JARBAS MILITITSKY
NILO CESAR CONSOLI
FERNANDO SCHNAID

# Patologia das Fundações

2ª edição revista e ampliada



JARBAS MILITITSKY NILO CESAR CONSOLI FERNANDO SCHNAID

# PATOLOGIA das FUNDAÇÕES

2ª edição | revista e | ampliada



©COPYRIGHT 2005 OFICINA DE TEXTOS 1º reimpressão – 2008 | 2º reimpressão – 2013 2º edição – 2015

Grafia atualizada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, em vigor no Brasil desde 2009.

CONSELHO EDITORIAL Cylon Gonçalves da Silva; Doris C. C. K. Kowaltowski;

José Galizia Tundisi; Luis Enrique Sánchez; Paulo Helene;

Rozely Ferreira dos Santos; Teresa Gallotti Florenzano

CAPA MALU VALLIM
ILUSTRAÇÕES FLÁVIA ATAIDE PITHAN
PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO MALU VALLIM
REVISÃO JONATHAN BUSATO E CAROLINA MESSIAS

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Milititsky, Jarbas
Patologia das fundações / Jarbas Milititsky,
Nilo Cesar Consoli, Fernando Schnaid. -- 2. ed.
rev. e ampl. -- São Paulo : Oficina de Textos, 2015.
Bibliografia.
ISBN 978-85-7975-183-7

1. Fundações (Engenharia) I. Consoli, Nilo Cesar. II. Schnaid, Fernando. III. Título.

15-04723

CDD-624.176

Índices para catálogo sistemático:

Fundações : Patologia : Engenharia 624.176
 Patologia das fundações : Engenharia 624.176

Todos os direitos reservados à Oficina de Textos
Rua Cubatão, 959
CEP 04013-043 São Paulo SP tel. (11) 3085-7933 (11) 3083-0849 www.ofitexto.com.br atend@ofitexto.com.br

#### PREFÁCIO à 2ª edição

A primeira edição desta publicação em 2006 foi bem recebida pelos profissionais da área, preenchendo um espaço carente de material técnico mais abrangente e atualizado da prática de engenharia brasileira. Nas diversas participações dos autores em eventos técnicos, foram inúmeras as manifestações positivas quanto à contribuição da publicação para a prática profissional, sem contar os cursos e treinamentos solicitados por empresas e entidades profissionais.

Após o lançamento da primeira edição do livro, recebemos incontáveis comentários e contribuições, com informações e fotos de problemas e acidentes que estarão presentes nesta revisão geral. Nosso agradecimento especial aos colegas Augusto Tozzi, Plínio Boldo, Claudio Gonçalves, George Bernardes, Luis Fernando de Seixas Neves, Edgar Odebrecht, Wilson Borges e Sérgio Paraíso, que deram especial contribuição para que os problemas de patologias fossem ilustrados de forma rica e elucidativa.

A atualização se faz necessária por inúmeros motivos, entre os quais podemos mencionar: a nova edição da norma ABNT NBR 6122/2010, de Fundações, com exigências de ensaios em fundações profundas; a nova edição do Manual ABEF; inovações no mercado brasileiro com novos equipamentos para execução de fundações; ampliação da disponibilidade de ensaios de investigação do subsolo e ensaios em estacas; e autores com acesso a novos problemas (natureza dos projetos). Ocorreu nesse período também uma evolução do conhecimento, com publicações de casos, procedimentos e práticas na literatura técnica, disponibilizada pelos novos meios digitais de divulgação (pesquisa na internet, publicações *on-line* etc.).

Nas palestras realizadas pelos autores, ocorreu a ampliação do escopo do conteúdo na forma de apresentação dos desafios para melhoria de cada um dos aspectos apresentados, além de recomendações de boa prática, cuja inclusão se constitui em inovação desta edição. No final de cada capítulo, são apresentadas indicações das práticas recomendadas para a evolução do setor e minimização dos riscos de patologias inerentes à área de atividade e natureza das fundações e suas práticas no Brasil.

#### **PREFÁCIO**

A presente contribuição à engenharia apresenta o tema "patologia das fundações", considerando a solução de eventos em sua abrangência maior, enfocando todas as fases em que os problemas podem ocorrer ou ser originados, a saber:

- ≥ caracterização do comportamento do solo;
- ≥ análise e projeto das fundações;
- ≥ execução das fundações;
- ≥ eventos pós-conclusão das fundações;
- degradação dos materiais constituintes das fundações.

A prática do campo de atividade descrito sob a denominação de fundações, abrange inúmeras atividades, em geral desempenhadas por profissionais com diferentes formações e experiências. O êxito ou fracasso de uma fundação, bem como a possibilidade de aparecimento de problemas, pode ter origem ou mesmo depender de uma imensa variedade de aspectos, alguns deles considerados como detalhes ou menos significativos. Os profissionais encarregados da etapa de "caracterização de comportamento", em geral, não são especialistas em fundações, muitas vezes não são engenheiros, não acompanham o desenvolvimento de todos os eventos que dão origem às fundações construídas. Condições especiais de comportamento ou ocorrência de materiais não usuais podem não ser identificadas nesta fase; o projetista das fundações frequentemente, não recebe informações precisas de eventos ou condições locais ou construtivas diferentes das estabelecidas como representativas do projeto; alterações das condições encontradas durante a execução não são necessariamente relatadas; os executantes podem não ter acesso ao detalhamento da investigação preliminar ou das especificações executivas adequadas à execução da obra; dificuldades construtivas podem comprometer as condições de projeto estabelecidas; acontecimentos pós-construção das fundações, internos à obra ou externos à mesma, podem afetar seu desempenho sem

que tenham sido previstas na concepção e projeto e, finalmente, a degradação dos elementos das fundações pode comprometer seu desempenho a longo prazo.

Identificam-se neste livro as causas e tipos correntes de problemas nas diferentes etapas da vida de uma fundação, com as referências disponíveis sobre o tema, como um guia norteando os cuidados necessários para evitar patologias, identificar suas causas, indicar as diretrizes adequadas de sua execução e fiscalização.

Como resultado das atividades profissional e de pesquisa dos autores, são relatados e apresentados aspectos que extrapolam a geotecnia ou a prática usual de fundações. A experiência no enfrentamento de casos práticos, de projeto e de recuperação, a produção de conhecimentos e o acesso à literatura nacional e internacional, bem como o envolvimento em pesquisa, conferem à contribuição um caráter especial, que pretende superar a lacuna da produção brasileira no tema e auxiliar os profissionais das várias áreas envolvidas na solução de problemas de fundações.

Não é pretensão deste livro apresentar uma revisão detalhada e profunda das várias áreas de conhecimento envolvidas, mas uma relação significativa de referências clássicas e atualizadas de cada assunto é incluída no final, servindo de indicação para estudos específicos que se façam necessários.

### SUMÁRIO

9	INTE	RODU	JÇÃO
17	CON	ICEIT	OS BÁSICOS
17	1.1	lden	tificação dos Movimentos das Fundações
18	1.2	Reca	alques Admissíveis
24	1.3	Efeit	os de Movimentos das Fundações
28	INV	ESTIG	GAÇÃO DO SUBSOLO
29	2.1	Ausê	encia de Investigação do Subsolo
30	2.2	Inve	stigação Insuficiente
33	2.3	Inve	stigação com Falhas
34	2.4		rpretação Inadequada dos Dados do Programa ovestigação
34	2.5	Caso	os Especiais
35	2	.5.1	Influência da Vegetação
40	2	.5.2	Colapsibilidade
43	2	.5.3	Expansibilidade
45	2	.5.4	Zonas de Mineração
47	2	.5.5	Zonas Cársticas
51	2	.5.6	Ocorrência de Matacões
54	2.6	Desa	ifios para Melhoria da Investigação
58	ANÁ	LISE	E PROJETO
60	3.1	Prob	lemas Envolvendo o Comportamento do Solo
62	3.2		iabilidade da Previsão da Capacidade de Carga stacas
70	3	.2.1	Variabilidade do Subsolo
72	3.3	Prob	lemas Envolvendo os Mecanismos de Interação
		Solo	-Estrutura
76	3.4		imentos do Solo Induzindo Carregamento ional em Fundações Profundas
77	3	.4.1	Atrito Negativo
78	3	.4.2	Estacas Inclinadas
78	3	.4.3	Aterro ou Sobrecarga Assimétrica
79	3	.4.4	Estacas Próximas a Escavações
79	3.5	Esta	cas em Solos Expansivos
80	3.6	Esta	cas em Solos Colapsíveis

	80	3.7	Problemas Envolvendo o Desconhecimento do Comportamento Real das Fundações		
	87	3.8	Prob	lemas Envolvendo a Estrutura de Fundação	
	92	3.9	Probl	lemas Envolvendo as Especificações Construtivas	
	92	3	.9.1	Fundações diretas – problemas podem ser causados pela ausência de indicações precisas com relação a	
	93	3	.9.2	Fundações profundas – nos projetos correntes são comuns problemas causados pela ausência de indicações referentes a	
	94	3	.9.3	Geral	
	95	3.10	Fund	dações sobre Aterros	
	95	3	.10.1	Recalque do Corpo do Aterro	
	97	3	.10.2	Aterro sobre Solos Moles	
1	100	3	.10.3	Aterros Sanitários e Lixões	
1	103	3.11	Desa	fios para Melhoria – Análise e Projeto	
1	105	EXE	CUÇÃ	ÃO	
1	106	4.1	Fund	ações Superficiais	
•	107	4	.1.1	Problemas Envolvendo o Solo	
1	109	4	.1.2	Problemas Envolvendo Elementos Estruturais da Fundação	
	113	4.2	Fund	ações Profundas	
	114	4	.2.1	Problemas Genéricos	
	119	4	.2.2	Estacas Cravadas	
•	137	4	.2.3	Estacas Escavadas	
•	152	4.3	Cont	role Preciso dos Volumes Concretados	
1	153	4.4	Prepa	aro da Cabeça das Estacas de Concreto	
1	153	4.5	Ensa	ios de Integridade	
	157	4.6	Prova	as de Carga	
	161	4.7	Desa	fios para Melhoria – Execução	
1	163	EVE	NTOS	PÓS-CONCLUSÃO DA FUNDAÇÃO	
1	163	5.1	Carre	egamento Próprio da Superestrutura	
				Alteração no Uso da Edificação	
	165			Ampliações e Modificações não	
				Previstas no Projeto Original	
1	165 5.2 Movimento da Massa de Solo Decorrente de Fatores Externos				
1	166	5	.2.1	Alteração de Uso de Terrenos Vizinhos	
1	166	5	.2.2	Execução de Grandes Escavações Próximo à Construções	
•	177	5	.2.3	Escavações não Protegidas junto a Divisas ou Escavações Internas à Obra (instabilidade)	

177	5.2.4	Instabilidade de Taludes
180	5.2.5	Rompimento de Canalizações Enterradas
181	5.2.6	Extravasamento de Grandes Coberturas sem
		Sistema Eficiente de Descarga
183	5.2.7	Oscilações não Previstas do Nível de Água
183	5.2.8	Rebaixamento do Nível de Água
185	5.2.9	Erosão ou Solapamento (Scour)
187	5.2.10	Ação de Animais ou do Homem Resultando
		em Escavações Indevidas
190		
191	5.3.1	Equipamentos Industriais
192	5.3.2	Cravação de Estacas
195	5.3.3	Compactação Vibratória e Dinâmica
196	5.3.4	Explosões
198	5.3.5	Vibrações – Normalização
206	5.3.5	Choque de embarcações
207	5.4 Desa	afios para Melhoria – Eventos Pós-conclusão
209	DEGRAD	AÇÃO DOS MATERIAIS
210	6.1 Conc	reto
219	6.2 Aço	
221	6.3 Mad	eira
225	6.4 Roch	as
227	CONSIDE	RAÇÕES FINAIS
229	7.1 Contr	role de Recalques
233	7.2 Cont	role de Verticalidade
234	7.3 Cont	role de Trincas
236	7.4 Reco	mendações e Comentários Finais
239	ÍNDICE R	EMISSIVO
242	SOBRE 0	S AUTORES
244	BIBLIOGI	RAFIA

#### INTRODUÇÃO

Uma fundação é o resultado da necessidade de transmissão de cargas ao solo pela construção de uma estrutura. Seu comportamento a longo prazo pode ser afetado por inúmeros fatores, iniciando por aqueles decorrentes do projeto propriamente dito, que envolve o conhecimento do solo, passando pelos procedimentos construtivos e finalizando por efeitos de acontecimentos pós-implantação, incluindo sua possível degradação.

