EM SOLOS COLAPSÍVEIS	21
<i>MECANISMOS E DANOS</i>	
3 TIPOS DE FUNDAÇÕES E COMPORTAMENTO EM SOLOS COLAPSÍVEIS	25
4 TÉCNICAS DE MELHORAMENTO DO SOLO	36
5 PROJETO DE FUNDAÇÕES POR ESTACAS	45
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS	58
ÍNDICE REMISSIVO	61

Nota editorial

Esta edição apresenta o estudo sobre fundações em solos colapsíveis em formato de livro técnico, com organização voltada à leitura progressiva dos conceitos, dos mecanismos de colapso e das soluções aplicáveis à engenharia de fundações. A obra reúne fundamentos geotécnicos, registros de ocorrências, métodos de investigação, alternativas de melhoramento do terreno e critérios de projeto.

As figuras e suas fontes foram preservadas por seu valor didático e documental, recebendo tratamento gráfico contemporâneo para ampliar a legibilidade. A terminologia e a exposição científica foram harmonizadas sem modificar as ideias, os resultados e as referências que fundamentam o trabalho original.

O conteúdo tem finalidade educacional. A aplicação em situações reais exige investigação geotécnica específica, projeto elaborado por profissional habilitado e consulta às normas técnicas vigentes.

INTRODUÇÃO

Introdução

Todos os solos submetidos a carregamentos apresentam deformações. Em condições usuais, esses recalques tendem a se estabilizar com o tempo. Nos solos colapsíveis, entretanto, o aumento da umidade pode provocar uma redução súbita de volume, cuja magnitude depende do estado de tensões, da estrutura porosa e do grau de saturação atingido.

O colapso do solo pode produzir deslocamentos expressivos nas fundações e comprometer o desempenho dos elementos estruturais e não estruturais. Além dos prejuízos econômicos, as manifestações patológicas associadas ao recalque diferencial podem afetar a segurança, a funcionalidade e a vida útil das edificações.

A prevenção desses danos exige investigação geotécnica adequada, avaliação do potencial de colapso e seleção criteriosa da solução de fundação ou da técnica de melhoramento do terreno.

Propósito e escopo

Este livro examina o comportamento dos solos colapsíveis, os riscos associados à perda súbita de volume e seus efeitos sobre fundações rasas e profundas. Também apresenta estratégias de investigação, critérios de projeto e técnicas de melhoramento destinadas a reduzir a vulnerabilidade das obras.

Relevância do tema

Na engenharia de fundações, é fundamental compreender o comportamento dos solos colapsíveis, prever a possibilidade de colapso e avaliar suas consequências. Esse fenômeno pode provocar danos às construções, gerar prejuízos econômicos e comprometer a segurança dos usuários.

Embora o tema seja relevante, ainda são limitadas as publicações dedicadas especificamente às fundações em solos colapsíveis. O assunto também recebe pouca atenção em parte dos cursos e da prática da construção civil.

Organização do livro

A introdução apresenta o propósito, a relevância e a base documental da obra. O Capítulo 1 define os solos colapsíveis, descreve sua ocorrência e aborda métodos de investigação. O Capítulo 2 discute os mecanismos de colapso e os danos às fundações. O Capítulo 3 examina o comportamento de sapatas, tubulões e estacas. O Capítulo 4 reúne técnicas de melhoramento do terreno. O Capítulo 5 apresenta critérios de projeto para fundações por estacas, e o Capítulo 6 sintetiza as considerações finais.

Base documental

O conteúdo foi elaborado com base em revisão bibliográfica de livros, artigos, normas e publicações técnicas relacionadas ao comportamento de solos colapsíveis e ao desempenho de fundações rasas e profundas.

01

SOLOS COLAPSÍVEIS

CONCEITOS E OCORRÊNCIA

01

1. Solos colapsíveis: conceitos e ocorrência

O comportamento dos solos sob carregamento pode ser descrito por relações entre tensão e deformação, cuja forma depende da composição, da estrutura, do estado de tensões e das condições de umidade do material.

Solos porosos e não saturados podem apresentar comportamento estável quando mantidos com baixa umidade natural. Entretanto, quando o teor de umidade aumenta até determinado valor crítico, esses materiais, se submetidos a carregamentos, podem sofrer redução brusca de volume, mesmo sem atingir a saturação completa. A Figura 1 representa uma prova de carga com inundação do terreno durante o ensaio.

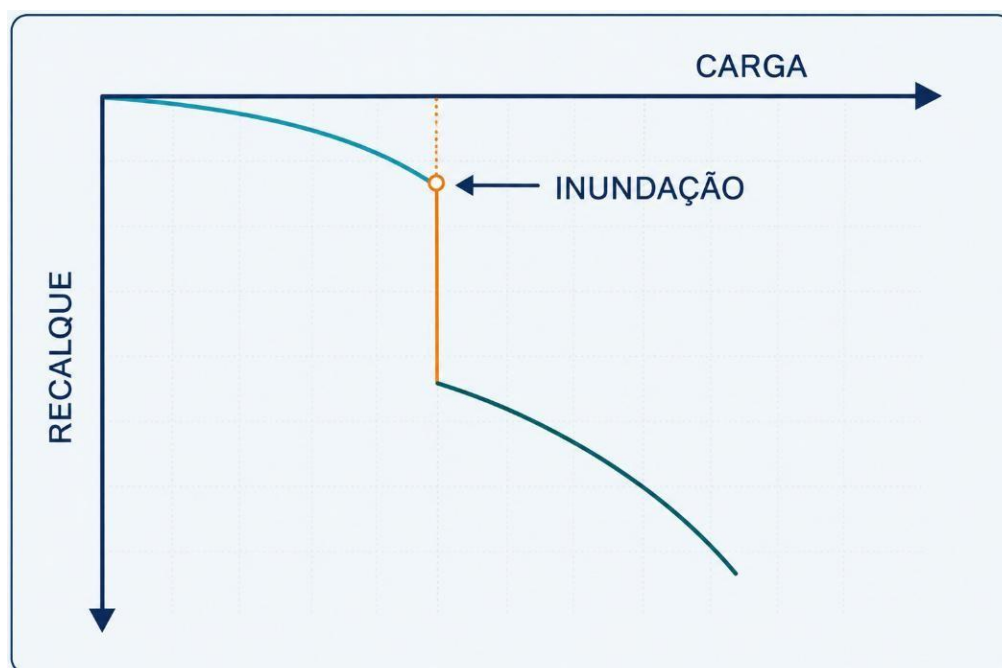


Figura 1 – Ocorrência de colapso após inundação.

Fonte: Adaptado de Cintra (1998).

Uma fundação apoiada em solo colapsível pode apresentar desempenho satisfatório durante anos e, após uma infiltração accidental, desenvolver recalque adicional. Vazamentos, chuvas intensas, alterações de drenagem ou elevação do nível d'água modificam o estado de

umidade e podem desencadear a perda de estrutura do solo. A Figura 2 ilustra esse mecanismo.

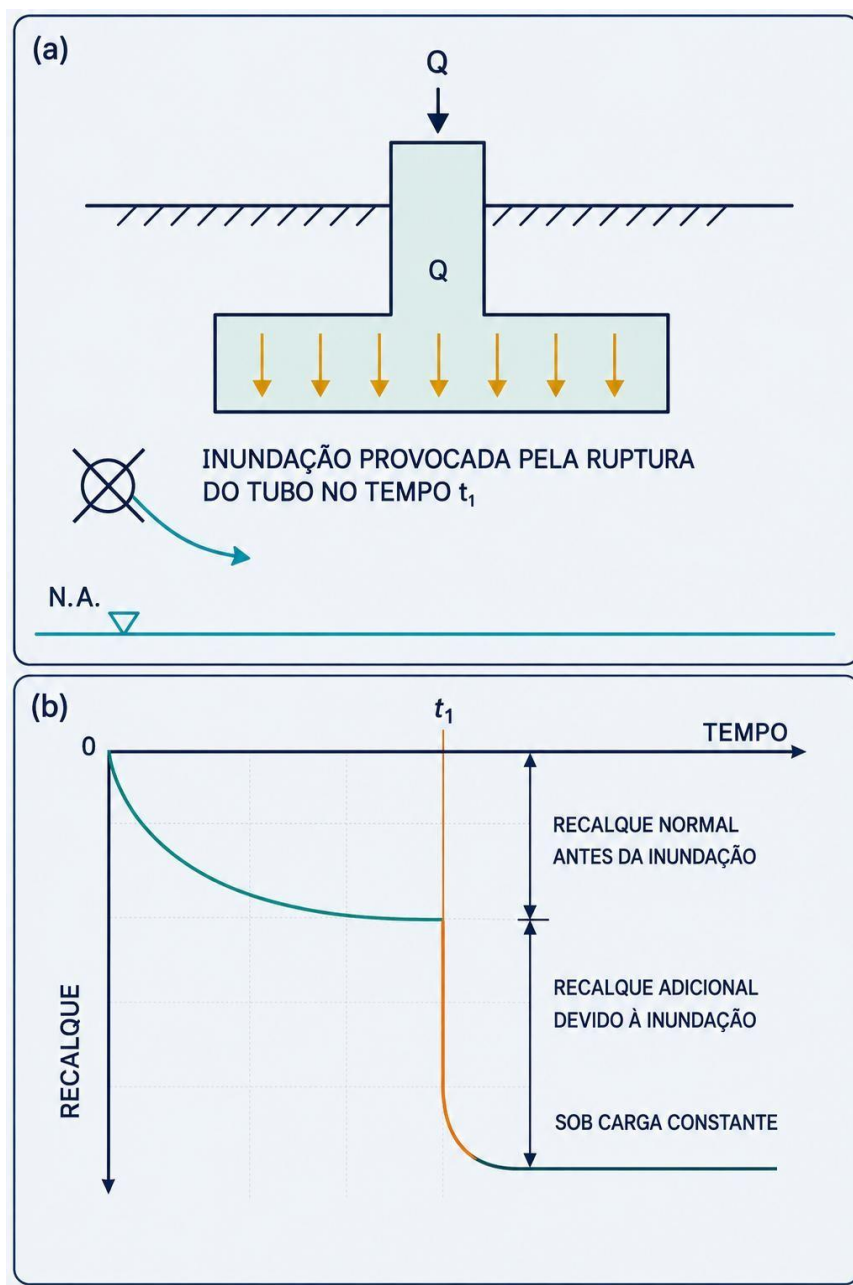


Figura 2 – Conceito básico de recalque adicional devido ao colapso da estrutura do solo.

Fonte: Adaptado de Jennings & Knight (1975).

O colapso não deve ser confundido com o adensamento. No adensamento, a deformação decorre predominantemente da dissipação gradual das pressões neutras e da expulsão de água dos vazios. No colapso, o aumento da umidade reduz as forças que estabilizam a estrutura porosa, produzindo deformação volumétrica rápida, mesmo sem saturação completa.

A colapsibilidade pode manifestar-se pelo aumento acentuado das deformações e pela consequente redução da capacidade de carga, conforme ilustrado na Figura 3.

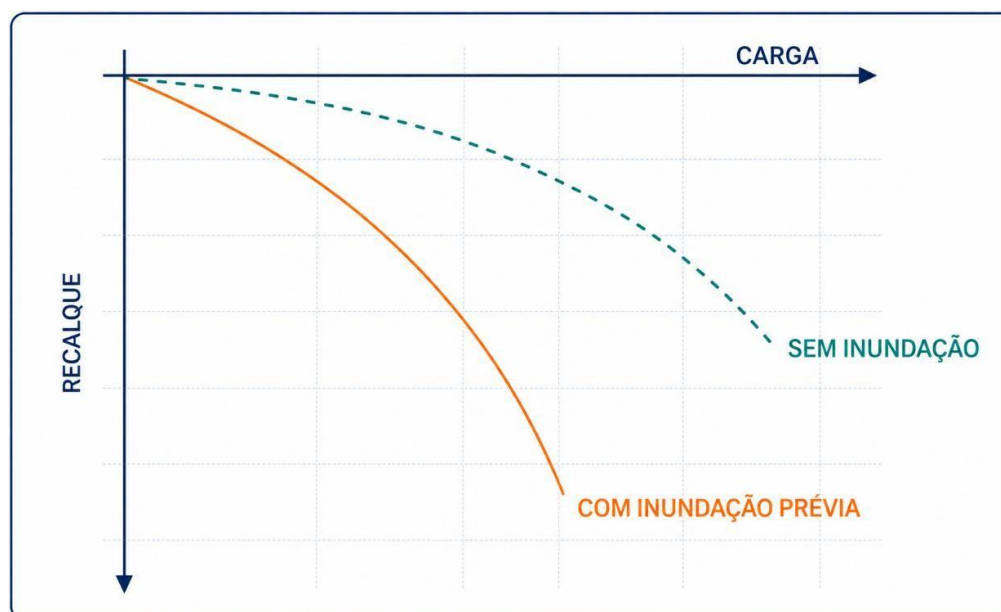


Figura 3 – Provas de carga em solo colapsível previamente inundado.

