



UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

LUCAS MACIEL HIRTZ

**ANÁLISE DAS CAUSAS DO DESABAMENTO DA EDIFICAÇÃO COM FOCO NO
COMPORTAMENTO DO SOLO DA REGIÃO
ESTUDO DE CASO: CHAMPLAIN TOWERS SOUTH**

Palhoça

2022

LUCAS MACIEL HIRTZ

**ANÁLISE DAS CAUSAS DO DESABAMENTO DA EDIFICAÇÃO COM FOCO NO
COMPORTAMENTO DO SOLO DA REGIÃO
ESTUDO DE CASO: CHAMPLAIN TOWERS SOUTH**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof.^a Caroline Ester Christ, Dra.

Palhoça

2022

LUCAS MACIEL HIRTZ

**ANÁLISE DAS CAUSAS DO DESABAMENTO DA EDIFICAÇÃO COM FOCO NO
COMPORTAMENTO DO SOLO DA REGIÃO
ESTUDO DE CASO: CHAMPLAIN TOWERS SOUTH**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Civil da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Palhoça, 25 de novembro de 2022.

Professora e orientadora Caroline Ester Christ, Dra.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Prof. Ricardo Moacyr Mafra, Ms.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Engenheira Civil Gisele Pregonatto

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todos os esforços realizados que me possibilitaram estar onde estou hoje.

Aos amigos que me incentivaram e ajudaram a vencer todos os desafios ao longo dessa jornada.

Aos professores do curso de Engenharia Civil, pelos ensinamentos e experiências transmitidos durante a graduação. Em especial, às professoras Caroline e Fernanda, pelo auxílio durante a realização deste trabalho.

À Universidade do Sul de Santa Catarina por possibilitar a realização de um curso de ensino superior de qualidade.

“Seja a mudança que você quer ver no mundo” (Mahatma Gandhi).

RESUMO

O seguinte trabalho analisou o tipo de solo da ilha de Miami Beach localizada na Flórida. A região é conhecida por suas inundações e rebaixamento do solo, o que a tornou tópico de estudos por diversas universidades americanas. Além disso, por ter sido uma área coberta por manguezais anteriormente ao desenvolvimento urbano, torna o solo muito instável para construções. A pesquisa identificou as características geológicas da região e sua possível influência no desabamento do edifício Champlain Towers South. Com o auxílio de fundamentações teóricas e estudos de universidades, foram formuladas hipóteses a partir dos dados coletados, correlacionando os itens solo, fundação e estrutura, como objeto de investigação da pesquisa. A partir da análise das causas, foi determinado que o colapso parcial da edificação provavelmente ocorreu devido às constantes inundações em garagem do subsolo do edifício, onde a água do mar em contato os elementos estruturais provocaram a corrosão de sua armadura, levando ao colapso da estrutura.

Palavras-chave: Desabamento. Champlain Towers South. Análise das causas.

ABSTRACT

The following work analyzes the soil type of the Miami Beach barrier island located in Florida. The region is known for its floods and sinks, which made it a subject of study by several American universities. In addition, as it was an area dominated by mangroves prior to urban development, it makes the soil very unstable for construction. The research identified the geological characteristics of the region and their possible influence on the collapse of the Champlain Towers South building. With the help of theoretical foundations and university studies, hypotheses were formulated from the collected data, correlating the items soil, foundation and structure, as an object of research investigation. From the analysis of the causes, it was determined that the partial collapse of the building probably occurred due to constant flooding in the underground garage of the building, where sea water in contact with the structural elements caused the corrosion of its reinforcement, leading to the collapse of the structure.

Palavras-chave: Collapse. Champlain Towers South. Analysis of the causes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Período e tipos de construções que desabaram 1980 – 2021.	16
Figura 2 – Estudo da causa de 33 edifícios residências que colapsaram desde 1980.....	17
Figura 3 – Implosão do edifício.....	17
Figura 4 – Antes e depois do colapso da edificação.....	18
Figura 5 – Colapso parcial da edificação.....	19
Figura 6 – Fases construtivas da Torre de Pisa.	20
Figura 7 – O ciclo das rochas.	22
Figura 8 – Distribuição das Rochas nas camadas da crosta terrestre.	23
Figura 9 – Patologias em edificações devido ao colapso do solo.....	27
Figura 10 – Componentes principais de um sistema cárstico.....	28
Figura 11 – Dolina em Cajamar.	29
Figura 12 – Dolina na Guatemala.....	30
Figura 13 – Fundação de um arco de ponte instável devido a falta de estudos geotécnicos.	31
Figura 14 – Interação terreno-fundação-estrutura.	32
Figura 15 – Tipos de ensaio de campo.	33
Figura 16 – Ensaio SPT.....	34
Figura 17 – Tipos de fundações e suas ramificações.....	35
Figura 18 – Principais tipos de fundações profundas: (a) estaca; (b) tubulão; (c) caixão.	36
Figura 19 – Execução da estaca Franki	39
Figura 20 – Recalques absolutos e diferenciais.....	42
Figura 21 – Efeito do recalque diferencial.	42
Figura 22 – Recalque de fundações de pilares internos resultando em fissuras a 45°.	43
Figura 23 – Ilha barreira de Ship Island, EUA.	44
Figura 24 – Movimentação dos sedimentos ao longo da costa.	45
Figura 25 – Fluxograma do processo de análise.....	46
Figura 26 – Condomínio Champlain Towers South.....	48
Figura 27 – Localização de Miami Beach.	50
Figura 28 – Localização do Centro de Convenções de Miami Beach e do Champlain Towers South.....	51
Figura 29 – Localização dos furos e extração das amostras do terreno.	52
Figura 30 – Perfil de sondagem TB-4	53
Figura 31 – Perfil de sondagem B-3.....	54

Figura 32 – Localização das inundações registradas em Miami Beach entre os anos de 1998 – 2012.	56
Figura 33 – Frequência de inundações – ocorrência/ano (a partir dos dados coletados).	57
Figura 34 – Deslocamentos registrados no período de 1993-1999.	58
Figura 35 – Comparação entre áreas com relatos de inundações e subsidência.....	59
Figura 36 – Champlain Towers South.	60
Figura 37 – Champlain Towers South após seu colapso.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sistema unificado de classificação dos solos	25
Tabela 2 – Tipos de Estacas	37
Tabela 3 – Perfil geral do subsolo.	55
Tabela 4 – Parâmetros do solo.....	55

LISTA DE SIGLAS

ML – Silte Inorgânico de Baixa Compressibilidade

OL – Areia ou Silte Orgânico de Baixa Compressibilidade

SM – Areia Siltosa

SP – Areia Mal Graduada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	DELIMITAÇÕES	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	DESABAMENTOS DE EDIFÍCIOS	16
2.1.1	Edifício Palace II	17
2.1.2	Edifício Wilton Paes de Almeida	18
2.1.3	Condomínio Residencial Anêmona	19
2.1.4	Torre de Pisa	20
2.2	SOLO	21
2.2.1	Origem do Solo	21
2.2.1.1	Classificação das Rochas	22
2.2.1.1.1	<i>Principais rochas sedimentares e suas características</i>	23
2.2.1.2	Classificação dos Solos	24
2.2.1.3	Sistema Unificado de Classificação	25
2.2.2	Solos Colapsíveis	25
2.2.2.1	Mecanismos de Colapso	26
2.2.2.2	Identificação de Solos Colapsíveis	26
2.2.2.3	Patologias por Colapso do Solo	27
2.2.2.4	Fundação Profunda como Alternativa	27
2.2.3	Subsidência e dolinas	28
2.2.3.1	Ocorrências	29
2.3	INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS	31
2.3.1	Standard Penetration Test (SPT)	33
2.4	FUNDAÇÕES	35
2.4.1	Fundações Profundas	36
2.4.1.1	Estacas	36
2.4.1.1.1	<i>Estacas pré-moldada de concreto</i>	38
2.4.1.1.2	<i>Estacas de madeira</i>	38

2.4.1.1.3	<i>Estacas Metálicas</i>	38
2.4.1.1.4	<i>Estacas Strauss</i>	38
2.4.1.1.5	<i>Estacas tipo Franki</i>	39
2.4.1.1.6	<i>Estacas Raiz</i>	40
2.4.1.1.7	<i>Estaca Hélice Contínua</i>	40
2.4.1.2	Tubulões	40
2.4.1.2.1	<i>Tubulão a céu aberto</i>	40
2.4.1.2.2	<i>Tubulão a ar comprimido</i>	41
2.4.2	Recalque em fundações	41
2.5	BARREIRAS COSTEIRAS E ILHAS BARREIRAS	44
3	METODOLOGIA	46
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	48
4.1	DESCRIÇÃO DA EDIFICAÇÃO	48
4.1.1	LAUDO ESTRUTURAL DO CONDOMÍNIO	48
4.1.2	EQUIPE DE INVESTIGAÇÃO	49
4.2	LOCALIZAÇÃO DE MIAMI BEACH	49
4.3	FORMAÇÃO DA ILHA-BARREIRA DE MIAMI BEACH	50
4.4	CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO	50
4.4.1	Relatório Geotécnico de um Empreendimento da Cidade	51
4.4.2	Pesquisas de Universidades sobre Recalques e Inundações na região	56
5	RESULTADOS E ANÁLISES	60
5.1	CONSIDERAÇÕES	60
5.2	HIPÓTESES	61
5.2.1	Danos Estruturais e Recalque Diferencial	61
5.2.2	Colapsibilidade do Solo e Erosão Subterrânea	63
5.2.3	Falta de Manutenções e Inundações em Subsolo da Edificação	63
6	CONCLUSÃO	65
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
	REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

O campo de estudo que investiga o comportamento do solo perante a interferência humana, a partir dos diversos tipos de construções, é a Geotecnia. O estudo geotécnico é de grande importância e se faz necessário previamente a elaboração de um projeto de engenharia. Isto se justifica devido a sua característica de suporte às obras, sendo esta uma de suas diversas finalidades, tornando fundamental a análise do solo e das rochas no local a ser executado uma construção.

As informações coletadas a partir de sondagens servem como parâmetros de dimensionamento das fundações de uma obra. Estas se caracterizam como elementos estruturais e exercem a função de transmitir as cargas solicitantes oriundas da superestrutura para o solo. A escolha do tipo de fundação a ser usada em uma construção civil tem grande dependência do tipo de solo do terreno, sendo este de grande impacto na tomada de decisões do projetista. É por esta correlação que se diz indispensável a atuação da Geotecnia nos inúmeros segmentos da engenharia civil.

A falta de conhecimento acerca do assunto, combinado a cultura de desinteresse que culminou durante décadas em relação a esta prática, coloca em risco a segurança de um projeto. O desenvolvimento tecnológico, as mudanças climáticas e a necessidade de novas soluções construtivas, relacionado a maiores exigências de carregamento em construções, exige maior responsabilidade dos profissionais envolvidos no planejamento de um projeto. A negligência dos responsáveis que comumente ignoram as etapas de estudos, relacionadas ao solo e fundações, sujeitam a estrutura a riscos como desabamentos e deslizamentos, além de possibilitar a contaminação do lençol freático e contribuir para problemas ambientais.

Este trabalho apresenta as características geológicas de Miami Beach, onde ocorreu no dia 24 de junho de 2021, o desabamento do edifício Champlain Towers South. Através de pesquisas, principalmente de artigos de universidades e estudos de casos, foram coletadas informações tanto da região quanto dos laudos técnicos da construção. Estas foram utilizadas nos tópicos deste trabalho, para discorrer sobre possíveis influências do constante afundamento e inundações que a região enfrenta, com o desabamento do edifício. Em conjunto, foi feita indagações sobre as causas desta tragédia relacionadas ao solo da região e aos problemas estruturais que a edificação apresentava.

1.1 JUSTIFICATIVA

O principal motivo para a escolha do tema foi a tragédia que ocorreu com o edifício Champlain Towers South neste ano, resultando em 98 vítimas que chegaram a óbito devido ao desabamento parcial da construção. Justamente por este assunto estar atrelado a questões que envolvem a área da Geotecnia e fundações, partiu-se do interesse em aprofundar os conhecimentos nestes tópicos que englobam principalmente a segurança em projetos de engenharia civil.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar as informações coletadas a respeito do desabamento da edificação, de modo a correlacioná-las com aspectos geológicos e elementos estruturais do edifício, verificando se estes contribuíram para a tragédia.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Coletar informações a respeito da obra e possíveis causas para o desabamento;
- Reunir informações a respeito das características geológicas e geotécnicas da ilha de Miami Beach;
- Comparar o evento com estudos de casos de edifício que desabaram;
- Avaliar os conceitos referentes às características do solo e fundações;
- Analisar os tipos de patologias causados pela relação solo/estrutura;
- Estabelecer uma relação entre problemas no solo que possam ter causado o colapso da estrutura.

1.3 DELIMITAÇÕES

A pesquisa busca alcançar seus objetivos através do estudo de fontes bibliográficas, reunindo informações pertinentes ao tema principal, que é justamente a investigação do solo na região e sua influência na construção analisada.

Posteriormente, o conhecimento normativo em conjunto com o referencial teórico, servirá como base para a realização de análises com os dados obtidos da região de estudo, respondendo a problemática proposta deste trabalho.

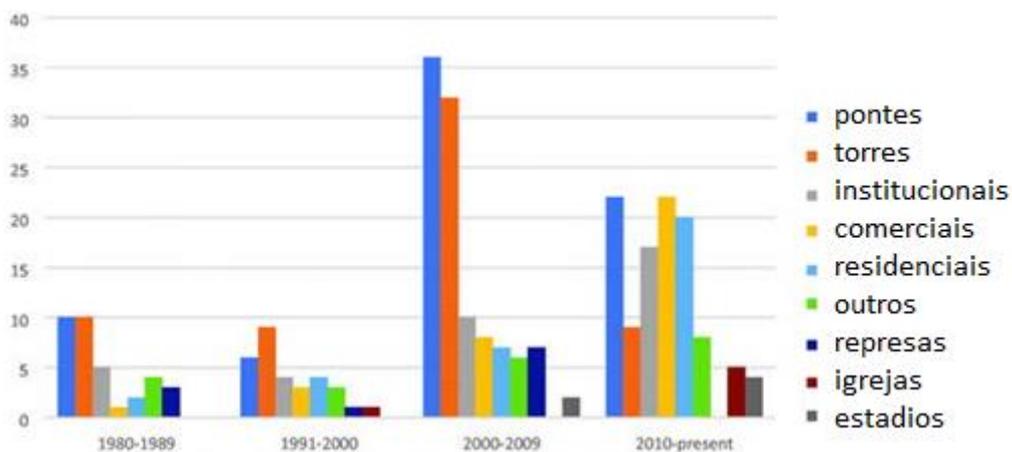
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo dispõe de uma apresentação geral dos elementos que compõem este trabalho, através da revisão bibliográfica dos conteúdos e de parâmetros normativos, com intuito de fundamentar a pesquisa. Os tópicos abordados incluem desabamentos de edifícios, a formação do solo e suas características, introdução às investigações geotécnicas, tipos de fundações profundas e seus aspectos e caracterização dos recalques e patologias resultantes deste fenômeno.