O custo usual de uma fundação é variável, dependendo das cargas e condições do subsolo, que em casos correntes pode se situar na faixa de 3 a 6% do custo da obra para a qual serve de elemento de base. Em casos especiais, dependendo do tipo de estrutura a ser suportada, das solicitações correspondentes e condições adversas de subsolo, pode-se chegar a percentagens superiores, em alguns casos atingindo 10 a 15% do custo global. Tratando-se de casos usuais, com média de custo de 4%, pode-se afirmar que a ocorrência de patologia e a necessidade de reforço da fundação implicam, além de custos que podem chegar a valores muitas vezes superiores ao custo inicial, em estigma para a obra; abalo da imagem dos profissionais envolvidos na construção; longos, caros e desgastantes litígios para identificação das causas e responsabilidades; necessidade de evacuação de prédios; interdição de estruturas, entre outras complicações. São conhecidos casos em que problemas em fundações provocaram a falência das empresas envolvidas.

A ocorrência de patologias em obras civis tem sido observada e reportada com frequência tanto na prática nacional como internacional. Alguns casos clássicos, como o da Torre de Pisa e o da Cidade do México, fizeram a fama de determinados monumentos e locais, tendo sido extensivamente estudados e apresentados em publicações de divulgação e técnicas. No Brasil, as edificações de Santos (São Paulo) merecem menção especial pelos desaprumos apresentados, e têm referências em inúmeras publicações espe-



cializadas. Ilustrações de consequências de patologias de fundações são apresentadas nas Figs. 1A, 1B, 1C e 1D. Na Fig. 2 são apresentadas ilustrações de casos típicos de patologias de fundações.







Fig. 1 (A) Torre de Pisa, Itália; (B e C) Cidade de Santos, SP; (D) Litoral de São Paulo

Considerando os inconvenientes provocados pelo aparecimento de patologias ou mau desempenho das fundações, fica clara a importância de serem evitadas, nas várias etapas da vida de uma fundação, condições que levem a esta ocorrência. O presente trabalho mostra, de forma extensiva, os problemas que costumam ocorrer e suas origens. As patologias são decorrentes das incertezas e riscos inerentes à construção e vida útil das fundações. Na busca de solu-



- condições do subsolo são causas frequentes na adoção de soluções inadequadas.
- Análise e projeto de fundações, destacando-se os mecanismos de interação solo x estrutura, cálculos, detalhamento e especificações construtivas.
- Procedimentos construtivos dos diferentes tipos de fundações, tanto superficiais como profundas.
- Eventos pós-conclusão, como alterações de uso e carregamentos, movimentos de massa por escavações e efeitos de choques e vibrações, bem como a degradação dos elementos de fundação.

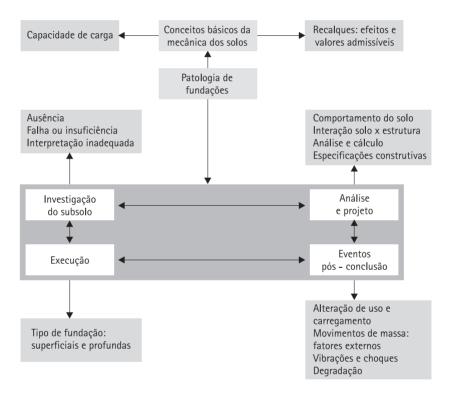


Fig. 3 Fluxograma das etapas de projeto e possíveis causas de patologias

#### CONCEITOS BÁSICOS RELATIVOS A RECALQUES

#### 1.1 Identificação dos Movimentos das Fundações

A descrição dos movimentos das fundações é muito variada, de acordo com cada autor ou prática, tornando difícil o entendimento do fenômeno efetivamente descrito.

Com a finalidade de melhor descrever e uniformizar a definição dos possíveis movimentos das fundações, a Fig. 1.1 da referência clássica de Burland e Wroth (1975) identifica o significado de recalques totais, recalques diferenciais, rotações relativas, distorções angulares etc.

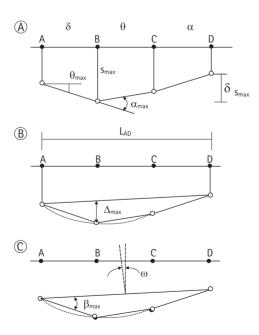


Fig. 1.1 Definições (Burland e Wroth, 1975): (A) definições de recalques (s), recalques diferenciais ( $\delta$ s), rotação ( $\theta$ ) e deformação angular ( $\alpha$ ); (B) definições de deflexão relativa ( $\Delta$ ) e deflexão proporcional ( $\Delta$ /L) e (C) definições de inclinação ( $\omega$ ) e rotação relativa (distorção angular)  $\beta$ 



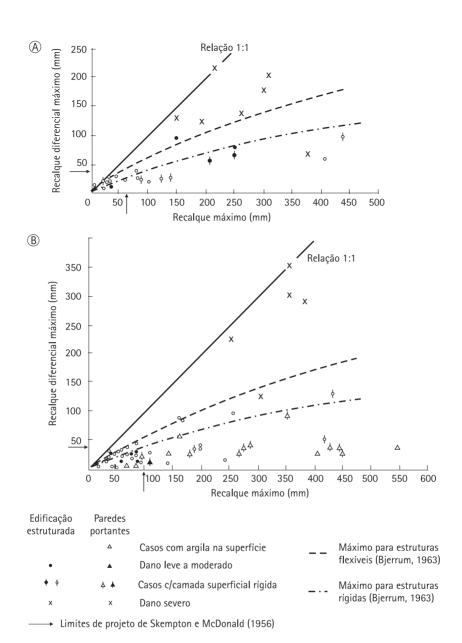


Fig. 1.2 Comportamento de edificações com fundações superficiais assentes em solos argilosos (Burland et al, 1977): (A) edificações estruturadas em fundações superficiais isoladas; (B) edificações em radier

(1974). A dispersão dos resultados é grande e indica com clareza e de forma inequívoca a necessidade de cautela no seu uso.

Poulos et al. (2001) indicam as deformações aceitáveis para prédios modernos e pontes de acordo com o tipo de dano e critério definidor



Tab. 1.2 Deformações diferenciais aceitáveis (Poulos et al. 2001)

	3		
Tipo de estrutura	Tipo de dano	Critério	VALOR LIMITE
Edifícios aporticados em concreto armado e paredes estruturais reforçadas	Dano estrutural	Distorção angular	1/150 a 1/250
	Fissuras em	Distorção angular	1/500
	paredes		1/1.000 a /1.400 para vãos extremos
	Aspecto visual	Inclinação	1/300
	Conexão com serviços	Deformação total	50 a 75 mm em areia
			50 a 135 mm em argila
Edifícios altos	Operação de elevadores	Inclinação	1/1.200 a 1/2.000
Paredes estruturais sem estrutura de concreto armado	Fissuras por arqueamento côncavo relativo	Taxa de deflexão*	1/2.500 para paredes com relação comprimento/altura = 1
			1/1.250 para paredes com relação comprimento/altura = 5
	Fissuras por arqueamento convexo relativo	Taxa de deflexão*	1/5.000 para paredes com relação comprimento/altura = 1
			1/2.500 para paredes com relação comprimento/altura = 5
Pontes	Qualidade de tráfego	Deformação total	100 mm
	Função	Movimento horizontal	38 mm (15")
	Dano estrutural	Distorção Angular	1/250 para vários vãos
			1/200 para vão único
	·		·

<sup>\*</sup> Taxa de deflexão = deflexão máxima relativa no painel/comprimento do painel

Problemáticas, mas aceitáveis:  $50 \text{ mm} \le S_v \le 100 \text{ mm}$ 

 $25 \text{ mm} \le S_h \le 50 \text{ mm}$ 

Inaceitáveis:  $S_v > 100 \text{ mm}$ 

 $S_h > 50 \text{ mm}$ 

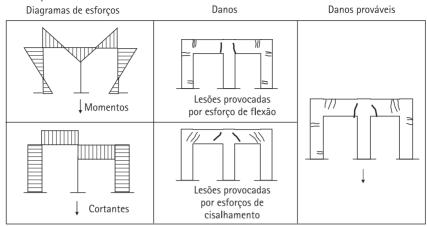
Os limites propostos por Moulton et al. (1985) e Moulton (1986), considerando o critério de manutenção do conforto dos usuários e controle de condições de comportamento estrutural, no estudo patrocinado pelo *Federal Highway Administration* (EUA) em pontes dos EUA e Canadá, foram:

- → 40 mm para deslocamentos horizontais;
- 1/200 para pontes com vigamento simplesmente apoiado e 1/250 para condição de vigas contínuas, como limites aceitáveis de distorção angular longitudinal.

A prática em diferentes países varia, como apresentado por Hambly (1979), indicando que na Inglaterra é usual a aceitação de limite



#### Recalque Central



#### Recalque na Extremidade

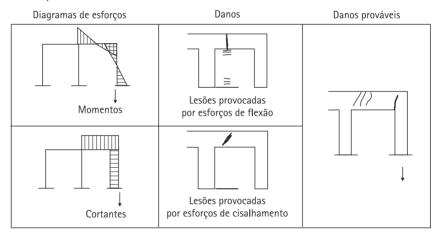


Fig. 1.9 Prováveis diagramas de esforços e fissuras em estruturas de concreto por recalques de fundações de pilares internos e nas extremidades (Mañá, 1978)

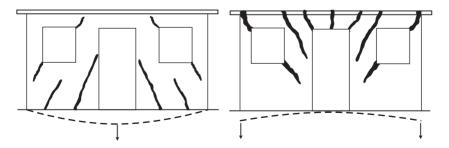


Fig. 1.10 Deformação côncava de parede portante e seus efeitos (Uriel Ortiz, 1983)

Fig. 1.11 Deformação convexa de parede portante e seus efeitos (Uriel Ortiz, 1983)

#### INVESTIGAÇÃO DO SUBSOLO



A investigação do subsolo é a causa mais frequente de problemas de fundações. Na medida em que o solo é o meio que vai suportar as cargas, sua identificação e a caracterização de seu comportamento são essenciais à solução de qualquer problema.

Um programa adequado de investigação do subsolo tem seu custo e abrangência proporcional ao valor da obra e complexidade do problema, devendo iniciar pelo que se denomina de "estudo de escritório" (desk studies). Nesta etapa, os dados hidrogeológicos, pedológicos, geotécnicos, conhecimentos regionais etc. são coletados e comparados, buscando-se identificar as possíveis condições do local de implantação da obra. As características específicas de cada problema devem definir a abrangência do programa preliminar, do complementar, e a eventual necessidade de um programa especial de ensaios geotécnicos.

No Brasil, o programa preliminar é normalmente desenvolvido com base em ensaios SPT (ver ABNT NBR 6484/2001). O programa complementar depende das condições geotécnicas e estruturais do projeto, podendo envolver tanto ensaios de campo (cone, piezocone, pressiômetro, palheta, sísmica superficial etc.) como de laboratório (adensamento, triaxiais, cisalhamento direto, entre outros). Uma revisão destas técnicas e procedimentos é apresentada por Schnaid (2000, 2009, 2012) e Souza Pinto (2001).

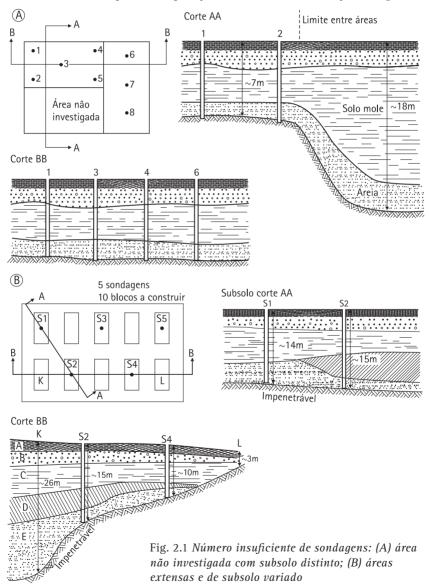
Assim, por exemplo, os solos de comportamento especial (colapsíveis, expansivos, em adensamento) podem ter sua ocorrência prevista ainda em fase preliminar, definindo os ensaios especiais necessários à caracterização de seu comportamento e sua influência nas fundações.



#### 2.2 INVESTIGAÇÃO INSUFICIENTE

Realizado o programa de investigação, o mesmo pode se mostrar inadequado à identificação de aspectos que acabam comprometendo o comportamento da fundação projetada. Casos típicos deste grupo são os seguintes:

Número insuficiente de sondagens ou ensaios para áreas extensas ou de subsolo variado, eventualmente cobrindo diferentes unidades geotécnicas (causa comum de problemas em obras correntes, pela extrapolação indevida de informações) (Fig. 2.1).





seja, os resultados devem refletir as verdadeiras condições e propriedades de solo relevantes ao problema em estudo.

# 2.4 Interpretação Inadequada dos Dados do Programa de Investigação

Os problemas deste grupo podem ser enquadrados no Cap. 4: Análise e Projeto, no qual o projetista necessariamente adota um modelo para descrever o subsolo, com propriedades de comportamento representativo das diversas camadas.

