



**CENTRO UNIVERSITÁRIO PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS
UNIPAC BARBACENA
ENGENHARIA CIVIL**

**ALEXANDRE NETO DAMASCENO SOBRINHO
BEATRIZ SOUSA SOBRINHO**

**COLAPSO ESTRUTURAL DO EDIFÍCIO CHAMPLAIN TOWERS SOUTH
EM MIAMI: UM ESTUDO DE CASO**

**BARBACENA
2021**

ALEXANDRE NETO DAMASCENO SOBRINHO
BEATRIZ SOUSA SOBRINHO

COLAPSO ESTRUTURAL DO EDIFÍCIO CHAMPLAIN TOWERS SOUTH
EM MIAMI: UM ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Presidente Antônio Carlos – UNIPAC, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Ma. Tairine Cristine Bertola Cruz

BARBACENA
2021

ALEXANDRE NETO DAMASCENO SOBRINHO
BEATRIZ SOUSA SOBRINHO

COLAPSO ESTRUTURAL DO EDIFÍCIO CHAMPLAIN TOWERS SOUTH
EM MIAMI: UM ESTUDO DE CASO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil o
Centro Universitário Presidente Antônio
Carlos - UNIPAC, como requisito parcial para
o título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Deysiane Antunes Barroso Damasceno
Centro Universitário Presidente Antônio Carlos - UNIPAC

Prof. Fernando Henrique Fagundes Gomes
Centro Universitário Presidente Antônio Carlos - UNIPAC

Prof. Erick de Paula Crisafuli
Centro Universitário Presidente Antônio Carlos – UNIPAC

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradecemos a Deus por nos proporcionar discernimento e por permitir que ultrapassássemos nossos limites.

Aos familiares e amigos, agradecemos por todo o incentivo nos momentos difíceis, pela paciência nas ausências, e pelas comemorações a cada etapa concluída.

Agradecemos à nossa orientadora Prof^a. Ma. Tairine Cristine Bertola Cruz, pelo apoio, ajuda e colaboração com essa pesquisa. Ao Prof. Me. Elvys Dias Reis por todo o apoio, conselhos, ajuda e paciência. Ambos proporcionaram significativamente para o nosso desenvolvimento durante nossa formação profissional.

Agradecemos a todos, que contribuíram efetivamente para a colaboração desse trabalho.

RESUMO

O colapso de uma edificação é um desastre onde vidas e bens materiais podem ser perdidos, tornando-se imprescindível compreender os motivos que favorecem o desabamento de um edifício de concreto armado. O presente estudo buscou entender e avaliar o condomínio residencial Champlain Towers South, localizado na Florida nos Estados Unidos, o qual foi construído em um sistema de concreto armado formado por pilares e lajes lisas e que entrou em colapso parcial 40 anos após sua construção. Este trabalho foi realizado com base em pesquisas bibliográficas de autores que abordam o emprego de concreto armado e suas possíveis falhas e patologias, como problemas no gerenciamento de projeto, execução e manutenção, puncionamento em lajes, recalques do solo e situações adversas do meio ambiente que impactam na estabilidade estrutural. Dentre as conclusões, aponta-se que a combinação de várias falhas existentes em determinadas edificações tem o potencial de promover o colapso das mesmas, e para que isso possa ser evitado, é necessária a adoção de medidas de manutenção.

Palavras-chave: Colapso estrutural, Concreto armado, Patologias, Manutenção.

ABSTRACT

The collapse of a building is a disaster where lives and material goods can be lost, making it essential to understand the reasons that favor the collapse of a reinforced concrete building. The present study sought to understand and evaluate the Champlain Towers South residential condominium, located in Florida in the United States, which was built in a reinforced concrete system formed by columns and flat slabs and which partially collapsed 40 years after its construction. This work was based on bibliographic research of authors who approach the use of reinforced concrete and its possible failures and pathologies, such as problems in project management, execution, and maintenance, punching in slabs, ground settlements, and adverse environmental situations that impact the structural stability. Among the conclusions, it is pointed out that the combination of several existing failures in certain buildings has the potential to promote their collapse, and for this to be avoided, it is necessary to adopt maintenance measures.

