



**FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**DIEIMES PEREIRA DA SILVA
JÉSSICA DA SILVA OLIVEIRA**

**ANÁLISE DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS
DEVIDO AO RECALQUE DIFERENCIAL DAS
FUNDAÇÕES**

PUBLICAÇÃO Nº: 09

**GOIANÉSIA / GO
2018**



**DIEIMES PEREIRA DA SILVA
JÉSSICA DA SILVA OLIVEIRA**

**ANÁLISE DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS
DEVIDO AO RECALQUE DIFERENCIAL DAS
FUNDAÇÕES**

PUBLICAÇÃO Nº: 09

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO
AO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA FACEG.**

ORIENTADOR: MSC. IGOR CEZAR SILVA BRAGA

GOIANÉSIA / GO: 2018

SILVA, DIEIMES PEREIRA DA
OLIVEIRA, JÉSSICA DA SILVA

Análise das manifestações patológicas devido ao recalque diferencial das fundações.

45P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2017).

TCC – Faculdade Evangélica de Goianésia

Curso de Engenharia Civil

1. Patologia
2. Recalque diferencial
3. Manifestação patológica

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, D. P; OLIVEIRA, J. S. Análise das manifestações patológicas devido ao recalque diferencial das fundações. TCC, Curso de Engenharia Civil, FACEG – Faculdade Evangélica de Goianésia – GO, 45P. 2018.

CESSÃO DE CRÉDITOS

NOME DOS AUTORES: Dieimes Pereira da Silva e Jéssica da Silva Oliveira.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:
Análise das manifestações patológicas devido ao recalque diferencial das fundações.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil ANO: 2018

É concedida a FACEG a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito dos autores.

**DIEIMES PEREIRA DA SILVA
JÉSSICA DA SILVA OLIVEIRA**

**ANÁLISE DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS
DEVIDO AO RECALQUE DIFERENCIAL DAS
FUNDAÇÕES**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA FACEG COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL.**

APROVADO POR:



**IGOR CEZAR SILVA BRAGA, MESTRE (FACEG)
(ORIENTADOR)**



**DANIELLY LUZ ARAÚJO DE MORAIS, MESTRE (FACEG)
(EXAMINADOR INTERNO)**



**IVANDRO JOSÉ DE FREITAS ROCHA, ESPECIALISTA (FACEG)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: GOIANÉSIA/GO, 22 de junho de 2018.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos a Deus por nos guiar até aqui, dando-nos força para superar os obstáculos que encontramos pelo caminho.

Aos nossos familiares, em especial, aos nossos pais, que sempre nos incentivaram e apoiaram em todos os momentos.

Ao orientador, Igor Cezar Silva Braga, pelo incentivo, paciência e apoio durante todo o trabalho.

Aos nossos professores, pela sabedoria e conhecimento transmitido e que tornaram realidade esse sonho.

RESUMO

As manifestações patológicas, devido a problemas nas fundações, podem ter origem em etapas variadas da vida útil de uma construção, como: caracterização do comportamento do maciço de solo, análise do projeto, execução e ações posteriores a conclusão das fundações bem como a degradação dos materiais constituintes. Desta forma, o presente estudo pretende analisar as principais manifestações patológicas existentes bem como seus mecanismos deflagradores, em especial o recalque diferencial nas fundações. Para isso, foi realizada uma pesquisa teórica e investigativa sobre dois dos principais exemplos de manifestações patológicas oriundas do recalque diferencial em fundações: a Torre de Pisa e os prédios da Orla de Santos. Desta forma, foram feitos um levantamento e uma análise detalhada de ambas situações, procurando identificar a origem do problema bem como as soluções corretivas adotadas, afim de conhecer toda a situação e confrontar os resultados obtidos como o referencial teórico apresentado. Após a análise individual de cada obra foi realizado um comparativo com o intuito de enfatizar as diferenças e semelhanças entre os objetos de estudo. Chegou-se à conclusão da extrema importância de conhecer, não apenas o solo onde as edificações serão apoiadas, mas também, diversas outras características como a tipologia de fundação ideal para a situação e a região ao redor da área da edificação, procurando prever efeitos como a sobreposição de tensões e consequente recalque diferencial.

Palavras-chave: Patologia, recalque diferencial, manifestação patológica.

ABSTRACT

Pathological manifestations, due to problems in foundations, can be originate in various stages of the life of a building, such as: characterization of soil mass behavior, project analysis, execution and post-completion of foundations as well as degradation of the constituent materials. In this way, the present study intends to analyze the main pathological manifestations as well as their causes, especially the differential settlement in foundations. For that, a theoretical and investigative research was carried out on two of the main examples of pathological manifestations originating from differential settlement in foundations: the Tower of Pisa and the buildings of the Border of Santos. In this way, a survey and a detailed analysis of both situations were made, trying to identify the origin of the problem as well as the corrective solutions adopted, in order to know the whole situation and to compare the obtained results as the theoretical reference presented. After the individual analysis of each situation, a comparison was made with the intention of emphasizing the differences and similarities between the objects of study. At the end of the research, we came to the conclusion of the extreme importance of knowing not only the soil where the buildings will be supported, but also several other characteristics such as the ideal foundation typology for the situation and the region around the area of the building, trying to predict effects such as the overlapping of tensions and consequent differential settlements.

Key words: Pathology, differential settlement, pathological manifestation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2. 1 - Fundação superficial | 13 |
| Figura 2. 2 - Exemplo de tipos de fundação superficial. | 14 |
| Figura 2.3 - Fundação profunda. | 15 |
| Figura 2. 4 - Tipologias de fundação profunda. | 16 |
| Figura 2. 5 - Recalque em elemento de fundação..... | 17 |
| Figura 2. 6 - Configuração das falhas devido ao recalque em pilares intermediários. | 20 |
| Figura 2. 7 - Configuração das falhas devido ao recalque em pilares de canto..... | 20 |
| Figura 2. 8 - Torre de Pisa, Toscana, Itália..... | 21 |
| Figura 2. 9 - Prédio inclinado na Orla de Santos, São Paulo, Brasil. | 21 |
| Figura 2. 10 - Exemplo de plano de sondagem e respectivos cortes. | 24 |
| Figura 2. 11 - Exemplo de investigação geotécnica com profundidade insuficiente. | 25 |
| Figura 2. 12 - Adoção errada do perfil do solo devido a falha na investigação do subsolo..... | 26 |
| Figura 2. 13 - Exemplo de adoção otimista do perfil do terreno. | 27 |
| Figura 2. 14 - Exemplo do efeito de sobreposição de tensões..... | 27 |
| Figura 2. 15 - Exemplo da adoção deliberada de tipos diferentes de fundações. | 28 |
| | |
| Figura 3. 1 - Torre de Pisa | 31 |
| Figura 3. 2 - Edifício Núncio Malzone - Bloco A..... | 32 |
| | |
| Figura 4. 1 - Camadas de solo abaixo da Torre de Pisa..... | 33 |
| Figura 4.2 - Contrapeso de chumbo na face norte da Torre de Pisa..... | 34 |
| Figura 4. 3 - Disposição dos tubos para a escavação subterrânea. | 35 |
| Figura 4. 4 - Variação do nível de água abaixo da Torre de Pisa. | 36 |
| Figura 4. 5 - Sistema de drenagem utilizado na Torre de Pisa. | 37 |
| Figura 4. 6 - Perfil do solo da orla santista. | 38 |
| Figura 4. 7 - Representação da sobreposição de tensões no solo sobre o Edifício Núncio Malzone. | 39 |
| Figura 4. 8 - Vigas de transição Virandeel. | 40 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2. 1 - Classificação de fissura, trinca e rachadura..... | 19 |
| Tabela 2. 2 - Problemas típicos decorrentes da ausência de investigação do subsolo. .. | 23 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | Objetivos | 11 |
| 1.1.1 | Objetivos Específicos | 12 |
| 2 | REFERÊNCIAL TEÓRICO | 13 |
| 2.1 | Fundações | 13 |
| 2.1.1 | Fundação Superficial | 13 |
| 2.1.2 | Fundação Profunda | 14 |
| 2.1.3 | Parâmetros para a escolha do tipo de fundação | 16 |
| 2.2 | Recalque em fundação | 17 |
| 2.2.1 | Tipos de recalque | 17 |
| 2.2.2 | Danos causados por recalque diferencial | 18 |
| 2.3 | Patologias em fundações | 18 |
| 2.3.1 | Principais manifestações patológicas com origem na fundação | 19 |
| 2.3.1.1 | Fissuras, trincas e rachaduras | 19 |
| 2.3.1.2 | Desaprumo da edificação | 20 |
| 2.3.2 | Origem das patologias em fundações | 21 |
| 2.3.2.1 | Caracterização do comportamento do maciço | 22 |
| 2.3.2.2 | Análise e projeto de fundações | 26 |
| 2.3.2.3 | Execução de fundações | 29 |
| 2.3.2.4 | Ações pós-conclusão das fundações | 29 |
| 2.3.2.5 | Degradação dos materiais constituintes das fundações | 30 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 31 |
| 3.1 | Torre de Pisa | 31 |
| 3.2 | Edifício Núncio Malzone – Santos/SP | 32 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 33 |
| 4.1 | Caso 1 – Torre de Pisa | 33 |
| 4.1.1 | Análise do problema..... | 33 |
| 4.1.2 | Soluções corretivas adotadas | 34 |
| 4.2 | Caso 2 – Prédios da Orla de Santos | 37 |
| 4.2.1 | Análise do problema..... | 37 |
| 4.2.2 | Soluções corretivas adotadas | 39 |
| 4.3 | Comparativo entre os casos | 41 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 42 |
| 5.1 | Sugestões para pesquisas futuras | 43 |
| 6 | REFENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 44 |

1 INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento populacional, principalmente nos grandes centros urbanos, houve-se a necessidade da verticalização das edificações dos mais diversos tipos: residenciais, industriais e comerciais. Como consequência deste fato, as cargas provenientes deste tipo de edifício também aumentaram consideravelmente, se fazendo necessário um estudo mais aprofundado e complexo na área das fundações e dos solos, a fim de evitar o surgimento de manifestações patológicas.

Segundo Milititsky, Consoli e Schnaid (2015), as manifestações patológicas podem ter origem em etapas diferentes da vida útil de uma construção, como: caracterização do comportamento do maciço de solo, análise do projeto de fundação, execução das fundações, ações posteriores à conclusão das fundações e, também, a degradação dos materiais constituintes.

De acordo com Milititsky, Consoli e Schnaid (2015), a escolha equivocada do tipo de fundação para determinado projeto ou, também, negligência na análise do solo, pode causar manifestações patológicas na edificação dos mais variados níveis de complexidade, desde uma pequena fissura até um desaprumo da edificação, como é o caso da Torre de Pisa, na Itália, e o edifício Núncio Malzone, na cidade de Santos-SP.

Dentre todas as causas das manifestações patológicas, a que ocasiona os problemas mais difíceis e complexos de serem solucionados é o recalque diferencial, que segundo ABNT NBR (6122:2010) é definido como movimento vertical descendente ocasionado pelas cargas da estrutura apresentado em magnitudes diferentes em pontos distintos da edificação. Desta forma, o presente estudo pretende analisar as principais manifestações patológicas existentes bem como seus mecanismos deflagradores, em especial o recalque diferencial nas fundações.