A adoção de valores não representativos ou ausência de identificação de problemas podem provocar desempenho inadequado das fundações. Por exemplo, solos porosos tropicais com NSPT abaixo de 4 indicam a possibilidade de instabilidade quando saturados (Milititsky e Dias, 1986); a presença de pedregulhos aumenta os valores de penetração NSPT sem que o comportamento (resistência ou rigidez) do solo seja equivalentemente aumentado; valores muito baixos em argilas saturadas indicam a possibilidade de ocorrência de atrito negativo em estacas.

Não é objetivo desta publicação apresentar e discutir os métodos de interpretação dos resultados de ensaios de campo e laboratório. Várias publicações nacionais podem ser utilizadas para esta finalidade (Ortigão, 1995; Quaresma et al., 1996; Soares, 1996; Schnaid, 2000). Porém, deve-se ressaltar que a estimativa de parâmetros geotécnicos representativos das condições de subsolo constitui-se uma área específica de conhecimento. Em obras de maior porte e/ou complexidade, faz-se necessário o cruzamento de dados provenientes de ensaios de campo e laboratório para aumentar a confiabilidade das previsões de projeto.

#### 2.5 CASOS ESPECIAIS

As dificuldades normalmente associadas ao planejamento de um programa racional de investigações podem ser acrescidas de ocorrências especiais, de difícil identificação. São exemplos dessas ocorrências a influência da vegetação, presença de solos colapsíveis ou expansivos, materiais cársticos, e a presença de matacões ou regiões de mineração, que podem resultar em patologias importantes e custos significativos de reparo. Outra possível ocorrência é a de subsidência provocada pela extração de água ou combustíveis fósseis do subsolo, que constituem casos especiais (Schrefler e Delage, 2001).



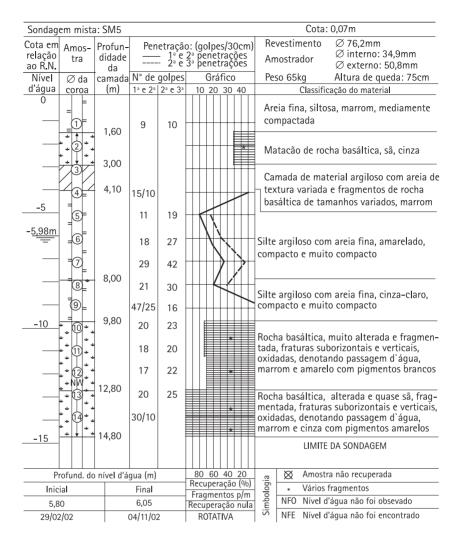


Fig. 2.4 (B) Sondagem mista no mesmo local executada de forma correta

consequentemente, qualquer fundação localizada na área afetada apresentará movimento e provavelmente patologia da edificação por causa de recalques localizados (Fig. 2.5A). Este movimento das fundações pode ser cíclico, em base sazonal, recalque progressivo onde a vegetação estabelece um déficit permanente de umidade (Fig. 2.5B), ou expansão progressiva, quando a vegetação é posteriormente removida (Eldridge, 1976) (Fig. 2.5C).

Os danos às estruturas podem ser significativos e ocorrem com frequência. Em países com registro sistemático de acidentes, pela



trutura do solo está normalmente associada a vazamentos de canalizações pluviais ou cloacais, reservatórios, piscinas, ou coberturas de grandes áreas sem a devida condução, situações nas quais a água é liberada ao terreno em grande quantidade, ocasionando variações na umidade e provocando o colapso.

#### 2.5.3 Expansibilidade

A presença de argilo-minerais expansivos em solos argilosos é responsável por grandes variações de volume destes materiais, decorrentes de mudanças do teor de umidade. Este tipo de comportamento provoca problemas especialmente em fundações superficiais.

O controle de variações de umidade não é simples, uma vez que a água pode se deslocar vertical e horizontalmente abaixo das fundações provocando mudanças nos níveis de sucção, e consequentemente de volume, por movimentos alternados de expansão e compressão. São inúmeros os fatores que produzem variações de umidade, podendo ser necessário intervir ou controlar os efeitos produzidos. Variações sazonais no nível do lençol freático, regime de chuvas e presença de vegetação podem determinar a ocorrência de patologias.

Segundo Vargas et al. (1989), a grande maioria da bibliografia brasileira em solos expansivos refere-se a solos residuais ou coluviais formados por intemperismo de rochas sedimentares. Segundo o mesmo autor, existem quatro principais áreas de solos expansivos no Brasil, afirmação que tem sido confirmada por estudos recentes:

- Litoral do Nordeste nesta área, os solos expansivos são solos residuais de argilitos, siltitos e arenitos, incluindo os de massapê do Recôncavo Baiano, nos arredores de Salvador (BA) e a Formação Maria Farinha, nos arredores da cidade de Recife (PE). O clima desta região é quente e úmido.
- Sertão nordestino − nas proximidades da barragem de Itaparica, no rio São Francisco. O clima da região é quente e seco.
- ≥ Estados de São Paulo e Paraná os solos expansivos nestes Estados são solos residuais ou coluviais, formados pelo intemperismo de argilitos e siltitos da formação carbonífera Tubarão. Ao norte da cidade de Campinas (SP) também são encontrados solos expansivos. O clima da região é subtropical, caracterizado por verões quentes e úmidos e invernos frios e secos.
- ≥ Estado do Rio Grande do Sul na Formação Rosário do Sul



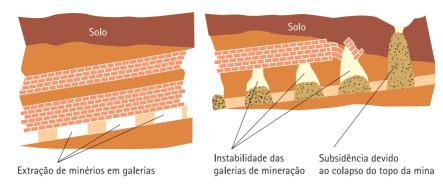


Fig. 2.9 Fenômeno de subsidência em áreas de mineração

rência. Tomlinson (1996) apresenta situações típicas desse problema, com a possibilidade de implantação das fundações apoiadas sobre o topo das galerias, quando a condição de estabilidade pode ser garantida, ou abaixo da cota inferior, quando tal situação não pode ser assegurada. Exemplo da última situação foi encontrado em projeto de fundações de prédio em Santa Catarina. Os perfis de sondagem resultantes do programa especial de reconhecimento, onde foram utilizadas sondagens mistas em solo e rocha, caracterizaram, abaixo da camada de solo superficial, a ocorrência de maciço rochoso brando com galerias (material de recuperação nula), com reaterros parciais. Para este caso foram projetadas fundações do tipo tubulão, assentes no nível da base das galerias na região (Fig. 2.10). A adoção de cota superior de apoio das fundações não teria garan-

tia de estabilidade pelas condições verificadas de ocorrência. Como carregamento atuante nas fundações, foram consideradas, além das cargas da estrutura, o efeito de eventual instabilidade do solo localizado acima da cota de implantação, na forma de atrito negativo ao longo do fuste dos tubulões.

No projeto de estruturas em áreas de mineração, o primeiro problema a

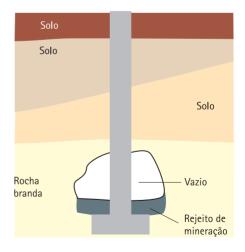


Fig. 2.10 Fundação do tipo tubulão assente no nível da base de galeria na região de mineração em Santa Catarina



cia de perfil de rocha contínua, induzindo soluções não compatíveis com o comportamento da massa de solo (Fig. 2.21).

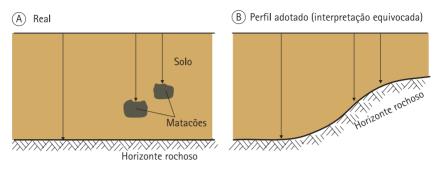


Fig. 2.21 Número insuficiente de investigações: os matacões podem ser confundidos com a ocorrência de perfil de rocha contínua, (A) perfil real; (B) perfil adotado (interpretação equivocada)

Durante a execução de fundações diretas (sapatas ou tubulões), a ocorrência dos matacões dificulta a implantação destes elementos, ora impedindo que o horizonte resistente previsto em projeto seja atingido, ora oferecendo indevida base em fundações previstas para apoiar na rocha (Fig. 2.22). Matacões sempre têm que ser ultrapassados para que as premissas de projeto sejam atingidas (Fig. 2.23).

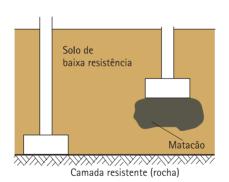


Fig. 2.22 Ocorrência dos matacões impedindo que o horizonte resistente previsto em projeto para o apoio das fundações seja atingido

Durante a execução de fundações profundas, a presença de matacões pode tanto resultar em elementos apoiados de forma não segura, como mostra a Fig. 2.24, como pode dificultar ou mesmo impedir a execução de estacas, como ilustrado na Fig. 2.25.

#### 2.6 Desafios para Melhoria da Investigação

凶 Criar a cultura de que a *inves- tigação de subsolo não é custo*, *mas investimento* e de que ela resulta em menores custos globais

das obras, com maior segurança nas soluções (escolha do tipo e projetos), minimizando incertezas e patologias decorrentes de problemas construtivos.

#### ANÁLISE E PROJETO



A análise de um problema de fundações ocorre a partir da determinação das solicitações ou cargas de projeto e da adoção de um modelo de subsolo, obtido após a investigação geotécnica (ensaios de campo e de laboratório, no caso mais amplo). Essas informações são interpretadas à luz do conhecimento estabelecido sobre o comportamento do solo sob carga, ou da transmissão de esforços à massa de solo. A Fig. 3.1 ilustra a estrutura de um prédio rompida pela atuação dos empuxos em etapa construtiva

Os solos, sendo produto da natureza, apresentam geralmente grande variabilidade tanto de ocorrência como de propriedades. Obras atuais têm sua solução calculada a partir da adoção de valores de propriedades representativas dos materiais envolvidos no problema. Um tratamento probabilístico, em muitos casos, traz vantagens significativas quanto à avaliação de segurança, porém é necessariamente acompanhado de análise mais complexa. Assim, as solicitações em obras correntes podem ter tratamento simplificado (prédios residenciais e comerciais), com abordagem determinística das cargas permanentes e acidentais. Em obras especiais (torres de linhas de transmissão de energia elétrica, prédios industriais



Fig. 3.1 Estrutura de prédio projetado sem a consideração de atuação dos empuxos



Os problemas que ocorrem nessa etapa da vida de uma fundação serão apresentados de acordo com a seguinte classificação:

- Relativos ao solo descrição das patologias envolvendo o solo como causador do problema;
- Relativos a mecanismos problemas causados pela ausência de identificação de mecanismo causador de mau comportamento ou colapso;
- Nelacionados ao desconhecimento do comportamento real das fundações – cada tipo de fundação mobiliza cargas e deforma de maneira específica, o que afeta o desempenho da estrutura apoiada sobre as mesmas;
- ☑ Relativos à estrutura de fundação problemas causados pelo projeto ou detalhamento estrutural do elemento de fundação;
- ≥ Relacionados às especificações construtivas, ou sua ausência.

Também, serão avaliados os possíveis problemas intrínsecos ao projeto de fundações em aterros.

#### 3.1 Problemas Envolvendo o Comportamento do Solo

São inúmeros os problemas originados na etapa de análise e projeto envolvendo o comportamento do solo. A avaliação de desempenho e a estimativa de parâmetros de projeto deve ser feita por profissional especializado e experiente. Exemplos típicos desse tipo de problemas:

1 Adoção de perfil de projeto otimista (superestimativa do comportamento), sem a caracterização adequada de todas as situações representativas do subsolo, como a a localização de camadas menos resistentes ou compressíveis (Fig. 3.2A e B) e a presença de lençol de água. Em alguns casos característicos de obras correntes, nos quais o subsolo é caracterizado por três perfis de sondagem, pode-se ter a especificação de profundidade projetada de estacas que satisfaça apenas dois perfis, não atendendo à condição observada no terceiro deles. Essa situação ser-

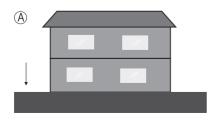




Fig. 3.2 Perfis (A) otimista; (B) real do solo



Como usualmente as soluções de fundações de tais estruturas são preferencialmente de mesma natureza, a variabilidade de condições do subsolo tanto local (Fig. 3.12A) quanto geral (Fig. 3.12C) precisam ser definidas *a priori* e consideradas pelo projetista.

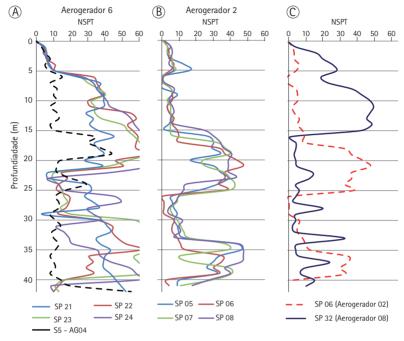


Fig. 3.12 (A) Perfil com grande variabilidade de valores de NSPT com quatro sondagens realizadas em círculo de 18 m de diâmetro; (B) valores de NSPT característicos de outra base no mesmo parque, com menor dispersão de valores; (C) comparação entre dois perfis de resistência no mesmo parque, mostrando a enorme diferença de ocorrência de horizontes resistentes em relação à profundidade

Uma ocorrência não rara em projetos de fundações profundas se refere a soluções definidas com a utilização de fórmulas de cálculo sem que a questão da exequibilidade executiva das estacas seja levada em consideração. Projetos elaborados com base em cálculo com estacas projetadas para horizontes de materiais que não podem ser atingidos, seja por insuficiência ou impossibilidade de uso de necessária energia e potência de equipamentos, seja por impossibilidade física do sistema, acabam resultando em condições inseguras de fundações (estacas projetadas com penetração em horizontes de resistência incompatível com o sistema construtivo escolhido).