Keywords: Structural collapse. Reinforced concrete. Pathologies. Maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Corrosão de armaduras em viga	13
Figura 2 – Fissuras geométricas em alvenaria.....	14
Figura 3 – Trincas em alvenaria	15
Figura 4 - Estrutura com rachadura.....	16
Figura 5 - Degradação do concreto.....	17
Figura 6 - Infiltração em laje.....	18
Figura 7 – Mecanismo de punção de lajes.....	28
Figura 8 – Esquema do sistema de lajes lisas	28
Figura 9 - Edifício Champlain Towers South	30
Figura 10 - Deterioração do intradorso da varanda.....	31
Figura 11 - Pilar danificado.....	32
Figura 12 - Armadura exposta e degradação do concreto em pilar da garagem.....	32
Figura 13 - Infiltração, fissura e lixiviação na laje da garagem.....	33
Figura 14 – Delaminação do concreto e armaduras expostas	33
Figura 15 – Detalhamento do pilar e sapata a serem executados	35
Figura 16 - Antes e depois das torres colapsadas	37
Figura 17 - Torres colapsadas.....	38
Figura 18 – Imagens escaneadas para monitoramento da integridade estrutural.....	39
Figura 19 - Vulnerabilidade nas ligações dos pilares com as lajes	41
Figura 20 - Pilares do estacionamento.....	41
Figura 21 – Aço aparente na casa de bombas.....	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	DESENVOLVIMENTO.....	11
2.1	Concreto armado.....	11
2.2	Patologias de estruturas em concreto armado	12
2.2.1	<i>Corrosão das armaduras.....</i>	<i>12</i>
2.2.2	<i>Fissuras, trincas e rachaduras</i>	<i>14</i>
2.2.3	<i>Degradação superficial do concreto.....</i>	<i>16</i>
2.2.4	<i>Infiltração.....</i>	<i>18</i>
2.3	Confiabilidade estrutural em locais com situações adversas	20
2.4	Gerenciamento de projetos.....	22
2.5	Manutenção de edificações	24
2.6	Colapso progressivo em edificações de concreto armado.....	25
2.6.1	<i>O Condomínio Champlain Towers.....</i>	<i>29</i>
2.6.2	<i>Condições do complexo.....</i>	<i>30</i>
2.6.3	<i>Plano de reformas.....</i>	<i>34</i>
2.6.3.1	<i>Subsolo... ..</i>	<i>34</i>
2.6.3.2	<i>Primeiro pavimento.....</i>	<i>35</i>
2.6.3.3	<i>Demais pavimentos.....</i>	<i>36</i>
2.6.4	<i>Colapso da estrutura</i>	<i>37</i>
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
	REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

O uso do concreto armado como elemento estrutural no Brasil ocorreu no início do século XX, quando as primeiras fábricas de concreto se instalaram no país. Desde então, diante dos avanços tecnológicos, o emprego do concreto armado passou por aperfeiçoamento, desde a criação de normas regulamentadoras relativas ao seu uso, como também ao desenvolvimento de traços, fórmulas matemáticas e ao desenvolvimento de softwares. Os avanços desse sistema construtivo se direcionam para a otimização de recursos e para o controle da resistência dos materiais empregados, explorando seus inúmeros recursos e benefícios.

O concreto armado se tornou o sistema construtivo mais empregado no país, podendo ser utilizado em inúmeras categorias de obras na construção civil. Esse sistema tem como vantagens a alta resistência à compressão e, devido à armação, resiste satisfatoriamente a esforços de tração, possui baixa demanda de mão de obra especializada, gera economia, resistência, durabilidade, adaptabilidade, impermeabilidade, entre outros. Já as suas desvantagens estão relacionadas ao alto consumo de matérias primas naturais, desperdícios no canteiro de obra e ao lançamento de gases poluidores ao meio ambiente decorrente da sua produção.

Dentro deste contexto, sabe-se que alguns fatores podem provocar a deterioração das estruturas de concreto armado ao longo de sua vida útil. No cenário da construção civil, estes problemas são denominados “patologias”, os quais acometem a matéria-prima das edificações, podendo-se citar as fissuras, infiltrações, corrosão de armaduras, entre outras.

Considerando a influência negativa das patologias em estruturas de concreto armado, este estudo se justifica pela necessidade de se entender os mecanismos de formação e prevenção de manifestações patológicas, bem como pela importância de uma gestão de qualidade na elaboração e na execução de um projeto estrutural, fatores que, mesmo isoladamente, têm provocado sinistros mundo afora, causando transtornos sociais, econômicos e ambientais. Isso acontece porque, diante de demandas cada vez mais exigentes no mercado de trabalho, os profissionais têm priorizado obras rápidas e econômicas, desprezando por vezes a qualidade. Desastres como desabamentos de construções podem gerar ainda insegurança à população em relação à estabilidade e à capacidade resistente das edificações em geral.