2.1 DESABAMENTOS DE EDIFÍCIOS

De acordo com Simons et al. (2022), no período entre 1980 e 2021, houve o desabamento de 281 construções. Esse aumento – nos últimos quarenta anos – teve seu ápice entre os anos de 2000 e 2009, onde pontes e torres de telefonia foram os tipos de construções que mais sofreram queda. Atualmente, houve aumento significativo de desabamentos de edifícios comerciais e residenciais. A Figura 1 apresenta os tipos de construções que colapsaram no período de estudo.

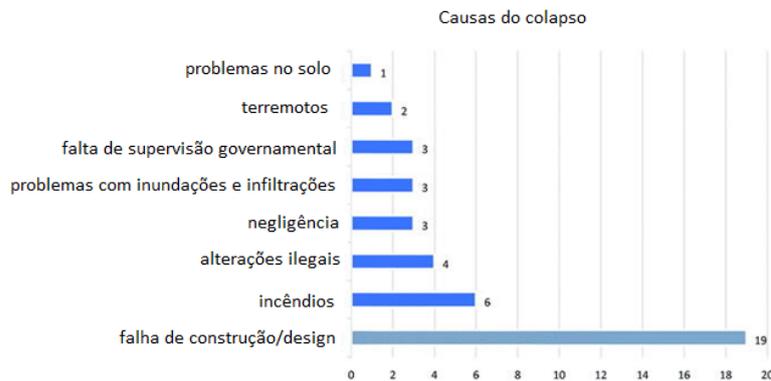
Figura 1 – Período e tipos de construções que desabaram 1980 – 2021.



Fonte: adaptado de Simons et. al (2022).

Simons et al (2022) verificam que cerca de 45% de 33 edifícios residenciais que colapsaram desde 1980, estavam localizados próximos ao mar e 24% próximos a água doce. O intuito desta pesquisa foi destacar que a água do mar possui efeitos corrosivos em barras de aço no concreto, diminuindo sua resistência e afetando a estrutura. A Figura 2 apresenta as principais causas que levaram ao colapso dos 33 edifícios analisados.

Figura 2 – Estudo da causa de 33 edifícios residências que colapsaram desde 1980.



Fonte: adaptado de Simons et. al (2022).

2.1.1 Edifício Palace II

No ano de 1998, o edifício Palace II – que possuía 22 andares e 172 apartamentos – entrou em colapso estrutural acarretando a morte de oito pessoas no Rio de Janeiro. Segundo o laudo do Instituto de Criminalística Carlos Éboli (ICCE), o que possibilitou a queda parcial do edifício foram erros generalizados do projeto estrutural, na qual 80% dos pilares foram projetados em discordância com as normas técnicas. Além disso, dois destes foram subdimensionados, onde deveriam suportar cargas de 480 toneladas, porém foram dimensionados para cargas de 230 toneladas. Grasselli (2004) ainda acrescenta que os erros de execução contribuíram para o desabamento parcial da edificação.

Após o incidente, peritos e técnicos da prefeitura constataram que o restante da estrutura apresentava diversas fissurações e estalos, o que implicou na decisão de implodir a edificação. A Figura 3 apresenta a implosão do edifício.

Figura 3 – Implosão do edifício.



Fonte: G1 (2022).

Segundo a normativa ASCE 7-05 (2005), o colapso progressivo é definido pela ocorrência de um dano inicial localizado que resulta na ruína de toda ou parte da estrutura. As falhas podem abranger desde erros de projeto até ausência de manutenções em edificações. Portanto, o edifício Palace II é um exemplo de colapso progressivo, pois devido a falha em pilares em conjunto com os erros na execução do projeto e má qualidade de materiais, possibilitou o total colapso da estrutura.

2.1.2 Edifício Wilton Paes de Almeida

Em 2018, o edifício Wilton Paes de Almeida sofreu um incêndio – devido a um curto-circuito no quinto andar - que resultou em seu desabamento total, causando a morte de 7 pessoas e prejuízos em construções vizinhas.

A edificação foi projetada e construída na década de 60 e contava com 24 andares, resistindo aos efeitos do incêndio durante 80 minutos. Comparado a outros casos de edificações em concreto armado que sofreram incêndio – Andraus, Joelma e Grande Avenida – é um tempo relativamente baixo, pois estas perduraram por mais de 4 horas a ação do fogo sem colapsar.

Conforme Pacheco et al (2019), a causa mais provável que desencadeou o colapso da estrutura foi o efeito de torção gerado pelas altas temperaturas. Como o edifício contava com estruturas assimétricas, as deformações térmicas geraram tensões de torção muito acima da resistência da estrutura. É importante destacar que, o projeto estrutural original não foi encontrado pelo autor, onde as suposições feitas foram baseadas em um projeto hipotético. A Figura 4 apresenta a edificação antes e depois de seu colapso.

Figura 4 – Antes e depois do colapso da edificação.



Fonte: G1 (2018).

2.1.3 Condomínio Residencial Anêmona

O condomínio Anêmona foi construído em 1993, possuindo dois blocos – A e B - de quatro andares com o total 48 apartamentos. Sua fundação foi executada com estacas pré-moldadas de concreto armado, cravadas em uma profundidade média de 25 m abaixo do nível inicial do terreno, apoiadas em solo de argila muito mole.

No ano de 2001, o bloco B sofreu desabamento parcial de sua estrutura, causado pela ruptura do seu sistema de sustentação, conforme explica Souza (2003). Foi verificado que as estacas cederam cerca de dois metros, onde a estrutura do edifício se acomodou de forma inclinada, causando desaprumo de 2,5 m entre a base e o topo. A Figura 5 apresenta a edificação após seu colapso parcial.

Figura 5 – Colapso parcial da edificação.



Fonte: G1 (2018).

Antes do incidente, foram realizados serviços de aterramento na área da edificação, com o intuito de prevenir possíveis transbordamentos e corrigir recalques sofridos no piso da garagem – cerca de 30 cm. Após o colapso da estrutura, foi concluído que o sistema de fundação em conjunto com o aterro localizado no edifício – aumento do carregamento - não estavam adequados para o tipo de solo do terreno. Com exceção do pavimento térreo, os demais pavimentos se mantiveram íntegros, sem patologias graves, de acordo com Souza (2013).

Além disso, a edificação continuou a apresentar recalque – em torno de 5 cm por mês – após seu colapso parcial, o que indicou a possibilidade de ocorrência do mesmo fenômeno no bloco A.

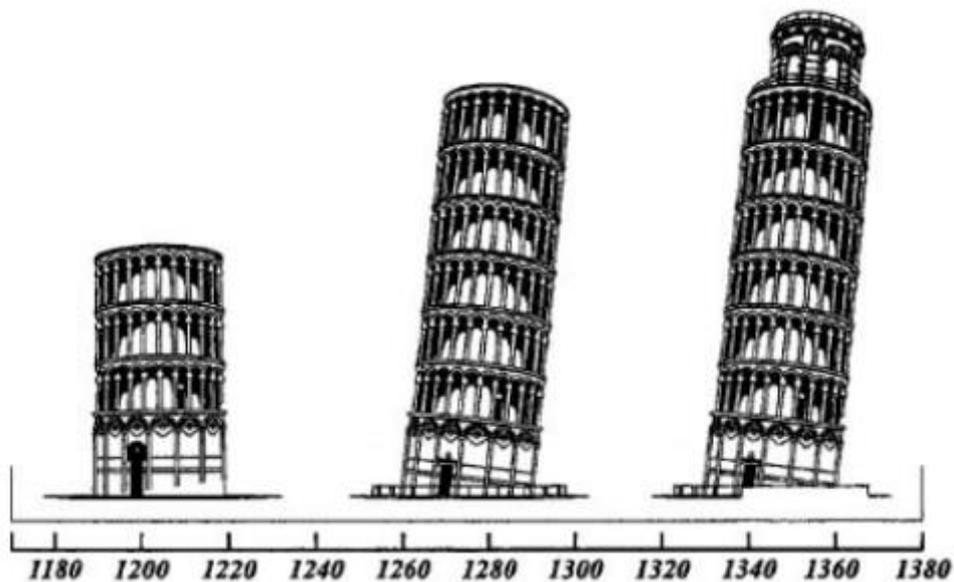
2.1.4 Torre de Pisa

A Torre de Pisa é um dos casos mais famosos de recalque de fundação, devido a inclinação significativa de sua estrutura que surgiu ao longo de suas fases construtivas.

Sua construção teve início no ano de 1173, sendo executada sobre solo mole (argila). O excesso de cargas da edificação em conjunto com a baixa rigidez da argila marinha, promoveu um grande adensamento do solo sob suas fundações, resultando em um elevado recalque diferencial.

Somente no final do século XIV e após diversas tentativas sem êxito de aprumar a estrutura, foi concluído a obra. A Figura 6 apresenta a inclinação da Torre de Pisa ao longo de seu período construtivo.

Figura 6 – Fases construtivas da Torre de Pisa.



Fonte: Adaptado de Burland et al. (2009).

É importante ressaltar que, a inclinação da torre chegou a atingir valores entre 4.9° a 5.5° até o século XX, sob risco de desmoronamento. Com isso, foram necessários serviços de restauração para estabilizar a torre, como o reforço da fundação e o reaprumo da estrutura, realizados entre 1993 e 2001.

2.2 SOLO

A partir do intemperismo de rochas e seu ciclo, há a formação de partículas minerais que se acumulam e tem como característica a presença de água ou ar nos vazios que as separam. Assim, todo arranjo de partículas que possuem estas características são considerados como solo (KNAPPETT e CRAIG, 2012).

Segundo Pena (2020), o solo abrange a parte superior da crosta terrestre, tendo em sua composição material orgânico ou mineral inconsolidado, essencial para as atividades produtivas do ser humano e sustentação da natureza.

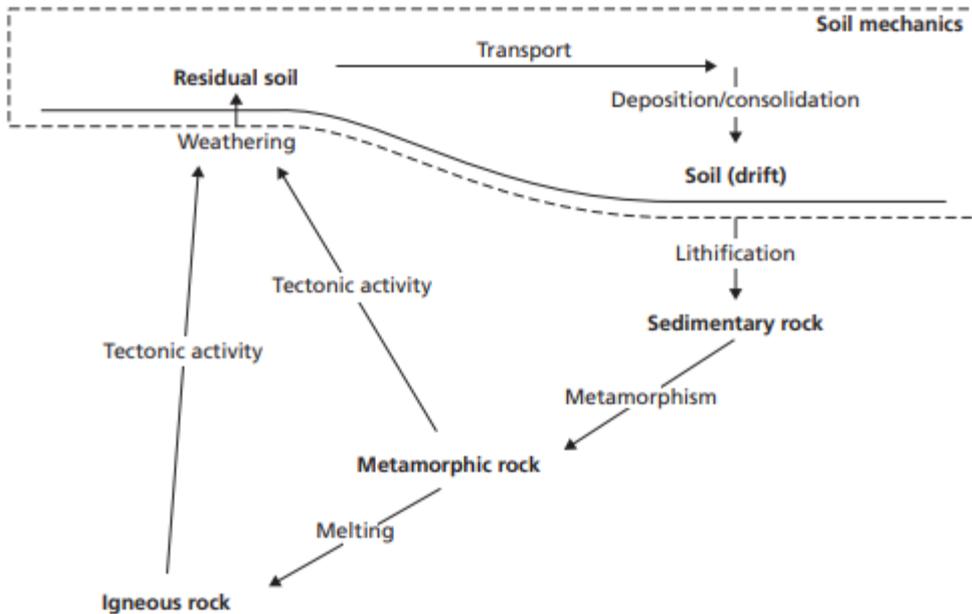
2.2.1 Origem do Solo

Das (2014) explica que o solo é proveniente da erosão das rochas e suas propriedades são definidas pelos resíduos minerais do tipo de rocha que sofreu este processo.

Caputo (2015) complementa que o intemperismo das rochas pode ocorrer de duas formas: a partir da decomposição química ou desintegração mecânica. O primeiro aspecto corresponde pela alteração química ou mineralógica da rocha matriz, através dos processos de oxidação, carbonatação, ação de bactérias e hidratação, tendo como o principal agente causador a água. Já o segundo, sofre influência de alguns elementos como a água, vegetação, ação do vento e temperatura, sem haver alteração na composição da rocha, resultando em sua desagregação em diferentes formatos como areias, pedregulhos, siltes e em alguns casos, argilas.

A Figura 7 representa o ciclo das rochas, dispondo das etapas que envolvem a formação do solo.

Figura 7 – O ciclo das rochas.



Fonte: Knappett e Craig (2012).

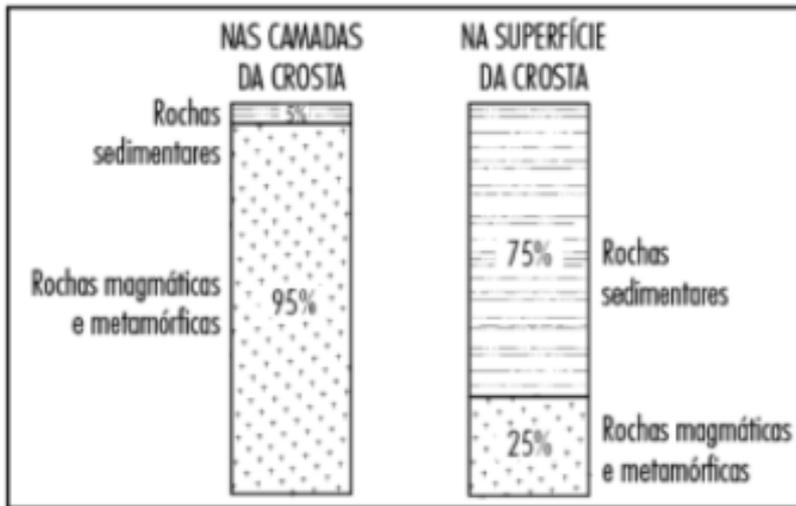
2.2.1.1 Classificação das Rochas

Das (2014) classifica as rochas a partir de sua origem em três tipos a seguir:

- a) **Ígneas:** o magma localizado no fundo do manto terrestre é expelido e então resfriado, formando este tipo de rocha, como o granito, basalto, diorita, sienita e peridotito;
- b) **Metamórficas:** as rochas expostas ao calor e pressão, sofrem alterações em sua composição, dando origem a este tipo de rocha, como o gnaisse, o mármore e a ardósia;
- c) **Sedimentares:** são formadas devido ao acúmulo de resíduos resultantes do intemperismo, como a areia, silte, pedregulho e argila. Em conjunto com os agentes de cimentação que interferem na sua compactação, formam as rochas sedimentares como o calcário, arenito, argilito e gesso.

Queiroz (2016) salienta que há maior presença de rochas magmáticas e metamórficas no interior da crosta terrestre, enquanto em sua superfície predomina rochas sedimentares. A Figura 8 apresenta esta distribuição em porcentagens.

Figura 8 – Distribuição das Rochas nas camadas da crosta terrestre.



Fonte: Queiroz (2016).

2.2.1.1.1 Principais rochas sedimentares e suas características

Segundo Queiroz (2016), é necessária a compreensão das características das rochas sedimentares pelo engenheiro civil devido a sua predominância na superfície da crosta terrestre, onde desempenha papel de suporte para grande parcela das construções. A seguir estão algumas das principais rochas sedimentares e suas definições segundo o autor.