1.1 Objetivos

Identificar e analisar as principais causas de manifestações patológicas devido ao recalque diferencial, bem como os efeitos causados pelas mesmas na edificação.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Conhecer os tipos de fundações existentes, bem como seu funcionamento;
- Identificar as causas das manifestações patológicas em fundações;
- Identificar os efeitos causados na edificação devido ao surgimento recalque diferencial nas fundações;
- Analisar as causas e medidas corretivas adotadas para a correção de problemas em fundação da Torre de Pisa e do Edifício Núncio Malzone, situado na orla santista.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Fundações

De acordo com a ABNT NBR (6122:2010), as fundações são elementos estruturais cuja principal finalidade é transmitir ao terreno as cargas provenientes da estrutura de uma edificação. Para este fim, as fundações necessitam possuir resistência adequada para que possa suportar todas as tensões atuantes na mesma.

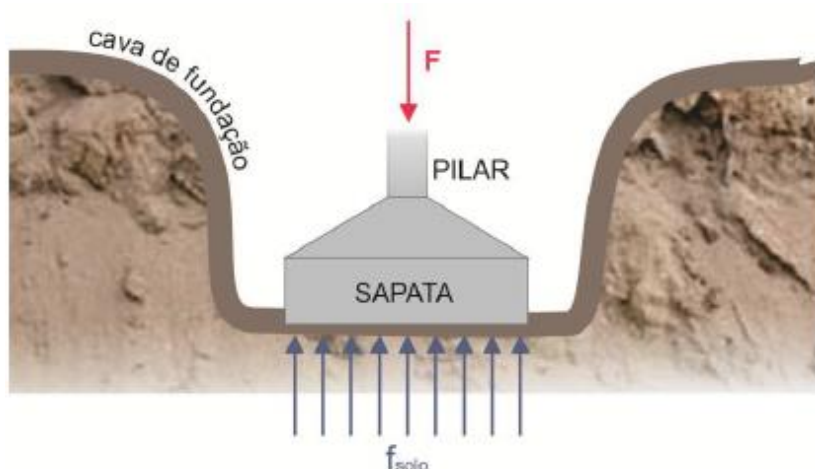
Além disso, é importante destacar que o solo onde se apoiará a fundação deve ter resistência e rigidez suficientes para que o mesmo não sofra ruptura e que não apresente deformações excessivas ou diferenças, as quais poderiam ocasionar grandes problemas à estrutura da edificação.

Ainda de acordo com a ABNT NBR (6122:2010), as fundações são divididas em duas tipologias: superficial (direta) e profunda (indireta).

2.1.1 Fundação Superficial

Define-se fundação superficial como elemento de fundação onde a carga pontual advinda do pilar é transmitida ao terreno pela base da fundação de maneira distribuída, conforme a Figura 2.1 abaixo. Além disso, a profundidade de assentamento deste tipo de fundação se dá a uma cota inferior a duas vezes a menor dimensão do elemento de fundação utilizado, assim como enuncia a ABNT NBR (6122:2010). Desta forma, é possível dizer que a camada de solo resistente se encontra nas primeiras camadas do solo onde será executada a edificação.

Figura 2. 1 - Fundação superficial



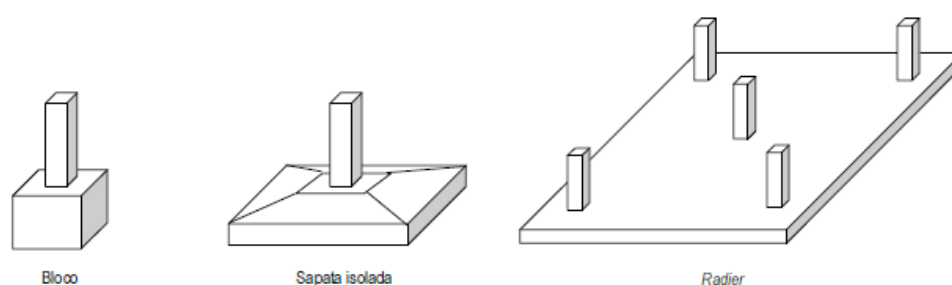
Fonte: Barros (2011).

A ABNT NBR (6122:2010) divide as fundações superficiais em cinco tipos:

- Sapata isolada: elemento de fundação de concreto armado dimensionado de maneira que as tensões de tração existentes sejam resistidas pela armadura empregada neste elemento;
- Sapata associada: elemento de fundação dimensionado da mesma forma que a sapata isolada, porém este tipo de fundação é comum a mais de um pilar, por isso sendo designada como sapata associada;
- Sapata corrida: elemento de fundação sujeito a ação de uma carga distribuída linearmente ou de pilares que seguem um mesmo alinhamento;
- Bloco: elemento de fundação de concreto que é dimensionado de maneira que as tensões de tração atuantes sejam resistidas pelo próprio concreto, sem a necessidade da utilização de armadura;
- Radier: elemento de fundação que recebe todos, ou parte, das cargas da edificação e as transmite sobre uma grande área de solo.

A Figura 2.2 apresenta alguns dos exemplos citados acima.

Figura 2. 2 - Exemplo de tipos de fundação superficial.

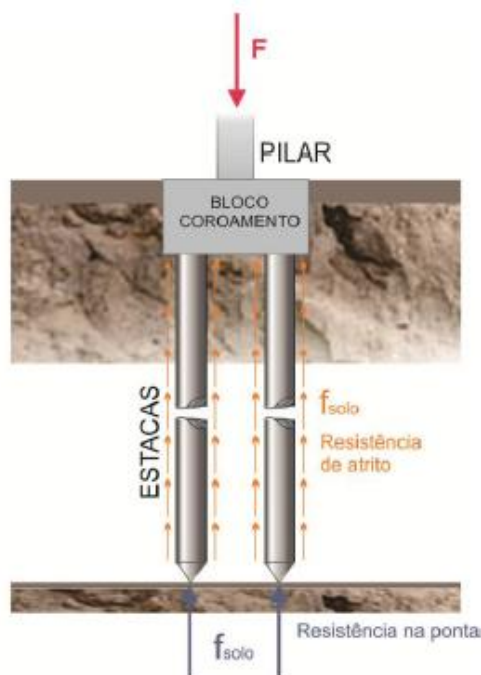


Fonte: Velloso e Lopes (2004) – Adaptado pelas autoras.

2.1.2 Fundação Profunda

A ABNT NBR (6122:2010) define fundação profunda como elemento de fundação que transmite a carga da estrutura para o terreno tanto pela base quanto pela superfície lateral do elemento. A resistência gerada pela base deste elemento de fundação é chamada de resistência de ponta enquanto que a lateral é denominada de resistência de fuste ou atrito lateral, conforme mostra a Figura 2.3. A profundidade de assentamento das fundações profundas se dá a uma profundidade superior ao dobro da menor dimensão do elemento de fundação, como no mínimo 3 metros de profundidade.

Figura 2.3 - Fundação profunda.



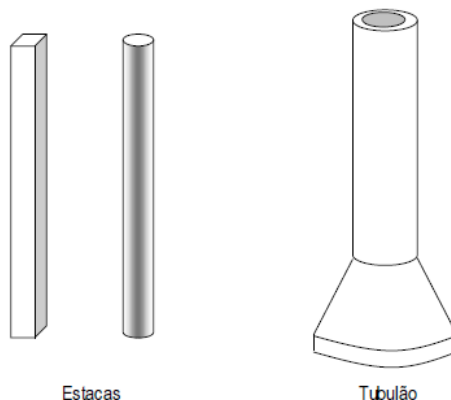
Fonte: Barros (2011).

A ABNT NBR (6122:2010), classifica as fundações profundas em dois tipos:

- Estaca: elemento de fundação executado por equipamentos e ferramentas sem que haja a necessidade da descida de um operário. Neste tipo de fundação, a parcela de resistência lateral é superior à resistência de ponta. Dentre os vários materiais possíveis a serem utilizados nas estacas, pode-se citar: concreto moldado no local, concreto pré-moldado, aço, madeira ou através da combinação dos materiais anteriores. Além disso, as estacas podem ser agrupadas em três subgrupos referente à maneira como são executadas: escavada, quando há a retirada do solo para a sua execução; cravadas, onde não há a retirada do solo para a execução da estaca e sim uma compactação; e as injetadas, onde as estacas são perfuradas por rotação enquanto há a injeção de concreto na parte inferior do fuste.
- Tubulão: elemento de fundação onde é necessário que haja a escavação do terreno de maneira que permita a descida de uma pessoa para que a mesma possa realizar o alargamento da base do tubulão. Para permitir a descida do operário, o tubulão precisa de um fuste com, no mínimo, 70 cm de diâmetro. Neste tipo de fundação profunda a transferência de cargas para o solo se dá predominantemente pela base do tubulão. Além disso, o tubulão pode ser dividido em duas categorias: ao ar livre e a ar comprimido, sendo o segundo utilizado, principalmente, quando há a presença de água.

A Figura 2.4 abaixo apresenta as tipologias acima citadas.

Figura 2. 4 - Tipologias de fundação profunda.



Fonte: Adaptado de Velloso e Lopes (2004).

2.1.3 Parâmetros para a escolha do tipo de fundação

Segundo Velloso e Lopes (2004), quatro variáveis devem ser levadas em consideração antes de se adotar uma determinada tipologia de fundação, que são:

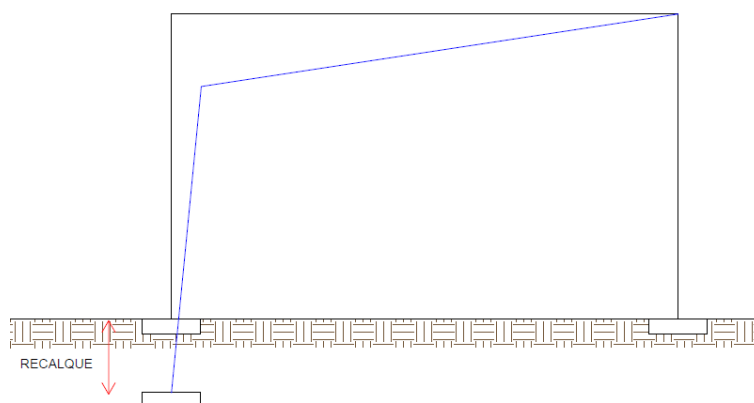
- Análise da topografia da área, que consiste em verificar a necessidade de cortes e aterros, levantamento de dados sobre taludes e encostas próximas e dados sobre erosões;
- Características do maciço do solo, etapa que visa investigar o subsolo através do processo de sondagem, procurando identificar a variação das camadas de solo, bem como a resistência e a profundidade de cada uma delas. Além disso, nesta etapa ainda é verificada a existência de matacões e a posição do nível de água;
- Dados da estrutura a ser construída, etapa em que são definidos o tipo e o uso da edificação que será construída, sistema estrutura a ser utilizado, bem como o sistema construtivo empregado e, ainda, estudo das cargas atuantes;
- Dados sobre as construções vizinhas, nesta etapa procura-se conhecer a estrutura de edificações vizinhas, bem como a quantidade de pavimentos, a existência de subsolos, identificação de danos já existentes na construção e, também, procura prever quais seriam as possíveis consequências provocadas pelas escavações e vibrações da obra a ser construída.

Após verificar todos os dados é possível determinar a tipologia de fundação que melhor se encaixaria nas especificações do terreno garantindo tanto a integridade da nova obra quanto das obras vizinhas.

2.2 Recalque em fundação

De acordo com a ABNT NBR (6122:2010), o recalque é a deformação que ocorre no solo quando o mesmo está submetido a determinados carregamentos, resultando em um movimento vertical descendente, conforme representado na Figura 2.5. A movimentação da fundação pode causar diversos danos a estrutura da edificação onde, dependendo da intensidade, estes danos podem ser irreversíveis.