Fonte: Adaptado de Cintra (1998).

Para que ocorra o colapso, o aumento da umidade deve atuar em conjunto com um estado de tensões suficientemente elevado. Esses fatores enfraquecem ou eliminam as ligações cimentantes entre as partículas, reduzem a resistência do solo e provocam a perda de sua estrutura porosa.

A deformação aumenta com o grau de saturação até uma faixa crítica. A partir de um limite superior, geralmente situado entre 70% e 80%, o acréscimo do recalque de colapso tende a diminuir. Reznik (1993) registra que, por essa razão, o código de construção da antiga União Soviética não considerava o loess colapsível quando o grau de saturação *in situ* ultrapassava 80%.

“As regiões tropicais apresentam condições flagrantes para o desenvolvimento de solos colapsíveis, quer pela lixiviação de finos dos horizontes superficiais nas regiões onde se alternam estações de relativa seca e de precipitações intensas, quer pelos solos com deficiência de umidade que se desenvolvem em regiões áridas e semiáridas” (VILAR ET AL., 1981).

“Muita embora o problema esteja quase sempre relacionado a depósitos de origem recente em climas áridos e semiáridos, não são poucos os exemplos que ocorrem em regiões com outros tipos de clima” (VILAR ET AL., 1981).

Vilar (1971) descreve diferentes formas de comportamento dos solos colapsíveis:

- a) alguns solos entram em colapso imediatamente após o aumento do grau de saturação por umedecimento, tanto em formações superficiais quanto em formações profundas;
- b) alguns solos experimentam colapso após o rebaixamento do nível do lençol freático. A retirada de água aumenta as tensões efetivas nas camadas profundas devido ao peso do solo sobrejacente, o que pode provocar o colapso do esqueleto sólido;
- c) alguns solos se expandem após a saturação e, com a aplicação de cargas externas, apresentam recalques substanciais. Esse comportamento pode estar associado à presença de argilominerais expansivos, como a montmorilonita;
- d) alguns solos loéssicos apresentam aumento da magnitude e da velocidade do colapso à medida que as cargas aplicadas se elevam;
- e) algumas areias de origem eólica apresentam redução da velocidade de recalque com o aumento das cargas aplicadas;
- f) alguns solos não recuperam, ao longo do tempo, nenhuma parcela do volume perdido durante o colapso;
- g) outros solos recuperam parcialmente o volume perdido, mesmo enquanto permanecem submetidos à carga que provocou o colapso.

No Brasil, os solos colapsíveis são representados principalmente por depósitos aluvionares e coluvionares, além de solos residuais submetidos a intensa lixiviação (Ferreira et al., 1989). Há registros de ocorrência em Minas Gerais, São Paulo, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Bahia, Distrito Federal, Rio Grande do Sul e Paraná, conforme indicado na Figura 4.

Segundo Ferreira et al. (1989), os principais indicadores da possível ocorrência de solos colapsíveis incluem:

- Baixos valores de N_{spt} (≤ 4 golpes);
- Valores reduzidos de resistência de ponta no CPT ($q_c \leq 1,0$ MPa);
- Baixo grau de saturação ($\leq 60\%$);
- Elevada porosidade ($\geq 40\%$);
- Baixo teor ou ausência de silte.

No estado de São Paulo, destacam-se os sedimentos cenozoicos do interior e a argila porosa da capital. A distribuição dessas ocorrências é apresentada nas Figuras 4 e 5.



Figura 4 – Solos colapsíveis no Brasil.

Fonte: Adaptado de Ferreira (1989).

A Figura 5 exemplifica a ocorrência de sedimentos cenozoicos no interior paulista. Esses materiais são, em geral, muito porosos e pouco compactos.

Sua espessura é geralmente inferior a 10 m, e os depósitos costumam situar-se acima do nível d'água. Os sedimentos cenozoicos podem apresentar características associadas a materiais laterizados.

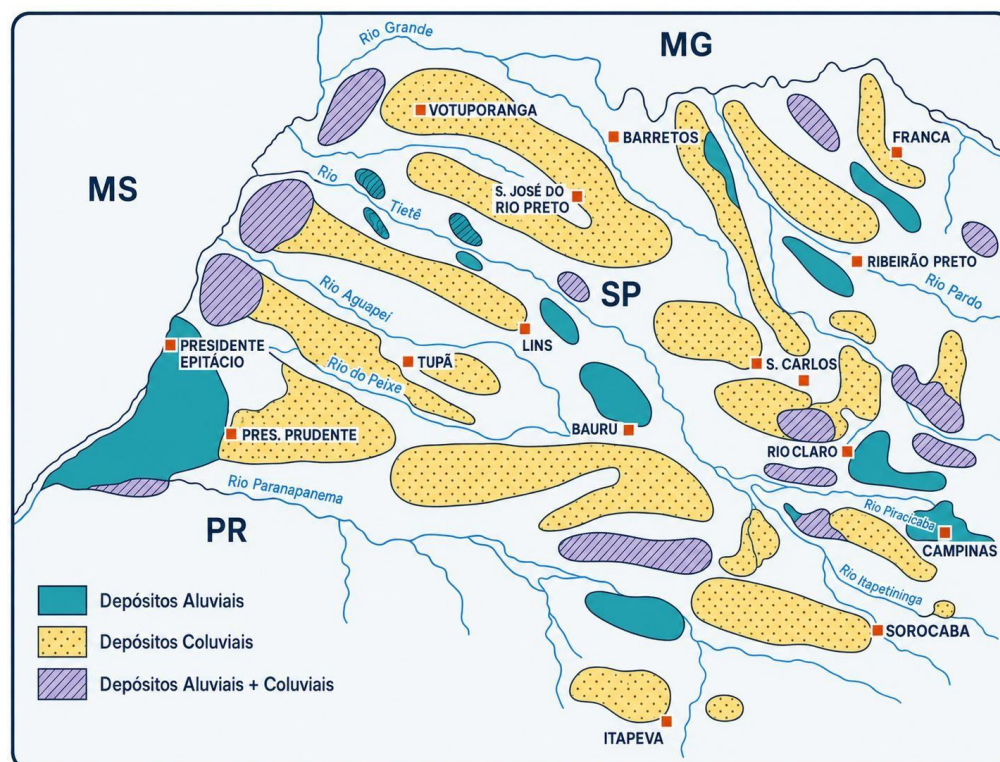


Figura 5 – Distribuição dos solos colapsíveis do Estado de São Paulo.

Fonte: Adaptado de Fulfaro & Bjornberg (1993).

1.1 Histórico

Segundo Cintra (1988), o primeiro registro histórico de colapso de solo foi relatado por Abelev (1938). O caso envolveu uma escola na Ucrânia construída sobre loess, material que entrou em colapso, após a inundação, sob o peso próprio da camada.

Depois de um incêndio que não comprometeu diretamente a estrutura, a escola apresentou inclinação acentuada e precisou ser escorada. O dano decorreu da infiltração da grande quantidade de água utilizada pelos bombeiros, que provocou o colapso do solo de apoio.

No Brasil, Vargas (1993) relatou que sua primeira experiência com solos colapsíveis ocorreu em 1944, quando trabalhava no Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Na época, esses materiais eram tratados apenas como solos porosos, e os riscos associados à colapsibilidade ainda eram pouco conhecidos.

A primeira divulgação sobre a existência desse tipo de solo no Brasil foi atribuída por Vargas (1993) a Pichler (1948), autor de um estudo regional sobre os solos do estado de São Paulo.

1.2 Sondagem a Percussão

A investigação do subsolo avalia as características geotécnicas do terreno onde será executada a edificação. Em muitos casos, essa avaliação é realizada por meio de sondagem de simples reconhecimento com ensaio de penetração.

Quando executada adequadamente, a sondagem fornece informações importantes, como a descrição das camadas do solo, os índices de resistência e a posição do nível d'água.

Um dos métodos mais utilizados é o Standard Penetration Test (SPT), que avalia a resistência do solo à penetração. O ensaio utiliza um amostrador-padrão, cravado por golpes de um martelo de 65 kg em queda livre de 75 cm.

O ensaio SPT fornece indicações sobre a consistência dos solos argilosos e o estado de compactidade dos solos arenosos.

O índice de resistência à penetração, N_{spt} , corresponde ao número de golpes necessário para cravar os 30 cm finais do amostrador-padrão, desconsiderando-se os 15 cm iniciais. Embora o ensaio não determine isoladamente todas as propriedades geotécnicas, seus resultados fornecem indicações úteis sobre a estratigrafia e a resistência do terreno. A Figura 6 apresenta o equipamento de percussão, e a Figura 7 detalha o amostrador-padrão.

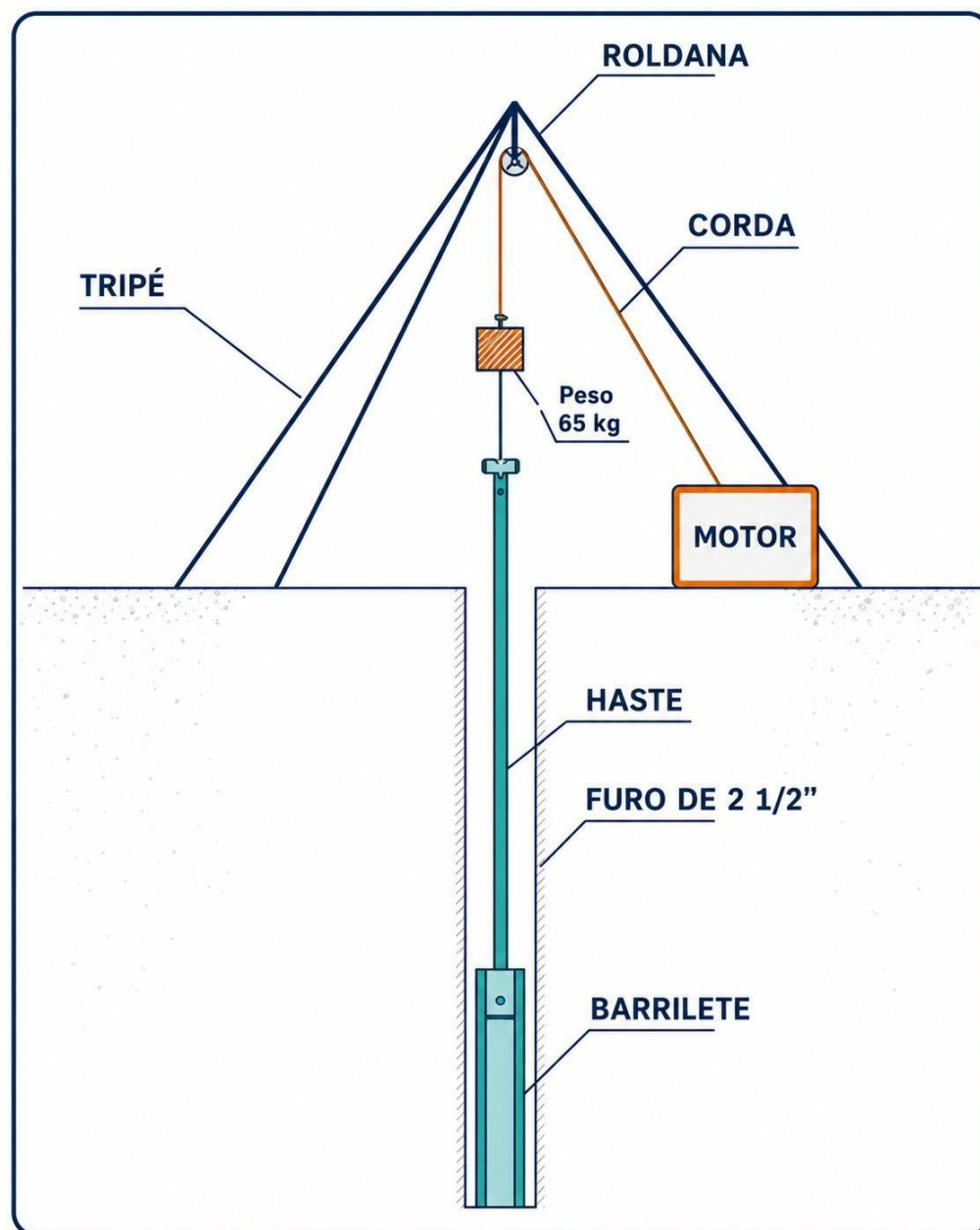


Figura 6 – Equipamento para ensaio de percussão e medição de SPT do subsolo.