A turfeira é caracterizada como sedimento orgânico, formada por argilas e matéria orgânica em decomposição, comumente encontrada em locais com curso d'água e muita vegetação, como pantanais. Sua coloração é composta de tons escuros, sendo este tipo de sedimento muito frequente em obras de engenharia. São consideradas porosas e saturadas de água, possuindo baixa resistência à compressão e alta deformidade, enquadrando-se na categoria de solos moles.

Os arenitos têm resistência à compressão simples muito variada, sofrendo influência do tipo de cimento que liga suas partículas de areia e do grau de alteração. Por exemplo, o arenito silicificado, ou seja, ligado por um cimento silicoso, atinge resistência à compressão simples de 180 MPa. O diâmetro de suas partículas varia entre 0,06 mm e 2 mm, sendo esta uma das poucas diferenças em relação ao siltitos, que apresentam granulometria entre 0,002 mm e 0,06 mm.

Os argilitos podem ser classificados como todas as partículas menores que 0,002 mm, podendo ser siltosos, arenosos ou folhelhos. Considerados sedimentos finos, sofrem adensamento ao longo do tempo causado pelas camadas superiores do solo. Um dos principais problemas na construção civil é ocasionado pela argila expansiva, capaz de absorver água e através do processo de empastilhamento, provocar fissuras, escorregamentos e desabamentos.

Os calcários são formados quando há o depósito de organismos mortos em conjunto com suas carapaças ou carbonato de cálcio em um local marinho. Pode apresentar em sua composição carbonato de magnésio, atribuindo à característica de reação fraca quando em contato com ácido clorídrico em água destilada.

2.2.1.2 Classificação dos Solos

Caputo (2015) define os solos em relação a sua origem e formação da seguinte forma:

- a) Residuais:** se mantêm no mesmo local da rocha matriz que o originou. Exemplo destes são os solos lateralíticos, expansivos e porosos.
- b) Sedimentares:** sofre influência de elementos como a água, o vento, a gravidade e geleiras, que o transportam para outras localizações. As características deste solo variam conforme a distância percorrida e o tipo de agente transportador.
- c) Orgânicos:** provenientes da decomposição de matéria orgânica seja ela de natureza animal ou vegetal.

Para Vargas (1978), é preciso analisar somente a constituição inicial dos solos para realizar sua classificação, levando em consideração aspectos como: o clima e a topografia da região, os processos orgânicos, a natureza da rocha matriz e o agente intempérico de transporte. Além disso, explica a possibilidade da atuação de múltiplos processos de formação do solo em um perfil, sendo necessário considerar apenas o último processo como objeto de estudo.

Pinto (2006) explica que existem inúmeras formas de classificar o solo, como por exemplo, a partir de sua evolução, sua origem, pelo preenchimento de vazios, pela presença ou falta de matéria orgânica em sua composição. Destes citados, as classificações que levam em conta a origem e a evolução do solo possuem maior utilidade devido às informações complementares que apresentam. Igualmente, ressalta a importância dessa divisão na área da engenharia, cuja finalidade é auxiliar as investigações geotécnicas na determinação do comportamento dos solos.

2.2.1.3 Sistema Unificado de Classificação

Caputo (2015) explica que o sistema unificado de classificação (USC) tem como propósito a identificação dos solos, classificando-os em três grupos: solos grossos, solos finos e turfas. A Tabela 1 apresenta o resumo do Sistema Unificado de Classificação dos Solos através de sua classificação geral, tipos principais e símbolos.

Tabela 1 – Sistema unificado de classificação dos solos

SISTEMA UNIFICADO DE CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS (USC) (Resumo)		
Classificação geral	Tipos principais	Símbolos
SOLOS GROSSOS (Menos que 50% passando na # 200)	Pedregulhos ou solos pedregulhosos	GW, GP, GM e GC
	Areias ou solos arenosos	SW, SP, SM e SC
SOLOS FINOS (Mais que 50% passando na # 200)	Siltosos ou argilosos	Baixa compressibilidade (LL < 50) ML, CL e OL
		Alta compressibilidade (LL > 50) MH, CH e OH
SOLOS ALTAMENTE ORGÂNICOS	Turfas	Pt

Fonte: Caputo (2015).

2.2.2 Solos Colapsíveis

Os solos colapsíveis podem ser caracterizados como solos não saturados que, quando submetidos a inundações – com ou sem carregamento adicional – acabam por sofrer um rearranjo de suas partículas que resultam em sua perda de volume, de acordo com Clemence e Finbarr (1981).

Segundo Reginatto e Ferrero (1973), os solos colapsíveis são aqueles que não suportam o seu peso próprio, quando expostos a inundações, e colapsam. Jennings e Knight (1975) explicam que o termo colapso, se refere aos recalques sofridos em uma fundação – além do admissível – devido ao umedecimento de um solo não saturado. Através do rearranjo de suas partículas, há uma grande redução de seu volume quando próximo à sua saturação total, desencadeando seu colapso.

2.2.2.1 Mecanismos de Colapso

Mitchell e Coutinho (1991) descrevem a necessidade de três fatores para que ocorra o colapso:

- a. Estrutura parcialmente saturada, aberta e potencialmente estável;
- b. Perda de resistência nas ligações intergranulares pelo efeito da água;
- c. Aplicação de tensões que levam a quebra da estrutura metaestável.

Para Dudley (1970), a perda de resistência ao cisalhamento dos vínculos que conferem a estrutura destes solos é o principal fator que provoca o colapso. Estes fornecem uma resistência adicional temporária ao solo, provenientes do efeito da sucção (quando são formados por areia e silte), pontes de argila (quando formados por argila) e/ou ligações cimentantes, conforme explica Clemence e Finbar (1981).

2.2.2.2 Identificação de Solos Colapsíveis

Para identificação de solos colapsíveis, são realizados ensaios laboratoriais de compressão edométrica, através da indução ao colapso por inundação do solo ou pelo comparativo das curvas de compressão do solo saturado e em condição natural.

Ensaio de campo também podem ser empregados para a identificação desses solos, através de cargas de prova em placa, ensaio dilatométrico e ensaios de penetração de cone.

Além disso, é possível analisar o comportamento colapsível do solo a partir de conceitos empíricos, fundamental nas etapas iniciais de investigação, servindo como auxílio às investigações mais detalhadas.

2.2.2.3 Patologias por Colapso do Solo

Este comportamento típico dos solos colapsíveis esclarece a estabilidade de fundações ao longo do tempo, até que haja seu umedecimento pela presença de água, causando recalques repentinos. Quando ultrapassados os recalques admissíveis para fundações, podem causar danos estruturais às construções, conforme descreve Aoki (2009). A Figura 9 apresenta exemplos de patologias em edificações devido ao recalque por colapso do solo.

Figura 9 – Patologias em edificações devido ao colapso do solo.



Fonte: Rodrigues (2007).

2.2.2.4 Fundação Profunda como Alternativa

Para minimizar o efeito das deformações por colapso em obras de engenharia, são utilizadas fundações profundas como alternativas para regiões que apresentem solos colapsíveis, devido a esta colapsibilidade ser recorrente em camadas superficiais do solo.

2.2.3 Subsidiência e dolinas

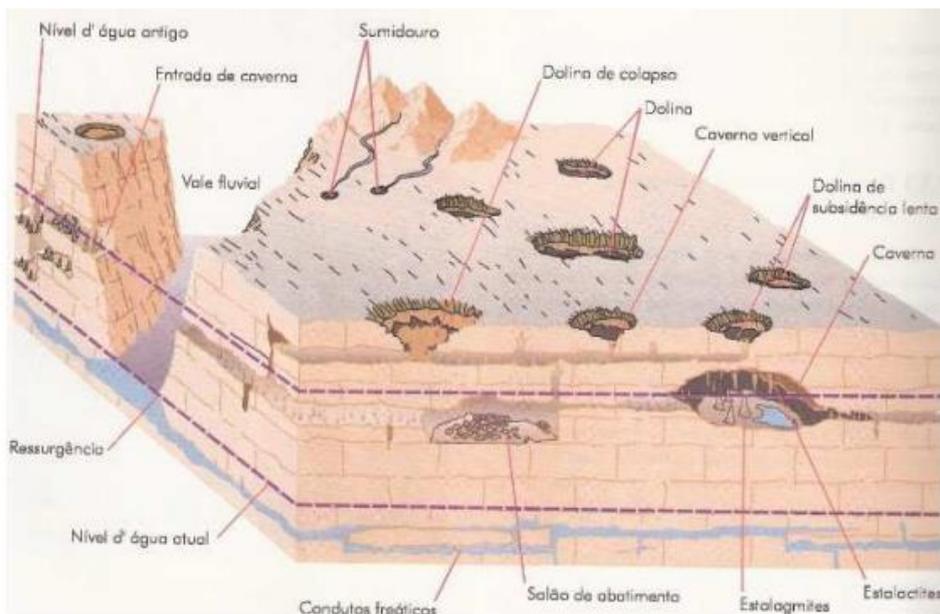
A subsidiência é definida como o rebaixamento da superfície do solo, causada por alterações em suas camadas subterrâneas.

Mingnorange (2000) divide os mecanismos que causam a subsidiência do solo em cinco grupos:

- a) Devido à hidrocompactação;
- b) Devido à dissolução de rochas e sais;
- c) Devido à extração de água subterrânea;
- d) Devido a extração de petróleo ou gás;
- e) Devido à atividade mineira.

A subsidiência devido à dissolução de rochas e sais ocorre devido ao fenômeno da carstificação, onde acontece a dissolução de rochas calcárias ou carbonáticas (calcário, dolomito, mármore) pelas águas subterrâneas e superficiais. É comum em regiões com formação de carste, onde o fluxo da água dissolve os compostos calcíferos e formam cavidades em subsolo com profundidades variáveis, conforme explica Teixeira et al (2000). A Figura 10 apresenta os principais componentes em um sistema cárstico.

Figura 10 – Componentes principais de um sistema cárstico.



Fonte: Teixeira et al (2000).

Os relevos cársticos são caracterizados por dolinas, sumidouros e vales de dissolução. O termo dolina se refere a depressões circulares – ou crateras - que se abrem no solo, formadas pela dissolução química das rochas calcárias abaixo da superfície, possuindo formato semelhante a um funil. Ou seja, a formação ou o colapso destas dolinas preexistentes em regiões calcárias, podem resultar na subsidência do terreno.

De acordo com Cabral et al (2006), os principais problemas ambientais que se associam a este tipo de relevo são a poluição da água subterrânea e problemas de fundação em construções (assentamento diferencial, erosão subsuperficial e colapso da superfície do terreno devido a cavidades subterrâneas). O autor ainda explica que a combinação do gás carbônico na atmosfera com a água da chuva facilita a ocorrência deste fenômeno, visto que promovem um meio ácido capaz de dissolver as rochas carbonáticas.

2.2.3.1 Ocorrências

No ano de 1986, na cidade de Cajamar em São Paulo, uma cratera de 10 metros de diâmetro e 10 metros de profundidade surgiu na região, sendo a possível causa o colapso de uma dolina.

O solo da área continha calcário, o que contribuiu para este evento, visto que elementos carbonáticos em conjunto com a água acabam por se dissolver e formar erosões (TEIXEIRA Wilson, et. al. 2000). Além disso, o autor explica que em conjunto com a água, é necessário a presença de ácidos – provenientes de combustíveis fósseis ou oxidação de sulfetos - que reagem com os minerais de rochas e causam sua dissolução e remoção. A Figura 11 apresenta a cratera que se formou em Cajamar.

Figura 11 – Dolina em Cajamar.



Fonte: G1 (2010).

É importante destacar que, a extração d'água subterrânea através de poços – para uso industrial – foi o que desencadeou o fenômeno, causando o rebaixamento do lençol freático. Como consequência, o solo perdeu parte de sua capacidade de suporte, onde era desempenhado pela água que ocupava os vazios existentes nos calcários da região.

A Figura 12 apresenta o mesmo fenômeno ocorrido na cidade da Guatemala, onde o solo também possuía rochas calcárias que estavam sujeitas a passagem de água no decorrer dos anos.

Figura 12 – Dolina na Guatemala



Fonte: G1 (2010).

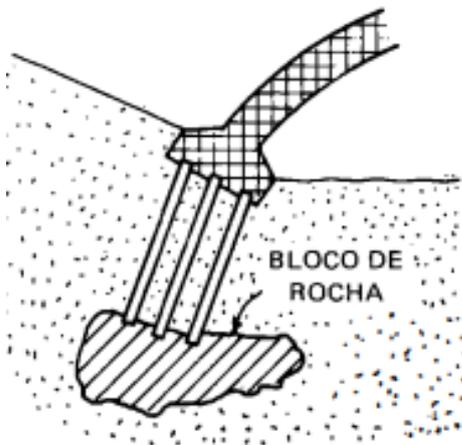
Assim, para avaliar os riscos geotécnicos em áreas com riscos de rebaixamento superficial, é preciso ações preventivas que evitem a ocupação inadequada do solo nestas áreas. Para isso, Nadal et al (2001) sugeriu em seus estudos os seguintes critérios que devem ser considerados durante a avaliação de susceptibilidade de uma determinada área com risco de subsidência:

- a) Investigações específicas de geologia e geomorfologia que verifiquem a existência de carste na região, com o intuito de identificar sua natureza e a localização espacial de calcários na área.
- b) Levantamento e análise de dados referente à topografia, hidrologia, ocupação do solo;
- c) Acompanhamento da evolução de cavidades que existam próximas a superfície;
- d) Analisar mudanças no nível da superfície do solo, indicados por fissurações em edificações ou desnível em pavimentos.

2.3 INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS

É indispensável às investigações geotécnicas durante os estudos do projeto para dimensionamento e execução de fundações de estruturas. A falta de conhecimento do terreno coloca em perigo toda a construção, tornando-a instável e suscetível a deslocamentos dos elementos que servem de apoio as estacas. A Figura 13 mostra este caso, onde a fundação de uma ponte está apoiada sobre um bloco de rocha, erroneamente caracterizado como um maciço rochoso (CAPUTO, 2015).

Figura 13 – Fundação de um arco de ponte instável devido a falta de estudos geotécnicos.



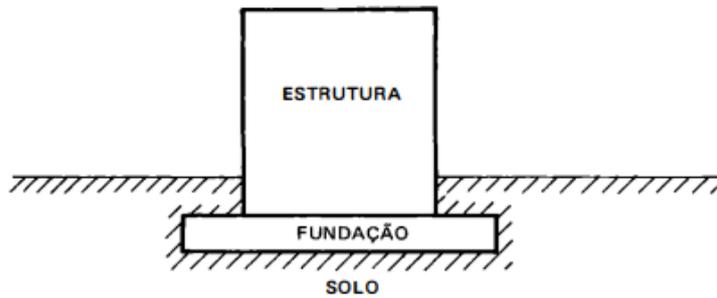
Fonte: Caputo (2015).

Pinto (2006) explica a necessidade do reconhecimento dos solos que atuam nos projetos de engenharia, através da identificação e classificação de suas camadas para avaliação de seu estado e das propriedades pertinentes à engenharia, assim como para eventual amostragem utilizada em ensaios especiais.

Caputo (2015) acrescenta que o intuito da prospecção do solo é determinar a interação do terreno com a estrutura com o auxílio da fundamentação científica, a fim de evitar problemas como recalque e possíveis rupturas do terreno. A Figura 14 demonstra essa interação. Portanto, busca- manter a relação de segurança-custo, agregando maior estabilidade ao projeto e ao mesmo tempo garantir maior economia na obra.