Questões referentes aos efeitos de carregamentos cíclicos, resultando em fadiga, típicos de fundações de equipamentos industriais e



bases de aerogeradores constituem fontes de patologias em longo prazo quando não considerados em projeto.

Finalmente, ressalte-se que o comportamento de fundações profundas, quando solicitadas com cargas com crescimento rápido e evolução lenta, ou com choques, tem respostas diversas, por isso cada caso deve ser estudado com a devida cautela por se tratar de uma área de *expertise* limitada nesse meio profissional.

# 3.3 PROBLEMAS ENVOLVENDO OS MECANISMOS DE INTERAÇÃO SOLO-ESTRUTURA

- 1 Quando uma fundação transfere carga ao solo e essa transferência é considerada de forma isolada, a existência de outra solicitação altera as tensões na massa de solo. Nas situações em que ocorre sobreposição de esforços de fundações superficiais no solo, sem avaliação adequada de seu efeito, os resultados obtidos na análise não são representativos. Os esforços sobrepostos podem ser originados na obra sendo projetada ou, eventualmente, produzidos pela implantação posterior de edificação junto à estrutura já existente (Fig. 3.13).
- 2 Grupos de estacas apoiadas sobre camadas pouco espessas, sobrepostas a camadas argilosas moles, podem romper nos casos em que a análise de capacidade de suporte desconsidera a camada de solo mole abaixo da ponta das estacas (Fig. 3.14A). Por outro lado, casos onde somente verifica-se a capacidade de carga, sem a análise de recalques da camada compressível inferior, podem con-

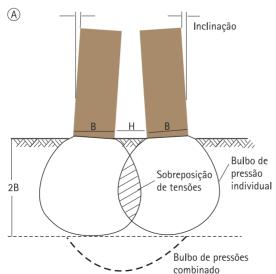
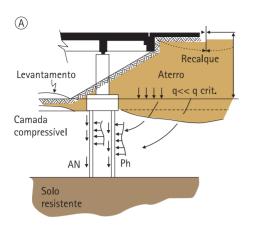
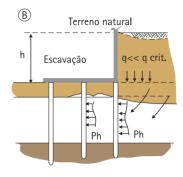


Fig. 3.13 Superposição de tensões: (A) fundações superficiais







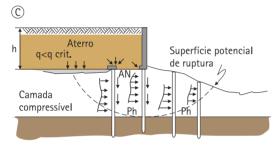


Fig. 3.24 Condição geométrica caracterizando aterro assimétrico sobre camadas subsuperficiais de solos moles, provocando o aparecimento de solicitações horizontais atuantes nas estacas em profundidade (efeito Tschebotarioff)

#### 3.4.4 Estacas Próximas a Escavações

Quando são feitas escavações não protegidas próximas a estruturas estaqueadas, o alívio de tensões provoca deslocamentos gerais da massa de solo, como pode ser visto no item 5.2. Escavações internas à obra, como aquelas feitas para a implantação dos blocos de coroamento das estacas, também provocam efeitos, como indicado na



Fig. 3.25 Pequenas escavações internas à obra, como a implantação do poço do elevador, usualmente com bloco sobre várias estacas, provocando problemas nos elementos já executados

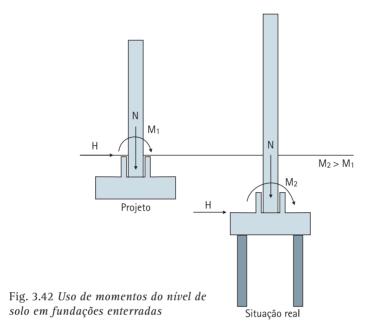
Fig. 3.25, que ilustra uma obra com grande escavação junto a estacas executadas. Poulos (2006) mostra formas de cálculo desses efeitos. Quando as estacas não têm armadura adequada para suportar a flexão decorrente desses deslocamentos, acaba com dano considerável.

## 3.5 ESTACAS EM SOLOS EXPANSIVOS

A presença de solos expansivos na superfície dos perfis de terreno acaba dando origem a soluções de fundações estaqueadas, em detri-



11 Uso das solicitações obtidas ao nível do terreno para o dimensionamento de fundações enterradas, sem a consideração das alterações por exemplo, o possível aumento dos momentos atuantes (Fig. 3.42).



#### 3.9 Problemas Envolvendo as Especificações Construtivas

As especificações construtivas devem atender a critérios de projetos tanto de fundações diretas como profundas.

- 3.9.1 Fundações diretas problemas podem ser causados pela ausência de indicações precisas com relação a:
  - vota de assentamento das fundações, resultando na implantação das sapatas na profundidade equivalente à sua altura ou definida no canteiro, e inadequada às condições de ocorrência do solo (Fig. 3.43);
  - y tipo e características do solo a ser encontrado e onde as fundações deverão ser assentadas, implicando na definição dessas características pelos executantes, em geral não qualificados tecnicamente para a tarefa;
  - ordem de execução no caso de elementos adjacentes em cotas diferentes, quando o elemento destinado à cota inferior deve ser implantado primeiro, para evitar o descalçamen-



ocorrer alterações na geometria do terreno (aterros ou cortes) modificando as condições de projeto, como comprimentos mínimos ou máximos, entre outras.

#### 3.10 Fundações sobre Aterros

A execução de fundações em solo criado ou aterro constitui uma fonte significativa de problemas, provocados pelos aspectos especiais do tema. Esses aspectos não são geralmente considerados no projeto por não especialistas em geotecnia, por desconhecimento dos mecanismos envolvidos. Fundações apoiadas sobre aterro têm, além dos aspectos usuais inerentes a qualquer fundação, características únicas no que se refere aos recalques a que estarão submetidas.

Os recalques de fundações assentes sobre aterros podem ter três causas distintas:

- Deformações do corpo do aterro por causa do seu peso próprio, bem como por carregamento provocado pela fundação ao transferir a carga da superestrutura.
- Deformações do solo natural localizado abaixo do aterro, em razão do acréscimo de tensões ocasionado pelo peso próprio do aterro e pelas cargas da superestrutura (expectativa da ocorrência de recalques significativos quando da execução de aterros sobre camadas de solos moles).
- Nos casos de execução de aterros e/ou carregamento externos sobre lixões ou aterros sanitários desativados, os mesmos estarão sujeitos a ações bioquímicas decorrentes da degradação da matéria orgânica de seus componentes.

#### 3.10.1 Recalque do Corpo do Aterro

Recalques totais e diferenciais do corpo do aterro, causados pelo seu peso próprio e/ou pelo carregamento provocado pela fundação, ocorrem normalmente nos seguintes casos:

- Uando da execução de aterros cujo material é disposto sem compactação (no caso de solos argilosos) ou sem vibração (no caso de solos arenosos). Tomlinson (1996) observou em tais casos a ocorrência de recalques lentos, porém contínuos, contabilizando a diminuição de 1 a 2% da espessura da camada de aterro no período de 10 anos.
- Quando da disposição de solo por aterros hidráulicos. Ainda segundo Tomlinson (1996), areias depositadas por meio de aterros hidráulicos apresentam pequenos recalques na camada deposi-

#### **EXECUÇÃO**

As falhas de execução constituem o segundo maior responsável pelos problemas de comportamento das fundações. O sucesso na concepção e construção de uma fundação depende não somente de uma caracterização conveniente das condições do subsolo, de cálculo e projeto adequados da solução a implantar, mas também de especificações precisas e detalhadas de materiais e procedimentos em conformidade com a boa prática, uso de processos construtivos apropriados executados com pessoal experiente e equipamento adequado, acompanhados de supervisão e controle construtivo rigoroso.

Mesmo no caso de contratação de empresas especializadas para a execução de fundações, é sempre necessário fiscalizar a execução, com registro de todos os dados relevantes, para informar ao projetista das reais condições executivas, verificar a conformidade com as especificações de normas vigentes (ABNT NBR 6122/2010 – Projeto e Execução de Fundações) e da boa prática, além de preservar as informações das fundações efetivamente construídas para eventuais necessidades futuras. Referências relativas à prática brasileira e internacional de execução de fundações podem ser encontradas nas publicações a seguir listadas: ICE (1996); Teixeira e Godoy (1998); Décourt et al. (1998); Maia et al. (1998); Wolle e Hachich (1998); Federation of Piling Specialists (1999) O'Neill e Reese (1999); FHWA (2007); Fleming et al. (2009); ABEF (2012).

Em casos especiais existe a necessidade de realização de ensaios complementares nas fundações para comprovar sua adequação e segurança, como apresentado de forma suscinta nos itens 4.5 e 4.6. Ver estacas – prova de carga estática (ABNT NBR 12131/2006), estacas – ensaio de carregamento dinâmico (ABNT NBR 13208/2007) ou verificação de inte-

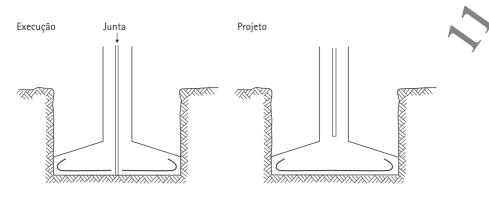


Fig. 4.12 Junta de dilatação mal executada (Socotec, 1999)

#### 4.2 Fundações Profundas

As fundações profundas apresentam peculiaridades que as tornam diferentes dos demais elementos das edificações. A elaboração do projeto está diretamente relacionada às características de execução de cada sistema de fundações profundas, não envolvendo apenas a adoção de perfil típico do solo e a análise através de teoria ou método específico de cálculo.

Uma estaca nem sempre é executada conforme os requisitos definidas no projeto, pois depende da variabilidade das condições de campo. Além da possibilidade de variação das características do subsolo identificadas na etapa de investigação, existem limitações de capacidade de equipamento e de geometria (comprimentos e diâmetros, por exemplo), e as condições de campo, muitas vezes, obrigam a mudanças substanciais no projeto original.

Fundações por estacas exigem uma comunicação eficiente entre o projetista e o executante, de forma a garantir que as reais condições construtivas sejam observadas e o projeto se adéque à realidade.

Detalhes do processo construtivo são essenciais ao bom desempenho das fundações profundas. Segundo Biarrez (1974), estas práticas, considerando os detalhes e cuidados construtivos e sua possível repercussão no sucesso ou fracasso de desempenho do elemento construído, pode ser comparada à culinária, onde um pequeno detalhe esquecido ou mal executado pode resultar em fracasso total.

A evolução no desenvolvimento de equipamentos construtivos de fundações e de materiais resultou no aumento da capacidade de carga dos elementos individuais, fazendo com que, em grande número de casos, seja utilizada uma única estaca para cargas elevadas, ao

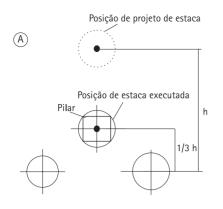




Fig. 4.13 (A) Erros de locação ou excentricidade não consideradas; (B) exemplo de excentricidade de estacas





Fig. 4.14 (A)
Apoio excêntrico
em estaca
pré-moldada
de ponte; (B)
bloco excêntrico
sobre estaca
hélice contínua
em escavação
realizada para
implantação
de subsolo não
previsto em
projeto inicial

Y Erros ou desvios de execução, comuns em casos de presença de obstruções (matacões ou blocos disseminados na massa de solo),





Fig. 4.20 Bloco concretado sobre estacas pré-moldadas com nível do rio em elevação, sem inspeção posterior, resultando perda de concreto com falta de vinculação estacas x bloco - ponte Marechal Rondon

Características do concreto inadequadas. Complicação típica das estacas moldadas in situ, responsável por inúmeros problemas construtivos e também de degradação. Referências abrangentes e atuais sobre o tema são Federation of Piling Specialists (1999) e Henderson et al. (2002).