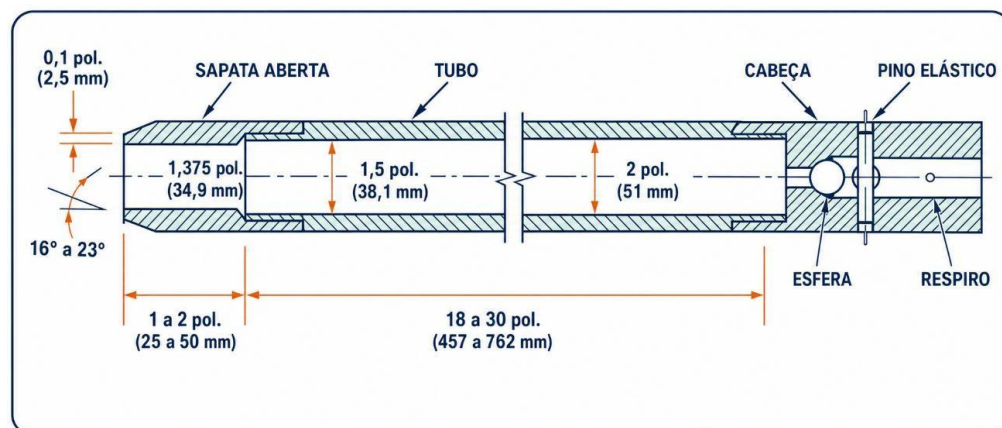


Figura 7 – Amostrador padrão para ensaios.

02

FUNDAÇÕES EM SOLOS COLAPSÍVEIS

MECANISMOS E DANOS

02

2. Fundações em solos colapsíveis: mecanismos e danos

Segundo Cintra (1998), duas condições estruturais favorecem o colapso do solo:

- Uma estrutura porosa (alto índice de vazios “e”)
- Condição não saturada (baixo teor de umidade ou grau de saturação “S”).

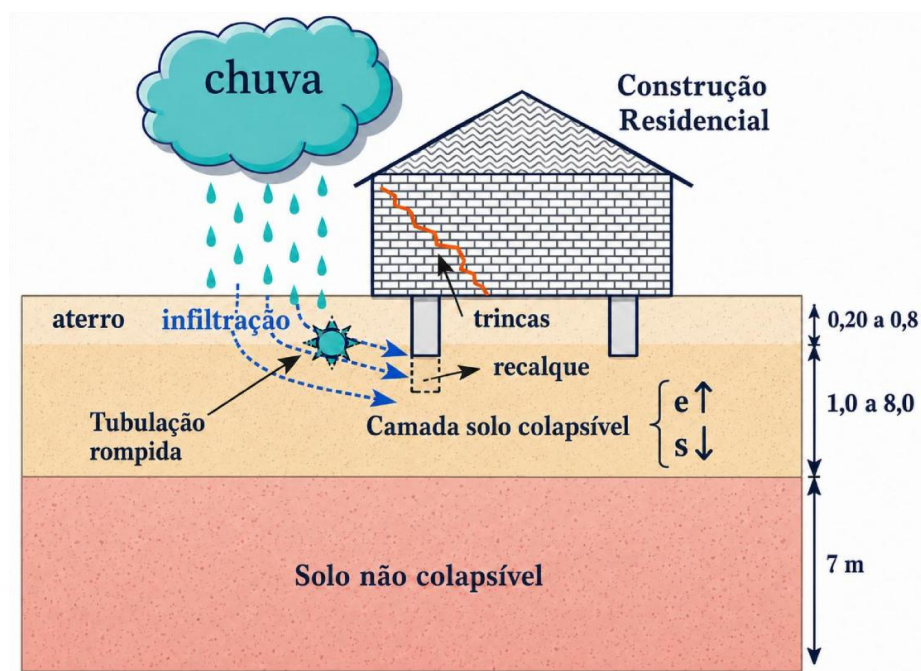
A existência dessas condições não é suficiente, por si só, para desencadear o fenômeno. O colapso ocorre quando o aumento da umidade, provocado por chuva, vazamentos ou mudanças na drenagem, reduz a estabilidade da estrutura porosa sob determinado estado de tensões. A perda abrupta de volume amplia os deslocamentos das fundações e pode causar danos relevantes à edificação.

Tanto as fundações superficiais, como sapatas, quanto as profundas, como estacas e tubulões, devem apresentar capacidade geotécnica e estrutural compatível com as ações transmitidas pela edificação.

Em solos potencialmente colapsíveis, o umedecimento pode reduzir a capacidade de carga e aumentar os recalques.

Um projeto fundamentado em investigação geotécnica adequada deve limitar os deslocamentos a valores compatíveis com o desempenho da estrutura. Quando o fenômeno não é considerado, recalques totais ou diferenciais podem provocar fissuras em alvenarias, lajes e coberturas, além de comprometer instalações e esquadrias.

A Figura 8 apresenta fissuras associadas a recalques após o umedecimento do terreno. A Figura 9 registra uma manifestação patológica observada em uma edificação no município de Pereira Barreto, no interior do estado de São Paulo.



A Figura 8 ilustra fissuras decorrentes de recalques provocados pela saturação do solo.



Figura 9 – Rachadura em alvenaria provocada por recalque do solo abaixo da edificação.

03

TIPOS DE FUNDAÇÕES E COMPORTAMENTO EM SOLOS COLAPSÍVEIS

03

3. Tipos de fundações e comportamento em solos colapsíveis

As fundações são classificadas em superficiais, como sapatas e radiers, e profundas, como estacas e tubulões. A escolha do sistema depende das características do terreno, das ações transmitidas pela estrutura, dos recalques admissíveis, do método executivo e dos critérios definidos pela norma técnica vigente.

3.1 Sapatas

As sapatas são fundações superficiais classificadas, entre outras formas, como isoladas, associadas ou corridas. As sapatas isoladas recebem a ação de um pilar; as associadas atendem a dois ou mais pilares próximos; e as corridas distribuem ações lineares, geralmente provenientes de paredes. Esses elementos são usualmente executados em concreto armado e dimensionados para resistir aos esforços de flexão e cisalhamento. As Figuras 10, 11 e 12 ilustram as principais configurações.

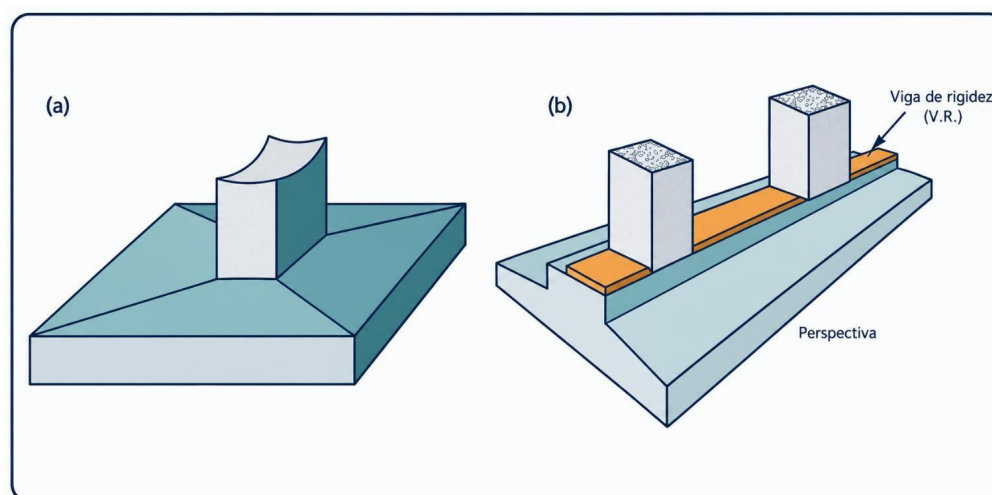


Figura 10 – Sapata Isolada Figura 11 – Sapata Associada.

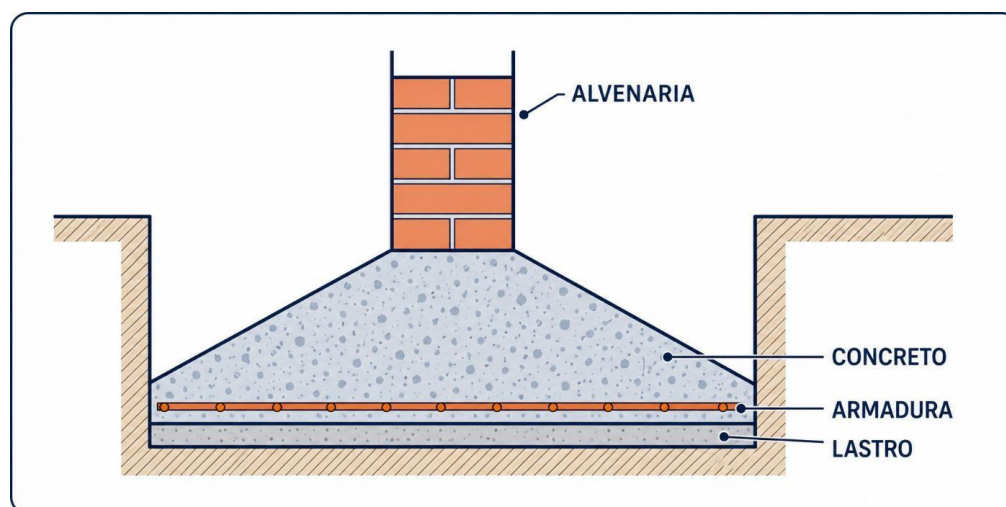


Figura 12 – Sapata Corrida.

As sapatas são particularmente sensíveis aos recalques provocados pela colapsibilidade, pois se apoiam nas camadas mais superficiais do terreno. Quando a inundação reduz significativamente a capacidade de carga, o emprego desse tipo de fundação pode tornar-se inadequado.

Quando se pretende utilizar sapatas sobre solos colapsíveis, uma alternativa consiste no tratamento prévio do terreno. Um procedimento simples é remover a camada situada sob a fundação, umedecer e compactar o fundo da escavação e, em seguida, recompor o volume com solo compactado em camadas. Ensaaios em modelos e protótipos indicam que esse tratamento pode reduzir os efeitos da colapsibilidade.

Cintra (1998) também recomenda avaliar a remoção e a compactação do solo em toda a área da construção, e não apenas sob as sapatas isoladas. Além de poder ser economicamente vantajoso, esse procedimento reduz a permeabilidade do terreno e limita a infiltração.

No caso de radiers e de fundações de silos ou tanques de grandes dimensões, a remoção e a compactação de toda a espessura necessária podem ser economicamente inviáveis.

Como sapatas e radiers são fundações superficiais, a possibilidade de variar sua cota de apoio costuma ser limitada. A viabilidade dessas soluções depende, portanto, da espessura da camada colapsível e da eficácia do tratamento do terreno.

Quando a camada superficial colapsível é pouco espessa, pode ser conveniente alterar o projeto arquitetônico e introduzir um subsolo ou porão, de modo que as sapatas se apoiem no estrato não colapsível. Essa alternativa deve ser comparada técnica e economicamente com o emprego de estacas curtas.