O estudo do subsolo se faz essencial para o dimensionamento adequado de fundações, assegurando custos inferiores em comparação aos gastos necessários que devem ser dispostos para reparar fundações projetadas incorretamente, onde este representa cerca de 3% a 10% do custo total da construção enquanto a outro acresce até 10 vezes o valor da fundação apropriada (BRITTO, 1987).

Figura 14 – Interação terreno-fundação-estrutura.



Fonte: Caputo (2015).

Os prejuízos de uma investigação geotécnica incompleta, aliada com a falta de interpretação dos resultados obtidos, podem ser: impactos ambientais, gastos excedentes em alterações construtivas, exposição da estrutura a riscos de colapso, incompatibilidade no cronograma devido a erros no projeto (US Army Corps of Engineers, 2001).

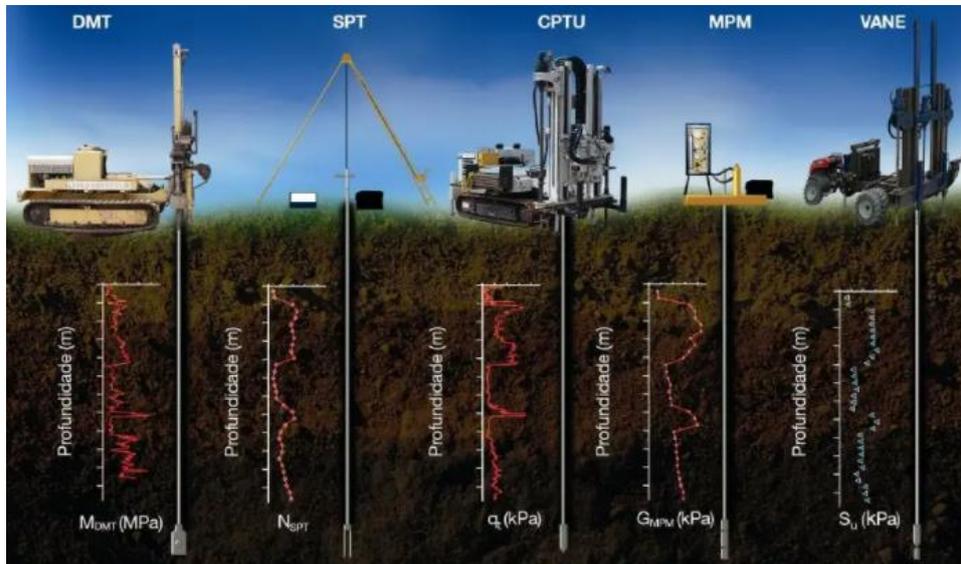
Hachich et al. (2019) afirma que é preciso a execução de ensaios in situ para a coleta de amostragem ou para processos de identificação e classificação dos solos. Em contrapartida, as propriedades do solo pertinentes à engenharia podem ser determinadas tanto em ensaios de campo como em laboratório.

A seguir está à relação dos ensaios de campo com mais relevância no mundo:

- Standard Penetration Test (SPT);
- Standard Penetration Test com medidas de torque (SPT-T);
- Ensaio de Penetração de Cone (CPT);
- Ensaio de Penetração de Cone com medidas das pressões neutras (CPT-U);
- Ensaio de Palheta – Vane Test;
- Pressiômetros (de Menard e auto-perfurantes);
- Dilatômetro de Marchetti;
- Ensaios de carregamento de placa – provas de carga;
- Ensaios geofísicos (Cross-Hole).

A Figura 15 reflete uma parcela dos principais tipos de ensaio de campo citados.

Figura 15 – Tipos de ensaio de campo.



Fonte: Schnaid e Odebrecht (2012).

2.3.1 Standard Penetration Test (SPT)

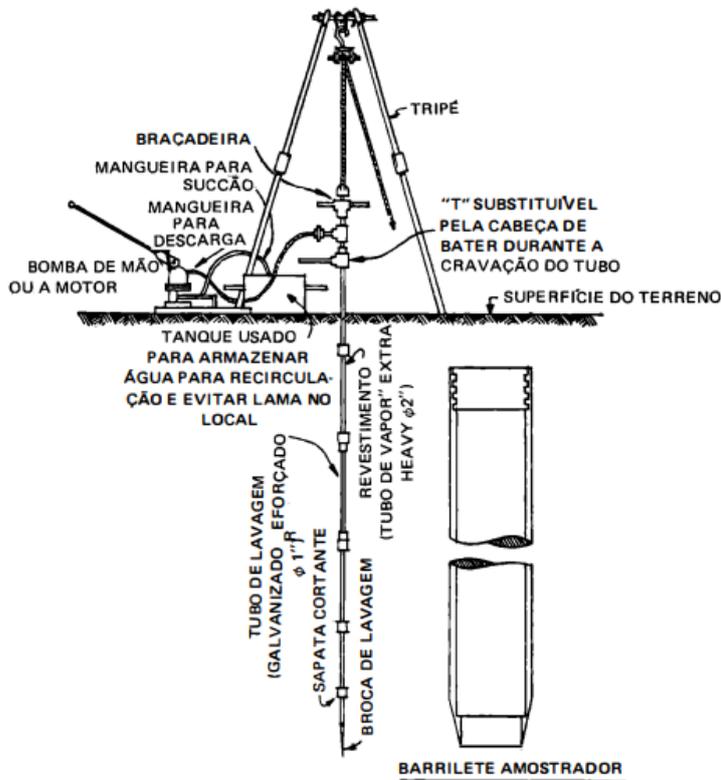
Segundo Knappett e Craig (2012), o Standard Penetration Test (SPT) é um dos mais antigos métodos de ensaio de campo. Apesar disso, sua utilização é extremamente popular ao redor do mundo devido sua praticidade e baixo custo. A norma americana que regulamenta este ensaio é a ASTM D1586.

O procedimento pode ser associado a uma sondagem a percussão, que tem como função realizar a amostragem do solo, agregada ao ensaio de penetração dinâmica, caracterizado por medir a resistência do solo ao longo das perfurações. Os objetivos finais a serem alcançados são: determinar o tipo de solo que será extraído a cada metro perfurado, determinar a resistência do solo em relação à cravação do mostrador e conhecer o nível da água ao longo do trecho (HACHICH et al. 2019).

Schnaid e Odebrecht (2012) acrescentam que o ensaio é utilizado na determinação de solos coesivos e rochas brandas, servindo como indicativo da densidade de solos granulares. Além disso, os resultados do SPT são comumente utilizados em projetos de fundações diretas e profundas, principalmente no Brasil.

Caputo (2015) discorre o processo de maneira sucinta, onde um barrilete amostrador dentro de um tubo de sondagem, é cravado 45 cm no terreno através de golpes de um elemento com massa, altura de queda de 75 cm e peso de 65 kg. No primeiro momento, há a penetração de 15 cm no solo e após, registra-se o número de golpes aplicados para a penetração dos 30 cm restantes, sendo necessário fazer o registro individual a cada 15 cm. A Figura 16 apresenta o conjunto dos equipamentos que constituem o ensaio de SPT.

Figura 16 – Ensaio SPT.



Fonte: Caputo (2015).

2.4 FUNDAÇÕES

A fundação é o elemento estrutural que nasceu da necessidade de transmitir as cargas provenientes de uma construção ao solo (MILITITSKY, CONSOLI e SCHNAID, 2015).

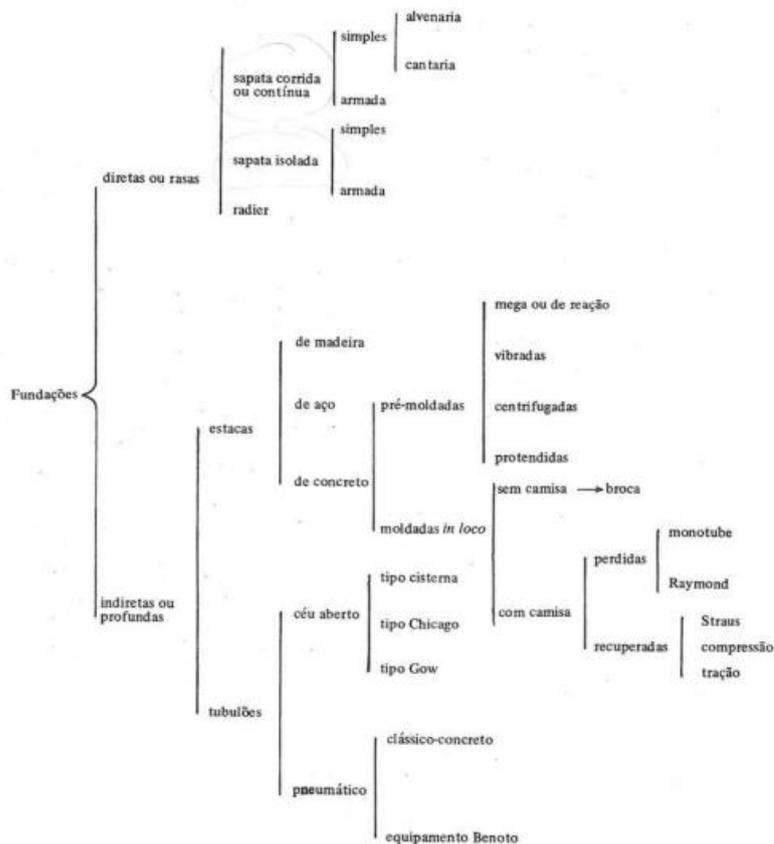
Azeredo (1997) classifica os tipos de fundações em dois grupos:

- a) Fundações rasas ou diretas;
- b) Fundações profundas ou indiretas.

Para a escolha do tipo de fundação deve-se levar em consideração em primeiro momento, o aspecto técnico, relativo à segurança da estrutura em relação a rupturas e recalques aceitáveis. Em seguida, analisam-se os critérios econômicos e de mercado, relacionados aos equipamentos, materiais e prazos. Além disso, não se devem excluir outros fatores como as características da obra e suas cargas, a natureza do terreno e construções vizinhas, restrições ambientais, metodologia e soluções a serem utilizadas na execução de uma fundação (HACHICH et al. 2019).

A Figura 17 retrata as ramificações das fundações diretas e indiretas.

Figura 17 – Tipos de fundações e suas ramificações.



Fonte: Azeredo (1997).

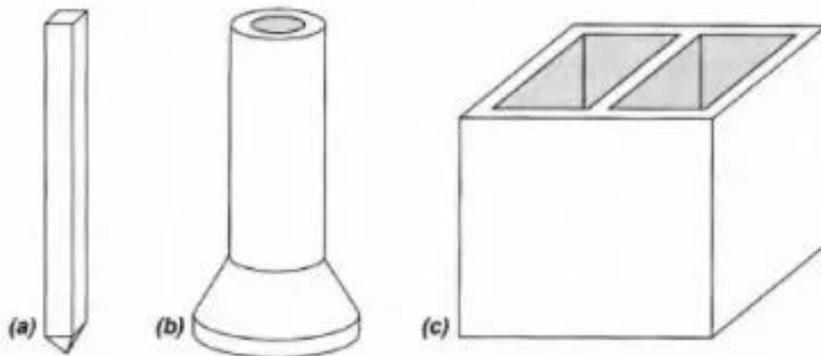
2.4.1 Fundações Profundas

Trata-se do elemento de fundação caracterizado por transmitir a carga da superestrutura para o terreno por meio da resistência de ponta (base), pela resistência de fuste (lateral) ou pela combinação de ambas. Além disso, a base ou o fuste devem estar assentados em profundidade superior ao dobro de sua menor dimensão e no mínimo três metros. Esta definição é dada pela NBR 6122 que regula o projeto e execução de fundações (ABNT, 2019).

Velloso e Lopes (2010) acrescentam que os elementos de fundação profunda podem ser classificados em três grupos, como mostra na Figura 18:

- a) Estaca: sua execução se dá por equipamentos ou ferramentas, podendo ser por cravação, escavação ou mista;
- b) Tubulão: possui formato cilíndrico, onde há a necessidade da descida de um operador ou técnico durante etapas de sua execução, sendo esta a diferença entre o processo envolvendo estacas;
- c) Caixão: possui formato prismático, na qual sua superfície é concretada e sua instalação é por escavação interna.

Figura 18 – Principais tipos de fundações profundas: (a) estaca; (b) tubulão; (c) caixão.



Fonte: Velloso e Lopes (2010).

2.4.1.1 Estacas

Tem como função transmitir as cargas e esforços da estrutura para as camadas profundas do terreno. Sua utilização ocorre quando há incompatibilidade entre o recalque e a estrutura a ser construída com uso de fundação direta. (AZEREDO, 1997).

Hachich et al. (2019) relaciona as estacas em duas categorias:

a) Estacas de deslocamento: quando não há a retirada de solo durante sua inserção no terreno. Exemplos destas são: estacas pré-moldadas de concreto armado, metálicas, de madeira, tubos de aço de ponta fechada, tipo Franki, Omega, entre outras.

b) Estacas escavadas: há a remoção de material através da perfuração do terreno, podendo ou não ter revestimento ou utilização de fluido estabilizante. As principais estacas deste grupo são: tipo broca, tipo Strauss, os estacões, as barretes, as hélices contínuas e as estacas injetadas.

Para Velloso e Lopes (2010) é possível a adoção de uma terceira categoria, chamada de “sem deslocamento”. Esta é caracterizada por alguns processos de estacas escavadas na qual não há remoção do solo, em conjunto com ações para reestabelecer as tensões geostáticas durante a concretagem. A Tabela 2 dispõe dos tipos de estacas conforme as três categorias mencionadas.

Tabela 2 – Tipos de Estacas

Tipo de execução	Estacas
De deslocamento	Grande (i) Madeira, (ii) pré-moldadas de concreto, (iii) tubos de aço de ponta fechada, (iv) tipo Franki, (v) microestacas injetadas
	Pequeno (i) Perfis de aço, (ii) tubos de aço de ponta aberta (desde que não haja embuchamento na cravação), (iii) estacas hélice especiais (“estacas hélice de deslocamento”)
Sem deslocamento	(i) Escavadas com revestimento metálico perdido que avança à frente da escavação, (ii) estacas raiz
De substituição	(i) Escavadas sem revestimento ou com uso de lama, (ii) tipo Strauss, (iii) estacas hélice contínua em geral

Fonte: Velloso e Lopes (2010).

2.4.1.1.1 *Estacas pré-moldada de concreto*

Segundo Pereira (2016), são peças de concreto armado ou concreto protendido que são cravadas no terreno por percussão, vibração ou prensagem. Apresentam como característica ótima resistência a compressão e flexão devido a sua armadura longitudinal. Além disso, há um rigoroso controle de qualidade por trás de sua execução em fábrica. Em contrapartida, não perfuram camadas de solos resistentes e geram vibrações no solo durante sua cravação.

2.4.1.1.2 *Estacas de madeira*

Um dos problemas deste tipo de estaca é sua necessidade de estar submersa. Caso contrário, a madeira estará sujeita a um fungo que causa o seu apodrecimento. O eucalipto é a madeira mais utilizada para esse tipo de estaca no Brasil. Suas vantagens são seu baixo custo, manuseio e transporte simples, fácil corte e emenda (AZEREDO 1997).