#### 4.2.2 Estacas Cravadas

As estacas executadas por cravação de elementos na massa de solo podem ter os seguintes problemas:

▶ Falta de energia de cravação, problemas genéricos de peso insuficiente do martelo ou baixa energia do sistema de cravação em relação à estaca cravada, ou insuficiência para ultrapassar eventuais obstruções ou horizontes intermediários resistentes, resultando elementos cravados aquém das necessidades (ABNT NBR-6122/2010 específica peso mínimo de martelo relacionado com o peso da estaca sendo cravada e energia especificada nas estacas tipo Franki). Martelos leves em relação ao peso da





Fig. 4.34 Estacas pré-moldadas: (I) ruptura durante a cravação devido ao mau posicionamento de armadura; (J) com dano devido à insuficiência de armadura no topo (fretagem); (K) com ruptura por cravação excessiva; e (L) excentricidade do martelo causador de dano no corpo da estaca





Fig. 4.35 Danos em estacas prémoldadas devido ao manuseio impróprio



#### iv) Moldadas in situ - Franki

Nas estacas cravadas moldadas no local, do tipo Franki, os problemas que podem ocorrer, específicos do sistema de execução, são os abaixo indicados:

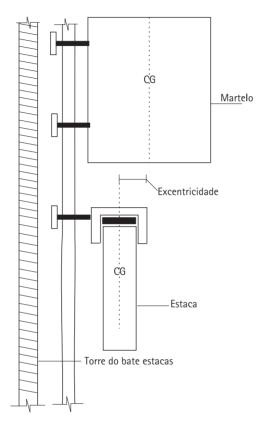


Fig. 4.37 Choque excêntrico do martelo em estacas pré-moldadas, danificando o topo

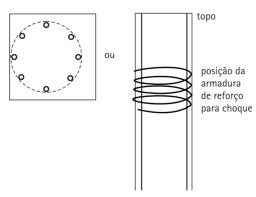


Fig. 4.38 Armaduras mal posicionadas ou região do topo das estacas sem armadura

- Estrangulamento do fuste na etapa de concretagem, quando a execução é feita em solos muito moles, pelo efeito do apiloamento do concreto e ruptura do solo externo ao tubo, com a contaminação da estaça.
- Injeção de volume menor que o projetado de material na base alargada na extremidade inferior da estaca.
- N Problema de integridade, por procedimento construtivo inadequado no levantamento do tubo. Sem o cuidado de manter uma altura de segurança do concreto dentro do tubo, ocorre descontinuidade do fuste.
- Danos causados em estaca recém-executada pelo efeito da cravação de elemento próximo, comum em subsolos com camadas de solos muito moles, como mostrado na Fig. 4.40.
- Baixa resistência estrutural pelo uso de agregados inetes contaminados ou cimento já em processo de hidratação.
- Baixa resistência estrutural pela mistura inadequada dos agregados e cimento.

#### vi) Mega

As estacas Mega são usualmente utilizadas em processos de reforço de fundações, devendo ser executadas somente por pessoal especializado e sob a direção técnica de profissional especialista.

Os problemas que podem ocorrer na execução desse tipo de elemento de fundação são:

- Falta de resistência do elemento estrutural no qual a estaca está sendo apoiada para permitir sua penetração, danificando-o;
- 凶 Má vinculação entre elementos macaqueados, resultando em elemento não contínuo.

#### 4.2.3 Estacas Escavadas

O grupo denominado de estacas escavadas, aquelas em que ocorre a retirada do solo para sua confecção, tem como referências clássicas relativas a problemas de execução: Baker e Khan (1971); LCPC (1978); Owens e Reese (1982); O'Neill (1991); Baker et al. (1993) e O'Neill e Reese (1999). Os problemas correntes são discutidos na sequência:

Problemas de integridade ou continuidade (Fig. 4.45). Esse é o principal causador de mau desempenho das estacas escavadas. Não sendo detectado o defeito, o desempenho será desastroso. A concretagem deve ser executada de forma compatível (material e processo) com o sistema construtivo (Beckhaus, 2014), com supervisão estrita para garantir a qualidade da estaca. Problemas genéricos e seus mecanismos observados nesse tipo de estaca são apresentados nas Figs. 4.46 a 4.50.



Fig. 4.45 Fotos de estacas (A) escavada mecanicamente; (B) Strauss, com problema de integridade









Fig. 4.50 Estrangulamento de fuste de estacas escavadas de grande diâmetro, executadas com o auxílio de lama bentonítica, causado por procedimentos construtivos inadequados e detectado em ensaio de PIT

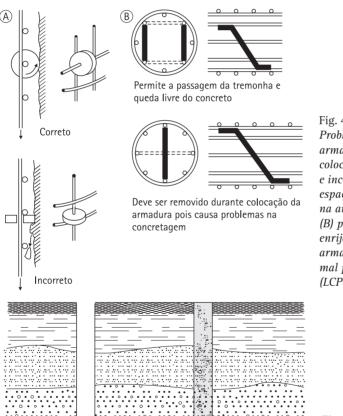
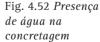


Fig. 4.51
Problemas de
armadura: (A)
colocação correta
e incorreta de
espaçadores
na armadura;
(B) presença de
enrijecedores de
armadura bem e
mal posicionados
(LCPC, 1978)



Desmoronamento das paredes de escavação não protegidas durante a concretagem e interferência na continuidade da estaca, comprometendo seu desempenho.

contaminado ou vazio

☑ Execução de estaca próxima a elemento recentemente concretado, em condição de solos instáveis ou pouco resistentes,

## 4.4 Preparo da Cabeça das Estacas de Concreto

Uma fonte de problemas nas fundações profundas é a forma com que o preparo da cabeça (topo das estacas) é reduzido ao nível necessário. Esse preparo se faz necessário tanto nas estacas moldadas no local como nas pré-moldadas. Em geral, o topo das estacas após execução encontrase em cota diferente da necessária à implantação do bloco, ou precisa ser limpo de concreto contaminado. Em algumas obras, para acelerar o pro-

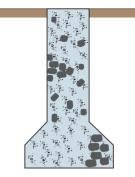


Fig. 4.71 Uso de agregado graúdo com dimensão de "pedra de mão" no concreto do tubulão, provocando problema de integridade

cesso de preparação, no caso das estacas moldadas no local, o preparo inicia-se antes que o concreto tenha atingido a necessária resistência. Em outras circunstâncias é utilizada na ferramenta pesada, em geral marteletes de impacto, provocando grandes danos ao topo das estacas e eventual trincamento do fuste. Esse tipo de ocorrência é de difícil constatação, e acaba causando problemas a longo prazo em situações de meio agressivo, ou mesmo a curto prazo, quando o dano provocado é significativo e compromete a transmissão de carga às zonas inferiores da estaca.

Existem recomendações específicas, como o Manual ABEF (2012), referentes à boa prática de preparo da cabeça das estacas, de forma a evitar danos que comprometam sua integridade.

Nas estacas armadas, o uso de ferramentas inadequadas dá origem a trincamento do concreto junto à armadura, criando caminho preferencial para possíveis agentes agressivos.

#### 4.5 ENSAIOS DE INTEGRIDADE

O custo de prover reforços de fundação após a implantação da estrutura a ser suportada, ou seja, em estágio mais avançado da obra, pode ser extremamente elevado. Além da questão do custo, a dilatação do prazo construtivo, responsabilidades e problemas de imagem profissional dos envolvidos e desprestígio ao projeto tornam essa condição extremamente negativa e deve ser sempre evitada. Uma indicação precoce de problema é altamente desejável, por meio da utilização das ferramentas atuais disponíveis, com a aplicação do método ou procedimentos adequados.

# EVENTOS PÓS-CONCLUSÃO DA FUNDAÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os casos em que ao final da construção a fundação apresentava comportamento adequado mas, por causa de eventos pós-conclusão, tem depois alteradas sua segurança e estabilidade. Alguns itens a seguir explicitados podem ter sua ocorrência prevista e permitem a adoção de medidas preventivas ainda durante a fase de projeto; outros, entretanto, são imprevisíveis ou fortuitos e acabam sendo tratados como acidentes ou problemas.

#### 5.1 CARREGAMENTO PRÓPRIO DA SUPERESTRUTURA

Dentre os eventos possíveis na etapa pós-conclusão das construções, alterações significativas no carregamento resultam em problemas de comportamento, podendo decorrer de alteração no uso da edificação ou ampliações e modificações não previstas.

### 5.1.1 Alteração no Uso da Edificação

Quando ocorrem modificações no uso de uma estrutura as solicitações podem variar, ocasionando elevação ou alteração de cargas incompatíveis com suas fundações. Essa é uma situação típica de transformação ou alteração de uso de prédios comerciais ou industriais, quando as sobrecargas atuantes sofrem incremento significativo. Casos comuns são os shopping centers e supermercados, onde as sobrecargas de projeto são decididas em função da utilização inicialmente prevista pelo layout de funcionamento, sendo porém alteradas substancialmente, até com implantação ou aumento de elementos especiais, mezaninos e outros, provocando aumento de carga nas fundações.

Outra situação é a estocagem pesada de materiais sobre pisos internos ou externos não prevista inicialmente em projeto, afetando e sobrecarregando as fundações. Esse



com o carregamento transmitido. Deslocamentos do solo podem ser causados por várias atividades relacionadas com construções, como escavações, explosões, rebaixamento de lençol freático, tráfego pesado, demolições, cravação de estacas, compactação vibratória de solos. Apresentam-se a seguir os casos possíveis desse tipo de ocorrência.

#### 5.2.1 Alteração de Uso de Terrenos Vizinhos

Com referência à alteração de uso de terrenos vizinhos, dois tipos de situação podem ocorrer:

- Uma nova construção edificada sem o cuidado essencial de promover junta entre ela e a já existente. Essa situação é mais frequente do que se poderia supor, e também ocorre em ampliações de obras em que a nova etapa é construída sem junta. Há situação real em que um prédio com dezessete pavimentos foi construído ao lado de uma construção leve à medida que a nova obra carregava suas fundações e provocava recalques, induzia distorção significativa na obra existente, como mostra a Fig. 5.4A. Outros exemplos são ilustrados nas Figs. 5.4B, 5.4C e 5.4D.
- U Outra situação ocorre quando são realizadas construções de grande porte ou estocagem de materiais pesados junto a prédios com fundações diretas ou profundas leves, ocasionando superposição de pressões e recalques adicionais na edificação antiga, como mostram as Figs. 5.5A, 5.5B, 5.5C e 5.5D.

# 5.2.2 Execução de Grandes Escavações Próximo à Construções

#### i) Escavações e deslocamentos

A execução de escavações provoca, necessariamente, a movimentação da massa de solo junto à elas ou a estruturas de contenção, em razão da perda de material, variação no estado inicial de tensões ou rebaixamento do lençol freático, com eventual adensamento de solos saturados. Esses efeitos dependem das fundações existentes nas proximidades e da sensibilidade aos recalques das estruturas próximas. A norma brasileira ABNT NBR 9061/1981 regulamenta a execução de escavações a céu aberto.

Como os efeitos originados afetam o estado de tensões da massa de solo, mesmo fundações profundas são afetadas (Finno et al.,1991; Poulos e Chen, 1997; Clayton et al., 2013).

O tema do tipo de deslocamento relacionado com os solos solicitados e processos construtivos foi objeto de inúmeras publicações. A re-



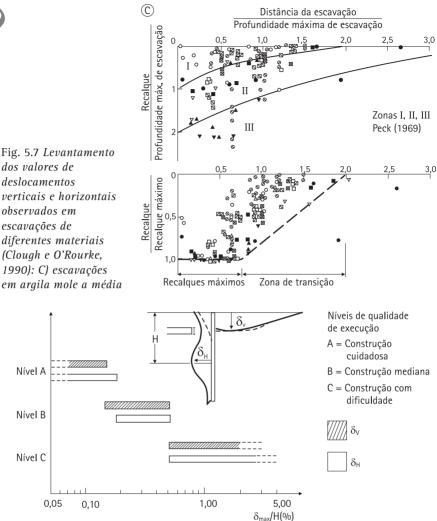


Fig. 5.8 Forma expedita de prever deslocamentos verticais e horizontais máximos em escavação escorada (apud Ranzini e Negro Jr, 1998)

Em geral, os movimentos do solo por escavações são causados pela execução da parede, de tirantes, pelo deslocamento horizontal do paramento de contenção durante a escavação, pelo fluxo de água, ocasionando perda de solo e adensamento, pelos deslocamentos dos suportes e depois, na remoção ou desativação dos elementos provisórios de suporte.

O deslocamento lateral do elemento de contenção permite extensão lateral e recalque (deslocamento vertical do terreno), quando a massa de solo vizinha à escavação se movimenta em direção à região



Coal Board (1975). A Fig. 5.14A apresenta casa com danos visíveis (fissuras) na alvenaria em razão da escavação de aproximadamente três metros de profundidade ao longo de toda uma face lateral da casa, suportada por fundações superficiais; já a Fig. 5.14B ilustra dano em estrutura de prédio vizinho a grande escavação, quando ocorre deslocamento significativo da massa de solo e recalques das fundações.



Fig. 5.14 (A) Danos visíveis (fissuras) na alvenaria devidos à escavação ao lado da casa; (B) efeito de recalque diferencial em estrutura vizinha a grande escavação em perímetro urbano

A Fig. 5.15 ilustra efeito provocado por escavação junto a prédio estaqueado. Nos casos em que se faz necessária a intervenção para garantir a segurança de construções afetadas, é importante avaliar cuidadosamente os possíveis efeitos das ações reparadoras propostas, para evitar danos ainda maiores (Boscardin, 2003).