A concepção de que uma fundação profunda resolve automaticamente qualquer problema em terreno colapsível é equivocada, pois estacas e tubulões também podem ser afetados pela perda de resistência e pelo atrito negativo (Cintra, 1998).

3.2 Tubulões

O tubulão é uma fundação profunda constituída por fuste escavado e base alargada ou não. Sua execução exige controle das dimensões do fuste e da base, além da inspeção do solo de apoio. A escavação pode ser manual ou mecanizada, conforme o método executivo e as condições de segurança. As Figuras 13 e 14 apresentam, respectivamente, a geometria e as etapas de execução.

Em solos colapsíveis, os tubulões também podem sofrer recalques abruptos decorrentes do umedecimento do terreno.

A situação é especialmente crítica quando a base do tubulão permanece no interior da camada colapsível. Mesmo quando apoiado em estrato resistente, o fuste que atravessa a camada instável pode ficar sujeito ao atrito negativo após a inundação. Essa solicitação deve ser quantificada e considerada na verificação da capacidade de carga e da segurança.

Os tubulões são fundações profundas constituídas por fustes escavados, com ou sem base alargada.

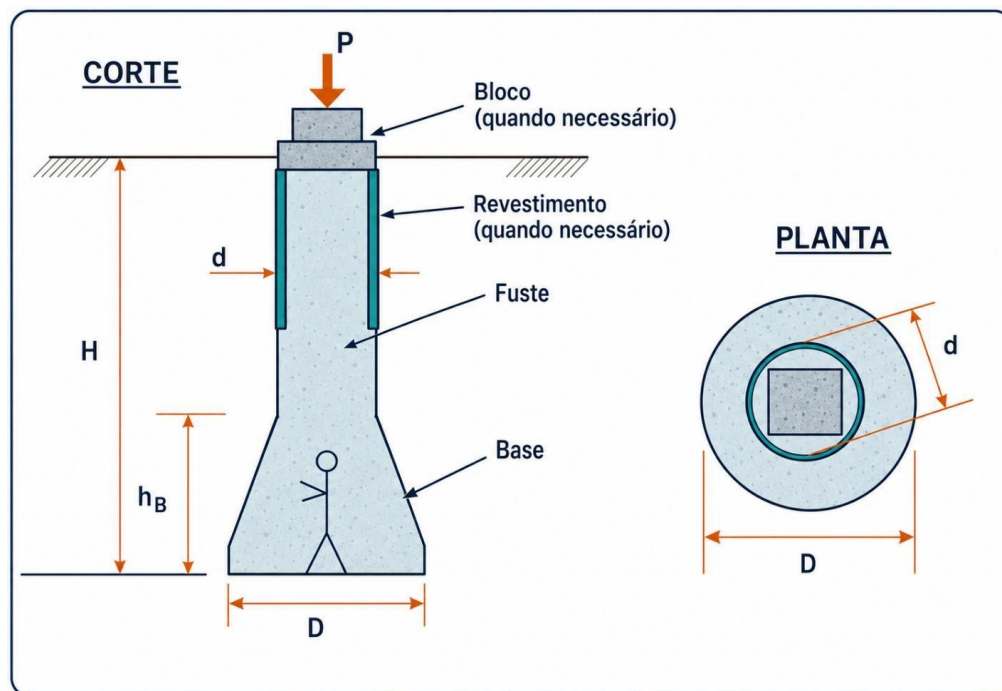


Figura 13 – Inspeção do tubulão.

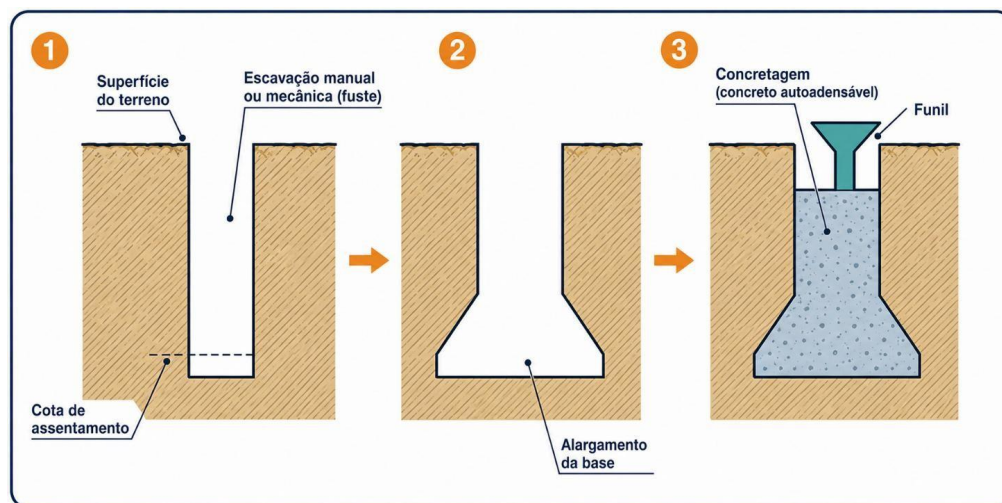


Figura 14 – Processo de execução dos tubulões.

Os tubulões devem apoiar-se em estrato não colapsível. Ainda assim, a inundação do terreno pode mobilizar atrito negativo ao longo da parcela do fuste que atravessa a camada colapsível e reduzir a capacidade de carga disponível.

Por essa razão, edificações apoiadas em tubulões a céu aberto podem apresentar recalques após vazamentos em reservatórios enterrados ou elevação do nível d'água.

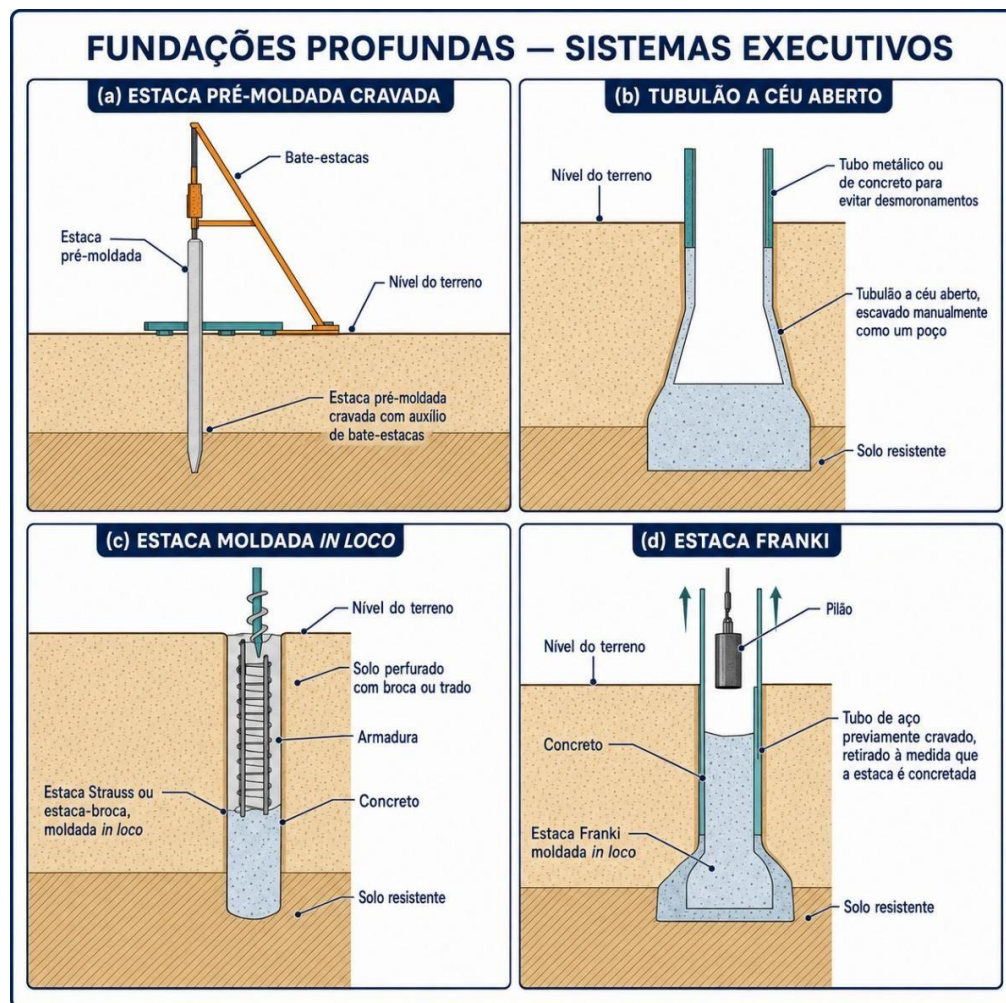
Há poucos estudos específicos sobre o comportamento de tubulões em solos colapsíveis.

Carneiro (1999) realizou provas de carga em quatro tubulões, em São Carlos, com fuste de 0,60 m de diâmetro, base alargada de 1,50 m e cota de apoio a aproximadamente 8 m de profundidade. Nos dois ensaios com pré-inundação, a carga média de colapso foi de 820 kN; nos outros dois, executados sem inundação, a capacidade média foi de 1.230 kN. Os resultados indicaram redução aproximada de 33% da capacidade de carga após a inundação.

3.3 Estacas

As estacas pré-moldadas são elementos de concreto armado ou protendido, fabricados no canteiro ou em instalações especializadas e introduzidos no terreno por cravação. As estacas Strauss são moldadas in loco, com escavação protegida por revestimento recuperável e concretagem acompanhada de apiloamento. As estacas Franki também são moldadas in loco e utilizam tubo de revestimento cravado com bucha seca, podendo apresentar base alargada. A Figura 15 ilustra diferentes tipos de estacas.

A Figura 15 exemplifica os diversos tipos de estacas.



O método executivo influencia significativamente o comportamento das estacas em solos colapsíveis. Estacas de deslocamento compactam o terreno ao redor do fuste e sob a ponta, reduzindo o índice de vazios e atenuando parte dos efeitos do colapso.

No Brasil, os trabalhos sobre estacas de deslocamento instaladas em solos colapsíveis restringem-se apenas às estacas apiloadas. Dependendo do comprimento da estaca e da espessura da camada colapsível, isto é, do nível de embutimento no estrato inferior, parece conclusivo que as estacas apiloadas sofrem uma redução de 20 a 30% na capacidade de carga como consequência da inundação do terreno. Portanto, o processo do apiloamento é eficiente para impedir a ocorrência do colapso na carga admissível, mas não é suficiente para eliminar completamente o efeito da colapsibilidade.

Quanto às estacas instaladas sem provocar deslocamento do solo, as pesquisas têm se concentrado nas estacas do tipo broca, por sua baixa capacidade de carga e, conseqüentemente, maior facilidade de obtenção de reação na preparação das provas de carga. Também se encontram alguns trabalhos publicados enfocando estacas do tipo Strauss e estacas escavadas a seco, sem utilização de lama bentonítica ou algum fluido estabilizante.

As estacas do tipo broca estão entre as mais afetadas pela colapsibilidade e podem apresentar redução superior a 50% da capacidade de carga. Isso decorre do método executivo e do pequeno comprimento usual dessas estacas, que frequentemente permanecem flutuantes na camada colapsível. Nesses casos, recomenda-se adotar estacas mais longas, embutidas no estrato resistente, ou fundações superficiais associadas à remoção e compactação do solo.

As estacas Strauss tendem a ser menos afetadas pela colapsibilidade do que as estacas escavadas a seco, possivelmente devido ao uso de água durante a perfuração, que pode produzir um umedecimento prévio localizado.



Figura 16 – Cravação de estaca a seco.

Em princípio, a ponta das estacas não deve permanecer no interior da camada colapsível, especialmente no caso de estacas escavadas a seco, que podem sofrer recalques expressivos e redução superior a 50% da capacidade de carga quando trabalham como estacas flutuantes.

Nas estacas escavadas, não basta fazer a ponta alcançar o estrato não colapsível; é necessário prever embutimento suficiente do fuste nesse material. A resistência mobilizada no estrato inferior deve contrapor as ações estruturais e o atrito negativo desenvolvido na camada superior após o umedecimento.

Em 1953, pesquisadores norte-americanos analisaram 44 estacas e 28 provas de carga no estado de Nebraska, nos Estados Unidos, durante o projeto de uma estrutura hidráulica sobre solo colapsível. O estudo já considerava os recalques provocados pela perda da estrutura do solo sob carga e inundação.