2.4.1.1.3 *Estacas Metálicas*

Marongon (2018) explica que este tipo de estaca possui uma grande resistência a compressão, devido o aço ser o material utilizado na sua pré-fabricação. Além disso, possui seção mais esbelta em comparação com as estacas de concreto armado, o que acarreta em um deslocamento de volume de solo menor durante a penetração no terreno.

2.4.1.1.4 *Estacas Strauss*

Utiliza-se uma série de equipamentos básicos como um tripé com guincho, tubos de revestimento, instrumento de escavação e um pilão pequeno, sendo a qualidade da execução da estaca atrelada a equipe encarregada pelo processo. (VELLOSO e LOPES, 2010).

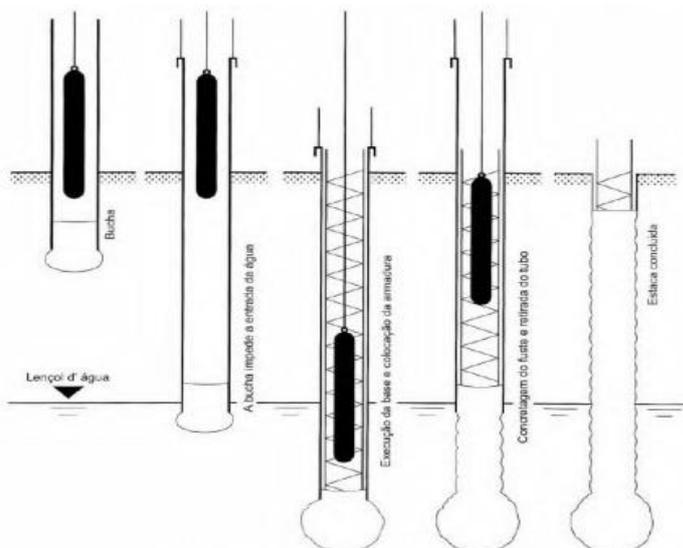
Uma de suas vantagens é não necessitar de bate-estacas, o que evita vibrações prejudiciais aos terrenos vizinhos. Porém, não é possível verificar a qualidade de execução devido à pega do concreto dentro do terreno (AZEREDO, 1997).

2.4.1.1.5 Estacas tipo Franki

São tipos de estacas moldadas in loco com diâmetros que variam entre 30 a 70 cm. Tem como principal característica sua base alargada, de modo a formar um “bulbo”, o que permite um grande aumento na sua capacidade de carga.

Sua execução é feita a partir da cravação de um tubo metálico no solo com o auxílio de bate estaca, onde são aplicados golpes de um pilão. No momento em que se atinge a profundidade de escavação desejada, é realizado o posicionamento da armadura e feito a concretagem do fuste, conforme explica Velloso e Lopes (2010). A Figura 19 apresenta o processo de execução da estaca Franki.

Figura 19 – Execução da estaca Franki



Fonte: Velloso e Lopes (2010).

Suas principais vantagens são a possibilidade de execução em solos moles e abaixo do lençol freático. Além de apresentar boa resistência lateral e de ponta, consegue atingir camadas profundas do solo.

Em contrapartida, sua execução acaba por gerar vibrações excessivas no solo – devido ao bate estaca – possibilitando danos às estruturas vizinhas caso não sejam adotadas medidas de proteção, de acordo com Pereira (2016). Além disso, demanda uma mão de obra especializada por um período longo, o que gera custos elevados. A necessidade de um canteiro de obras com grande espaço para utilização dos equipamentos também acaba por ser uma desvantagem.

2.4.1.1.6 *Estacas Raiz*

A vantagem deste tipo de estaca é a ausência de vibrações durante sua execução, além de permitir este processo em locais de difícil acesso devido às características dos equipamentos, considerados de pequeno a médio porte. Sua moldagem é feita in loco e com o uso de revestimento, o que permite atingir grandes profundidades, atravessando rochas, matacões etc. (GEOFIX, 2020).

2.4.1.1.7 *Estaca Hélice Contínua*

Tem como característica sua execução in loco e a colocação da armadura posteriormente ao lançamento do concreto. O equipamento de trado helicoidal contínuo executa este procedimento, realizando a concretagem da estaca ao mesmo tempo da retirada do solo. Suas vantagens vão desde a ausência de vibrações nos terrenos adjacentes, até sua alta produtividade. Sua desvantagem é seu custo elevado em comparação com os outros processos, além de necessitar de espaço para o equipamento de grande porte (PEREIRA, 2017).

2.4.1.2 Tubulões

Segundo Marangon (2018), os tubulões comportam-se de modo similar a fundações diretas, onde a transmissão das cargas da estrutura para o solo acontece através do contato da base com o solo de apoio (da mesma maneira que sapatas ou blocos).

Hachich et al. (2019) realiza a divisão dos tubulões em dois tipos: a céu aberto, onde normalmente não há revestimento; a ar comprimido, contendo revestimento constituído por camisa de concreto armado ou metálica, em todos os casos.

2.4.1.2.1 *Tubulão a céu aberto*

Caracterizado como um poço aberto no terreno, com diâmetro mínimo de 70 a 80 cm, necessário para a movimentação do operário de maneira adequada (AZEREDO, 1997).

Para Marangon (2018), a execução é indicada para obras com cargas elevadas, além de regiões distantes dos centros urbanos e áreas que não permitem a utilização de técnicas de fundações mecanizadas.

2.4.1.2.2 Tubulão a ar comprimido

Velloso e Lopes (2010) descrevem o procedimento de escavação do fuste, através de equipamento mantém-se a água dentro do tubulão. A utilização da campânula torna-se necessário ao atingir o lençol d'água. Após, injeta-se ar comprimido para permitir a descida dos operários para a execução do alargamento da base. Marangon (2018) cita que este tipo de fundação é apropriado para obras com cargas elevadas, como é o caso de viadutos e pontes, assim como é preciso executar tubulões abaixo do nível d'água.

2.4.2 Recalque em fundações

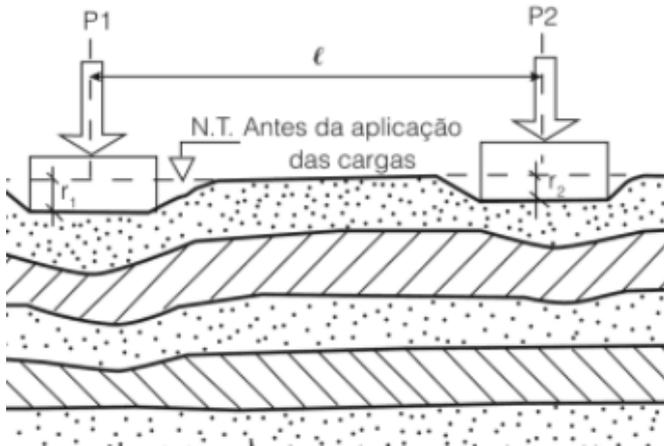
A NBR 6122 determina o recalque como o movimento realizado por um elemento estrutural de maneira descendente, ou seja, a construção sofre rebaixamento por motivos de compactação do solo que sustenta a fundação (ABNT, 2019).

Alonso (2019) define este fenômeno de deslocamento de um elemento de fundação como recalque absoluto. A diferença entre estes em dois pontos de fundações distintos, é chamado de recalque diferencial.

Milititsky, Consoli e Schnaid (2015) afirmam que os solos possuem caráter deformável, resultando nos deslocamentos de fundações sempre que haver carga sob elas. Contudo, esse comportamento deve ser analisado para estabelecer o fator de segurança à ruptura e recalques compatíveis com as cargas solicitantes da construção, ou seja, os recalques admissíveis para a obra.

A Figura 20 representa a situação em que duas fundações sofrem recalques absolutos, r_1 e r_2 , devido a duas cargas P_1 e P_2 . A diferença entre estes recalques resultará no recalque diferencial l .

Figura 20 – Recalques absolutos e diferenciais.

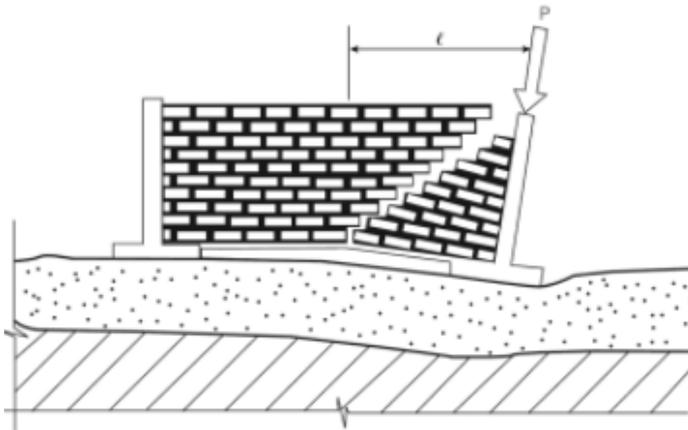


Fonte: Alonso (2019).

A Figura 21 dispõe outra situação em que o recalque diferencial específico provoca distorções a estrutura, gerando fissuras.

Figura 21 – Efeito do recalque diferencial.

$$\frac{\Delta}{l} = \frac{\text{recalque diferencial}}{\text{distância entre os elementos}}$$



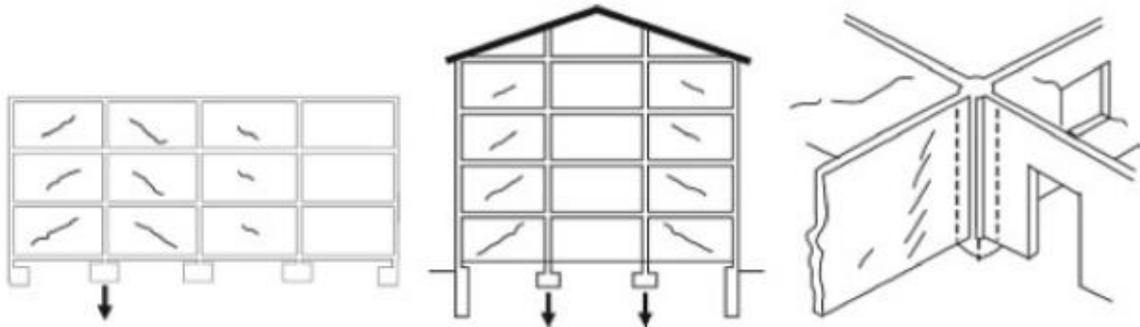
Fonte: Alonso (2019).

Segundo Thomaz (1989), as fissuras provocadas por recalques possuem características específicas, como sua inclinação a 45°, seu tamanho e sua direção. Porém, é possível observar oscilações nas configurações causadas por recalques diferenciais, devido aos diferentes formatos das construções em conjunto com métodos construtivos variados, como a presença de juntas no edifício, cintamentos e afins.

É preciso o monitoramento e controle de recalques para determinar o comportamento real das fundações de forma precisa, sendo complexa a identificação do deslocamento da mesma, a partir de patologias expostas, como a fissuração (MILITITSKY, CONSOLI e SCHNAID, 2015).

A Figura 22 apresenta fissuras resultantes de padrões típicos de deslocamentos.

Figura 22 – Recalque de fundações de pilares internos resultando em fissuras a 45°.



Fonte: Milititsky, Consoli e Schnaid (2015).

2.5 BARREIRAS COSTEIRAS E ILHAS BARREIRAS

O termo barreira costeira foi designado para descrever os corpos sedimentares que emergem próximo à costa. Estes podem estar separados do continente através de corpos d'água ou conectados à linha de costa a partir de uma ou duas extremidades, conforme explica Moura (2018). Comumente tem em sua composição areias, silte e argila, com quantidades variáveis de cascalho.

As ilhas barreiras são o tipo mais comum de barreira costeira, formadas por uma faixa de areia estreita, disposta paralela e próxima à costa, normalmente com duas extremidades livres. A Figura 23 apresenta um exemplo de ilha barreira.

Figura 23 – Ilha barreira de Ship Island, EUA.



Fonte: United States Geological Survey (2004).

Segundo Anna Linhoss (2018), as ilhas-barreiras desempenham papel fundamental contra eventos naturais, como tempestades e furacões. Estas protegem cerca de 10% das costas no mundo, absorvendo os impactos dos fenômenos naturais, reduzindo a energia das ondas de forma a proteger o interior da ilha.

A autora ainda explica que é característica dessas ilhas a erosão do solo e acúmulo de areia em diferentes áreas, onde o percurso natural dos sedimentos se dá em direção à costa. Com o aumento do nível do mar, durante tempestades as ondas do mar acabam por “lavar” a ilha, deslocando a areia da costa para o interior da ilha. A Figura 24 apresenta a movimentação dos sedimentos ao longo da praia.

Figura 24 – Movimentação dos sedimentos ao longo da costa.



Fonte: adaptado de Anna Linhoss (2018).

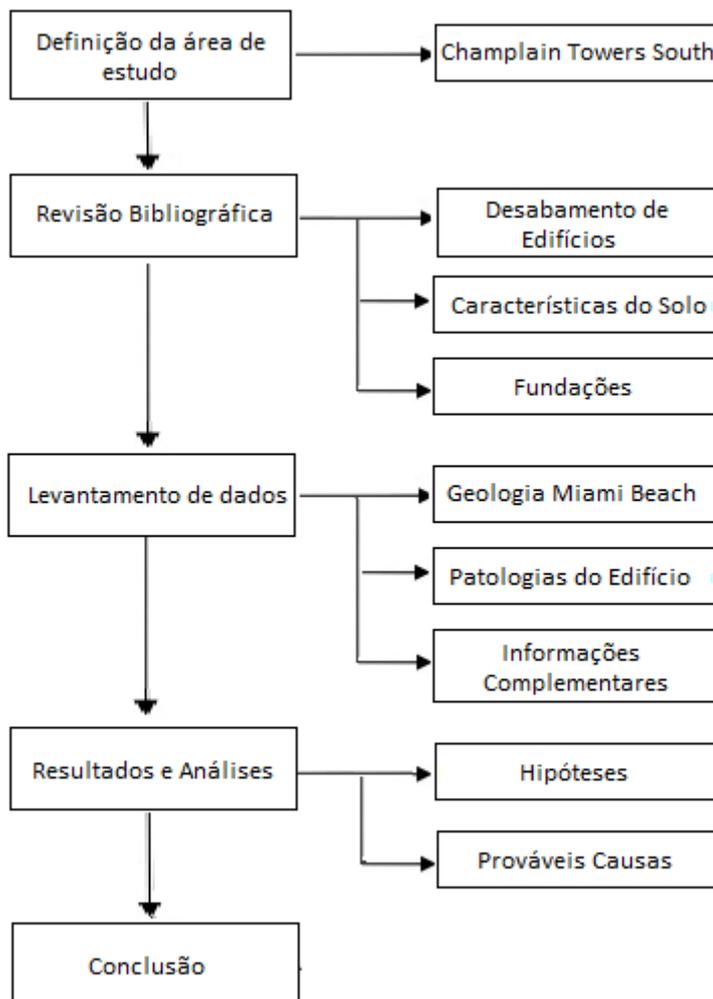
Porém, com a construção de edifícios e estradas, a dinâmica natural da ilha-barreira acaba por ser afetada. Assim, o fluxo de sedimentos é interrompido em certas áreas e outras ficam expostas à erosão.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para a realização deste estudo de caso, com o intuito de organizar os processos que compõem o trabalho de forma a orientar o processo de análise.