Figura 2. 5 - Recalque em elemento de fundação.



2.2.1 Tipos de recalque

Do ponto de vista do elemento de fundação, Milititsky, Consoli e Schnaid (2015), o recalque é classificado em dois tipos:

- Recalque absoluto: é o recalque que ocorre em um elemento de fundação isolado.
- Recalque diferencial: ocorre quando um elemento de fundação desloca e outro não, ou quando ambos são deslocados, mas com intensidades diferentes. Este tipo de recalque deve ser sempre evitado, uma vez que sua aparição pode ocasionar o aparecimento de manifestações patológicas e, em casos mais graves, pode causar danos difíceis e onerosos de serem reparados.

Quanto à deformação sofrida pelo solo, Rebello (2008) as classifica o recalque em três tipos:

- Recalque elástico ou imediato: assim como o próprio nome diz, é aquele que ocorre imediatamente após a aplicação da carga no solo, sendo maiores em solos não coesivos;

- Recalque por escoamento lateral: essa deformação trata-se da migração do solo da região mais solicitada para a menos solicitada, ou seja, do centro para as laterais, acontecendo predominantemente em solos não coesivos;
- Recalque por adensamento: esse recalque ocorre devido à diminuição do volume aparente do solo devido ao fechamento dos vazios deixados pela água intersticial que foi expulsa pela pressão exercida pelas cargas advindas da estrutura

2.2.2 Danos causados por recalque diferencial

Como visto anteriormente, a ocorrência de recalque nos elementos de fundação pode ocasionar diversos danos à edificação. Velloso e Lopes (2004) classifica os danos oriundos do recalque da fundação em três grupos:

- Danos estruturais: são danos causados aos elementos estruturais que compõem os edifícios, tais como pilares, vigas e lajes. A extensão desse dano pode ocasionar efeitos mais simples, como o aparecimento de pequenas fissuras nos elementos estruturais, ou até os efeitos críticos, podendo ocasionar o colapso da estrutura;
- Danos arquitetônicos: são os danos causados a estética da edificação como o aparecimento de fissuras e trincas em paredes e acabamentos. Estes danos causam, principalmente, um desconforto visual, mas nem por isso devem ser menosprezados.
- Danos funcionais: são danos que afetam a funcionalidade do edifício, ocasionando refluxo ou ruptura do sistema de esgoto, empenamento das esquadrias, desgaste de elevadores. Estes danos estão ligados ao desaprumo do edifício causado pelo recalque excessivo da fundação.

2.3 Patologias em fundações

A palavra patologia em grego significa: *páthos* – doença, e *logos* – ciências. De acordo com Souza e Ripper (2009), no âmbito da engenharia civil a patologia consiste no estudo dos problemas causados às edificações, procurando identificar as modificações ocorridas nas mesmas e descobrir a origem destes sintomas a fim de erradicá-los.

Desta forma, Oliveira (2012) destaca a importância da distinção de manifestação patológica e patologia. A manifestação patológica é o sintoma em si, é uma expressão resultante de um mecanismo de degradação, enquanto patologia é a ciência que estuda as origens e possíveis métodos para eliminar tais manifestações patológicas.

2.3.1 Principais manifestações patológicas com origem na fundação

De acordo com Milititsky, Consoli e Schnaid (2015), as principais manifestações patológicas oriundas de problemas nas fundações são: fissuras, trincas, rachaduras e desaprumo da edificação.

2.3.1.1 Fissuras, trincas e rachaduras

Segundo Oliveira (2012), as fissuras, trincas e rachaduras são manifestações patológicas que podem ocorrer principalmente em alvenarias, lajes, pilares vigas e pisos, podendo interferir na estética, durabilidade e no desempenho estrutural da edificação. Este tipo de manifestação patológica surge quando os elementos citados anteriormente são submetidos a tensões superiores às resistentes pelos materiais que os constituem.

A ABNT NBR (9573:2003) diferencia fissuras, trincas e rachaduras com base na abertura apresentada por esta manifestação patológica, como pode ser visto na Tabela 2.1 abaixo.

Tabela 2. 1 - Classificação de fissura, trinca e rachadura.

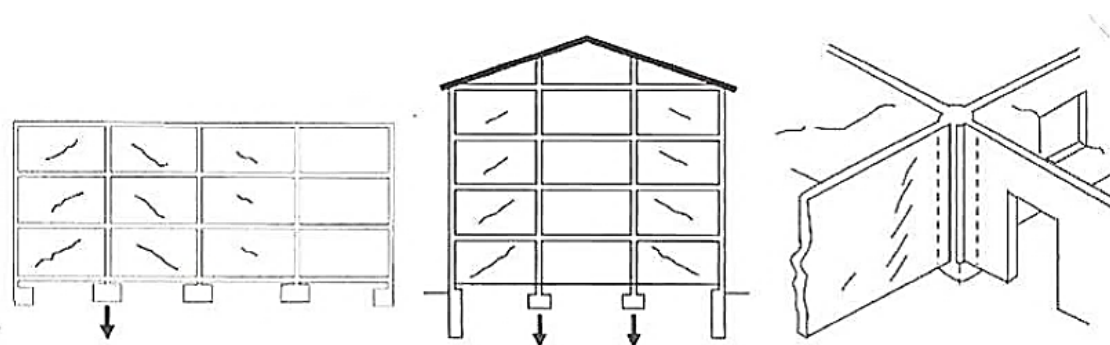
| Classificação | Abertura – e (mm) |
|---------------|----------------------|
| Fissura | $< 0,50$ |
| Trinca | $0,50 \leq e < 1,00$ |
| Rachadura | $1,00 \leq e < 1,50$ |

Fonte: Adaptado de ABNT NBR (9573:2003).

Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) destacam que o aparecimento de fissuras, trincas e rachaduras, não se devem exclusivamente a problemas nas fundações. Essas manifestações patológicas podem ocorrer, também, devido a sobrecargas na estrutura, deformação excessiva da estrutura, alterações químicas, variações térmicas e por movimentação higroscópica.

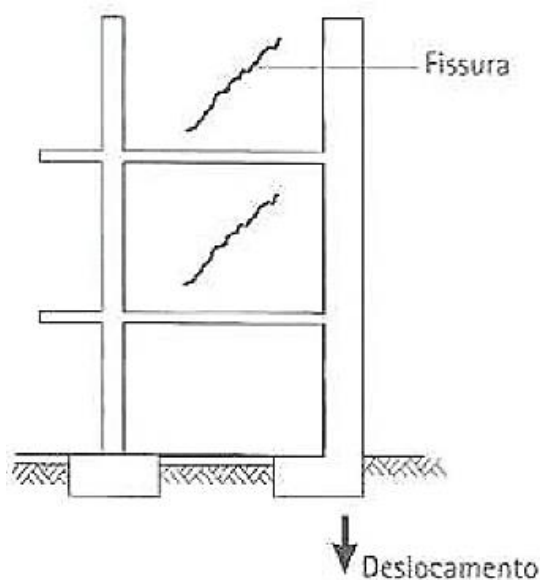
Segundo Milititsky, Consoli e Schnaid (2015), as fissuras, trincas e rachaduras apresentam determinados padrões quando tem origem nas fundações. Essas falhas geralmente ficam inclinadas a 45 graus e a parte mais alta da falha aponta para o lado da edificação que está sofrendo a deformação, assim como mostra as Figuras 2.6 e 2.7 abaixo.

Figura 2. 6 - Configuração das falhas devido ao recalque em pilares intermediários.



Fonte: Milititsky, Consoli e Schnaid (2015)

Figura 2. 7 - Configuração das falhas devido ao recalque em pilares de canto.



Fonte: Milititsky, Consoli e Schnaid (2015)

2.3.1.2 Desaprumo da edificação

De acordo com Milititsky, Consoli e Schnaid (2015), o desaprumo da edificação tem como principal origem o recalque diferencial dos elementos de fundação. Essa manifestação patológica afeta desde a estética do edifício até a distribuição de cargas no edifício, que por consequência acaba aumentando gradativamente o esforço nos elementos de fundação gerando um acréscimo de recalque que, atingindo valores exorbitantes, pode ocasionar o colapso total do edifício, tornando-o insegura a edificação.

A olho nu, o desaprumo ocasiona o desalinhamento do edifício, causando desconforto visual e habitacional. Dentre os principais casos de desaprumo devido a problemas na fundação, pode-se citar a Torre de Pisa na cidade de Toscana, Itália, e os

prédios da orla de Santos, São Paulo, Brasil. Esses casos podem ser observados nas Figuras 2.8 e 2.9 abaixo, respectivamente.

Figura 2. 8 - Torre de Pisa, Toscana, Itália.



Fonte: Dicas de Arquitetura - <http://dicasdearquitetura.com.br/por-que-a-torre-de-pisa-e-inclinada/>. Acesso em 30 de novembro de 2017.

Figura 2. 9 - Prédio inclinado na Orla de Santos, São Paulo, Brasil.



Fonte: Massa cinzenta - <http://www.cimentoitambe.com.br/predios-tortos-de-santos-como-eles-estao- hoje/>. Acesso em 30 de novembro de 2017.

2.3.2 Origem das patologias em fundações

De acordo com Milititsky, Consoli e Schnaid (2015), na ocorrência de manifestações patológicas deve-se identificar suas origens e possíveis mecanismos deflagradores a fim de eliminar tais problemas. No entanto, Carvalho (2010) afirma que

a análise deste tipo de patologia não é simples nem imediato, podendo provocar interrupção das funções exercidas pela edificação.

Segundo Carvalho (2010), uma vez conhecidas as causas que originam as patologias nas fundações, é possível adotar um conjunto de medidas a fim de erradicar tais problemas, como por exemplo, reforço estrutural da edificação ou, também, modificações das propriedades geotécnicas do terreno.

Conforme Milititsky, Consoli e Schnaid (2015), é possível classificar a origem dos problemas nas fundações em cinco grupos:

- Caracterização do comportamento do maciço;
- Análise projeto de fundações;
- Execução de fundações;
- Ações pós-conclusão das fundações;
- Degradação dos materiais constituintes das fundações.

Desta forma, é possível perceber que os problemas oriundos das fundações podem ocorrer desde antes o início das obras e até mesmo após sua conclusão, sendo necessário grande estudo com a finalidade evitar e mitigar tais problemas.

2.3.2.1 Caracterização do comportamento do maciço

Conforme Carvalho (2010), dentre as causas mais frequentes de problemas nas fundações pode-se citar a ausência e a insuficiência nas investigações do subsolo no qual a obra será realizada. A importância do levantamento correto do maciço do solo é de vital importância para o bom funcionamento de um edifício, uma vez que esse maciço é o meio de suporte para todas as cargas advindas da edificação.

Segundo Milititsky, Consoli e Schnaid (2015), a ausência de da investigação do subsolo é um problema tipicamente encontrado em obras de pequeno e, até mesmo, médio porte. Dentre as principais justificativas para a não realização desta investigação pode-se citar a questão econômica.

De acordo com Carvalho (2010), devido ao fato do solo ser um material heterogêneo e de natureza errática, é de extrema importância a investigação do maciço com o intuito de conhecer e identificar o tipo de solo, para que desta maneira seja possível indicar a melhor tipologia de fundação para cada caso.

A Tabela 2.2 abaixo apresenta os principais problemas decorrentes da ausência da investigação do subsolo nos tipos de fundações existentes.

Tabela 2. 2 - Problemas típicos decorrentes da ausência de investigação do subsolo.