Na época, o emprego de estacas era considerado uma possível solução. Gibbs e Holtz (1953) desenvolveram um programa experimental para responder às seguintes questões:

“O que acontece com as estacas quando o solo é completamente inundado?” e “A estrutura natural do solo colapsível pode suportar estacas de atrito?”

Foram utilizados dois locais de pesquisa: o primeiro, destinado a estacas de ponta com 14 m de comprimento, apoiadas em areia compacta sob uma camada superficial de loess com 10 m a 12 m de espessura; e o segundo, destinado a estacas de atrito com 17 m, instaladas em solo colapsível com mais de 18 m de profundidade.

Em cada local, foram instaladas estacas no solo com umidade natural e em áreas submetidas à saturação prévia até profundidade superior ao comprimento das estacas.

Na área com umidade natural, foram instaladas:

- Três estacas de madeira cravadas;
- Três estacas metálicas de perfil H, cravadas;
- Três estacas moldadas in loco, com camisas metálicas instaladas por cravação ou em pré-furos;

- Três estacas de madeira instaladas em furos abertos com injeção de água sob pressão.

A área previamente saturada continha apenas estacas cravadas.

Foram realizadas provas de carga em estacas representativas de cada tipo e método de instalação.

Todas as estacas selecionadas foram submetidas a provas de carga.

Os ensaios do primeiro local indicaram elevada capacidade de carga para todos os métodos de instalação. O objetivo era avaliar o afundamento das estacas após a inundação da camada superior; contudo, o solo não apresentou recalque significativo.

No segundo local, foram realizadas diversas provas de carga.

No primeiro ensaio, uma estaca cravada após inundação prévia atingiu a ruptura sob carga elevada. No segundo, uma estaca instalada em furo aberto com injeção de água foi ensaiada antes e depois da inundação, apresentando pequena redução da carga de ruptura. No terceiro, uma estaca instalada em pré-furo seco mostrou resistência substancialmente menor após a inundação. No quarto, uma estaca curta cravada no solo seco apresentou elevada capacidade inicial, mas atingiu a ruptura sob carga baixa depois do umedecimento.

Gibbs e Holtz sintetizaram as conclusões do estudo sobre a colapsibilidade.

As três principais conclusões dos autores foram:

“Para a utilização de estacas de deslocamento em loess espesso, recomenda-se inundar previamente o solo, pois, assim, obtém-se maior resistência em consequência da consolidação do material circundante.”

“Estacas de deslocamento podem exigir pré-furo em loess seco, mas apresentam capacidade de carga relativamente baixa após a inundação do solo.”

“Estacas metálicas cravadas em loess exigem embutimento adequado em material não colapsível, pois a resistência do loess inundado é baixa.”

Entretanto, como as provas de carga em umidade natural não foram conduzidas até a ruptura, não foi possível quantificar com precisão o efeito da saturação sobre a capacidade das estacas.

04

TÉCNICAS DE MELHORAMENTO DO SOLO

04

4. Técnicas de melhoramento do solo

Em terrenos colapsíveis, uma das estratégias mais usuais consiste em melhorar as propriedades do solo e reduzir as tensões transmitidas pelas fundações.

Para viabilizar fundações superficiais, o melhoramento do terreno pode reduzir significativamente as deformações de colapso. Souza e Cintra (1994) relataram redução superior a 70% no recalque de sapatas de um muro após a compactação do solo.

A técnica de melhoramento deve ser escolhida de acordo com o tipo de solo, a profundidade da camada instável e as condições da obra. Em alguns casos, o pré-carregamento é mais eficaz; em outros, recomenda-se a compactação. Entre as técnicas mais utilizadas estão:

- Compactação
- Pré-Carregamento
- Compactação Dinâmica e inundação
- Injeção de solução de silicato de Sódio

4.1 Compactação

A compactação é um dos procedimentos mais utilizados para reduzir o recalque de colapso e viabilizar o emprego de sapatas.

O tratamento consiste em remover o solo situado na zona de influência das tensões, medida a partir da cota de apoio da sapata, e recompô-lo mediante compactação em camadas. A espessura tratada deve ser definida em projeto, considerando a geometria da fundação e o perfil geotécnico. A execução deve atender às especificações técnicas e ao controle de compactação aplicável. A Figura 17 ilustra o procedimento.

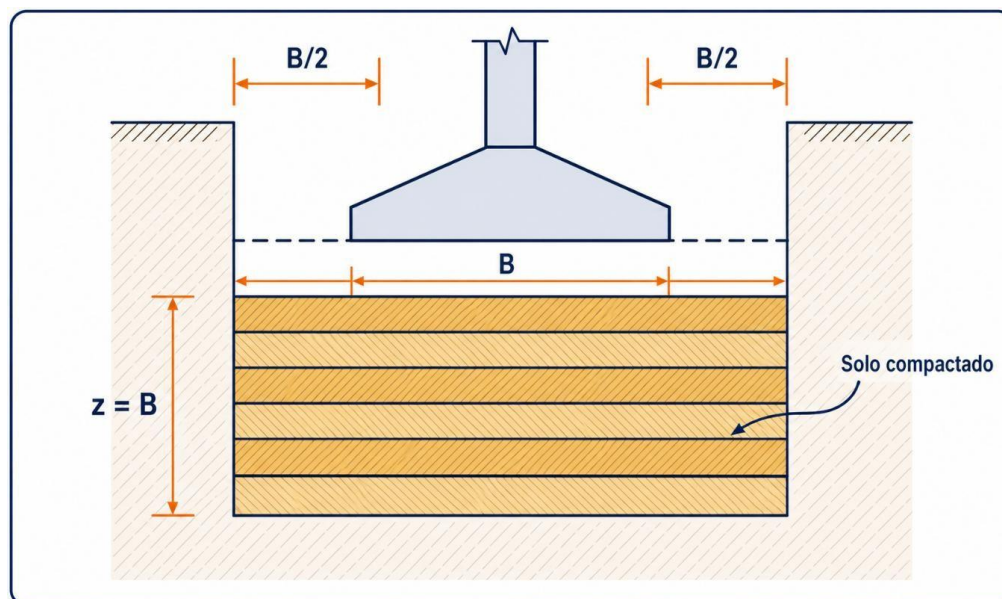


Figura 17 – Uso de sapatas em solo colapsível compactado.

Fonte: Adaptado de Cintra (2003).

Essa técnica tem apresentado resultados satisfatórios, com redução significativa dos recalques associados à colapsibilidade em obras adequadamente controladas.

4.1.1 Um exemplo de compactação

A compactação foi adotada nas fundações do Reservatório da Consolação, na cidade de São Paulo, com capacidade aproximada de 50.000 m³.

As sapatas dos muros seriam apoiadas sobre uma camada de argila vermelha porosa, com cerca de 2,50 m de espessura, índice de vazios igual a 1,50 e teor de umidade natural entre 35% e 40%.

A argila vermelha porosa que recobre parte dos espigões da capital paulista apresenta elevada compressibilidade. Registros técnicos associam esse material à ocorrência de recalques e fissuras em alvenarias, mesmo sob pressões relativamente baixas nas sapatas.

A solução adotada consistiu em escavar a argila porosa ao longo das sapatas contínuas dos muros laterais do reservatório, com dimensões externas aproximadas de $100\text{ m} \times 75\text{ m}$ e lâmina d'água de cerca de 7 m , e recompor o terreno mediante compactação. O procedimento reduziu o índice de vazios e, conseqüentemente, a compressibilidade do material (Vargas, 1951).

A experiência do Reservatório da Consolação contribuiu para reconhecer que determinados solos porosos, além de compressíveis, podem sofrer colapso estrutural quando umedecidos.

Na época dos estudos de fundação, moradores das proximidades das avenidas Paulista e Consolação já relatavam recalques e fissuras após o rompimento de tubulações. Esses episódios indicavam que, mesmo sob tensões reduzidas, a infiltração poderia desencadear o colapso da argila porosa. A análise passou, portanto, a considerar não apenas a compressibilidade, mas também a colapsibilidade do terreno.

A Figura 18 indica que a pressão de ruptura no solo natural era de aproximadamente 160 kPa . Considerando o fator de segurança adotado, a pressão admissível nas sapatas era da ordem de 80 kPa . Após a compactação, foram alcançadas tensões próximas de 550 kPa sem ocorrência de ruptura (Vargas, 1951).

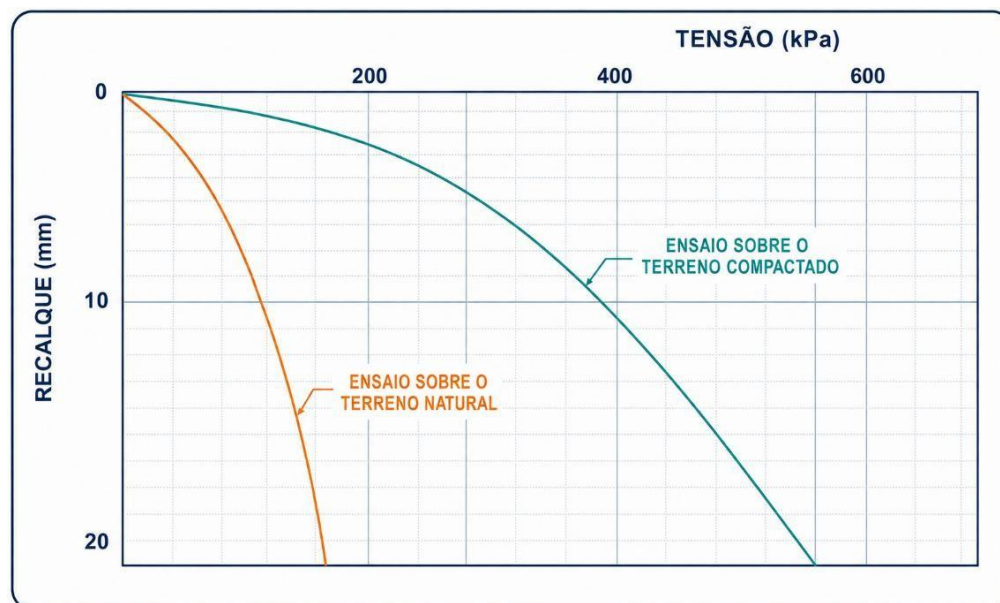


Figura 18 – Pressão admissível de ruptura no solo natural.

Fonte: Adaptado de Vargas (1951).

4.2 Injeção de solução de silicato de Sódio

Abelev e Askalonov (1957) desenvolveram um método de estabilização de solos loéssicos por injeção de silicato de sódio. A solução forma um gel que liga as partículas, aumenta a resistência e reduz a permeabilidade. O método foi aplicado na antiga União Soviética para estabilizar as fundações de duas chaminés com 80 m e 120 m de altura.

Um caso relevante de aplicação ocorreu no Teatro de Ópera de Odessa. Dez anos após a conclusão da obra, foram medidos recalques de aproximadamente 170 mm, associados ao rompimento de tubulações de água e esgoto. As medidas corretivas incluíram a substituição das redes e a injeção de silicato de sódio em cerca de 15.400 m³ de solo, por meio de 2.250 furos.

Após o tratamento, os recalques cessaram.

4.3 Compactação Dinâmica e inundação

Na compactação dinâmica associada à inundação, delimita-se a área de tratamento e promove-se o umedecimento do terreno até a condição especificada. Após o escoamento da água superficial, aplicam-se impactos sucessivos de uma massa elevada por guindaste.

A principal limitação dessa técnica é a vibração transmitida às estruturas vizinhas.

4.4 Pré-Carregamento

O pré-carregamento foi inicialmente desenvolvido para o tratamento de solos moles, mas também pode ser aplicado a solos colapsíveis. O procedimento utiliza um aterro temporário, executado com material local ou proveniente de área de empréstimo, combinado, quando necessário, com inundação controlada.

O carregamento temporário provoca deformações antes da construção definitiva, reduz o índice de vazios e limita o potencial de colapso futuro.

No tratamento de solos colapsíveis por pré-carregamento, podem ser executados furos verticais para facilitar a infiltração de água na zona de influência das tensões. O tempo de inundação deve ser suficiente para mobilizar as deformações previstas. Após a estabilização, o aterro temporário é removido e a obra pode ser iniciada.