O desenvolvimento deste trabalho seguiu os procedimentos representados no fluxograma da Figura 25.

Figura 25 – Fluxograma do processo de análise.



Fonte: Elaboração do autor (2022).

A primeira etapa da pesquisa caracterizou-se pela busca de informações através de livros e artigos acerca de conteúdos relativos à área da geotecnia e fundações. Esta parte representa a revisão bibliográfica, agregando todos os tópicos que servirão de referência durante as comparações a serem feitas.

Posteriormente, coletaram-se dados históricos a respeito da ilha-barreira de Miami Beach. Foram utilizados artigos da Universidade da Califórnia que demonstram o tipo de solo da região, assim como suas inundações e afundamentos característicos. Simultaneamente, através de notícias da organização responsável pela investigação do desabamento do edifício Champlain Towers South e laudos técnicos, foi possível adquirir material para pesquisa relativo as patologias que a construção apresentava antes de desabar.

Por fim, com os dados reunidos é possível fazer indagações a respeito da tragédia, tendo a pesquisa como objetivo identificar os fatores que influenciaram para a ocorrência do desabamento do edifício. Além disso, determinar as possíveis causas do fenômeno relacionadas a área da geotecnia, contribuirá para reforçar a importância de um estudo geotécnico em um projeto, assegurando sua segurança e prevenindo adversidades que resultam na perda de vidas.

A pesquisa pode ser classificada como exploratória, visto que se pretende construir hipóteses acerca do problema. De certa forma também haverá traços de pesquisa descritiva, sendo o objetivo desta a descrição de determinado fenômeno ou população. (GIL, 2002).

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo serão apresentadas as características gerais da região de estudo e do condomínio que colapsou, através de dados históricos, relatórios técnicos e outras informações que servirão de embasamento para o trabalho.

4.1 DESCRIÇÃO DA EDIFICAÇÃO

Construído em 1981, o condomínio Champlain Towers South se localizava ao norte da costa de Miami Beach na cidade de Surfside, completando 40 anos de idade em 2021 – ano em que ocorreu seu colapso parcial. Este possuía 12 pavimentos com 136 apartamentos, além de garagem no subsolo. A Figura 26 apresenta a localização do condomínio em Surfside.

Figura 26 – Condomínio Champlain Towers South.



Fonte: Google Earth (2021).

4.1.1 LAUDO ESTRUTURAL DO CONDOMÍNIO

Para determinar as condições da edificação, foram utilizados os dados do relatório técnico realizado pela empresa Morabito Consultants em 2018.

De acordo com o laudo estrutural (Morabito Consultants, 2018), a edificação foi executada em concreto armado e apresentava diversas manifestações patológicas, como desgaste do revestimento e fissurações em fachadas, assim como a falta de vedação em

esquadrias de sacadas. Dentre os inúmeros problemas verificados, o local que apresentou maior urgência foi o subsolo. O nível – constituído por garagem e casa de bombas – estava com seus elementos estruturais (pilares, vigas e lajes) danificados, devido sua exposição de armadura para o meio, além de fissurações, estalos e infiltrações que ocorriam por causa da falta de impermeabilização do deck da piscina – localizado no nível acima.

Após a elaboração do laudo, é importante destacar que o edifício não havia realizado as manutenções e correções necessárias para garantir o seu bom desempenho. Entretanto, o laudo técnico não cogita a possibilidade de desabamento, apesar das diversas irregularidades. O Código de Construção de Miami-Dade estabelece que toda edificação que possua 40 anos ou mais realize a inspeção predial para receber a recertificação.

No ano de 2021, a Morabito Consultants realizou um plano de reformas para o edifício. Neste documento, foi relatada a necessidade do escoramento de todos os elementos estruturais do subsolo, para a realização dos reparos necessários.

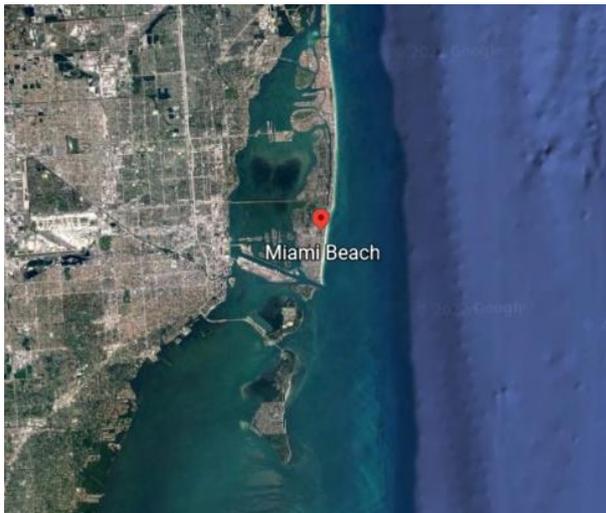
4.1.2 EQUIPE DE INVESTIGAÇÃO

O Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST) dos Estados Unidos, foi designado para coletar informações sobre o colapso do edifício e determinar quais foram os fatores que desencadearam sua repentina queda. Vale destacar que, até o momento do presente trabalho, a equipe está realizando a coleta e análise – em laboratório - dos materiais empregados nos elementos construtivos da edificação, com o intuito de verificar suas características.

4.2 LOCALIZAÇÃO DE MIAMI BEACH

A cidade-ilha de Miami Beach está localizada no sul do Estado da Flórida, nos Estados Unidos, conforme apresenta a Figura 27.

Figura 27 – Localização de Miami Beach.



Fonte: Google Earth (2022).

4.3 FORMAÇÃO DA ILHA-BARREIRA DE MIAMI BEACH

A ilha-barreira de Miami Beach surgiu a partir do depósito de sedimentos, pela ação das ondas do mar, em sua costa. Segundo o Escritório Nacional de Administração Oceânica e Atmosférica dos Estados Unidos (2021), é característica deste tipo de ilha sua movimentação, causada pela ação do vento e ondas em conjunto com as mudanças climáticas, resultando na erosão do solo e modificações em seu terreno.

No início do século XX, a região que era predominante de manguezais, passou a ser preenchida com terras através da dragagem, com o intuito de se construir uma cidade de luxo a beira do mar. Randall Parkinson (2021), afirma que o terreno varia muito em toda ilha, onde há locais que pode haver presença ou não de calcário, areia ou matéria orgânica (principais composições do solo na ilha).

4.4 CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO

Atualmente, a ilha conta com uma área total de 48,5 km², onde aproximadamente 60% desta área é coberta por água e cerca de 19,91 km² por solo, de acordo com o U.S Census Bureau (2020).

4.4.1 Relatório Geotécnico de um Empreendimento da Cidade

Com a finalidade de determinar o tipo de solo presente na região – apesar do caráter heterogêneo da área de estudo – foram utilizados os resultados obtidos no relatório geotécnico realizado pela empresa Univesal Engineering Sciences (UES, 2015), no Centro de Convenções de Miami Beach. A Figura 28 apresenta a localização do empreendimento onde foram realizadas as investigações geotécnicas (marcação amarela), em relação ao edifício Champlain Towers South (marcação vermelha), sendo a distância entre ambos os estabelecimentos aproximadamente 9 km.

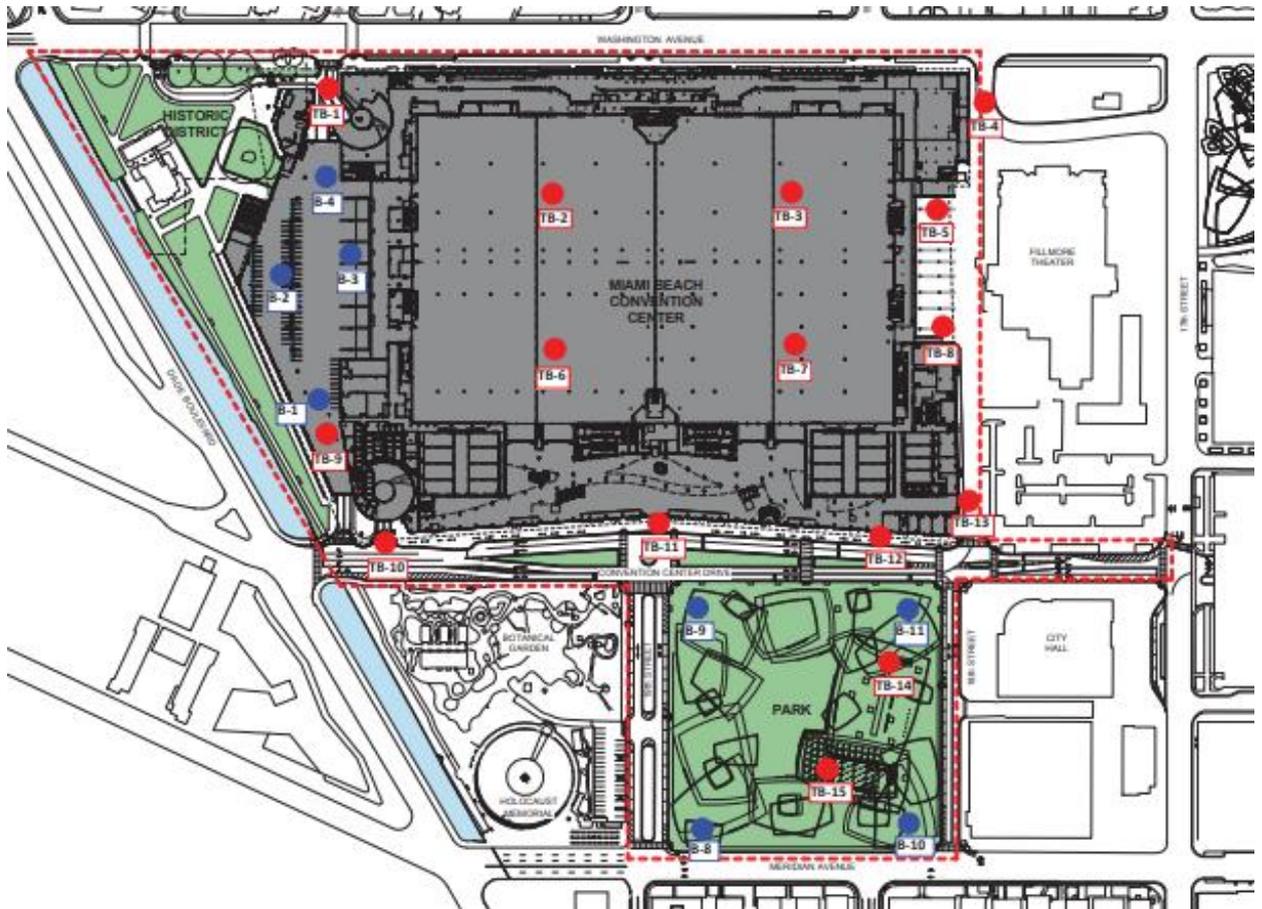
Figura 28 – Localização do Centro de Convenções de Miami Beach e do Champlain Towers South.



Fonte: Google Maps, 2022.

O documento elaborado pela organização – disponível no site da cidade de Miami Beach – contém os resultados do ensaio de sondagem a percussão (SPT) para estudo do solo do terreno. A Figura 29 mostra o local em que foram executados os furos de sondagem SPT e extraídos as amostras do solo.

Figura 29 – Localização dos furos e extração das amostras do terreno.



Fonte: Universal Engineering Sciences, 2015.

O ensaio SPT foi realizado abaixo da estrutura existente do empreendimento (pavimentação e laje em contato com o solo).

Para exemplificar de maneira breve o que foi descoberto através das amostras de solo coletadas no SPT, será disponibilizado o relatório técnico de dois furos de sondagem (Figura 30 e a Figura 31).

Figura 30 – Perfil de sondagem TB-4

DEPTH (FT.)	S A M P L E	BLOWS PER 6" INCREMENT	N (BLOWS/ FT.)	W.T.	S Y M B O L	DESCRIPTION	-200 (%)	MC (%)	ORG. CONTENT (%)	ROCK CORING DATA			
										REC (%)	QD (%)	DOWN PRESSURE (PSI)	TIME (s.)
0						2" Asphalt Pavement							
1		23-19-12-11	31		▽	Light Brown Slightly Silty Fine to Medium SAND with Some Limerock Fragments (FILL; SP-SM)							
2		10-7-7-7	14										
3		8-7-6-8	13			Brown Fine to Medium SAND (FILL; SP)							
4		7-10-11-12	21										
5		8-9-8-10	17			Light Gray Fine to Medium Shelly SAND (SP)							
6													
7						Light Gray Fine to Medium SAND with Some Limestone Fragments (SP)							
8		19-17-15-14	32										
9		7-10-8-12	18			Light Brown Fine to Medium SAND (SP)							
10													
11		36-25-12-11	37			Light Gray Fine to Medium SAND with Little Limestone Fragments (SP)							
12		4-6-7-9	13										
13		9-10-25-34	35			Gray Sandy LIMESTONE							
14		50/4"	50/4"										
15		50/3"	50/3"			SPT Boring Terminated at Depth of 60 Feet. Borehole Grouted.							
16		18-12-8-9	20										
17		10-10-12-10	22										
18		16-20-14-20	34										

Fonte: Universal Engineering Sciences, 2015.

Figura 31 – Perfil de sondagem B-3

DEPTH (FT.)	SAMPLE	BLOWS PER 6" INCREMENT	N (BLOWS/ FT.)	W.T.	SYMBOL	DESCRIPTION	-200 (%)	MC (%)	ORG. CONTENT (%)	ROCK CORING DATA					
										REC (%)	ROD (%)	DOWN PRESSURE (PSI)	TIME (h.)		
0						Asphalt Pavement (2")									
4.5-15-10-10		25				Brown Slightly Silty Fine to Medium SAND with Some Limerock Fragments (FILL: SP-SM)									
6-4-2-3		6				Brown Fine to Medium SAND (FILL: SP)									
4-5-5-7		10													
3-6-7-9		13													
8-12-22-25		34													
7-8-8-9		16				Gray Fine to Medium SAND (FILL: SP)									
10-22-32-25		54				Gray Sandy LIMESTONE									
6-16-20-17		36													
13-17-21-45		38													
50/1"		50/1"													
50/4"		50/4"													
50/4"		50/4"													
6-9-8-8		17				Gray Fine to Medium SAND with Some Limestone Fragments (SP) ...Lost All Drilling Fluid Circulation									
1-42-45-50/3"		87				Gray Sandy LIMESTONE									
50/5"		50/5"				SPT Borings Terminated at Depth of 60 feet. Borehole Grouted.									

Fonte: Universal Engineering Sciences, 2015.

Para a análise do perfil do solo, foram considerados os resultados de todos os furos de sondagens realizados e feito uma descrição generalizada do que compõe a área de estudo. Foi descoberta – na maioria dos casos - a presença de areia siltosa com fragmentos de calcário na composição dos perfis do solo. Além disso, foi constatado que o lençol freático varia entre as profundidades de 0,90 m a 1,8 m. Contudo, deve-se levar em consideração que a região sofre com constantes inundações e afundamentos devido a variações climáticas, o que pode influenciar nos níveis do lençol freático.

A Tabela 3 apresenta o resumo do tipo de solo predominante em cada camada do perfil, levando em consideração vinte e três (23) furos de sondagens que foram realizados no ensaio SPT. A Tabela 4 apresenta os parâmetros do solo analisado.

Tabela 3 – Perfil geral do subsolo.