Fig. 5.15 Detalhe das estacas pré-moldadas tubulares rompidas



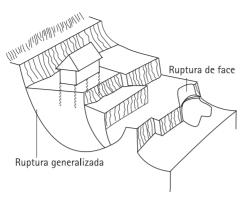


Fig. 5.21 Instabilização de encostas naturais



Fig. 5.22 Instabilidade de encosta afetando a segurança de fundações de torre de linha de transmissão muitos anos após implantação, enfatizando a necessidade de inspeção para verificação periódica sistemática de estabilidade



Fig. 5.23 Instabilidade de taludes envolvendo edificação existente na encosta

intervenções antrópicas ou fenômenos associados a chuvas intensas para provocar escorregamentos. Nesses casos, o projeto deve contemplar não somente o cálculo da transmissão das cargas da estrutura ao solo pelo elemento de fundação, mas também o reconhecimento dos mecanismos do escorregamento da massa de solo e suas consequências à obra a ser projetada. Em regiões urbanas fortemente densificadas, como as cidades do Rio de Janeiro, São Paulo e Belo Horizonte, as populações ocupam áreas coluvionares (solos residuais transportados pela ação da gravidade) particularmente sujeitas à ocorrência de grandes movimentos de solo (Fig. 5.23).

### 5.2.5 Rompimento de Canalizações Enterradas

A boa prática de engenharia preconiza que não devem ser projetadas ou construídas fundações diretas com canalizações desprotegidas em cota inferior à sua implantação. No entanto, problemas de rompimento de canalizações enterradas podem conduzir a complicações também para obras sobre fundações profundas. Em geral, o rom-

#### 5.2.9 Erosão ou Solapamento (Scour)

O fenômeno de erosão ou solapamento de fundações parcialmente executadas dentro de leitos com água corrente, tipicamente em pilares de pontes ou estruturas construídas junto a rios (como casas de bombeamento), constitui-se em evento pós-construção de grande relevância, por seu possível efeito que (ver Federico et al., 2003). A inclusão em leito de rios de elementos estruturais tais como blocos sobre estacas, tubulões, encontros de ponte em fundações diretas ou elementos tipo gabiões provoca aumento de velocidade da água próxima. Quando não são projetados e executados trabalhos de proteção, resulta carreamento do material existente no leito do rio imediatamente após a conclusão dos trabalhos, fazendo com que o perfil do leito se altere de forma significativa. Essas alterações interferem na estabilidade dos elementos de fundação, seja pela redução de seu trecho enterrado, seja pelo aumento do trecho livre de elementos esbeltos, provocando sua flambagem, e podendo causar ruptura geral e colapso.

A estabilidade geral da fundação fica comprometida, e o aspecto de ausência de programas regulares de inspeção às obras de arte, como o existente nos EUA (Federal Highway Administration, 1995) resulta em conhecimento do problema somente quando ele assume aspectos de extrema gravidade e risco. O perfil da Fig. 5.28 identifica a evolução do leito de rio ao longo de 30 anos, mostrando a situação inicial na construção e a condição, após esse tempo, das fundações construídas para a ponte ferroviária existente no local, caracterizando situação de risco e instabilidade, com medida de afundamento do bloco de topo das fundações da ordem de 20 cm. A Fig. 5.29 ilustra o solapamento de ponte em Santa Catarina; a Fig. 5.30 exibe uma erosão catastrófica envolvendo píer e colocando em risco uma edificação próxima; e a Fig. 5.31 apresenta erosão do acesso a uma ponte, com colapso total do aterro.

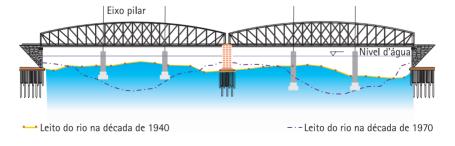
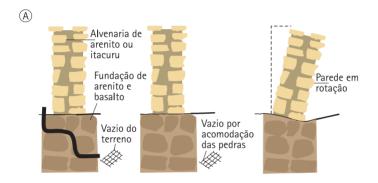


Fig 5.28 Evolução de leito de rio ao longo de 30 anos, mostrando solapamento

lititsky, 2002). Durante a investigação do subsolo foi identificada a presença de vazios subterrâneos provocados, possivelmente, pelas escavações realizadas ou ação animal. Nos trabalhos de recuperação das fundações, que apresentavam sensível deslocamento após mais de 300 anos de implantação, foi verificada a ação dos caçadores de tesouro, na forma de danos à estrutura (Fig. 5.34). Foi necessária a recomposição geométrica das fundações, realizada por equipe de arqueólogos para não alterar os padrões construtivos originais (Fig. 5.35), e realização de trabalhos de reforço, com estacas injetadas de pequeno diâmetro (Fig. 5.36), executadas de forma a não contaminar a região superior do subsolo nesse sítio arqueológico.



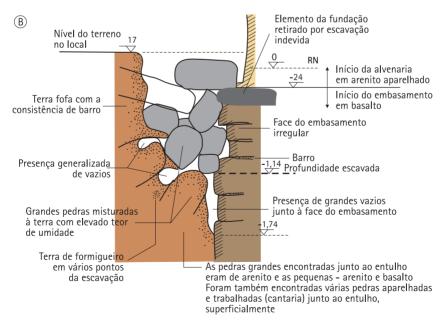
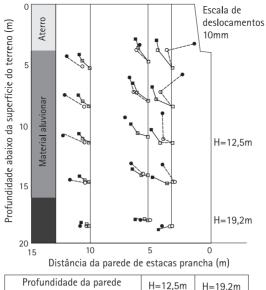


Fig. 5.34 Investigação do subsolo nas ruínas de São Miguel identifi cou a presença de vazios subterrâneos, possivelmente causados por escavações realizadas ou ação animal, ocasionando danos às estruturas das fundações Milititsky, 2002)





Profundidade da parede de estacas prancha	H=12,5m	H=19,2m
Resultados de campo	0	•
Soluções SSPM teóricas		•

Fig. 5.41 Deslocamentos devido a cravação de estacas prancha em Chicago (Finno et al., 1988)

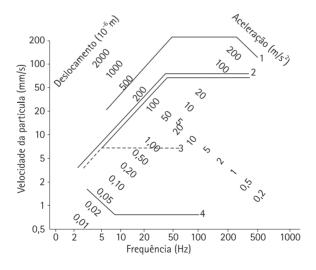


Fig. 5.42 Valores de vibração toleráveis e que causam danos (critérios): (linha 1) danos em edificações causados por vibrações causadas por explosões; (linha 2) limite superior recomendado em explosões; (linha 3) valores limite recomendados para cravação de estacas de concreto, estacas prancha, compactadores vibratórios, equipamentos de compactação, tráfego no local da construção; (linha 4) vibrações que perturbam as pessoas



- Limiar do dano: refere-se à microfissuras, da espessura de um fio de cabelo, que podem não ser vistas a olho nu (75 micra ou menos). Esses danos não produzem efeitos sobre a integridade estrutural do imóvel. Sua ocorrência passa a ser considerada a partir de PVP superiores a 30 mm/s.
- Danos menores: trincas podem ser notadas a olho nu, porém não produzem qualquer efeito sobre a integridade estrutural do imóvel. Seu único inconveniente é estético. Sua ocorrência está relacionada a PVP superiores a 50 mm/s.
- Danos maiores: ocorrência de grandes trincas e severos danos ao imóvel. Pode haver danos estruturais e mesmo colapso de estruturas. Sua ocorrência refere-se a PVP superiores a 225 mm/s.

O emprego de controle sismográfico em desmontes urbanos é altamente recomendável para aferição dos resultados obtidos no plano de fogo e para o conhecimento da resposta das condições geológicas naturais ao uso de explosivos.

#### 5.3.5 Vibrações - Normalização

Na medida em que o acesso às diversas normas referentes ao tópico é limitado, apresenta-se a seguir o material disponível na literatura técnica. É relevante, entretanto, esclarecer que há limitações na aplicação dessas normas, uma vez que foram desenvolvidas empiricamente e baseadas em experiências regionais, considerando e sendo afetadas pelas condições geológicas e geotécnicas, práticas construtivas e materiais de construção utilizados nas edificações. Sua aplicação requer avaliação crítica quando utilizada em outro ambiente distinto do usado no desenvolvimento do método, além do reconhecimento de que normas e recomendações consideram fatores diversos na definição de valores limites (Massarsch; Fellenius, 2014).

Várias normas e recomendações foram desenvolvidas para efeitos de explosivos no desmanche de rochas, mas são amplamente utilizadas para avaliar riscos de dano em edificações e instalações devido a vibrações originadas por outros tipos de atividades, entre as quais a cravação de estacas e a compactação dos solos.

#### Norma suíça

A norma suíça SN 640312 foi criada em 1979 e considera os efeitos de vibração transiente (choque) e vibrações contínuas. As estruturas foram divididas em quatro categorias, de acordo com o Quadro 5.1.

# DEGRADAÇÃO DOS MATERIAIS

Todos os projetos de engenharia com elementos enterrados ou em contato com o solo e a água devem considerar os aspectos de permanência e integridade a longo prazo. A ação dos elementos naturais sobre os materiais das fundações obriga à verificação da existência de materiais agressivos e seus possíveis efeitos, cuja avaliação deve ser prevista nas etapas de coleta de dados do solo (investigação), análise, projeto e execução.

Na etapa de investigação do subsolo, devem ser identificados materiais agressivos ou contaminantes para que se considere, adequadamente a solução do problema. As fundações de unidades industriais são casos típicos de ocorrência de problemas de degradação. Seu projeto necessita informações referentes a processos e elementos envolvidos; nos casos de ampliação, é na fase de investigação do subsolo que as implicações ambientais existentes devem ser identificadas.

Em condições usuais, um ambiente agressivo pode ser identificado pela resistividade do solo, pH, teor de sulfatos e cloretos.

Na presença de aterros com rejeitos industriais, locais de depósito de elementos potencialmente agressivos ou de natureza desconhecida, é necessária uma avaliação abrangente das possíveis substâncias agressivas. Indústrias, em geral, objeto de problemas especiais são as de celulose e papel, química e petroquímica, de fertilizantes, laticínios, acucareira e vitivinícola.

Caso de especial interesse relatado por Costa Filho e Jucá (1996) e Lima e Costa Filho (2000) identifica a ação de soda cáustica infiltrada no terreno como causa de alte-



dêmico foi divulgado pela primeira vez por Stanton (1940), mas esse assunto já é bastante difundido no meio científico atualmente. Esses fenômenos ocorrem mais comumente em grande peças de concreto armado que são submetidas à umidade frequentemente (por exemplo, blocos de fundação, estacas, pontes, barragens e pavimentos rígidos). Um exemplo de um bloco de fundações atacado por esse tipo de reação é mostrado na Fig. 6.2.





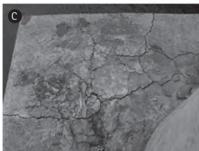


Fig. 6.2 (A) Bloco de fundação com padrão de fissuração típico de RAA (Pecchio et al., 2006); (B) bloco de fundação de pilar de ponte com padrão típico de RAA; (C) detalhe do bloco de fundação de pilar de ponte com padrão típico de RAA

De acordo com FHWA (2013), as reações álcali-agregados são divididas em dois grupos principais: reações álcali-sílica e reações álcali-carbonatos. As reações álcali-sílica consistem na interação entre hidróxidos e certos tipos de silicatos presentes em alguns agregados. O produto formado por essa reação é um gel álcali-silicoso que possui uma grande tendência à absorção de água e variação volumétrica e que fica acumulado nos poros do concreto. Para que ocorram essas reações, são necessárias três condições:

- u quantidade suficiente de sílica reativa nos agregados;
- 2 concentração suficiente de álcalis provenientes do cimento;
- ∠ umidade.

Sem qualquer uma dessas condições, as reações de expansão devidas a esse fenômeno não irão se apresentar. A Fig. 6.3 ilustra esquematicamente como ocorre essa interação entre os materiais. As reações

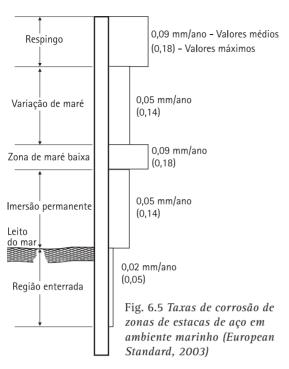
2

utilizadas em concreto para resistir a ataques de agentes químicos variam entre 0,35 (400 kg/m³) a 0,55 (300 kg/m³) em ambientes muito agressivos e agressivos, respectivamente. Detalhes sobre o problema do uso de elementos de concreto em meio agressivo, abordando aspectos que incluem a determinação da agressividade do meio e as especificações para evitar problemas nas aplicações e usos em peças pré-moldadas e moldadas *in situ*, são apresentados na publicação do BRE (2001).