- O aterro deve ter a mesma dimensão do empreendimento.
- Os furos devem apresentar diâmetro compatível com o método de inundação adotado.
- O espaçamento entre os furos varia, em geral, de 2 m a 3 m, conforme exemplificado na Figura 19.

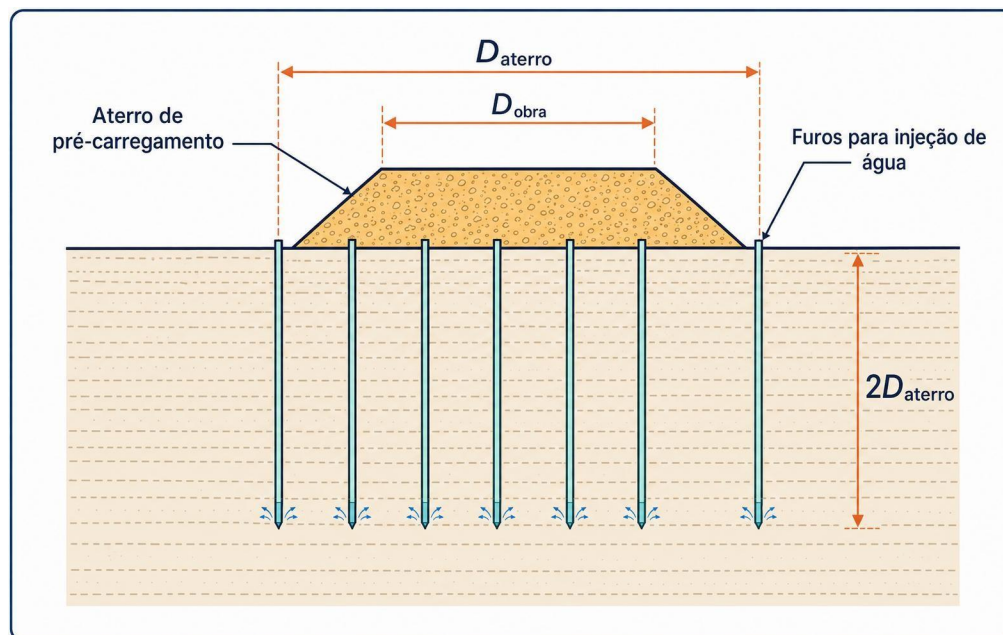


Figura 19 – Injeção de água, esquema de execução do pré-carregamento.

Fonte: Editora CEFET, 2009.

4.5 Estacas de Areia ou Pedra

Esse método é utilizado para compactar e reforçar o terreno mediante a execução de colunas de areia ou pedra. O tratamento reduz o índice de vazios, melhora as condições de drenagem e aumenta a capacidade de suporte do solo.

O processo executivo é apresentado esquematicamente na Figura 20 e pode ser resumido nas etapas seguintes:

Fases de execução de uma estaca tipo “Franki” Standard

1. Lançamento de areia e brita para formar a bucha na extremidade do tubo;
2. Cravação do tubo com a bucha de areia e brita mediante pilão em queda livre;

3. Após atingir a profundidade prevista, execução da base com o tubo suspenso pelos cabos de tração;
4. Colocação da armadura ancorada na base;
5. Formação do fuste mediante introdução e apiloamento do material, com retirada gradual do tubo;
6. Conclusão da coluna, cujo diâmetro indicado no exemplo é de 0,30 m.
- 7.

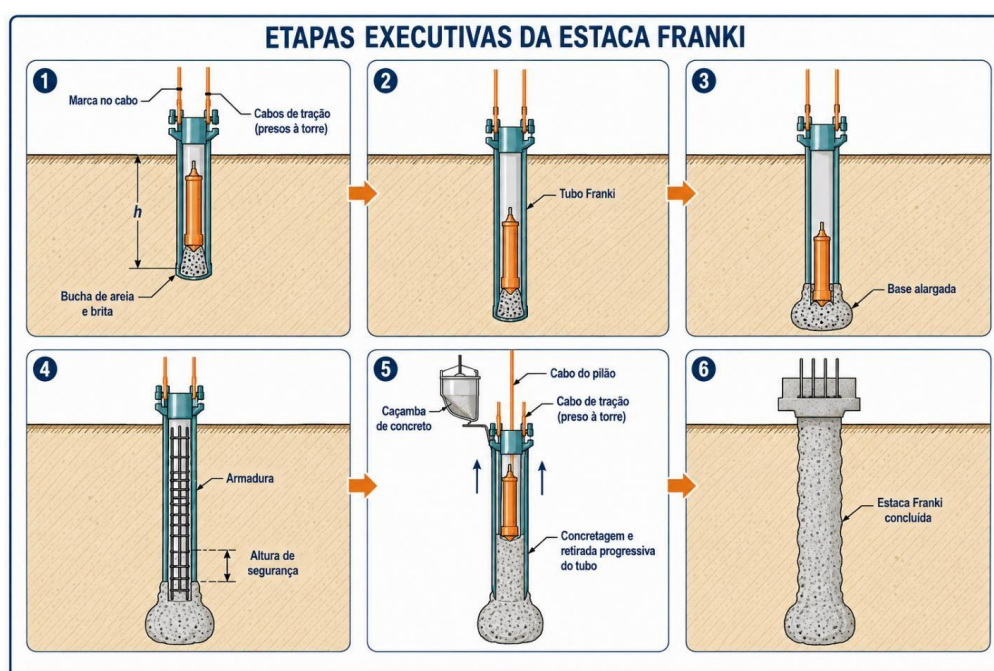


Figura 20 – Processo de execução de areia ou de pedra.

Fonte: Adaptado de Cintra (1996).

O espaçamento entre as colunas depende das ações transmitidas e das características do terreno; em geral, cargas maiores exigem menor espaçamento.

4.5.1 Equipamento

O equipamento pode ser constituído por bate-estacas do tipo Strauss, com tripé, guincho, motor, pilão e tubo de revestimento.

No exemplo descrito, o pilão tem peso de 13 kN e altura de queda de 3,0 m, enquanto o tubo de revestimento apresenta diâmetro de 300 mm.

4.5.2 Controle de execução

Durante a execução, devem ser controlados os dados de cravação, o equipamento e a energia empregados, a profundidade atingida e a quantidade de material introduzida. Nagaraju e Datye (1981) relacionam o desempenho das colunas granulares ao consumo de brita e areia. Uma proporção volumétrica de areia entre 0,2 e 0,5 em relação à brita pode produzir um material bem compactado, com preenchimento adequado dos vazios.

05

PROJETO DE FUNDAÇÕES POR ESTACAS

05

5. Projeto de fundações por estacas

Este capítulo apresenta o conceito de carga de colapso e a aplicação de um fator de segurança específico. A metodologia permite projetar fundações por estacas considerando os efeitos de uma eventual inundação do solo. O procedimento foi desenvolvido em pesquisas realizadas na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

5.1 Sondagens e ensaios *in situ*

Em solos colapsíveis, ensaios realizados durante períodos de estiagem podem fornecer valores de N_{spt} e de resistência de ponta q_c superiores aos obtidos em períodos chuvosos. Por isso, o projetista deve conhecer a data e as condições de umidade existentes durante a investigação, especialmente quando a campanha foi executada na estação seca.

Provas de carga realizadas em períodos de estiagem também podem indicar capacidades superiores às que seriam obtidas em condições de maior umidade.

Em terrenos potencialmente colapsíveis, recomenda-se avaliar a realização de sondagens e provas de carga com pré-inundação controlada.

Cintra (1998) observa que, no caso do SPT, a circulação de água antes de atingir o nível d'água, embora não corresponda ao procedimento normativo usual, pode reproduzir parcialmente a condição de umedecimento necessária ao colapso. O autor sugere que essa condição seja investigada apenas em furos adicionais e com finalidade específica de pesquisa.

O uso controlado de circulação de água antes do nível d'água pode auxiliar a avaliação do comportamento do solo após o umedecimento, mas não substitui automaticamente um programa de ensaios com pré-inundação.

5.2 Carga de Colapso

A condição inundada é, em geral, a mais crítica para solos colapsíveis. A carga de colapso representa o limite associado ao início da deformação acentuada e deve ser considerada no projeto da fundação.

Para uma estaca, a carga de colapso pode ser determinada por prova de carga com pré-inundação. O procedimento descrito na literatura consiste em introduzir água com vazão suficiente para manter uma lâmina no interior da cava durante as 48 horas anteriores ao ensaio e ao longo de sua execução.

Segundo Cintra (1996), quando não há prova de carga na fase de projeto, a carga de colapso pode ser estimada por métodos semiempíricos de capacidade de carga, como o método de Aoki-Velloso, utilizando valores de N_{spt} ou q_c obtidos em ensaios realizados sob condição inundada.

5.3 Redução da Capacidade de carga

A inundação reduz a capacidade de carga em relação à condição de umidade natural; essa redução é representada pela diferença entre a resistência convencional e a carga de colapso.

A magnitude dessa redução indica o grau de suscetibilidade da fundação aos efeitos do colapso.

Metodologia de projeto de fundações profundas

No projeto de fundações profundas em solos colapsíveis, deve-se escolher uma solução capaz de limitar os efeitos do umedecimento. Sempre que possível, a ponta e parte suficiente do fuste devem alcançar um estrato não colapsível.

Uma fundação de menor profundidade pode ser economicamente viável, desde que a carga admissível seja reduzida e as verificações de ruptura, recalque e colapso sejam atendidas.

Qualquer que seja a solução, devem ser determinadas tanto a capacidade de carga na condição não inundada, R , quanto a carga de colapso, R_c . A carga admissível, P_a , deve satisfazer os fatores de segurança aplicáveis à ruptura e ao colapso, além do critério de recalque (Cintra, 1985).

A verificação complementar adota fator de segurança mínimo de 1,5 em relação à carga de colapso. Assim, a carga admissível deve atender às duas condições apresentadas a seguir.

$$P_a \leq \begin{cases} R/2,0 \\ R_c/1,5 \end{cases}$$

A principal vantagem dessa metodologia é incorporar a colapsibilidade à determinação da carga admissível, em vez de apenas verificar, posteriormente, o comportamento da fundação sob uma carga previamente definida.

Essa abordagem modifica a concepção tradicional de projeto. Antes, a prova de carga com inundação era realizada diretamente no estágio correspondente à carga admissível, apenas para simular o comportamento de uma fundação dimensionada sem considerar explicitamente a colapsibilidade.

A determinação da carga de colapso em prova com pré-inundação permite definir uma carga admissível compatível com a segurança e reduzir o risco de deformações excessivas durante a vida útil da obra.

Considere uma estaca com capacidade de carga $R = 1.500$ kN na condição não inundada e carga de colapso $R_c = 900$ kN. Com fator de segurança de 1,5 em relação ao

colapso, obtém-se $P_a = 600$ kN, valor inferior aos 750 kN resultantes do fator 2,0 aplicado à ruptura. Como a redução de capacidade é de 40%, o colapso controla o dimensionamento, desde que o recalque admissível também seja verificado.

O procedimento de projeto busca definir uma carga admissível que satisfaça simultaneamente os critérios de ruptura, recalque e segurança em relação ao colapso. A Figura 21 mostra que, para uma mesma carga, o recalque na condição inundada (ρ_2) é superior ao observado na condição de umidade natural (ρ_1).