Profundidade (m)	Descrição do Solo
0 a 5	Após as camadas de pavimento asfáltico e laje de concreto (0,25 m), encontra-se abaixo areia fina a média com porcentagens variadas de fragmentos de calcário (SP, SP-SM, SM) <u>Nota 1:</u> na sondagem B-1 foi encontrado areia siltosa orgânica com coloração marrom escura, contendo traços de raízes (OL) na profundidade entre 1,2 m a 1,5 m. <u>Nota 2:</u> na sondagem TB-13 foi encontrado areia orgânica siltosa com coloração cinza (ML) em uma profundidade entre 0,6 m a 1,2 m <u>Nota 3:</u> na sondagem TB-1 foi encontrado areia siltosa com coloração marrom escura, na profundidade entre 1,5 m a 1,8 m.
5 a 12	Marrom Claro a Cinza Claro de Calcarenito (calcário superior)
12 a 14	Areia Fina a Média com Porcentagens Variadas de Fragmentos de Calcário (SP, SP-SM)
14 a 24	Marrom Claro a Cinza Claro de Calcarenito (calcário inferior)

Fonte: Adaptado de Universal Engineering Sciences, 2014.

Tabela 4 – Parâmetros do solo.

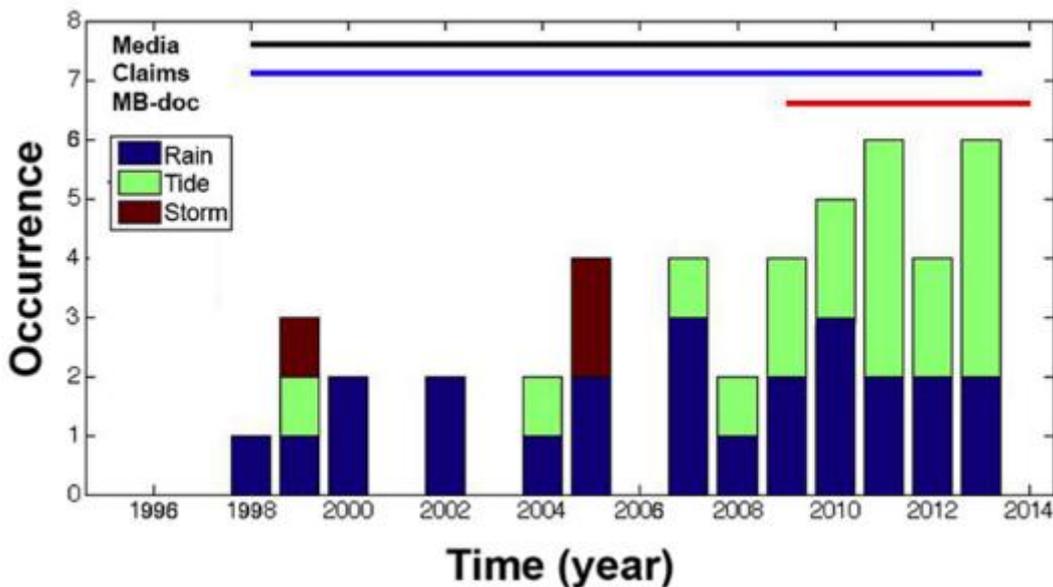
Descrição dos Materiais (Símbolos USCS)	Média de golpes a cada 30 cm SPT N60
Preenchimento granular (SP/SP-SM/SM)	16
Calcarenito Superior	68
Areia (SP/SP-SM)	15
Calcarenito Inferior	+100 (impenetrável)

Fonte: Universal Engineering Sciences, 2014.

Wdowinski (2016) relata que a região tem um longo histórico de inundações causado por chuvas e tempestades intensas. Porém, nos anos atuais, em conjunto com estes fatores mencionados, o aumento do nível do mar está afetando regiões baixas (oeste de Miami Beach) que foram construídas acima de pantanal.

Para determinar as inundações recentes na cidade, foram utilizados os registros de chuvas e aumento do nível do mar, fornecidos pela Administração Oceânica e Atmosférica Nacional do governo estadunidense. Além disso, os relatos dos meios de comunicação e dos moradores da região também contribuíram para determinar a frequência das inundações, como apresenta a Figura 33.

Figura 33 – Frequência de inundações – ocorrência/ano (a partir dos dados coletados).



Fonte: Shimon Wdowinski (2016).

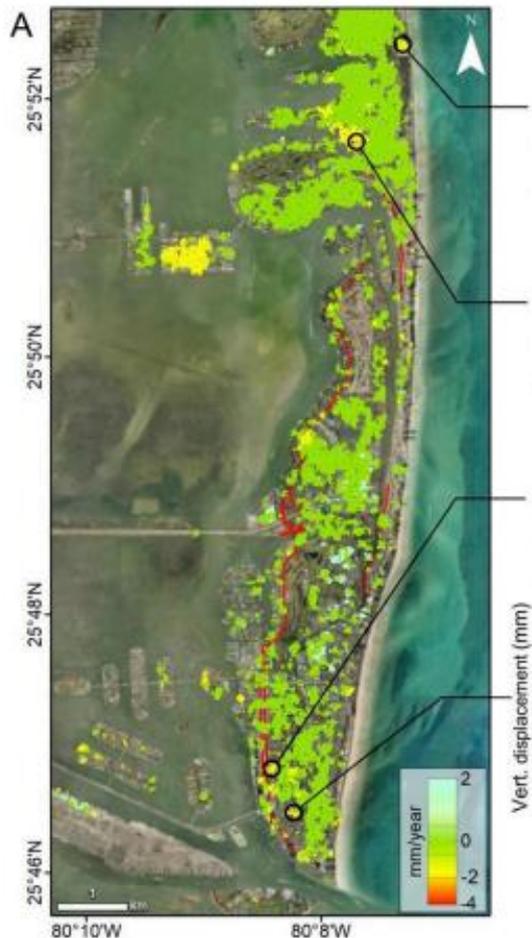
A partir do levantamento de dados, concluiu-se que a partir do ano de 2006 houve mudanças significativas na frequência de inundações na região, onde eventos relacionados a chuvas e marés aumentaram em 33% e 400%, respectivamente (Wdowinski, 2016).

Além disso, o autor relata que houve a aceleração do aumento do nível do mar no sudeste da Flórida, onde a taxa média de aumento foi de 9 ± 4 mm/ano, ficando acima da média global. Segundo Church et al. (2013), a taxa média global de aumento do nível do mar para o período de 1993-2012 é de $3,2 \pm 0,4$ mm/ano, obtidos por dados de satélite. Para dados obtidos in situ, a variação é de $2,8 \pm 0,4$ mm/ano.

Em sua segunda pesquisa, verificou-se através de imagens de satélites obtidas no período entre 1992-1999, a subsidência na região. Assim, foi constatado que cerca de 97% da cidade se apresentava estável em relação a subsidência. Porém, na área oeste da cidade, onde é predominante a presença de casas que foram construídas acima de terreno pantanoso, foram constados diversos casos de rebaixamento da superfície do solo. Além disso, foi detectado o fenômeno em uma edificação de 12 andares localizado na parte leste da cidade. Segundo Wdowinski (2020) a taxa de subsidência verificada foi de 1-3 mm/ano, com margem de erro de 0,6-0,8 mm/ano.

A Figura 34 apresenta os registros das subsidências em Miami Beach no período em estudo. A área amarela apresenta os deslocamentos verticais na parte oeste da cidade, enquanto os círculos pretos ao sul e ao norte mostram a localização das áreas onde há residência unifamiliares e o condomínio analisado, respectivamente. As linhas vermelhas apresentam estradas afetadas por inundações entre 1998-2012.

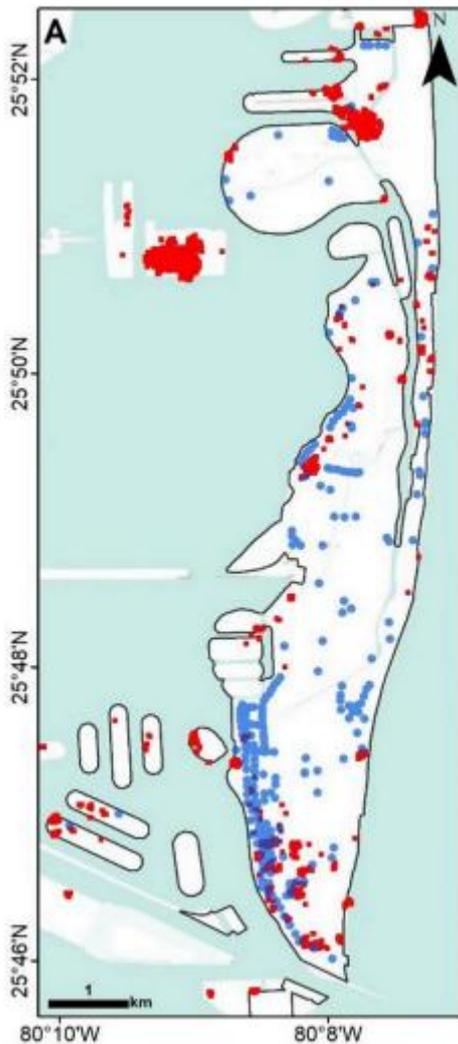
Figura 34 – Deslocamentos registrados no período de 1993-1999.



Fonte: Shimon Wdowinski (2020).

Com o intuito de determinar se as subsidências influenciavam na ocorrência de inundações, o autor compilou as áreas onde houve rebaixamento do solo (pontos azuis) e inundações (pontos vermelhos), como apresenta a Figura 35.

Figura 35 – Comparação entre áreas com relatos de inundações e subsidência.



Fonte: Shimon Wdowinski (2020).

A comparação determinou que em Miami Beach, cerca de 60% da área de estudo onde foi verificada a ocorrência de subsidência, encontrava-se a menos de 200 m de distância de locais que já sofreram inundações. Contudo, para confirmar a influência da subsidência na região – apesar da possível relação entre os fenômenos – são necessários dados mais atualizados (Wdowinski, 2020).

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão analisadas as informações coletadas a respeito das características geológicas de Miami Beach em conjunto com os aspectos estruturais da edificação, correlacionando-os com o seu desabamento.

5.1 CONSIDERAÇÕES

A partir do levantamento das informações, é possível afirmar que a edificação já se encontrava em uma localização desfavorável para construção, visto que estava situado em uma região litorânea, onde há um grau elevado de agressividade ambiental. A Figura 36 apresenta a localização do edifício de frente para o mar.

Figura 36 – Champlain Towers South.



Fonte: Google Maps (2022).

Além disso, é importante dar destaque a todo o processo de desenvolvimento urbano de Miami Beach ao longo do século XX, pois grande parcela do terreno da ilha se encontra abaixo do que antes era manguezal. De acordo com o que explica Queiroz (2016), os sedimentos orgânicos – comum de pantanais – possuem baixa resistência à compressão e alta deformabilidade, sendo caracterizado como um solo mole. Acrescidos destes pontos, a região possui uma baixa elevação, onde um quarto da ilha está a menos de 1 m de elevação (Milton, 2021).

Em conjunto com a matéria orgânica, temos que a composição do solo da ilha abrange calcário e areia, estando sujeitos aos efeitos naturais da região.

5.2 HIPÓTESES

Apesar de a área de estudo apresentar condições desfavoráveis à construção, só esses fatores não explicam a repentina queda da edificação. Assim, foram estudadas as diversas possibilidades das causas, onde serão apresentadas suposições que visam identificar os fatores mais prováveis que desencadearam o desabamento do edifício.

O primeiro ponto a ser considerado são as variações das marés que a região vem sofrendo ao longo dos anos. Devido à baixa elevação da ilha, diversas áreas sofrem com constantes inundações, o que acaba por favorecer a intrusão salina. Esta se caracteriza pela introdução da água do mar na parte inferior de edificações (Parkinson, 2021). Amorim (2010) explica que a água salina tem propriedades corrosivas quando em contato com o concreto armado, contribuindo para sua degradação.

Além disso, as chuvas e a subsidência – apesar de ocorrer em poucos locais – na ilha, também contribuem para a ocorrência dos fenômenos relatados. Foi verificado que o rebaixamento do solo, causado por sua baixa resistência, é cerca de 2 mm por ano (Wdowinski, 2021). Se levarmos em consideração o ano de construção do edifício, pode-se estipular que a área onde estava a construção afundou cerca de 8 cm.

A subsidência localizada também pode ter influência da erosão subterrânea, onde as regiões predominantes de carste (calcário em sua composição) podem reagir com infiltração da água do mar resultando em sua dissolução com o passar do tempo – dolinas. Conforme descreve Lane (1994), a geologia da área de Miami é constituída por platôs de calcário carstico, similar aos casos apresentados no item 2.2.3, onde estas áreas estão suscetíveis a subsidência localizada devido ao processo de carstificação.

5.2.1 Danos Estruturais e Recalque Diferencial

Os estudos realizados por Kong e Smyl (2021) no edifício Champlain Towers South, utilizaram como base um vídeo que registrou o momento exato da queda da edificação. Através de modelagem numérica, foram feitas análises do comportamento da estrutura e suas movimentações, possibilitando o mapeamento da sequência do colapso dos elementos

construtivos da edificação. Foi constatado que o início do desabamento aconteceu na torre Leste e posteriormente na torre Sul, permanecendo apenas a torre Norte. A Figura 37 mostra a comparação entre o antes e depois da edificação.

Figura 37 – Champlain Towers South após seu colapso.



Fonte: Lima (2021) – BBC News (2021).

Os autores mostram que o colapso ocorreu de maneira progressiva, onde a falha de um elemento estrutural desencadeou elementos adjacentes. Além disso, estipulam que a fissuração dos elementos estruturais e o recalque diferencial do solo, possam ter causado o colapso parcial da edificação.

Para o caso do Champlain Towers South, não foi constatado sinais de recalque diferencial em laudo estrutural (2018) - apresentado no item 4.1.1 - visto que o resultado destes são fissuras com inclinações características (45°) em elementos estruturais e de vedações, conforme define Thomaz (1989). Os danos estruturais que a edificação apresentava se assemelham ao caso do edifício Palace II – item 2.1.1 – onde também foram constatados fissurações e estalos em elementos estruturais. Assim, é provável que a falha destes elementos pode ter contribuído significativamente para o colapso do edifício, visto que as manutenções – será feito análise em item posterior – necessárias não foram realizadas,

Vale destacar que, toda construção está sujeita ao fenômeno do recalque e, desde que ocorra em pequenas dimensões, não geram riscos estruturais. Para isso, é estabelecido um limite previsto em projeto que determina o rebaixamento que uma construção pode sofrer – recalque admissível – garantindo sua segurança. Portanto, a ocorrência de recalque nestas condições, não é indicativo para tal catástrofe.

5.2.2 Colapsibilidade do Solo e Erosão Subterrânea

Como relatado neste trabalho, os solos colapsíveis são solos não saturados que sofrem a redução de volume ao ganhar umidade, levando a perda de sua resistência. Para que ocorra este fenômeno, o solo não saturado necessita estar parcialmente estável e com estrutura aberta, além de possuir ligações intergranulares e cimentantes que conferem suas características específicas quando em umidade natural. Por fim, é necessário que haja a ruptura dessas ligações quando em contato com a água, o que possibilita seu colapso.