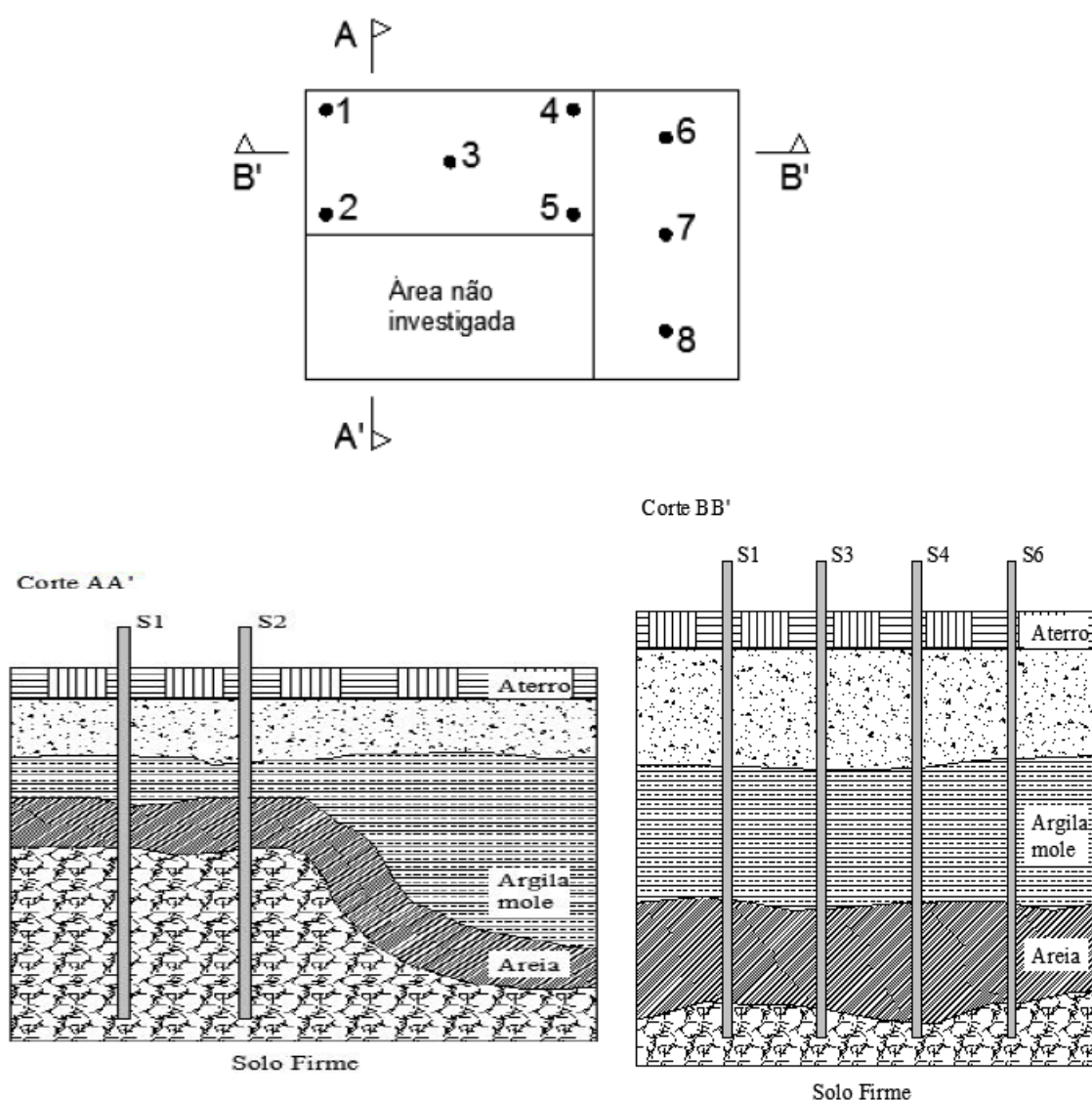
| Tipo de fundação | Problemas típicos decorrentes |
|------------------------|--|
| Fundações superficiais | Tensões no solo excessivas, incompatíveis com as características reais do solo, resultando em assentamentos inadmissíveis ou ruptura. |
| | Fundações em solos/aterros heterogêneos, provocando assentamentos diferenciais. |
| | Fundações em solos compressíveis sem estudos sobre os possíveis assentamentos, resultando em grandes deformações. |
| | Fundações apoiadas em materiais de comportamentos muito diferentes, sem junta, o que origina assentamentos diferenciais. |
| | Fundações apoiadas numa camada dura que esta sobreposta sobre solos moles, sem análise de assentamentos, ocasionando ruptura ou grandes deslocamentos das fundações. |
| Fundações profundas | Estacas inadequadas ao tipo de subsolo, geometria inadequada, comprimento ou diâmetro inferiores aos necessários. |
| | Estacas apoiadas em camadas resistentes sobre solos moles, com assentamentos inaceitáveis. |
| | Ocorrência de atrito negativo não previsto, reduzindo a carga admissível adoptada para a estaca. |

Fonte: Milititsky, Consoli e Schnaid (2015).

Por outro lado, o fato de realizar as investigações subsolo por si só não garante que não haverá erros. De acordo com Carvalho (2010), a execução de um número insuficiente de sondagens para uma área determinada do terreno ou, também, uma profundidade insuficiente dos ensaios pode causar tantos problemas quanto a ausência das próprias investigações.

A Figura 2.10 abaixo mostra um exemplo de investigação insuficiente do solo. Segundo Carvalho (2010), é possível perceber que a área que não foi investigada apresenta solo firme a uma profundidade maior que a região analisada ao lado e como as fundações são definidas e projetadas tendo em conta os dados resultantes das sondagens, uma sapata executada na linha do corte A-A não teria funcionamento pleno, uma vez que de um lado ela estaria se apoiando em solo firme e do outro em um solo não resistente. De acordo com Milititsky, Consoli e Schnaid (2015), o principal problema nesta situação apresentada seria o aparecimento de recalque diferencial, podendo ocasionar diversos problemas como os citados no tópico 2.3.1 do presente estudo.

Figura 2. 10 - Exemplo de plano de sondagem e respectivos cortes.



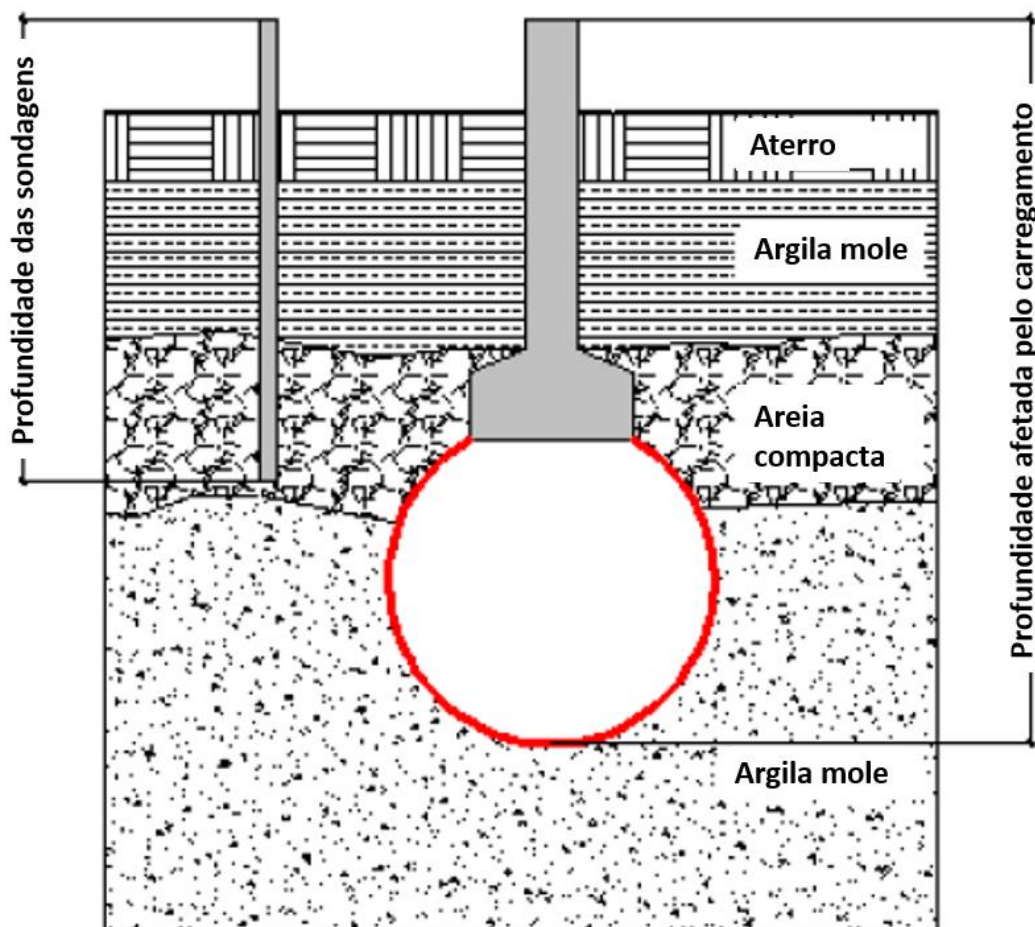
Fonte: Milititsky, Consoli e Schnaid (2015).

O outro ponto citado por Carvalho (2010) é a profundidade insuficiente alcançada na investigação geotécnica, que por sua vez não acaba identificando camadas mais profundas de comportamento distinto e que ainda são solicitadas pela estrutura.

A Figura 2.11 abaixo mostra um exemplo desta situação. Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) mostra que o carregamento advindo do edifício afeta o solo até uma determinada profundidade que não foi alcançada pela investigação do subsolo. Neste caso apresentado, a camada mais baixa possui resistência menor que a última camada analisada e desta forma o maciço não irá se comportar como esperado, uma vez que a atuação da carga no solo mole ocasionará grandes deformações, ocasionando o recalque fundação

que em situações mais graves poderá ocasionar o colapso total da estrutura caso o mesmo não seja combatido.

Figura 2. 11 - Exemplo de investigação geotécnica com profundidade insuficiente.



Fonte: Milititsky, Consoli e Schnaid (2015).

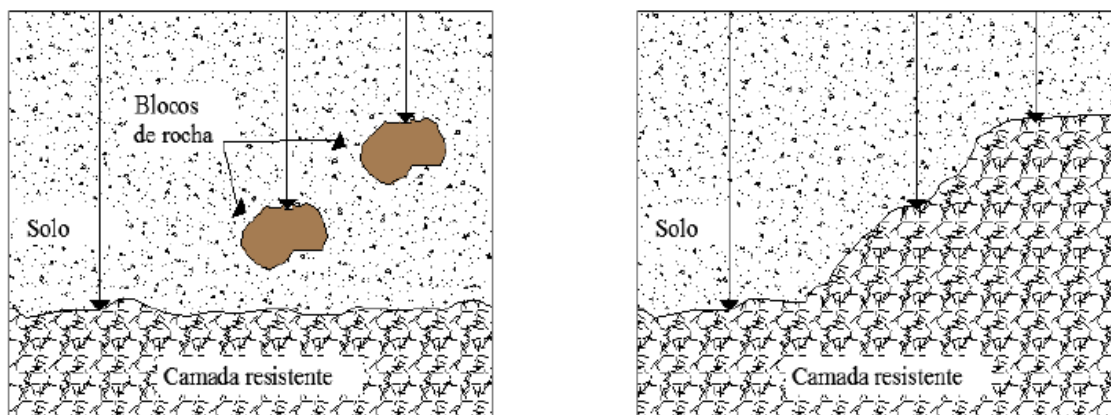
Além dos exemplos mencionados, outro ponto é levantado por Milititsky, Consoli e Schnaid (2015), que é falha na execução e na interpretação de estudo de investigação do solo. Ainda de acordo com Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) este processo pode ocorrer, por exemplo, quando são encontrados matacões, que são blocos de rocha com elevada resistência. Dessa forma, em uma interpretação errônea o responsável pela investigação pode admitir que naquele local já existe a camada resistente do solo e enviar ao responsável pelo projeto de fundações, que por sua vez irá projetar a fundação da edificação com base neste laudo.