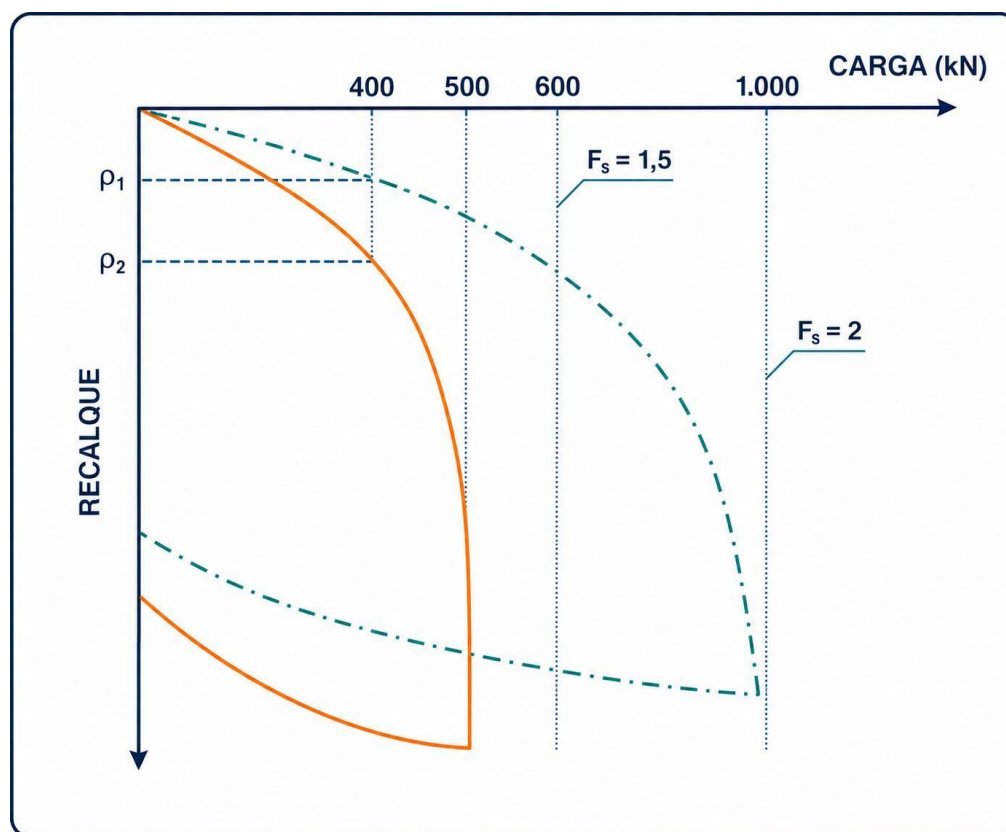


Figura 21 – Recalque condição inundada.

Fonte: Adaptado de Cintra (1998).

O exemplo numérico permite comparar a verificação convencional com a metodologia baseada na carga de colapso. Se fosse mantida uma carga admissível de 500 kN sem essa análise específica, o fator de segurança em relação ao colapso seria de apenas 1,2.

A Figura 22 representa uma redução de 25% da capacidade de carga, com $R = 1.000$ kN e $R_c = 750$ kN. Nesse caso, $P_a = 500$ kN atende simultaneamente ao fator 2,0 para a ruptura na condição não inundada e ao fator 1,5 para o colapso. O recalque na condição inundada também deve ser verificado.

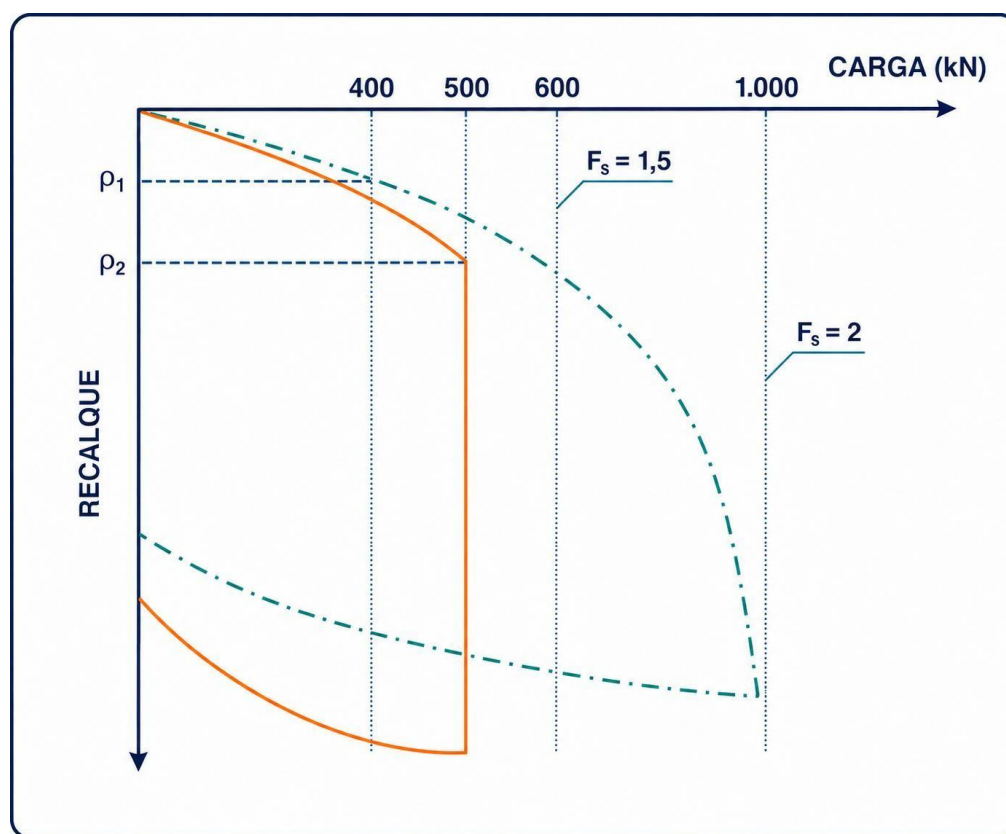


Figura 22 – Redução de capacidade de carga igual a 25%.

Fonte: Adaptado de Cintra (1998).

Quando a redução é inferior a 25%, como no exemplo $R = 1.000 \text{ kN}$ e $R_c = 850 \text{ kN}$, a carga admissível de 500 kN é controlada pela resistência na condição não inundada, com fator de segurança $2,0$. Ainda assim, o recalque deve ser avaliado pela curva correspondente à condição inundada, na qual q_2 é superior a q_1 .

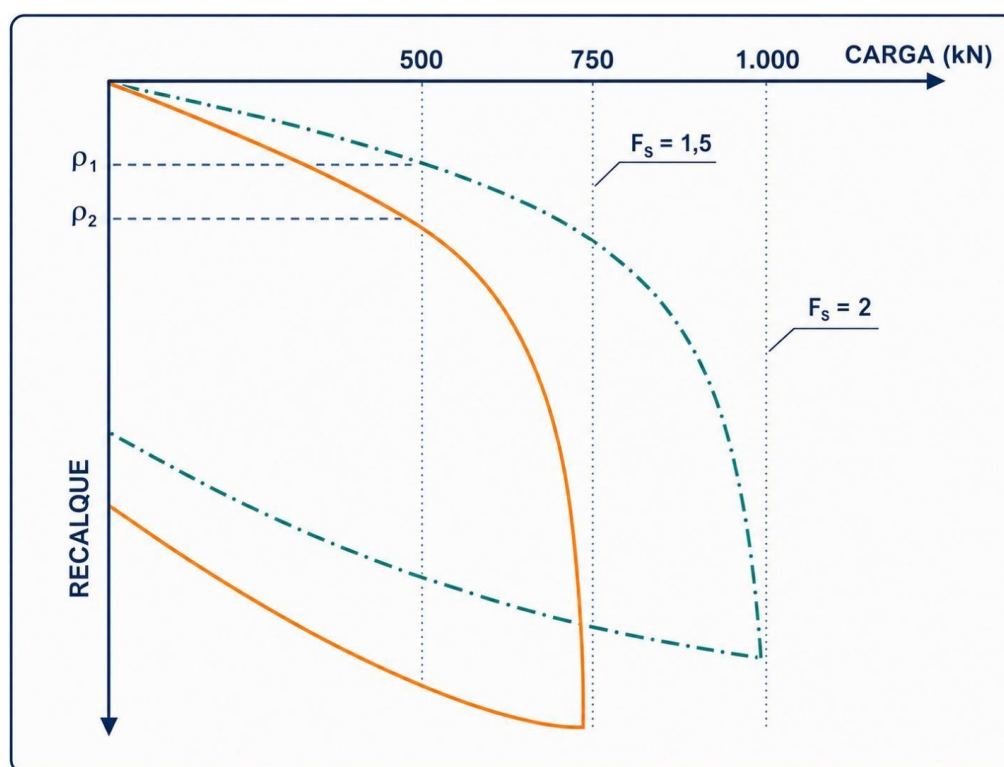


Figura 23 – Redução de capacidade de carga inferior a 25%.

Fonte: Adaptado de Cintra (1998).

A Figura 24 relaciona os fatores de segurança à redução da capacidade de carga. Para reduções superiores a 25%, prevalece o fator 1,5 em relação ao colapso; para reduções inferiores a 25%, prevalece o fator 2,0 em relação à ruptura na condição não inundada.

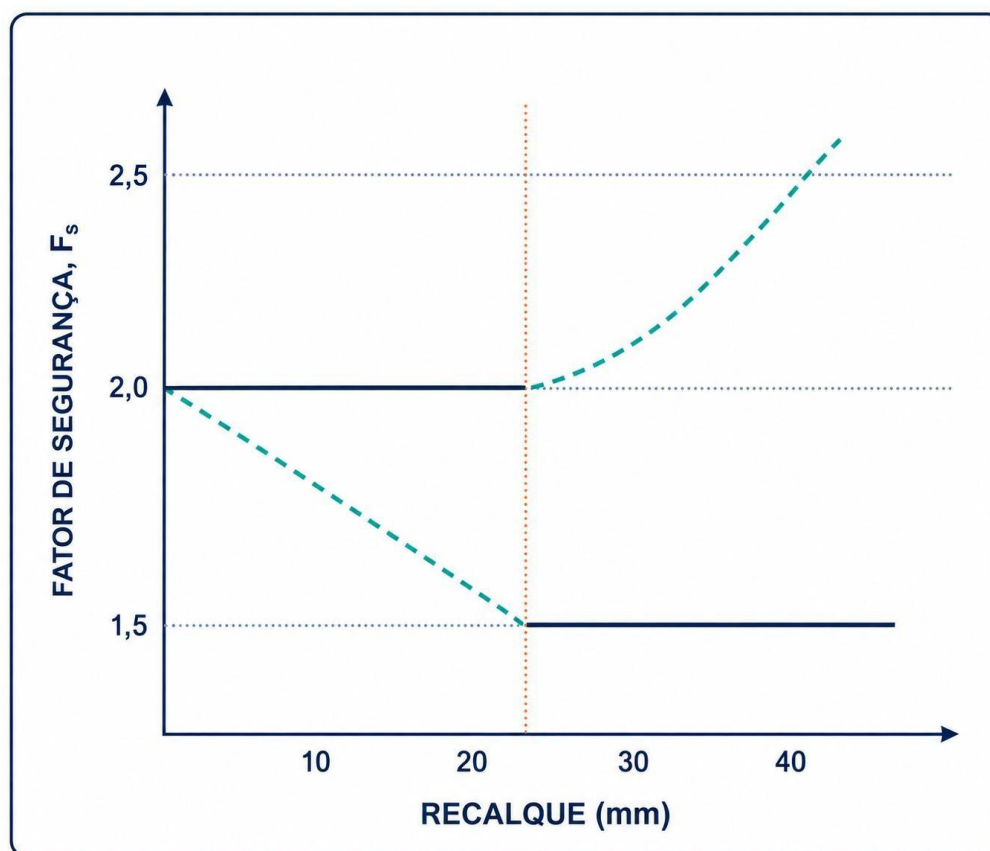


Figura 24 – Variação dos fatores de segurança com redução de capacidade de carga.

Fonte: Adaptado de Cintra (1998).

5.3.1 Fundações superficiais

A metodologia anterior também pode ser aplicada às fundações superficiais mediante o conceito de tensão de colapso, análogo ao de carga de colapso.

Para determinar a capacidade de carga, σ_r , e a tensão de colapso, σ_c , são necessárias provas de carga nas condições de umidade natural e de pré-inundação. A tensão admissível, σ_a , deve satisfazer os fatores de segurança indicados nas expressões seguintes, além do critério de recalque.

$$\sigma_a \leq \begin{cases} \sigma_r/2,0 \\ \sigma_c/1,5 \end{cases}$$

Quando se utilizam fórmulas teóricas de capacidade de carga, como a de Terzaghi, a tensão de colapso deve ser estimada com parâmetros representativos da condição inundada. Os fatores de segurança são então aplicados para determinar a tensão admissível.

$$\sigma_a \leq \begin{cases} \sigma_r/3,0 \\ \sigma_c/2,25 \end{cases}$$

O recalque admissível também deve ser verificado para a condição inundada. Quando se empregam métodos como o de Schmertmann, os parâmetros de deformabilidade derivados de N_{spt} ou q_c devem representar adequadamente essa condição.