A partir dos dados fornecidos pelo relatório geotécnico - apresentados no item 4.4.1 - foi verificado que o lençol freático da região de Miami Beach pode variar entre as profundidades de 0,90 m a 1,8 m. Portanto, o efeito do colapso é mais acentuado em camadas superficiais do solo, implicando restrições para a execução fundações diretas apoiadas sobre estes.

Foi verificado que as fundações do edifício Champlain Towers South foram executadas em estacas Franki, apoiadas em camadas mais profundas do solo, o que torna improvável a ocorrência de colapsibilidade do solo.

Em relação a erosão subterrânea, é improvável que esta tenha atingido níveis similares as dolinas relatadas neste trabalho (Cajamar e Guatemala) na área onde estava localizado a edificação, visto que após seu desabamento parcial não havia as “crateras” características deste fenômeno. Wdowinski afirma em seus estudos – sobre rebaixamento do solo – que a cidade de Miami Beach sofreu minimamente com subsidência e erosão em relação a Cidade do México (onde ocorreu outra tragédia).

5.2.3 Falta de Manutenções e Inundações em Subsolo da Edificação

Dentre todas as análises formuladas, a causa mais provável do desabamento da edificação se relaciona com sua falta de manutenções e as frequentes inundações que ocorriam em seu subsolo.

Parkison (2021) verificou em seus estudos que o nível do mar aumentou significativamente ao longo dos últimos dez anos. Atrelado a este fato, a edificação registrou – através de relatos de moradores – inundações constantes na área da garagem do subsolo, principalmente durante tempestades, chuvas e maré alta. Ou seja, a garagem onde foram

detectadas patologias em elementos estruturais – fissurações e exposição de armadura – estava frequentemente em contato com a água.

O mais provável é que a corrosão da armadura em elementos estruturais devido à intrusão salina, tenha sido o principal fator que desencadeou às falhas na estrutura. Se um elemento estrutural não consegue desempenhar mais a função para o qual foi projetado, há a redistribuição de tensões e sobrecarga da estrutura, até atingir seu colapso progressivo. Aliados a negligência na gestão condominial, onde não foram realizadas as manutenções necessárias – relatadas no laudo estrutural (item 4.1.1) – para garantir o bom desempenho da edificação, ocorreu a tragédia.

Destaca-se a importância das correções de patologias, principalmente em elementos estruturais, visto que em todos os casos de desabamentos analisados neste trabalho – Edifício Palace II, Wilton Paes de Almeida e Anêmona – ocorreram devido a falha da estrutura perante a erros de projeto, incêndios e análise de solo. Os mecanismos que proporcionam estas falhas podem variar, porém o resultado tende a ser o mesmo: perda da função estrutural da construção.

É possível afirmar que, caso o edifício Champlain Towers South tivesse realizado a restauração de seus elementos danificados, tal tragédia poderia não ter acontecido, pois estes componentes manteriam sua vida útil de projeto e resistiriam aos esforços necessários para manter a edificação estável.

No geral, é possível concluir que as características da região, em conjunto com o aumento do nível do mar e a subsidência localizada, facilitaram as inundações na área da garagem do subsolo que podem ter agravado os danos em elementos estruturais, dando início ao desastre.

6 CONCLUSÃO

A pesquisa teve como objetivo analisar as características geológicas de Miami Beach/FL, em conjunto com os elementos estruturais do edifício Champlain Towers South, para determinar os fatores que contribuíram para seu desabamento. Assim sendo, foi apresentada a análise dos dados obtidos – com o auxílio de estudos de casos sobre desabamentos de edifícios - e formulado diferentes hipóteses sobre a provável causa do colapso do condomínio.

Primeiramente, o estudo identificou os principais problemas que residem na ilha-barreira de Miami Beach. Devido ao aumento do nível do mar na região em conjunto com a subsidência localizada devido às características geológicas do local (solo composto de areia, calcário e matéria orgânica), houve maior incidência de inundações na cidade.

Dentre as hipóteses, verificou-se que a colapsibilidade do solo como agente causador do desabamento do edifício é improvável, visto que este comportamento é típico de solos não saturados perante o ganho de umidade, acontecendo em camadas mais superficiais do solo. Devido ao lençol freático da região ser elevado, a edificação foi executada com fundações de estacas Franki, provavelmente alocadas em camadas profundas do solo com boa resistência, e que não estão sujeitas a deformações por colapso.

Chegou-se ao entendimento que a influência das inundações no nível do subsolo da edificação – onde havia diversos pilares com exposição de armadura – agravou a corrosão dos elementos estruturais, redistribuindo as cargas do edifício e comprometendo a estrutura. Pode-se afirmar que foram diversos fatores em conjunto que auxiliaram na ocorrência deste fenômeno, desde a presença de calcário na camada do solo - que pode ter sofrido erosão ao longo dos anos e contribuiu para o rebaixamento do solo no local da edificação - o que consequentemente facilitou as inundações, até a negligência perante as faltas de manutenções necessárias na edificação que foram determinadas em laudo estrutural em 2018.

Por fim, é importante destacar a necessidade do município de Miami Beach se adaptar as constantes mudanças que a região vem sofrendo. Além das investigações geotécnicas para possibilitar as mais diversas construções na ilha, ainda é preciso prover soluções de engenharia que garantam a segurança perante o aumento do nível do mar, através de paredes e sistemas de drenagens que atuem de maneira eficaz. A reformulação das leis no Estado - referente às manutenções prediais - também é necessária, para impedir que ocorram desastres similares ao do edifício Champlain Towers South.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do trabalho realizado, é pertinente a sugestão de novas pesquisas para trabalhos futuros:

- Analisar o parecer final divulgado pelo NIST (instituto que está realizando a investigação do colapso do condomínio) com os demais estudos realizados sobre o tema;
- Verificar a composição do solo das demais ilhas-barreiras que podem estar sujeitas às mesmas adversidades que Miami Beach;
- Comparar as características geológicas de Miami Beach com Florianópolis com o intuito de detectar suas similaridades;
- Avaliar se o projeto de fundações do condomínio Champlain Towers South está de acordo com o tipo de solo do local;
- Buscar soluções de engenharia que possam amenizar os problemas enfrentados por Miami Beach.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13441: Rochas e Solos - Simbologia**. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6484: Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7181: Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2017.

ALONSO, Urbano Rodriguez. **Previsão e controle das fundações: uma introdução ao controle de qualidade em fundações**. 3ª ed. – São Paulo: Blucher, 2019.

AMORIM, Anderson Anacleto de. **Durabilidade das estruturas de concreto armado aparentes**. Orientador: Prof. José Eduardo de Aguiar. 2010. 74 f. Monografia (Especialista em Construção Civil) - Escola de Engenharia Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, janeiro de 2010.

ASCE Standard ASCE/SEI 7-05. **Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures**. American Society of Civil Engineers, 2005.

AZEREDO, H. A. **O edifício e sua cobertura**. São Paulo: Blucher, 1997.

BCC (org.). **Prédio que desabou parcialmente em Miami estava afundando, mas essa não é a única explicação**. BBC New Mundo. 26 jun. 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/internacional-57646973>. Acesso em: 03 ago. 2022.

BRAJA, M. Das e KHALED, Sobhan. **Fundamentos de engenharia geotécnica.**; tradutoras: Livia Koeppl e Priscilla Rodrigues Lopes; revisora técnica: Roberta Boszczowski – São Paulo, SP: Cengage, 2019.

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

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

CABRAL, Jaime; SANTOS, Sylvana; FILHO, Ivaldo. **Bombeamento Intensivo de Água Subterrânea e Riscos de Subsidência do Solo**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, volume 11. 2006.

CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, Armando Negreiros; RODRIGUES, J. Martinho de A.. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações – Fundamentos**. Grupo GEN. 7ª ed. v.1, 2015.

CARLOS SERRANO. **Como Miami Beach foi construída em terreno pantanoso e instável.** BBC News Mundo. set. 2021. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/internacional-57659003>. Acesso em: 03 ago. 2022.

CHURCH, J.A., CLARK, P.U., CAZENAVE, A., GREGORY, J.M., JEVREJEVA, S., LEVERMANN, A., MERRIFIELD, M., MILNE, G., NEREM, R., NUNN, P., 2013. **Sea Level Change.** PM Cambridge University Press.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Projeto de fundações em Solos Colapsíveis.** São Carlos - SP: EESC-USP, 2009.

CLEMENCE, S. P. e FINBARR, A. O. **Design considerations for collapsible soils.** *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, v.107, n.GT3, 1981.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica.** 7a ed. São Paulo: CENGAGE Learning, 2014.

DUDLEY, J.H. **Review of collapsing soils.** *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, v.96, n.SM3, 1970.

FIASCHI, Simone; WDOWINSKI, Shimon. **Local land subsidence in Miami Beach (FL) and Norfolk (VA) and its contribution to flooding hazard in coastal communities along the U.S. Atlantic coast,** *Ocean & Coastal Management.* Elsevier. Miami, 2020.

GEOFIX. **Estaca raiz.** São Paulo: Geofix Fundações. Disponível em: <http://geofix.com.br/servico-estaca-raiz.php>. Acesso em: 15 nov. 2021.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4ª. ed, p. 42-47. São Paulo: Atlas, 2002.

GRASSELLI, V. A. **Controle das edificações: uma contribuição ao processo de gestão pelos órgãos públicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.

HACHICH, Waldemar et al. **Fundações: teoria e prática.** 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

JENNINGS, J.E.; KNIGHT, K. **A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to collapse of grain structure.** In: VI Regional Conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1975.

KNAPPETT, J. A. ; CRAIG, R. F. **Craig's Soil Mechanics,** 8th ed. New York: Spon Press, 2012.

KONG, Xiangxiong; SMYL, Danny. **Investigação do colapso de um prédio de condomínio em Surfside, Flórida: uma abordagem de rastreamento de recurso de vídeo.** 2021

LANE, E. **Florida's Geological History and Geological Resources Special Publication No. 35.** Department of Environmental Protection, Florida Geological Survey, Tallahassee, FL. 1994.

LEÃO, Marcio Fernandes; DE PAIVA, Guilherme V. Coelho. **Mecânica dos solos avançadas e introdução a obras de terra**. Londrina – Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2018.

LINHOSS, Anna. **Barrier islands are natural coast guards that absorb impacts from hurricanes and storms**. The conversation, 2018.

LUCIANA ROSSETTO (ed.). **Buraco da Guatemala intriga geólogos brasileiros**. G1 Globo. São Paulo, jun. 2010. Disponível em: <http://g1.globo.com/brasil/noticia/2010/06/buraco-da-guatemala-intriga-geologos-brasileiros.html>. Acesso em: 05 ago. 2022

MARANGON, M. Notas de Aula de Tópicos em **Geotecnia de fundações e Obras de Terra**. Juiz de Fora: Faculdade de Engenharia da UFJF, 2018.

MILITITSKY, Jarbas; CONSOLI, N. C; SCHNAID, F. **Patologia das fundações**. 2^a ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

MILTON, Connor. **Measuring vulnerability to flooding using two indices: A case study of Miami-Dade County, Florida**. 2021. Dissertação de Mestrado. University of Twente.

MINGORANCE, F. **Manifestaciones de subsidencia superficial en el Pastal, Norte de Mendoza, Argentina**. Revista de la Facultad de Ingeniería, Argentina. 2000.

MITCHELL, J. K; COUTINHO, R. Q. **Special Lecture: Occurrence, Geotechnical Properties of Some Soils of America**. IX P.C.S.M.F.E. Viña Del Mar, Chile. Sociedade Chilena de Geotecnia, vol. IV, 1991

MORABITO CONSULTANTS. **Champlain Towers South 40 Year Building Repair and restoration**. 2021.

MORABITO CONSULTANTS. **Champlain Towers South Condominium – Structural Field Survey Report**. 2018.

MOURA, F. J. M. **Dinâmica de barreiras costeiras na costa semiárida brasileira: o caso do litoral de Acaraú e Itarema – Ceará**. Tese (Doutorado em Ciências Marinhas Tropicais) – Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018

NADAL, C.A., GIUSTI, D.A., ROSA FILHO, E.F., HINDI, E.C. **Metodologia geodésica/geológica para o levantamento de deslocamentos do terreno em regiões circunvizinhas a um poço artesiano**. Anais do II Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, Maio 2001.

PACHECO, J. COUTO, D. HELENE, P. **Colapso do edifício Wilton Paes de Almeida – SP: Lições aprendidas**. XV Congreso Latinoamericano de Patología de Construcción y XVII Congreso de Control de Calidad en la Construcción Vol. 2, PATOLOGÍA. México, 2019.

PARKISON, Randall W. **Speculation on the role of sea-level rise in the tragic collapse of the Surfside condominium (Miami Beach, Florida U.S.A) was a bellwether moment for coastal zone management practitioners**. Ocean and Coastal Management, volume 215. 2021.

PENA, Rodolfo F. Alves. "**Solo**"; Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/o-solo.htm>. Acesso em 23 de Outubro de 2021.

PEREIRA, Caio. **Fundações Profundas**. Escola Engenharia, 2016. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/tipos-de-fundacoes/>. Acesso em: 13 de Outubro de 2021.

PEREIRA, Caio. **Estaca Hélice Contínua – Vantagens e Desvantagens**. Escola Engenharia, 2017. Disponível em: <https://www.escolaengenharia.com.br/estaca-helice-continua/>. Acesso em: 13 de Outubro de 2021.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**, 3ª Edição – São Paulo: Oficina de textos, 2006.

QUEIROZ, Rudney C. **Geologia e geotecnia básica para engenharia civil** – São Paulo: Blucher, 2016.

REGINATTO, A.R.; FERRERO. **Collapse Potential of Soils and Soil-Water Chemistry**. In: VIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, Moscou, 1973. p. 177-183.

RODRIGUES, R. A. **Modelação das deformações por colapso devidas à ascensão de lençol freático**. (Tese de Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007

SCHNAID, Fernando; ODEBRECHT, Edgar. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SIMONS, Robert; XIAO, Yan; EVENCHIK, Aaron; BARRETO, Amanda. **Champlain Towers South Collapse: Frequency, Governance and Liability Issue**. Journal of Sustainable Real Estate. Volume14, Issue 1. **2022**.

SOUZA, E. G. **Colapso de edifício por ruptura de estacas: estudo das causas e da recuperação**. Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo, 2003.

SOUZA NETO, J. B. **Comportamento de um solo colapsível avaliado a partir de ensaios de laboratório e campo, e previsão de recalques devidos à inundação (colapso)**. (Tese de Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, RJ, 2004.

TEIXEIRA, Wilson; TOLEDO, Maria Cristina Motta de; FAIRCHILD, Thomas R.; TAIOLI, Fabio. **Decifrando a Terra**. São Paulo. 2000.

THOMAZ, E. **Trincas em Edifícios, Causas, Prevenção e Recuperação**. 1. ed. São Paulo: PINI, 1989.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Engineering design: geotechnical investigations**. Manual 1100-1-1804. 2001.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. Editora McGRAW-HILL do Brasil LTDA, 1978.

VELLOSO, Dirceu de Alencar; LOPES, Francisco de Rezende. **Fundações: critérios de projeto, investigações do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

WDOWINSKI, Shimon; BRAY, Ronald; P.KIRTMAN, Ben; WU, Zhaohua. **Increasing flooding hazard in coastal communities due to rising sea level: Case study of Miami Beach,** Florida. Elsevier, 2016.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.