De acordo com Carvalho (2010), dentre os principais problemas que podem acontecer podem-se citar a perda da estabilidade do matacão, uma vez que o mesmo é apenas um trecho resistente e não uma camada e desta forma pode ocasionar recalques

diferenciais na edificação, causando o desaprumo do edifício e o aparecimento de fissuras no mesmo.

A Figura 2.12 abaixo mostra de maneira simples a falha na interpretação dos resultados do processo de investigação do maciço de solo.

Figura 2. 12 - Adoção errada do perfil do solo devido a falha na investigação do subsolo.



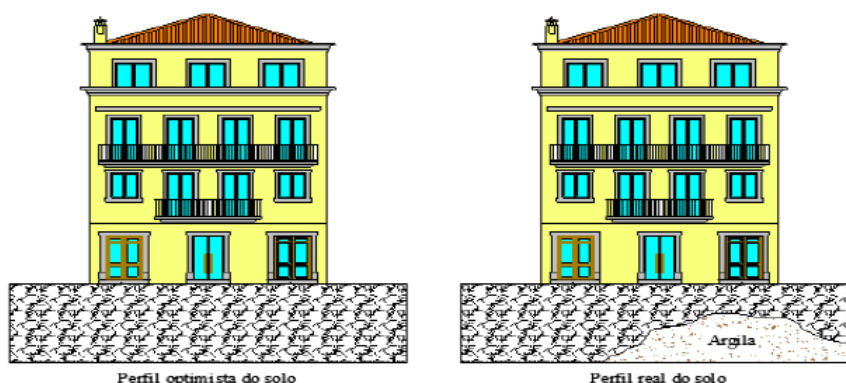
Fonte: Milititsky, Consoli e Schnaid (2015).

2.3.2.2 Análise e projeto de fundações

Após a definição do tipo de solo e esforços solicitantes da edificação, parte-se para a escolha da tipologia de fundação a ser utilizada e o seu dimensionamento. Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) citam cinco problemas que podem acontecer nesta etapa da vida da fundação.

O primeiro problema é relativo ao solo. De acordo com Sdwirck (2005) um exemplo típico nessa situação é a adoção de um perfil geológico otimista, ou seja, superestimando as características do solo. Na Figura 2.13 abaixo Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) cita como exemplo quando o responsável decide desconsiderar de maneira deliberada a existência de trechos importantes do solo, adotando deliberadamente um perfil de solo diferente do perfil real encontrado. Segundo Carvalho (2010), esta consideração errônea pode ocasionar o aparecimento de manifestações patológicas no edifício, como por exemplo o aparecimento de fissuras devido ao recalque ocasionado pelo assentamento da camada de solo desconsiderada.

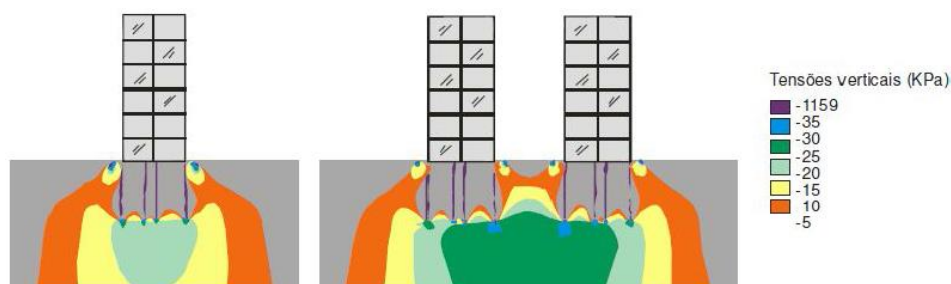
Figura 2. 13 - Exemplo de adoção otimista do perfil do terreno.



Fonte: Milititsky, Consoli e Schnaid (2015).

O segundo ponto apresentado por Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) está relacionado ao mecanismo de iteração solo-estrutura, como por exemplo a transferência de cargas para o solo. Para Carvalho (2010) quando uma fundação é pensada e projetada considerando-se que a mesma realiza a transferência de cargas ao solo de maneira isolada. No entanto, quando há outros edifícios ao redor da nova estrutura que está sendo projetada, as mesmas também transmitem seus respectivos carregamentos ao maciço. Desta forma, Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) diz que a consideração de ação isolada se torna inadequada pois devido à proximidade destas edificações há efeito da sobreposição de tensões, como apresentado na Figura 2.14 a seguir. Como consequência da sobreposição de tensões, pode acontecer o assentamento do solo que por sua vez o recalque diferencial, responsável pelo desaprumo do edifício e aparecimento de fissuras. Um exemplo típico desta situação são os prédios da orla de Santos, São Paulo.

Figura 2. 14 - Exemplo do efeito de sobreposição de tensões.

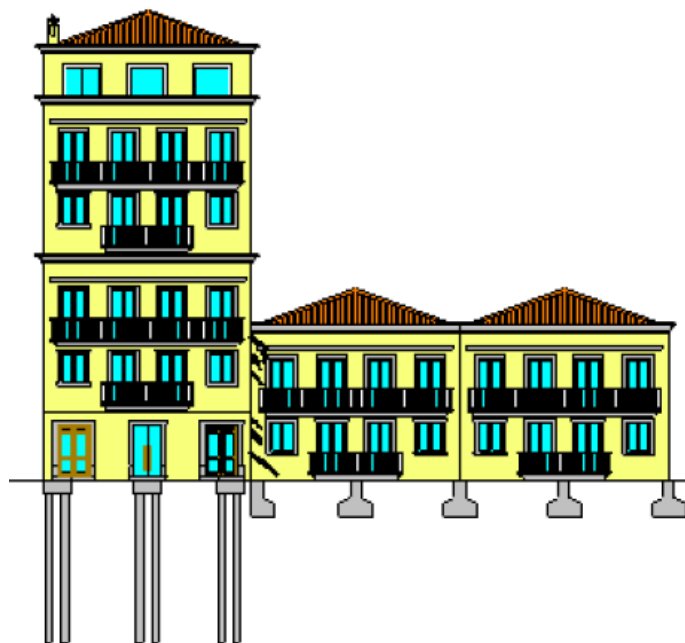


Fonte: Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) – Adaptado pelas autoras.

O terceiro problema está relacionado ao desconhecimento do comportamento das tipologias de fundações por parte do responsável. Segundo Milititsky, Consoli e Schnaid (2015), cada tipo de fundação transfere as cargas e sofre deformações de maneira

específica causando efeitos distintos no desempenho da estrutura que as mesmas suportam. Como exemplo Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) cita o exemplo da adoção de diferentes tipos de fundações para o mesmo edifício, em virtude das profundidades das camadas resistentes do subsolo, dificuldades executivas e, também, pela magnitude das cargas atuantes. Caso essa adoção seja feita de maneira deliberada, ou seja, sem a consideração da compatibilização das deformações sofridas pelos tipos de fundações adotados, essa adoção pode dar origem ao recalque diferencial, causando o aparecimento de diversas manifestações patológicas. A Figura 2.15 exemplifica de maneira simples este caso.

Figura 2. 15 - Exemplo da adoção deliberada de tipos diferentes de fundações.



Fonte: Milititsky, Consoli e Schnaid (2015).

O quarto problema citado por Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) é relativo à estrutura da fundação. Como exemplo deste erro é possível citar a falha determinação das cargas atuantes na fundação, desconsideração de sobrecargas e erro no dimensionamento dos elementos estruturais nas fundações. Segundo Carvalho (2010), as falhas citadas acima geralmente estão relacionadas a falta de experiência do responsável pelo projeto, que por sua vez acaba não levando em consideração ações de grande importância no dimensionamento das fundações, fazendo com que diversas vezes as mesmas sejam subdimensionadas.

O quinto e último problema apontado por Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) está relacionado às especificações construtivas. Neste ponto é definida a grande

importância da presença das especificações utilizadas para o dimensionamento do projeto. De acordo com Carvalho (2010), isso permite que caso seja necessário fazer alguma alteração no projeto o novo responsável será capaz de identificar as considerações levantadas pelo projetista original, minimizando a propagação de erros no projeto.

2.3.2.3 Execução de fundações

De acordo com Milititsky, Consoli e Schnaid (2015), as falhas de execução constituem o segundo maior responsável pelos problemas relacionados ao comportamento das fundações. Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) ainda salienta que estes problemas são diferentes quando se compara a fundação superficial com a profunda.

Ao se tratar da execução de fundações superficiais, é possível separar os problemas relativos tanto ao solo quanto a estrutura da fundação em si. Como problemas envolvendo o solo, Schwirck (2005) cita a execução de fundações assentes em solos de diferentes comportamentos e principalmente a substituição do material do solo por outro material não apropriado e com comportamento distinto. Já em relação aos problemas no elemento estrutural da fundação Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) apresentam como principais pontos a qualidade inadequada dos materiais utilizados, ausência da regularização da vala, execução de fundações com dimensões diferentes das definidas em projeto e, também, a insuficiente ou má disposição da armadura no elemento de fundação.

Tratando de fundações profundas, Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) afirmam que são diversos os problemas relacionados a esta tipologia. Como exemplo, pode-se citar o erro de locação de estacas, desvios devido ao aparecimento de obstruções, substituição do tipo da estaca, concreto com características inferiores às consideradas no projeto e entre outras.

2.3.2.4 Ações pós-conclusão das fundações

De acordo com Carvalho (2010), este grupo refere-se ao aparecimento de manifestações patológicas após a conclusão da execução das fundações, ou seja, admitindo-se que as mesmas funcionem de maneira correta para a qual foram projetadas, mas devido a ações realizadas após sua conclusão as mesmas perdem seu funcionamento ideal.

Dentre os principais pontos levantados por Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) pode-se citar: a alteração no carregamento da estrutura, quando há uma

modificação da função para qual a estrutura foi inicialmente projetada; movimentos do solo oriundo de ações externas, problemas que são associados escavações vizinhas e rebaixamento do nível do lençol freático por exemplo; e, também, vibrações e choques devido equipamentos industriais que produzem vibrações excessivas, cravação de estacas e, também, o emprego de explosivos para desmonte de rocha.

2.3.2.5 Degradação dos materiais constituintes das fundações

Segundo Schwirk (2005), para todo e qualquer projeto da área de engenharia que possui elementos em contato direto com o solo e água ou estão enterrados, faz necessário levar em consideração os efeitos causados aos materiais constituintes devido a ação dos elementos naturais anteriormente citados.

De acordo com Milititsky, Consoli e Schnaid (2015), as ações nocivas destes elementos devem ser previstas tanto na fase de investigação do subsolo quanto na fase de projeto, com a finalidade de garantir o melhor desempenho e a maior vida útil do material empregado.

Dentre os principais materiais empregados em estruturas de fundações pode-se citar o concreto, aço e a madeira. Conforme apresentado por Milititsky, Consoli e Schnaid (2015), cada um destes materiais possui comportamentos distintos perante a ação destes elementos estruturais. A presença do solo e da água pode ocasionar diminuição da durabilidade em concreto através de ataques químicos, no aço o principal problema apresentado é a corrosão e no caso da madeira é a perda da integridade física do material e conseqüente perda da capacidade resistente do mesmo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho possui caráter teórico e investigativo.