Com essa metodologia, é possível definir uma tensão admissível compatível com a segurança em relação ao colapso.

5.4 Instrumentação

A instrumentação é importante para fundações profundas, não só para medir separadamente as parcelas de resistência lateral e de ponta, mas também para investigar a variação do atrito lateral ao longo do fuste.

Uma instrumentação completa poderia, então, fornecer subsídios para a avaliação do atrito negativo que se manifesta na camada colapsível, quando inundada, bem como das tensões residuais existentes em reensaaios.

Além disso, uma instrumentação do terreno, para a monitoração da variação do teor de umidade (e indiretamente da pressão de sucção), seria de apreciável importância para o estudo da redução da capacidade de carga que se processa quando da inundação de um solo colapsível. Isto talvez possibilite até o desenvolvimento de métodos de previsão da carga de colapso para diferentes tipos de estacas, em variadas condições de embutimento, num dado perfil de terreno, com a espessura da camada colapsível conhecida.

5.5 Esforços de tração

As fundações submetidas a esforços de tração também são afetadas pela colapsibilidade. A redução da resistência por atrito lateral ao longo do trecho do fuste inserido na camada colapsível diminui a capacidade à tração e pode produzir deslocamentos bruscos após a inundação.

Às estacas tracionadas aplicam-se as mesmas considerações relativas ao método executivo e ao nível de embutimento no estrato não colapsível.

Esses fatores influenciam a intensidade dos efeitos provocados pelo colapso e devem ser considerados no dimensionamento.

Permanece a restrição às estacas escavadas a seco totalmente embutidas no estrato colapsível e também a sugestão de trabalhos sobre os possíveis benefícios de utilização de água no processo executivo das estacas.

5.6 Carregamento Lateral

Miguel (1996) realizou provas de carga horizontal em fundações instaladas em solo colapsível, com inundação artificial do terreno, no campo experimental da USP em São Carlos.

As principais conclusões apresentadas por Miguel (1996) foram:

- Redução média de 12% na capacidade de carga horizontal de estacas Strauss;
- Redução média de 37% na capacidade de estacas do tipo raiz, segundo o critério de ruptura adotado;
- Redução de 78% no coeficiente de reação horizontal do solo após a inundação.

5.7 Grupos de Estacas

Embora as estacas sejam frequentemente empregadas em grupos, a maior parte dos estudos sobre solos colapsíveis e inundação refere-se a estacas isoladas. Uma exceção é o trabalho de Fernandes (1995).

O autor ensaiou grupos formados por duas a quatro estacas do tipo broca, com 0,25 m de diâmetro e 6,0 m de comprimento, no campo experimental da USP em São Carlos. Após a inundação, as reduções de capacidade variaram de 25% a 42%, com diferenças relacionadas ao número de estacas do grupo.

06

CONSIDERAÇÕES FINAIS

06

6. Considerações finais

Os solos colapsíveis apresentam estrutura porosa e comportamento sensível à variação da umidade. Quando submetidos simultaneamente a carregamento e umedecimento, podem sofrer redução brusca de volume e desenvolver recalques adicionais.

Os registros históricos demonstram que o colapso do terreno pode provocar danos significativos às edificações. Durante muito tempo, parte dessas manifestações foi atribuída a outras causas, até que o comportamento específico dos solos colapsíveis passou a ser investigado de forma sistemática.

Há diferentes alternativas para prevenir ou reduzir os danos, como remoção e compactação, pré-carregamento, inundação controlada, compactação dinâmica, injeções e fundações profundas adequadamente embutidas em estratos resistentes. A escolha depende das condições geológicas e geotécnicas, do sistema estrutural, do método executivo e da viabilidade econômica.

A análise desenvolvida permitiu identificar os principais mecanismos de colapso, seus efeitos sobre fundações superficiais e profundas e as medidas de investigação, projeto e tratamento que contribuem para reduzir riscos futuros.

Referências

ABELEV, Y. M.; ASKALONOV, V. V. *The stabilization of foundations of structures on loess soils*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 4., 1957, London. Proceedings [...]. London: [s.n.], 1957. v. 1, p. 259-263.

AGNELLI, N. *Estudo da colapsibilidade do solo de Bauru por meio de provas de carga diretas*. 1992. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

BRITO, J. L. W. *Fundações do edifício*. São Paulo: EPUSP, 1987.

CARVALHO, D.; SOUZA, A. *Análise do efeito do umedecimento do solo em fundações rasas e profundas em solos porosos*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES (COBRAMSEF), 9., 1990, Salvador. Anais [...]. v. 2, p. 109-114.

CINTRA, J. C. A. *Fundações em solos colapsíveis*. 1995. Tese (Livre-Docência) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

CINTRA, J. C. A. *Fundações em solos colapsíveis*. São Carlos: RiMa, 1998. 106 p.

FERNANDES, J. C. S. *Grupos de estacas escavadas de pequeno diâmetro em solo colapsível*. 1995. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

FERREIRA, C. V. et al. *Correlações entre parâmetros geotécnicos de um solo residual*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 10., 1994, Foz do Iguaçu. Anais [...]. São Paulo: ABEF/ABMS, 1994. p. 1213-1220.

FERREIRA, C. V. *Efeito da inundação do solo no comportamento de estacas moldadas in loco e instrumentadas em campo experimental de Bauru-SP*. 1998. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

FERREIRA, R. C.; MONTEIRO, L. B.; PERES, J. E.; BENVENUTO, C. *Some aspects on the behaviour of Brazilian collapsible soils*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 12., 1989, Rio de Janeiro. Proceedings [...]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1989. p. 117-120.

GIBBS, H. J. *Consolidation and related properties of loessial soils*. *Special Tech. Publ.*, ASTM, 1951.

HACHICH, Fundações Teoria e prática

MIGUEL, M. G. *Execução e análise de provas de carga horizontal em estacas em solo colapsível*. 1996. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

NAGARAJU; DATYE. *Performance das Estacas Granulares*. Dissertação de Mestrado, USP/Poli, 1981.

REZNIK, Y. M. *Plate-load test of collapsible soils*. *Journal of Geotech. Eng.*, ASCE, v. 119, n. 3, p. 608-615, 1993.

SOUZA, A.; CINTRA, J. C. A. *Fundações rasas em solo colapsível de Ilha Solteira*. São Carlos: Universidade de São Paulo, 1994.

SULTAN. *Comportamento do solo colapsível*. *Revista Geotecnica*, Lisboa, n. 88, p. 20-27, 1971.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. *Soil mechanics in engineering practice*. New York: Wiley, 1948.

VARGAS, M. *Fundação sobre aterro compactado*. *Boletim da Repartição de Águas e Esgotos*, ano 13, n. 23, p. 51-60, jun. 1951.

VARGAS, M. *Structurally Unstable soils in Southern Brazil*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 8., 1973, Moscow. Proceedings [...]. v. 2.2, p. 239-246.

VILAR, O. M.; BORTOLUCCI, A. A.; RODRIGUES, J. E. *Solos colapsíveis; um problema para a engenharia de solos tropicais*. Simp. Brás. De Solos Tropicais em engenharia de solos tropicais. Simp. Bras. De Solos Tropicais em Engenharia, Rio de Janeiro, v. 1, p. 209-224.

Bibliografia complementar

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6122: *projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9061: *segurança de escavação a céu aberto*. Rio de Janeiro: ABNT, 1985.

EDIFIQUE. *Imagens de estacas*. Disponível em: www.edifique.arq.br/imagens/estacas.GIF. Acesso em: 15 out. 2011.

EDITORA CEFET. *Fundações para construção de Habitação de Interesse Social no Estado de Mato Grosso*. [S.l.]: Editora CEFET, 2009.

UNICAMP. *Fundações*. Disponível em: www.fec.unicamp.br/~pjr/fundacoes.html. Acesso em: 15 out. 2011.

ÍNDICE REMISSIVO

A

ADMISSÍVEL

31, 39, 48, 49, 50, 51, 52, 53

ÁGUA

11, 13, 14, 16, 17, 18, 30, 32, 34, 39, 40, 41, 42, 46, 47, 54

C

CAMADA

17, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 37, 38, 54

CAPACIDADE

13, 22, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 38, 42, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55

CARGA

11, 13, 14, 22, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 58, 59

CARLOS

30, 46, 54, 55, 58, 59

CINTRA

11, 13, 17, 22, 27, 28, 37, 38, 43, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 58, 59

COLAPSÍVEL

11, 14, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 38, 47, 54, 58, 59

COLAPSO

6, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 17, 22, 30, 31, 37, 39, 41, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 57

COMPACTAÇÃO

27, 32, 37, 38, 39, 41, 57

CONDIÇÃO

22, 41, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 53

E

ESTRUTURA

8, 11, 12, 13, 17, 22, 26, 33, 57

I

INUNDAÇÃO

11, 17, 27, 28, 30, 31, 33, 34, 37, 41, 46, 47, 48, 52, 54, 55, 57, 59

INUNDADA

47, 48, 49, 50, 51, 53, 54

P

PAULO

15, 17, 18, 22, 38, 46, 58, 59

R

RECALQUE

8, 11, 12, 14, 24, 34, 37, 48, 49, 50, 51, 52, 53

RECALQUES

8, 14, 22, 23, 26, 27, 28, 30, 33, 38, 39, 40, 57

REDUÇÃO

8, 11, 13, 14, 30, 31, 32, 33, 34, 37, 38, 47, 50, 51, 54, 55, 57

RESISTÊNCIA

13, 15, 18, 28, 33, 34, 40, 47, 51, 53, 54

RUPTURA

34, 35, 39, 40, 48, 49, 50, 51, 55

S

SAPATAS

9, 22, 26, 27, 28, 37, 38, 39

SEGURANÇA

28, 39, 46, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 60

T

TERRENO

6, 8, 9, 11, 18, 22, 26, 27, 28, 30, 31, 37, 39, 41, 42, 43, 54, 57

U

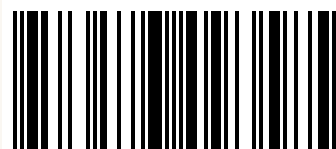
UMIDADE

8, 11, 12, 13, 14, 22, 33, 35, 38, 46, 47, 49, 52, 54, 57

FUNDAÇÕES EM SOLOS COLAPSÍVEIS

O livro *Fundações em Solos Colapsíveis* apresenta os fundamentos necessários para compreender o comportamento de solos que, embora possam permanecer aparentemente estáveis em seu estado natural, sofrem redução súbita de volume quando submetidos simultaneamente ao aumento da umidade e a determinado estado de tensões. Esse fenômeno pode provocar recalques adicionais, perda de capacidade de carga e danos em fundações, estruturas e elementos construtivos. A obra aborda os conceitos relacionados à colapsibilidade, a ocorrência desses solos no Brasil e os principais métodos empregados em sua identificação e investigação geotécnica, com destaque para a sondagem à percussão e os ensaios de campo. São examinados os mecanismos responsáveis pelo colapso, seus efeitos sobre as edificações e as manifestações patológicas associadas aos recalques diferenciais. Também são analisados o comportamento e a aplicabilidade de diferentes soluções de fundação, incluindo sapatas, tubulões e estacas. O livro apresenta técnicas de melhoramento do terreno, como compactação, injeção de solução de silicato de sódio, compactação dinâmica, inundação controlada, pré-carregamento e execução de estacas de areia ou pedra. Na parte dedicada ao projeto de fundações por estacas, são discutidos aspectos como carga de colapso, redução da capacidade de carga, fatores de segurança, instrumentação, esforços de tração, carregamentos laterais e comportamento de grupos de estacas. A análise demonstra que a prevenção de danos depende de investigação geotécnica adequada, controle das fontes de umidade e escolha de soluções compatíveis com as características do terreno. Com linguagem técnica e recursos visuais, a obra oferece uma visão integrada do diagnóstico, da prevenção e do tratamento dos problemas relacionados às fundações construídas em solos colapsíveis.

ISBN



9-786-58309-3585