#### 6.2 Aço

Estacas metálicas executadas em solos naturais, em contato com água e ar podem essar sujeitas à corrosão e devem ser adequadamente projetadas. A corrosão do aço também pode ocorrer se os elementos de fundação estiverem em contato com solos contendo materiais agressivos ou aterros, se estiverem localizados em ambiente marinho ou submetidos aos efeitos de variação de nível de água. A ação da corrosão é função da temperatura ambiente, pH, acesso ao oxigênio e da química do ambiente circundante ao elemento de fundação.

Elementos metálicos para sempre enterrados em solo natural usualmente não são afetados de forma significativa por degradações (Beavers e Durr, 1998). Corus Construction Centre (2003) ratifica a afirmação anterior, estabelecendo que a corrosão de estacas metálicas em solos não perturbados é negligenciável em razão dos baixos níveis de oxigênio apresentados nesses ambientes. Para objetivos de cálculo, uma taxa de corrosão de 0,015 mm/face/ano pode ser definida em tais casos. Somente circunstâncias de aterros contaminados, zonas industriais com efluentes agressivos ou ocorrência de corrente elétrica caracterizam risco, cabendo estudo específico por especialista metalúrgico. Sob condições atmosféricas, a taxa de corrosão do aço, segundo Corus Construction Centre (2003), aproxima-se de valores médios em torno de 0,035 mm/face/ano. Morley e Bruce (1983) relatam os seguintes valores de taxa de corrosão de estacas metálicas em diferentes ambientes: corrosão negligenciável em solos naturais, 0,05 mm/ano em água doce, 0,08 mm/ano imersa em água salgada, 0,1 a 0,25 mm/ano em ambiente marinho com variação da maré e respingos e 0,1 a 0,2 mm/ano em condições atmosféricas industriais. As taxas de corrosão utilizadas em anteprojeto de estruturas metálicas no solo, acima ou abaixo do lençol freático, e em água doce ou salgada são apresentados nas Tabs. 6.5 e 6.6.



to da corrosão em estacas observado ao longo dos anos tem efeito limitado, e não progride indefinidamente.

A Fig. 6.6A apresenta valores específicos de corrosão de estacas metálicas e os locais, no Japão, onde foram feitos os ensaios. A Fig. 6.6B apresenta intervalo de variação da taxa de corrosão de um grande número de estacas metálicas testadas em todo o Japão (Japanese Association for Steel Pipe Piles, 1991).

Segundo a ABNT NBR 6122/2010, quando por inteiro enterradas em terreno natural, as estacas de aço dispensam tratamento especial, independentemente da situação do lençol freático. Havendo, porém, trecho desenterrado ou imerso em aterro com materiais capazes de atacar o aço, é obrigatória sua proteção com encamisamento de concreto ou outro recurso adequado (pintura, proteção catódica etc.). Segundo a mesma norma, quando a estaca estiver total e permanentemente enterrada em solo natural, deve ser descontada da sua espessura 1,5 mm por face que possa vir a entrar em contato com o solo, excetuando-se as estacas que dispõem de proteção especial de eficiência comprovada à corrosão.

#### 6.3 MADFIRA

As estacas de madeira são utilizadas no Brasil de modo mais intenso como fundações de estruturas provisórias, mas em certas regiões e circunstâncias têm uso como elementos de suporte permanente. Em estruturas de cais e ancoradouros seu uso é bastante difundido.

Além dos ataques biológicos de insetos, no caso de estruturas totalmente imersas em solo (besouros e cupins), ou por moluscos *Teredo navalis* e crustáceos *Cheluria* quando encontram-se na água (Goodell, 2000; Goodell et al., 2003; Highley, 1999), estacas de ma-

- u estacas de madeira tratadas, com uma proteção de concreto na parte que se encontra acima do nível da água feita em concreto, tendem a durar 100 anos ou mais;
- 3
- uem águas puras, as estacas de madeira tratada tendem a durar entre 5 e 10 anos menos que a madeira utilizada no resto da estrutura:
- para determinar a durabilidade de estacas de madeira utilizadas em águas salobras, sempre é necessário levar em conta a experiência local;
- una experiência americana, estacas de madeira tratadas em ambientes marinhos tendem a durar em torno de 50 anos em ambientes frios (norte) e 25 anos em ambientes quentes (sul).
- ≥ Conforme Vargas (1955 apud Miná, 2005), as seguintes observações sobre a deterioração de estacas de madeira são importantes:
- u as três principais causas de deterioração da madeira são o apodrecimento (fungos são os maiores causadores), o ataque por insetos e o ataque por animais marinhos;
- para ocorrer o apodrecimento da madeira, só ocorre na presença de ar, umidade e temperatura favorável; quase todas madeiras são suscetíveis ao ataque de cupins, que podem ser subterrâneos ou aéreos:
- us estacas de madeira sem tratamento não devem ser utilizadas em obras terrestres em zonas com variação de nível de água e nunca devem ser utilizadas em obras marinhas;
- ≥ as estacas de madeira podem ter uma curta vida útil, por exemplo, uma estaca de eucalipto não tratada, em condições favoráveis, pode ter vida útil de até 5 anos.

Referências relativas ao ataque e degradação de elementos de fundação de madeira, bem como cuidados na manutenção e reabilitação, alem das já citadas, são: Chellis (1961); Grefsheim (1979); Haswell e Newman (1981); Lundstrom (1981); U.S. Army (1990); Mitchell et al. (1991); U.S. Army Corps of Engineers et al. (2001).

#### 6.4 Rochas

Fundações diretas executadas em blocos de pedra de monumentos históricos antigos ou construções utilizando rochas brandas podem apresentar degradação das rochas a longo prazo por agressividade do meio, como apresentado por Schrefler e Delage (2001) e ASTM (2010). Relato de caso específico encontrado na recuperação das fundações do Arco do Triunfo, em Paris, em que a elevada degradação dos elementos constituintes das fundações diretas induziu ao

# CONSIDERAÇÕES FINAIS

O relato de casos de patologia tanto em obras de grande como de pequeno porte não é frequente, dificultando a avaliação estatística de suas ocorrências. Não existe no Brasil nenhum mecanismo de registro e acompanhamento sistemático de problemas em obras que identifique a ocorrência relativa ao número total de empreendimentos e problemas, como mostraremos a seguir, mas o aumento de casos de patologias e a necessidade de intervenção em determinada etapa das obras é do conhecimento de profissionais e de entidades de classe. Somente os casos catastróficos chegam ao conhecimento da opinião pública, fazendo com que não se tenha uma avaliação quantitativa da real extensão do problema.

Para explicitar a abrangência dos casos patológicos em obras correntes de pequeno porte, apresenta-se na Fig. 7.1 a estatística de 318 eventos estudados por Silva (1993) no Rio Grande do Sul.

A estatística francesa (Logeais, 1982) mostra que, em 2 mil casos estudados no país, cerca de 80% dos problemas fo-



Fig. 7.1 Origem dos problemas em fundações correntes no Estado do Rio Grande do Sul (adaptado de Silva; 1993)

ram decorrentes do desconhecimento das características do solo. Publicação mais recente (Socotec, 1999), citando os casos registrados de patologias de todas as naturezas em obras na França, indica o crescimento do número de problemas na década de 1990, como identificado na Fig. 7.2, mesmo com o aprimoramento da técnica e com a implantação de programas de qualidade e acompanhamento.

Na Fig. 7.3 é apresentada estatística (O'Neill e Sahran, 2004) do Departa-

detectados. Na Fig. 7.5 é indicada por tipo de estaca, a natureza das conclusões, sendo as classes assim descritas:



Classe 1 - estaca em condições

Classe 2 - estaca com problemas não muito significativos

Classe 3 – estacas com sérios problemas de qualidade

Classe 4 - sinal obtido não utilizável

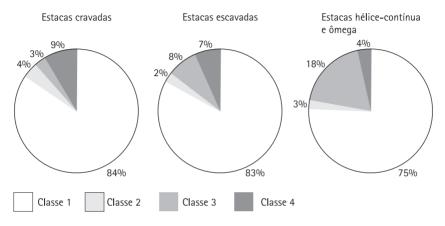


Fig. 7.5 Três gráficos com indicação de classes 1, 2, 3 e 4

Patologias em fundações e edificações são, portanto, frequentes, envolvem análise de risco e comprometem recursos expressivos dos setores público e privado. Causas e consequências de patologias de fundações em obras de engenharia foram discutidas neste livro, buscando-se pelo relato de casos substanciar a ação de engenheiros e desenvolver indicadores capazes de mediar o relacionamento entre o setor produtivo e os organismos de regulamentação e fiscalização.

#### 7.1 Controle de Recalques

Quando existem dúvidas referentes ao comportamento de uma fundação, o projeto apresenta aspectos especiais, e quando é necessário acompanhar seu desempenho, em razão da escavação de grande porte próxima, recomenda-se a realização do controle de recalques da área.

O procedimento consiste na medida de forma regular, com equipamento topográfico de precisão (Fig. 7.6) ligado a um *bench mark* ou marco de referência, da evolução dos recalques com o tempo ou com os estágios de carregamento. A Fig. 7.7 mostra uma instalação

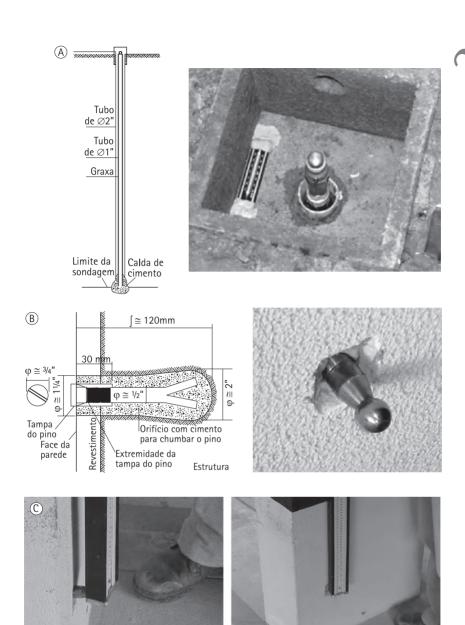
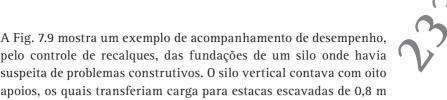


Fig. 7.7 Instalação de controle com o detalhe de (A) um marco de referência; (B) pinos usualmente utilizados; e (C) régua invar (ABNT NBR 9061/1981)

outros, do solo sendo escavado, do tipo e geometria da fundação sobre a qual se apioa a estrutura, da magnitude da escavação, da velocidade e qualidade de execução e do tipo de escoramento. Os valores abaixo são indicados como orientação geral (Milititsky, 2000):

Δ Até 50 μ/dia: seguro.





pelo controle de recalques, das fundações de um silo onde havia suspeita de problemas construtivos. O silo vertical contava com oito apoios, os quais transferiam carga para estacas escavadas de 0,8 m de diâmetro e 9 m de comprimento, que tiveram seu comportamento monitorado durante o enchimento do silo. Fica evidente, nos resultados apresentados na Fig. 7.9, que os recalques medidos são incompatíveis com o nível de carregamento aplicado, com deformações muito desiguais das estacas, superiores a 20 mm para carregamento de apenas 30% do total da carga acidental. Face ao desempenho medido, foi necessária a realização de reforço das fundações do silo para garantir sua segurança.

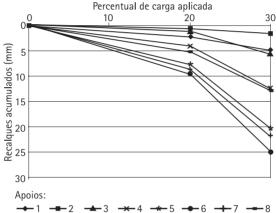


Fig. 7.9 Exemplo de acompanhamento de desempenho, pelo controle de recalques, das fundações de um silo onde havia suspeita de problemas construtivos (Milititsky, 2003)

#### 7.2 CONTROLE DE VERTICALIDADE

Quando se executam escavações nas proximidades de edificações, é comum a realização de controle de verticalidade dos prédios, como forma de acompanhar os efeitos produzidos. Trata-se de leitura periódica de verticalidade realizada com aparelho topográfico de precisão, sempre nos mesmos pontos, resultando em planilhas e gráficos como os mostrados na Fig. 7.10.