Inicialmente será realizada uma pesquisa bibliográfica em artigos, dissertações e livros acerca do tema, a fim de aprofundar as discussões sobre temas como fundações, patologias, manifestações patológicas e recalque.

Concluída a fase de revisão bibliográfica, a etapa seguinte consistirá em um estudo sobre obras que apresentaram manifestações patológicas devido a problemas na fundação destes edifícios. Para tal, dois casos famosos foram escolhidos: os prédios da Orla de Santos-SP, mais especificamente o Edifício Núncio Malzone, e a famosa Torre de Pisa, na Itália.

Após esta etapa, realizou-se uma nova consulta à bibliografia para compreender os fatores que desencadearam os problemas nas obras supracitadas. Foram consultados livros, laudos e monografias.

Após a compreensão das principais causas destes problemas, discutiu-se caso a caso, confrontando com a literatura sobre o tema.

3.1 Torre de Pisa

A Torre de Pisa, situada em Pisa (Itália), teve sua construção iniciada no ano de 1173 com conclusão no ano de 1370, sendo realizada em três etapas distintas: 1173-1188, 1272-1278 e 1360-1370. O edifício tem formato circular com diâmetro externo de 15,40 metros e altura de aproximadamente 56 metros, conforme mostra a Figura 3.1.

Figura 3. 1 - Torre de Pisa



Fonte: Baza Construtora - <http://www.construtorabaza.com.br/index.php/blog-home/item/47-por-que-a-torre-de-pisa-e-inclinada>. Acessado em 11 de mar. de 2018.

A torre de Pisa é bastante conhecida devido a sua inclinação, que na época mais crítica chegou a 5,5 graus e um desaprumo horizontal de quase 4,50 metros. De acordo com Santos (2014), a Torre começou a inclinar durante o segundo estágio da construção em 1272 a partir da construção do quarto andar. Desde então, o desaprumo apresentado pela Torre continuou aumentando até atingir o ponto supracitado.

3.2 Edifício Núncio Malzone – Santos/SP

Os prédios da orla santista começaram a ser construídos desde meados da década de 1940. A verticalização das edificações foi uma consequência direta do processo de urbanização que ocorria em todo o país. Atualmente, a orla santista é composta por diversos prédios com alturas variadas, e grande parte destes apresentam desaprumo por recalque diferencial.

Um dos principais exemplos deste problema é o edifício Núncio Malzone, composto por dois blocos (A e B) com 17 pavimentos cada e altura aproximada de 55 metros, conforme mostra a Figura 3.2. De acordo com Sayegh (2001), o desaprumo do bloco A começou a aparecer juntamente com sua construção em 1967, chegando a valores de 2,10 metros de desaprumo na sua situação mais crítica em 1999.

Figura 3. 2 - Edifício Núncio Malzone - Bloco A



Fonte: Dias (2010).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

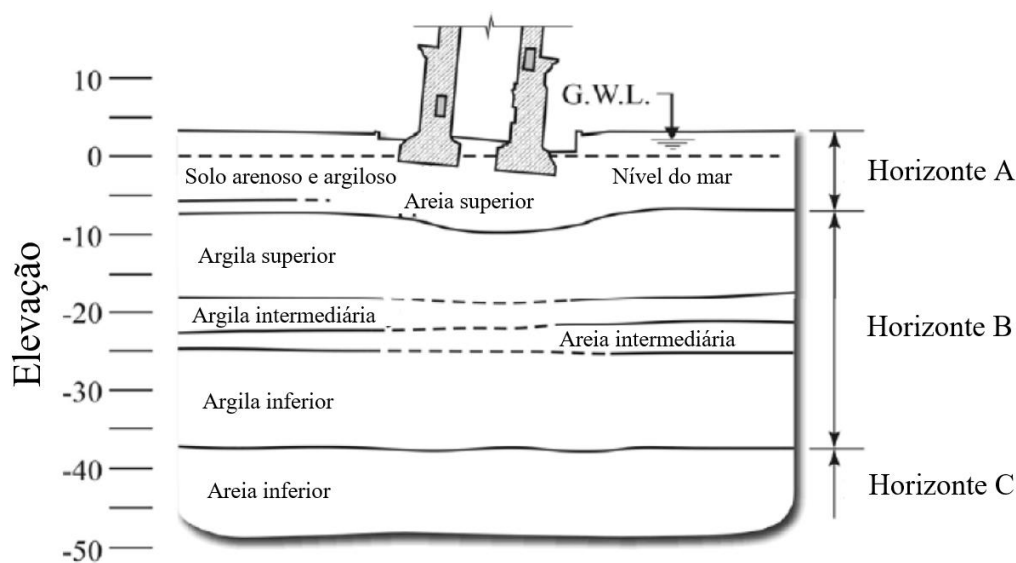
4.1 Caso 1 – Torre de Pisa

4.1.1 Análise do problema

Como relatado, a manifestação patológica apresentada pela Torre de Pisa foi o desaprumo de aproximadamente 4,50 metros no caso mais crítico, onde o mecanismo deflagrador de tal problema foi o recalque diferencial de 1,80 metros apresentado, sendo o recalque da região norte de 1,20 metros e o da região sul de 3,00 metros.

De acordo com Santos (2014), o solo sobre o qual a Torre está assentado apresenta camadas alternadas entre areia e argila, conforme a Figura 4.1. Além disso, Cintra *et al* (2013) ressalta que o maciço onde a torre está apoiada possui comportamento heterogêneo, apresentando maior deformabilidade na região sul, situação essa que não foi percebida antes do início da construção.

Figura 4. 1 - Camadas de solo abaixo da Torre de Pisa.



Fonte: Burland, Jamiolkowski e Viggiani (2009) – Adaptado pelas Autoras.

O tipo de fundação utilizado foi superficial, indicada para região em que o solo resistente está nas primeiras camadas de terra. Conforme Burland, Jamiolkowski e Viggiani (2009), a tensão média aplicada no solo era de 500 kPa distribuída de maneira uniforme. No entanto, como a porção sul do terreno era mais deformável o recalque nessa região se tornou mais acentuado, que por sua vez gerou a inclinação da torre.

Em uma análise computadorizada, Burland e Potts (1994, *apud* Santos, 2014) constataram que após a inclinação a tensão solo-estrutura no lado sul da torre era de

aproximadamente 1000 kPa, enquanto que no lado norte era praticamente nula. Desta forma, um colapso estrutural era eminente, visto que a tensão aplicada era o dobro para a qual a fundação foi projetada.

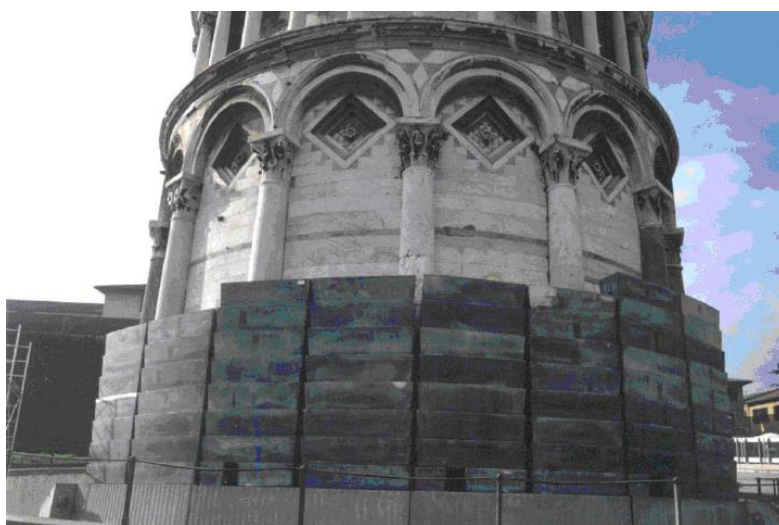
Desta forma, com base nos dados acima, percebe-se que a causa deste problema foi a ausência da caracterização do comportamento do maciço de solo antes da construção da obra em questão. Com a ausência deste dado importante, acabou sendo adotada uma tipologia de fundação incompatível com a situação real do maciço de solo, onde Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) confirmam que a ausência da caracterização do terreno levou a aplicação de tensões excessivas no solo, causando o assentamento diferencial no local da obra.

4.1.2 Soluções corretivas adotadas

Segundo Burland, Jamiolkowski e Viggiani (2009), após várias análises foi constatado que a inclinação da Torre de Pisa estava aumentando gradativamente com o passar dos anos. De acordo com Santos (2014) o problema mais agravante é a instabilidade da inclinação da Torre devido à sua rigidez e não mais devido a capacidade de carga do solo.

No ano de 1993, o comitê italiano resolveu adotar uma medida temporária para a estabilização da Torre. De acordo com Burland, Jamiolkowski e Viggiani (2009), a estratégia adotada foi a colocação de pesos de chumbo com um total de 600 toneladas ao redor do lado norte da torre, conforme a Figura 4.2. A tática utilizada foi um sucesso e permitiu uma redução na inclinação da torre e no momento atuante na fundação.

Figura 4.2 - Contrapeso de chumbo na face norte da Torre de Pisa.



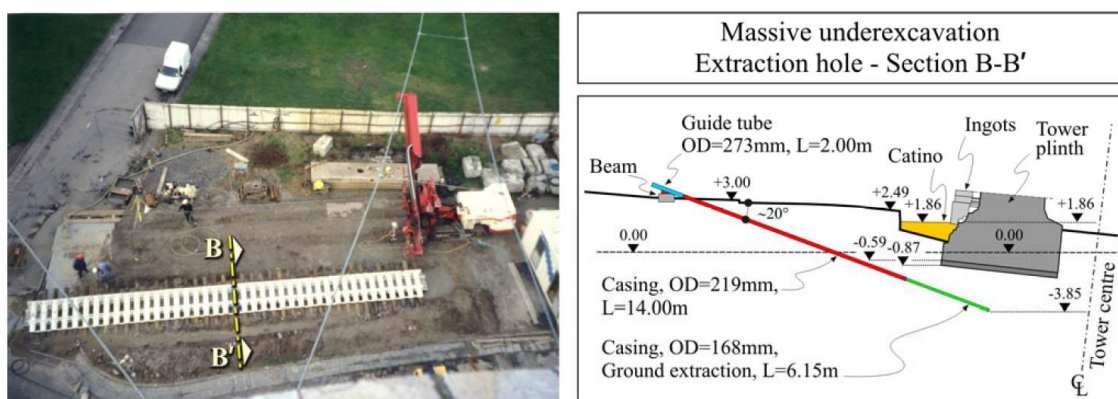
Fonte: Burland, Jamiolkowski e Viggiani (2009)

Segundo Santos (2014), o comitê responsável decidiu substituir os pesos de chumbo por tirantes conectados ao anel de concreto localizado abaixo dos pesos de chumbo. Contudo, essa medida não obteve sucesso devido aos artifícios utilizados que ocasionaram um aumento no recalque sofrido pela estrutura. Ao final desta tentativa falha, foi necessário aumentar os pesos de chumbo de 600 para 900 toneladas, com a finalidade de controlar a rotação da torre.

Temendo o pior, o comitê italiano procurou uma solução definitiva para o problema. Segundo Burland, Jamiolkowski e Viggiani (2009), o processo adotado para estabilizar a torre foi retirar parte do solo situado abaixo da fundação da parte norte através de escavação subterrânea, que de acordo com Santos (2014) consiste na em instalar tubos de extração de solo compostos por uma hélice contínua para que o solo possa ser coletado.