Destaca-se que a negligência no gerenciamento pode resultar em perdas irreparáveis, tanto físicas quanto materiais. Uma edificação executada sem os planos e as etapas previamente definidos tem maior propensão a ocorrências de irregularidades em qualquer etapa do processo, irregularidades essas capazes de comprometer a segurança de toda a estrutura, levando à instabilidade estrutural e causando mau funcionamento ou até o colapso dessas estruturas do edifício. Além disso, as formações patológicas estão relacionadas com o gerenciamento devido aos projetos deficientes, execução inadequada e materiais de qualidade inferior.

Neste sentido, este trabalho visa ressaltar a importância da gestão e execução de um projeto, analisar e relacionar as manifestações patológicas com o colapso de um edifício de concreto armado em ambiente com condições adversas. Para isso, será realizada uma revisão de literatura sobre o assunto, buscando relacioná-la a um breve estudo de caso sobre o edifício residencial Champlain Towers South, localizado no município de Surfside, estado da Florida, nos Estados Unidos, que desabou em 24 de junho de 2021. Então, abordam-se os conceitos de concreto armado, patologias, confiabilidade estrutural em locais com situações adversas, gerenciamento de projetos, manutenção de edifícios e, por fim, o colapso progressivo em edificações de concreto armado.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Concreto armado

O concreto é o elemento construtivo mais empregado em edifícios e apresenta diversas possibilidades de aplicações, promovendo melhorias no habitat e no bem estar da sociedade, além disso beneficia as indústrias, facilita os deslocamentos e assegura várias outras vantagens. O concreto é constituído por cimento, agregado miúdo (areia natural ou artificial), agregado graúdo (britas, seixos rolados) e água, é um material que se apresenta na forma sólida, um elemento denso, durável, de fácil aplicação e produção. Quando há a adição de armaduras de aço na execução dos elementos estruturais é denominado de concreto armado (AMORIM, 2010).

Para a garantia do bom desempenho das infraestruturas de concreto armado deve-se adotar cuidados nas fases de projeto, execução, controle de materiais e na manutenção (AMORIM, 2010). A NBR 6118 (ABNT, 2014) adota três requisitos que as estruturas de concreto armado devem fornecer, sendo: capacidade resistente, desempenho em serviço e durabilidade.

A capacidade resistente se refere a segurança contra a ruptura; o desempenho em serviço abrange a capacidade das estruturas em manter as condições plenas de vida útil durante o período estimado, não apresentando danos que comprometam o uso para a qual foi projetada; a durabilidade consiste na resistência dos elementos estruturais diante das ações ambientais previstas e definidas para a realização e execução dos projetos, além disso, é destacado que as características, a qualidade do concreto e a espessura de cobertura das armaduras está diretamente ligado a durabilidade dessas estruturas (NBR 6118, ABNT 2014).

A maior durabilidade das estruturas está associada a produção de peças menos permeáveis e compactas, a aplicação do produto da forma adequada respeitando o tempo de cura, e o desenvolvimento de métodos que visam protegê-las dos agentes agressivos como o gás carbono, oxigênio, chuvas ácidas e água salgada. O concreto é um material sólido e robusto, apesar disso, ainda sofre com os malefícios devido aos agentes agressivos, a sua microestrutura e as propriedades sofrem mudanças, ocasionando o surgimento de patologias e conseqüentemente a redução da sua vida útil (AMORIM, 2010).

A NBR 15575-1 (ABNT, 2021) aborda a vida útil de projeto como uma estimativa do período ao qual a edificação foi projetada. É estabelecido que as estruturas de concreto armado devem ser projetadas para uma vida útil mínima de 50 anos, de modo a compatibilizar os custos iniciais, a durabilidade conforme os interesses pelo usuário e os custos de manutenção. Deste modo, a vida útil pode ou não ser atingida diante das influências de uso, fatores climáticos, das condições adversas e das manutenções inerentes as edificações.