O trabalho deve ser realizado com muito cuidado e de forma criteriosa, para não produzir resultados incoerentes. Sempre mais de uma direção e todas as paredes opostas devem ser objeto das medições, para evitar conclusões equivocadas. A leitura inicial deve ser realizada antes do início das atividades cujo efeito se quer avaliar. A

#### ÍNDICE REMISSIVO

concreto 14, 26, 93, 96, 101, 106,

acidentes 14, 163, 165, 177, 181, 196, 109, 110, 118, 119, 122, 125, 128, 206 134, 136, 138, 139, 141, 142, 144, ácido fosfórico 210 146, 153, 154, 181, 192, 194, 196, 210, 211, 214, 215, 217, 221 aço 96, 101 adensamento 28, 96, 97 concreto autonivelante 151 concreto de baixa resistência 129 agressividade 214, 215, 217, 218, concreto fresco 141 220, 225 água 33, 40, 60, 97, 100, 102 conexões 102, 103, 174 containers 164 água na concretagem 140 continuidade da estaca 140, 144 ambiente agressivo 91, 209 amolgamento 107, 126, 141 controle de integridade 156 amortecedores 191, 192 controle de recalques 18, 175, 229, armadura de fretagem 117, 120 232, 233 armaduras de estacas 90 controle de trincas 234 artesianismo 141, 147 controle de verticalidade 233 árvores 37, 38, 39, 96 correlações empíricas 59, 61 aterro 95, 96, 98, 100, 101 corrosão 216, 219, 220, 221, 222 aterro assimétrico 79 corrosão da armadura 216 aterro sobre solos moles 97 corrosão no aço 101 aterros sanitários 95, 100, 101 cortes 95, 107 atividades de pós-construção 12 cravação de estacas 122, 135, 166, atrito negativo 59, 84, 100, 101 191, 192, 193 ausência de pressurização 147 D dano 19, 20, 38, 126, 133, 135, 149, bulbo de tensões 74, 99 153, 175, 195, 198, 206, 224, 236 defeito executivo 11 C deformações admissíveis 18 cabeça das estacas 106, 153 degradação 9, 16, 100, 110, 119, 151, camada betuminosa 100 209, 210, 222, 223, 224 camada mole 99 degradação de estacas 11, 223 canalizações 102, 103, 108, 180 descontinuidade do fuste 147 canalizações enterradas 180 deslocamentos 13, 22, 29, 102, 166, carga nas fundações 94, 163 167, 169, 170, 171, 173, 174, 175, cargas horizontais 59 179, 181, 184, 187, 193, 194, 230 choques 16, 190 desmoronamento 108, 138, 140, 142 chuvas 108, 180, 182 desvios de execução 115 cinemática de ruptura 75 detonações 193, 196, 197 classificação de danos 235 dimensionamento de elementos cloretos 101, 209, 216 estruturais 89 colapsibilidade 32, 40 distorções angulares 17, 20 colapso 40, 60, 107, 111, 114, 144, durabilidade do concreto 210 151, 185, 198, 210 colocação de armadura 149 E edificações vizinhas 174 compactação 95, 96, 99, 108, 190, efeitos de sobreposição 75 194, 196 compactação dinâmica 97, 195, 196 efeito Tschebotarioff 79 compactação do solo 122, 191 emenda de armadura 147 emenda de estacas metálicas 127 compactação vibratória 166, 193, emendas 133, 135

enrijecedores de armadura 140



ensaios de campo 28, 34, 58 107, 109, 110, 166, 168, 180, 181, ensaios dinâmicos 156, 157 182, 183, 184, 185, 190, 193, 210, equipamento à percussão 33 225, 230 equipamentos industriais 190, 191 fundações isoladas 20, 22 erosão 174, 179, 182, 185, 186 fundações profundas 29, 55, 96, erros de locação 114, 115 100, 106, 113, 114, 127, 153, 158, escavações 16, 166, 167, 169, 170, 159, 166, 180, 182, 217, 230 173, 174, 175, 177, 179, 188, 189, fundações superficiais 13, 14, 21, 230, 233 24, 97, 100, 106, 107, 109, 176, 177, espaçadores 138, 140 182, 183, 187, 226 especificações construtivas 59, 60 G estabilização 174, 235 grupo de estacas 99 estabilizantes químicos 45 I estaca de madeira 223 integridade 91, 101, 105, 109, 110, estaca Franki 122, 124, 135 111, 112, 127, 134, 137, 138, 139, estaca hélice contínua 149 141, 142, 144, 146, 147, 151, 152, estaca pré-moldada 133 153, 156, 198, 206, 209, 222, 226, estacas broca 142 228, 236 estacas cravadas 94, 97, 101, 114, integridade do fuste 141 117, 119, 122, 129, 134, 135, 193 interação solo x estrutura 16, 18 estacas escavadas 101, 102, 114, 137, investigação de subsolo 15, 29 146, 171, 195, 233 J estacas escavadas mecanicamente junta 29, 83, 144, 166, 167 143, 145 junta de dilatação 113 estacas injetadas de pequeno diâmetro 146, 189, 190 estacas Mega 137 laboratório 14, 28, 33, 34, 40, 58, estacas metálicas 56, 127, 219, 220, 210 lama bentonítica 139, 145 estacas moldadas in situ 119, 156 lençol freático 166, 171, 177, 183, estacas Ômega 135 184, 195, 196, 214, 219, 221, 223 levantamento de elementos já estacas tracionadas 118, 121, 135 estaca Strauss 143, 144 cravados 122 limpeza da cava 108 estado limite 19 lixões 95, 100, 101 estado limite de serviço 19 estado limite último 19 estrangulamento de seção 111, 112 martelo 94, 119, 128, 133, 134 estrangulamento do fuste 139, 147 martelo de cravação 94 estrutura de fundação 60 matacões 55, 115, 127 estruturas vizinhas 32 mau comportamento 29, 60, 111, excesso de energia de cravação 121, 128 mecânica dos solos 13 expansibilidade 32 mecanismos de ruptura 59 explosões 166, 190, 191, 194, 196, método dos elementos finitos 190 197 métodos numéricos 59 extravasamento 181, 182 mineração 29, 174 momentos fletores 59 movimento das fundações 24, 36 falhas de execução 105 mudanças volumétricas 35 falsa nega 124, 128 falta de energia de cravação 119 N fator água/cimento 142 nega 94, 120, 124, 127, 133 ferramentas numéricas 18 nível de água 96, 142, 171, 183, 184, flambagem de estacas 128 219, 220, 222, 223 flexão dos elementos 126 norma 59, 133, 159, 166, 196, 198, fundações de pontes 22 214, 221 fundações diretas 22, 29, 93, 106, NSPT 33, 34, 61

0			solos compressíveis 29
	obras vizinhas 106		solos granulares 20, 148, 171, 184,
P			190, 193, 196
	parede diafragma 168, 171, 172		solos moles 29, 95, 97, 98, 108, 127,
	patologias de fundações 10, 11, 13		128, 138
	PDA 106, 124		solos não saturados 40
	permeabilidade 40, 97, 102, 184,		sondagem mista 33, 35, 36
	210, 211, 216		SPT 28
	pH 209, 214, 215, 218, 219		subpressão 183
	PIT 106, 206		subsidência 29
	poropressões 98, 99		subsolo 9, 16, 28, 29, 30, 33, 34, 58,
	potencial de colapso 41		60, 105, 113, 141, 184, 189, 28, 209
	presença de obstruções 128		substâncias ácidas 211
	proteção na cabeça da estaca 126,		substâncias agressivas 209, 214
	133		sulfatos 101, 209, 214, 215
	provas de carga 106, 122, 157, 159		superposição de pressões 168
	provas de carga estática 125, 156	T	
	puncionamento 110		tala 135
R			taludes 126, 177, 179
	radiers 20		tensões admissíveis 61
	raízes 38, 39, 96		torque 94, 136, 148
	rebaixamento do nível de água 183		tremonha 145
	recalques 13, 15, 17, 18, 20, 26, 29,		tubulões 151, 152, 183, 185
	40, 41, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 102,	U	
	103, 108, 164, 165, 166, 167, 168,		umidade 39, 40, 96, 196, 214, 216,
	171, 174, 181, 182, 183, 184, 192,		217, 218
	193, 196	V	
	recalques admissíveis 13, 18, 174		variação de carregamento nas
	recalques diferenciais 11, 17, 20, 29,		fundações 165
	96, 100, 107		variações sazonais 43
	recalques totais 17, 20, 95, 97 recobrimento 101, 102, 110, 112,		vegetação 38
	127, 141		vibrações 16, 171, 190, 191, 193,
	recobrimento de armadura 111		194, 195, 196, 197
	reforços 116	_	vinculação 117, 118, 121, 135, 137
	revestimento 138, 139, 141, 143,	Z	
	144, 146, 147		zonas cársticas 29
	rocha 33, 111, 127, 146, 179, 196,		
	210		
	rocha calcária 48		
	rochas 40, 143, 190, 196, 211, 225,		
	226		
	rompimento de canalizações		
	enterradas 180		
	ruptura do solo 11, 134		
S			
	sapatas adjacentes 93		
	segregação 138		
	slump 142, 144, 146		
	sobrecarga assimétrica 168		
	soda cáustica 209		
	soil grouting 49		
	solapamento 181, 182, 185		

soldagem 127

195

solos argilosos 20, 21, 95, 126, 184,

## **SOBRE OS AUTORES**

O PROF. JARBAS MILITISKY é formado em Engenharia Civil na UFRGS em 1968, Ph.D. em Engenharia Civil pela Universidade de Surrey, Inglaterra, professor titular de Geotecnia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS. Atua em consultoria em projetos nas áreas de investigação geotécnica, fundações, contenções e patologia de fundações. Participou em projetos industriais, fundações de estruturas especiais, grandes subsolos, reforço de fundações de prédios históricos, entre outros. Atuou em ensino e pesquisa, tendo orientado teses de mestrado e doutorado, com inúmeras publicações nacionais e internacionais, co-autor de vários livros, entre os quais a publicação na Inglaterra de Earth Pressure and Earth Retaining Structures. Membro de comissões de elaboração de normas da ABNT. Recebeu o Premio Terzaghi da ABMS por sua contribuição ao conhecimento na área. Foi presidente da ABMS e é o vice presidente da ISSMGE para a América do Sul (2014-2017).

O PROF. NILO CESAR CONSOLI, Ph.D. em Engenharia Civil pela Universidade Concordia, Canadá, e Pós-Doutorado pela Universidade de Western Austrália, é hoje professor do Departamento de Engenharia Civil e pesquisador/orientador de mestrado e doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS. Atua como pesquisador do CNPg (categoria IA) e dedica-se a atividades de ensino, pesquisa e consultoria nas áreas de fundações, melhoramento de solos e geotecnia ambiental, com ênfase em análise numérica de fundações e obras de terra. Na UFRGS coordena Laboratório de Resíduos, Novos Materiais Geotécnicos e Geotecnia Ambiental (EN-VIRONGEO), tendo orientado mais de 35 teses de mestrado e doutorado. É professor visitante de universidades na Inglaterra, Escócia, Portugal, Austrália, Canadá e EUA. Sua produção envolve ainda mais de 100 artigos em periódicos internacionais e nacionais com corpo editorial, além de 100 artigos publicados em conferências nacionais e internacionais. O Prof. Consoli foi agraciado com o Telford Prize 2001 pelo Instituto de Engenheiros Civis da Inglaterra, devido à publicação de um artigo no periódico Géotechnique, da Thomas Telford, que foi escolhido entre os melhores artigos no ano 2000 no Reino Unido. Atuando também como revisor dos periódicos internacionais Géotechnique (ICE - UK), Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering - ASCE (USA), Canadian geotechnical journal (Canadá), Environmental modelling and software, entre outros

O PROF. FERNANDO SCHNAID, Ph.D. em Engenharia Civil pela Universidade de Oxford, Inglaterra, e Pós-Doutorado pela Universidade de Western Austrália, é hoje professor da UFRGS. Atua como pesquisador do CNPq e dedica-se a atividades de ensino, pesquisa e consultoria nas áreas de investigação geotécnica, fundações e geotécnica ambiental. Na UFRGS coordenou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e o Laboratório de Ensaios Geotécnicos e Geoambientais, tendo orientado mais de 60 teses de mestrado e doutorado. É professor visitante de universidades na Inglaterra, Escócia, Austrália, Argentina e Uruguai. Autor de outros 4 livros, sua produção envolve ainda mais de 100 trabalhos técnicos publicados nacional e internacionalmente, incluindo o estado da arte em Propriedades de Solos na Conferência Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica de Osaka, 2005.

## O primeiro Livro Profissional que trata de Problemas, Acidentes e Patologias das Fundações!

Fonte de referência e um guia dos cuidados e diretrizes que devem ser adotados para evitar patologias das fundações. Inúmeros estudos de caso ilustram com imagens expressivas as estruturas deterioradas em virtude das falhas nas medidas preconizadas.

Esta segunda edição, revista e ampliada em 48 páginas, apresenta indicações de práticas recomendadas para cada etapa do projeto de fundações, fruto da extensa e diversificada experiência dos autores, assim como novos exemplos de casos reais, estrategicamente ilustrados. A atualização também atende às novas edições da NBR 6122/2010 e do Manual ABEF.

Patologia das Fundações organiza as causas de ruína ou desempenho inadequado de forma sistemática, identificando-as em cada etapa: da investigação, do projeto, da execução e fiscalização, e as ligadas a eventos pós-construção e deterioração dos materiais. Em cada etapa, enfatizam-se os procedimentos adequados para garantir a qualidade da fundação.