O processo de extração do solo mencionado por Burland, Jamiolkowski e Viggiani (2009) teve início no ano de 1999. Inicialmente foram feitas extrações preliminares com o intuito de comprovar a eficácia do método aplicado. Este processo possibilitou uma redução de 1,33 graus na inclinação da Torre. Verificada então a eficácia e do método adotado, novas escavações foram feitas. Segundo Santos (2014) ao final do ano de 1999 foram instalados 41 tubos para a extração do solo, conforme a Figura 4.3, espaçados entre si em 50 cm e a escavação teve início já em fevereiro do ano 2000.

Figura 4. 3 - Disposição dos tubos para a escavação subterrânea.

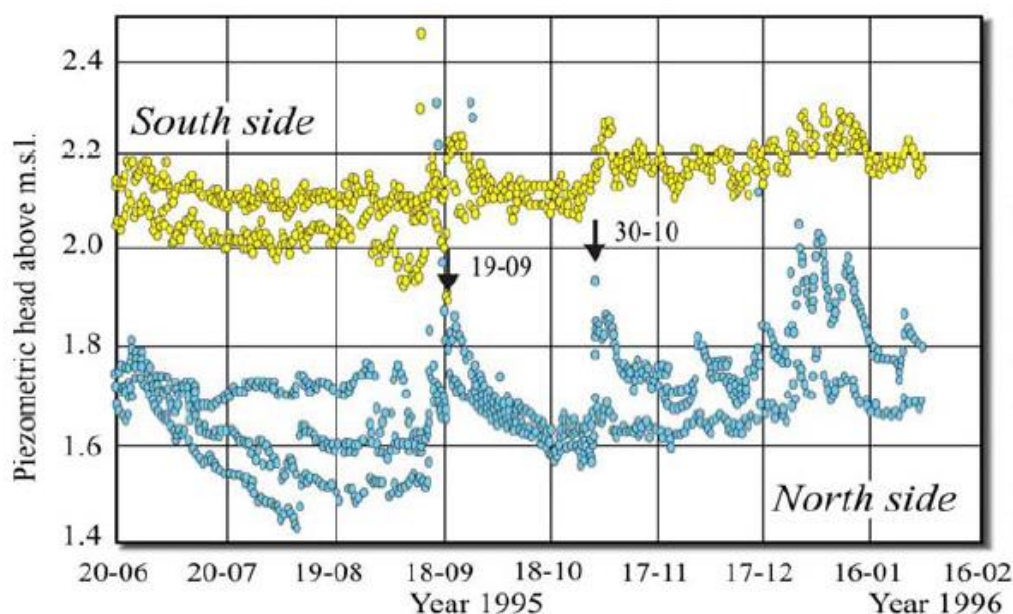


Fonte: Burland, Jamiolkowski e Viggiani (2009)

Com o sucesso do procedimento utilizado, os pesos de chumbo foram sendo retirados gradativamente até fevereiro de 2001 que eles foram removidos por completo. Como resultado do processo de estabilização a inclinação da Torre passou a ser de 0,5 graus.

O outro ponto levantado anteriormente foi relativo ao nível da água. De acordo com Santos (2014), o comitê italiano responsável pela recuperação da torre constatou que a variação do nível da água foi responsável pelo desaprumo sofrido pela Torre. Segundo Burland, Jamiolkowski e Viggiani (2009), os dados do comitê italiano mostram que o nível de água da parte sul era até 30 cm mais profundo que a parte norte, conforme a Figura 4.4, devido a concentração de cargas na porção sul da torre que acabava “expulsando” a água presente debaixo da fundação. Desta forma, em época de fortes chuvas o nível da água se elevava com maior intensidade no lado norte, que por consequência causava um aumento considerável na rotação da Torre no sentido sul.

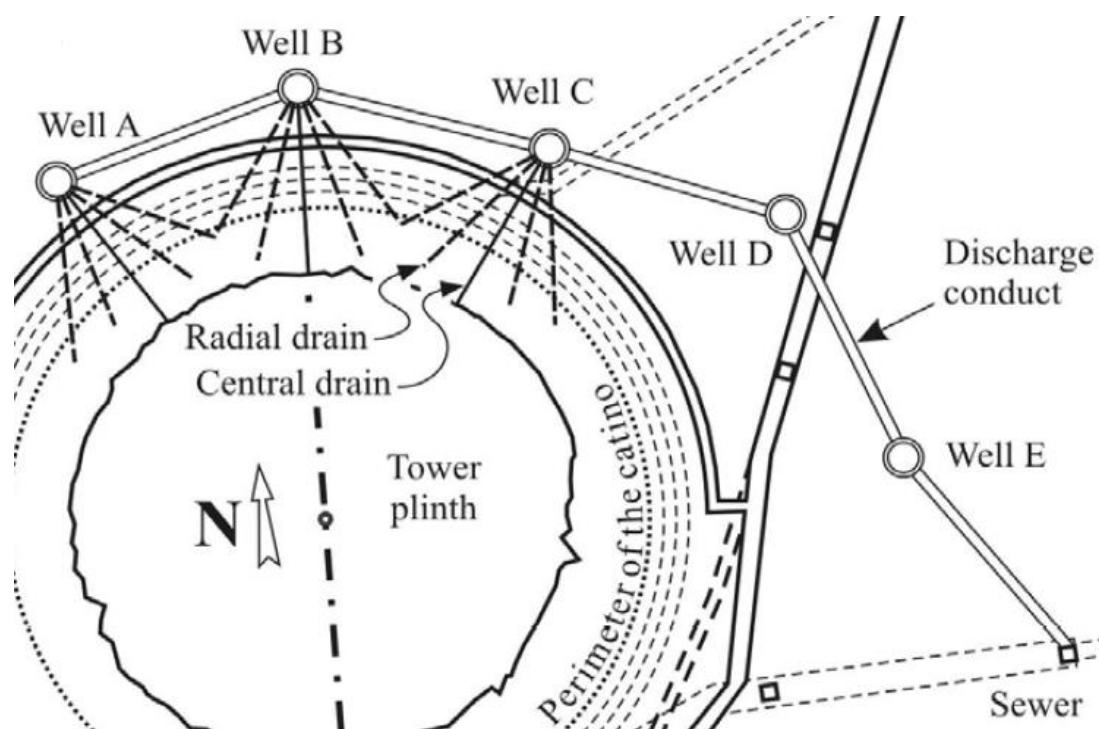
Figura 4. 4 - Variação do nível de água abaixo da Torre de Pisa.



Fonte: Burland, Jamiolkowski e Viggiani (2009)

Com o intuito de reduzir o efeito causado pela variação piezométrica foi necessário implantar um sistema de drenagem eficiente. De acordo com Burland, Jamiolkowski e Viggiani (2009) foram utilizados três poços subterrâneos (Well A, B e C) dispostos de forma radial no lado norte da Torre e outros poços com o intuito de conduzir a água drenada dos outros poços até o sistema de drenagem principal da cidade, conforme apresenta a Figura 4.5. A implantação deste sistema de drenagem possibilitou uma redução do poro-pressão, que por sua vez garantiu uma rotação da torre para a direção norte, reduzindo seu desaprumo.

Figura 4. 5 - Sistema de drenagem utilizado na Torre de Pisa.



Fonte: Burland, Jamiolkowski e Viggiani (2009)

4.2 Caso 2 – Prédios da Orla de Santos

4.2.1 Análise do problema

O prédio escolhido para ser tratado no presente trabalho foi o edifício Núncio Malzone Bloco A, doravante chamado de NM-A, que conforme citado anteriormente teve um desaprumo de 2,10 metros.

Segundo Dias (2010), o NM-A utilizou fundações superficiais do tipo sapata, assentadas a uma profundidade de 1,50 a 2,00 metros, ligadas entre si por vigas de elevada rigidez. O principal fato para utilização de fundações superficiais se deve ao fato da orla santista apresentar como a primeira camada de solo uma areia medianamente compacta, com características e resistências adequadas para esta utilização.

No entanto, o que os construtores da época não esperavam eram as camadas abaixo do horizonte de areia. De acordo com Sayegh (2001), o solo da orla santista é formado pela camada superficial de areia, seguida de uma extensa camada de argila marinha mole e bastante compressível, uma segunda camada de areia até o encontro da rocha de elevada resistência, conforme Figura 4.7. Desta forma, a alta compressibilidade da camada de argila apresenta grande deformabilidade que por consequência acarreta na

diminuição do volume do solo, ocasionando um rebaixamento no nível das fundações do edifício, ou seja, o recalque.

Figura 4. 6 - Perfil do solo da orla santista.

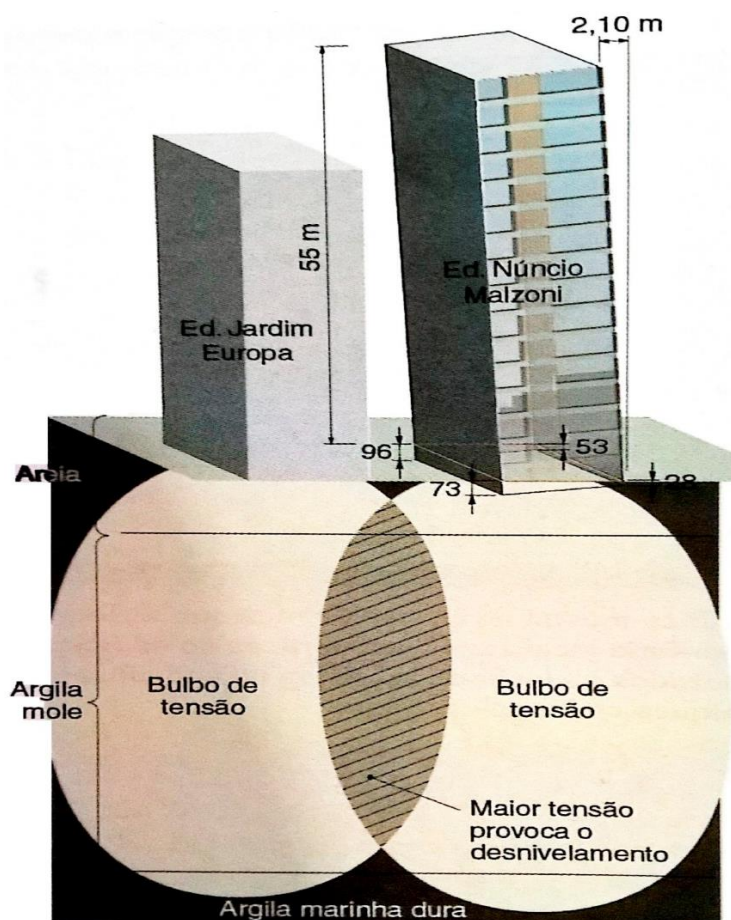


Fonte: Melhor de Santos - <http://www.melhordesantos.com/2011/12/predios-tortos-de-santos.html>.

Acessado em 24 de mar. de 2018. – Adaptada pelas autoras.

Segundo Sayegh (2001), um fator que agravou a situação dos prédios da orla santista em geral foi a proximidade entre os mesmos. Essa proximidade faz com que haja uma sobreposição do bulbo de tensões dos edifícios, conforme descrito no tópico 2.3.2.2 do presente trabalho. Esta sobreposição faz com que a tensão no solo entre dois prédios se eleve, ocasionando um maior recalque nesta região que por consequência faz com que os prédios sofram desaprumo. A Figura 4.7 abaixo representa essa situação que ocorreu no NM-A.

Figura 4. 7 - Representação da sobreposição de tensões no solo sobre o Edifício Núncio Malzone.



Fonte: Engenheiro Caiçara - <http://engenheirocaicara.com/desmisticando-por-que-os-predios-de-santos-sao-tortos/>. Acessado em 24 de mar. de 2018.

4.2.2 Soluções corretivas adotadas

De acordo com Sayegh (2001), a primeira tentativa de estabilizar o recalque sofrido pelo NM-A foi em 1978, nove anos após o início da sua construção. A ideia proposta para esta correção foi a execução de estacas raiz com 25 cm de diâmetro com profundidade de 50 metros no lado mais recalçado da edificação. Entretanto, esta primeira tentativa só apresentou sucesso nos primeiros meses, onde a partir deste período o prédio voltou a recalcar.

Em 1995, uma comissão de obras foi formada pelos moradores do NM-A com o intuito de erradicar o problema apresentado pelo prédio. A solução optada pela comissão foi a do engenheiro Carlos Eduardo Moreira Maffei, cujo o objetivo era interromper o recalque e reaprumar o edifício.

Segundo Dias (2010), a primeira etapa do processo foi a execução de estacas escavadas com o auxílio de lama betonítica com profundidade média de 57 metros. Ao

todo foram executadas 16 estacas com diâmetro variando entre 1,00 e 1,40 metros, sendo oito estacas em cada lado do edifício e executando primeiramente no lado mais recalçado. Sayegh (2001) ainda ressalta a necessidade do remanejamento das redes hidráulica, elétrica e telefônica para a execução das fundações, tornando mais dispendioso todo o processo.

A etapa seguinte, de acordo com Dias (2010), teve início com a execução de oito vigas de transição do tipo virandeel, que são vigas formadas por barras horizontais e verticais funcionando como um quadro rígido de ligações enrijecidas, com aproximadamente 4,50 metros de altura, conforme Figura 4.8, cuja principal função era receber os esforços dos pilares do edifício e transmiti-los às novas fundações. Primeiramente foi executada a viga da frente do edifício e as demais de maneira intercalas, enquanto as vigas longitudinais de travamento foram executadas logo após ao termino das vigas principais.

Figura 4. 8 - Vigas de transição Virandeel.



Fonte: Novo Milênio - <http://www.novomilenio.inf.br/santos/h0236f.htm>. Acessado em 24 de mar. de 2018.

A terceira etapa, conforme apresenta Sayegh (2001), consistiu na utilização de 14 macacos hidráulicos acionados por seis bombas que foram colocados entre as vigas de transição e os novos blocos de fundação, cuja principal função era a de reaprumar o edifício. Dias (2010) completa dizendo que foi necessário construir pilaretes dos dois lados de cada macaco para a colocação de calços com o intuito de garantir a segurança do edifício e, também, servir de apoio para as vigas enquanto cada macaco era rebaixado uma vez que o prédio foi levantado cerca de 80 cm para garantir seu reaprumo.

Segundo Dias (2010), a quarta e última etapa foi a escavação do terreno, retirando cerca de 200 toneladas de terra que dificultavam o nivelamento do edifício e as sapatas deixaram de estar em contato com o terreno. Deste modo, o NM-A passou a transmitir suas 6,50 mil toneladas para o solo através das estacas profundas.

Dias (2010) ressalta o cuidado necessário para a execução das obras, uma vez que todo este reparo ocorreu sem que os moradores desocupassem seus imóveis.

4.3 Comparativo entre os casos

Mesmo ocorrendo em locais distintos, o caso da Torre de Pisa e dos prédios da orla santista, mais precisamente o edifício Núncio Malzone, apresentam peculiaridades específicas.

O principal ponto que pode ser levantado em relação aos dois casos apresentados, pode-se dizer que é a identificação equivocada ou inexistente do perfil do solo onde a obra se apoia. No caso da Torre de Pisa o principal problema foi a heterogeneidade não identificada do plano de solo onde a obra se apoia, que por consequência ocasionou recalque diferencial além do admissível. Já no caso dos prédios da orla santista foi a presença de um solo mole de alta compressibilidade abaixo de uma camada de areia que passava a falsa impressão de segurança para a execução de fundações superficiais.

Outro fator a ser levado em consideração é que em ambos os casos estudados foram utilizadas fundações do tipo superficial, admitindo que as camadas superiores do solo fossem resistentes o suficiente para suportar toda a tensão solicitante.

Outro ponto que pode ser ressaltado é a taxa de ocupação do local. Pode-se dizer que a Torre de Pisa é um edifício isolado, onde a porção de solo em que a mesma se apoia recebe somente sua carga, diferentemente do caso dos prédios da orla de santos onde existem vários edifícios próximos uns aos outros. Desta forma pode-se dizer que a causa do recalque da Torre de Pisa é consequência direta da falta de conhecimento sobre o solo a qual se apoia, enquanto que os prédios da orla santista apresentaram recalque diferencial devido a não consideração a da porção de solo compressível, sendo agravado pela sobreposição de tensões devido à proximidade dos edifícios.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho procurou analisar e compreender como são originados os recalques diferenciais nas edificações, bem como as manifestações patológicas causadas por este fenômeno, como, por exemplo, o desaprumo.

Após toda a pesquisa e o estudo realizado foi possível perceber que o recalque diferencial pode ser ocasionado por diversas maneiras, como por exemplo, a sobreposição de tensões, como no caso dos prédios da orla Santista, e também a falta ou a má caracterização do horizonte de solo onde a obra será construída, como o caso da Torre de Pisa e uma das causas principais nos prédios em Santos.

Com os resultados obtidos na pesquisa, foi possível perceber o quão importante é a caracterização do solo antes da construção de uma edificação. Em ambos os casos analisados, a negligência no momento da caracterização do solo foi a principal causa de todas as manifestações patológicas apresentadas nas edificações, ou seja, o desaprumo devido ao recalque diferencial.

Além disso, outro ponto que pode ser obtido através da análise dos resultados é a importância da consideração dos arredores no projeto de fundação de um edifício. Esse caso foi observado principalmente no edifício Núncio Malzone, onde a sobreposição de tensões devido as cargas das construções próximas, juntamente com a consideração equivocada das camadas mais profundas de solo, aumentando o desaprumo do edifício.

Mesmo apresentando situações semelhantes, como o desaprumo nos dois casos (4,50 metros na Torre de Pisa e 2,10 metros no Edifício Núncio Malzone), a solução corretiva adotava para cada edifício foi diferente uma da outra, mostrando que não existe apenas uma maneira de solucionar um caso, devendo ser consideradas outras causas que acabaram contribuindo para o problema e, também, as limitações existentes para a aplicação da medida corretiva.

Assim sendo, devido à complexidade apresentada nas obras analisadas pelo estudo de caso, a correção das manifestações patológicas causadas pelo recalque diferencial exigiu grande dispêndio de tempo para a elaboração da estratégia corretiva a ser utilizada, bem como os altos custos para a correção dos problemas apresentados.

Desta forma, é possível reafirmar o pensamento de Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) que mostra o recalque diferencial como a manifestação patológica de maior complexidade corretiva e de elevado custo.

Sendo assim, é de extrema importância conhecer não apenas o solo onde a edificação será apoiada, mas, também, diversas outras características como a tipologia de fundação ideal para a situação e a região ao redor da área da edificação, procurando prever efeitos como a sobreposição de tensões e consequente recalque diferencial.

5.1 Sugestões para pesquisas futuras

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se:

- Realizar acompanhamento detalhado da evolução do recalque em determinado estudo de caso;
- Análise da influência do nível do lençol freático no projeto de fundações.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. R. **Levantamento das Manifestações Patológicas em Fundações e Estruturas nas Edificações, com até dez anos de idade, executadas no estado de Goiás.** 2009. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

ARANHA, P.M.S. **Contribuição ao estudo das manifestações patológicas nas estruturas de concreto armado na região amazônica.** 1994. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: **Projeto e execução de fundações.** Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR 9573: **Vermiculita expandida – Temperatura inicial e final de amolecimento – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2012.

BARROS, C. **Apostila de fundações.** Pelotas: Instituto Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

BURLAND, J. B.; JAMIOLKOWSKI, M. B.; VIGGIANI, C. **Leaning Tower os Pisa: behaviour after stabilization operations.** International Journal os Geoenineering, 01 julho 2009. 156-169.

CARVALHO, D, M. **Patologias das fundações: fundações em depósitos de vertente na cidade de machico.** 2010. Dissertação (Mestrado). Universidade de Madeira, Funchal, 2010.

CINTRA, J, C, A; AOKI, N; TSUHA, C, H, C; GIACHETI, H, L. **Fundações: Ensaio estáticos e dinâmicos.** 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

DIAS, M. S. **análise do comportamento de edifícios apoiados em fundação direta no bairro da Ponta da Praia na cidade de Santos.** 2010. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

DICAS DE ARQUITETURA. **Por que a Torre de Pisa é inclinada?.** 2015. Disponível em: <<http://dicasdearquitetura.com.br/por-que-a-torre-de-pisa-e-inclinada/>>. Acesso em 29 de out. de 2017.

ENGENHEIRO CAIÇARA. **Desmistificando: Por que os prédios de Santos são tortos?.** Disponível em: <<http://engenheirocaicara.com/desmistificando-por-que-os-predios-de-santos-sao-tortos/>>. Acessado em 24 de mar. de 2018.

MATOS. A. **Patologia das Fundações: estudo caso do edifício centro de ciências humanas e da educação.** 2010. Dissertação (Mestrado). Universidade do Estado da Santa Catarina – UDESC, Florianópolis, 2010.

MELHOR DE SANTOS. **Prédios tortos de Santos.** Disponível em: <<http://www.melhordesantos.com/2011/12/predios-tortos-de-santos.html>>. Acessado em 24 de mar. de 2018

MILITITSKY, J. CONSOLI, N. C. SHNAID F. **Patologia das Fundações**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

NOVO MILÊNIO. **Histórias e lendas de Santos**. Disponível em: <<http://www.novomilenio.inf.br/santos/h0236f.htm>>. Acessado em 24 de mar. de 2018.

OLIVEIRA, A. M. **Fissuras, trincas e rachaduras causadas por recalque diferencial de fundações**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

REBELLO, Y. C. P. **Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento**. 4 ed. São Paulo: Zigurate Editora, 2008.

SANTOS, A. **Prédios tortos de Santos: como eles estão hoje?**. 2015. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/predios-tortos-de-santos-como-eles-estao-hoje/>>, Acesso em 29 de out. de 2017.

SANTOS, G. V. **Patologia devido ao recalque diferencial em fundações**. Centro Universitário de Brasília – UniCEUB, Brasília, 2014.

SAYEGH, S. **Efeito Solo**. Techné PINI, 2001. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/51/artigo285197-1.aspx>>. Acessado em 24 de mar. de 2018.

SOUZA, V. C. M. RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e reforço em estruturas de concreto**. 5 ed. São Paulo: PINI, 2009.

SCHWIRCK, I. A. **Patologia das Fundações**. Universidade do estado de Santa Catarina – UDESC, Joenvile, 2005.

VELLOSO, D. A. LOPES, F. R. **Fundações, critérios de projeto – investigação do subsolo**. São Paulo: Oficina dos Textos, 2004.

VERÇOZA, Ê. J. **Patologia das Edificações**. Porto Alegre-RS: Sagra. 1991. Disponível em: <<http://equipedeobra.pini.com.br/construcaoreforma/41/artigo239476-1.aspx>>, Acesso em nov. de 2017.