2.2 Patologias de estruturas em concreto armado

As patologias em edificações são manifestações decorrentes da degradação das estruturas que comprometem principalmente a vida útil da construção diante de falhas, erros de projetos e execução, imperícias, má utilização, a má qualidade dos materiais empregados, ação do tempo, falta de manutenção entre outros diversos fatores. É essencial que sejam estudadas as suas origens, formas de surgimento, as consequências, mecanismos de falhas e sistemas de degradação, além de destacar que, para a identificação correta dos fatores de deterioração, torna-se necessária a definição das medidas a serem aplicadas para a recuperação e manutenção da vida útil, segurança e durabilidade, o que permite reduzir os custos de manutenções e eliminar fatores negativos referentes à formação de patologias (ARIVABENE, 2015).

Existem várias patologias em estruturas de concreto armado, as quais podem ocorrer de maneira isolada ou, como é mais comum, simultaneamente. Como mencionado anteriormente, um estudo de caso foi desenvolvido neste trabalho e, pelo fato de o tema “patologia das construções” ser muito amplo, optou-se por abordar as quatro manifestações patológicas principais que acometeram a edificação deste estudo, a saber: corrosão de armaduras, fissuras, desgaste superficial do concreto e infiltração. É importante ressaltar que tais patologias, quando ocorridas nos elementos estruturais (fundações, lajes, vigas e pilares), tendem a comprometer a estabilidade e a durabilidade da edificação.

2.2.1 Corrosão das armaduras

Compreende-se como corrosão a interação destrutiva do material com o meio ao qual está inserido, mostrando-se como um mecanismo de deterioração do aço, na

qual se gera uma redução de massa do material e a formação de ferrugem (FÉLIX, 2018). Assim, entende-se que esta manifestação patológica pode gerar prejuízo financeiro, estético e, sobretudo, redução da capacidade mecânica do elemento estrutural se a agressividade ambiental for muito rigorosa.

Sabe-se que elementos metálicos são aplicados na construção civil com diversas finalidades, e a corrosão pode provocar efeitos negativos na edificação. Ela pode implicar na segurança estrutural, diminuindo a seção das barras de aço utilizadas na confecção das armaduras dos elementos estruturais, deslocamento do concreto que cobre a armadura oxidada e, dependendo do ambiente e da solicitação mecânica aplicada no elemento, pode causar a ruptura do mesmo. Além disso, se o desgaste for localizado, a corrosão pode ocasionar a perfuração do componente e, no caso de tubulações, existe o risco de perda de gases e líquidos (SOUZA & MURTA, 2012).

A aparição deste tipo de fenômeno é comum em pilares, vigas e lajes, quando estes são expostos a ambientes agressivos que contém sulfatos, ácidos, sais e etc, e a cobertura do aço com concreto não é executada de maneira correta (SOUZA & MURTA, 2012). A FIG. 1 apresenta uma viga com corrosão de armaduras em estágio avançado. Destaca-se que em ambientes próximos ao mar é mais propício a corrosão devido alta concentração de agentes agressivos (AMORIM, 2010).

Figura 1 – Corrosão de armaduras em viga



Fonte: Tecnosil¹

¹ tecnosilbr.com.br/corrosao-de-armadura-o-que-causa-e-como-amenizar-esse-dano/

2.2.2 Fissuras, trincas e rachaduras

As fissuras podem ser caracterizadas como interrupções de pequena abertura, impulsionadas pela ação de forças que causam a aparição de tensões de tração que superam a capacidade resistente do material que constitui a estrutura (DUARTE *et al.*, 2021). Conforme a norma brasileira NBR 9575 (ABNT, 2010), fissura é a “abertura ocasionada por ruptura de material ou componentes, com abertura inferior ou igual a 0,5 mm”.

Nas edificações, as fissuras possuem duas classificações: geométricas e mapeadas. As geométricas são quase lineares, acompanhando uma direção principal e que geralmente se originam da movimentação da estrutura, como mostra a FIG. 2. Já as mapeadas surgem em todas as direções ao mesmo tempo e ocorrem devido a retração do material. As fissuras também são classificadas com ativas e passivas. As ativas são as que possuem variações de abertura e fechamento. Já as fissuras passivas são aquelas avaliadas como estabilizadas, pois não demonstram variação ao longo do tempo (DUARTE *et al.*, 2021).

Figura 2 – Fissuras geométricas em alvenaria



Fonte: FiberSals²

² fibersals.com.br/blog/rachaduras-no-predio/

As trincas, por sua vez, são aberturas mais profundas e acentuadas. O fator decisivo para se caracterizar uma trinca é a “separação entre as duas partes”, isto é, o material em que a trinca se localiza está separada em dois. As trincas são mais perigosas se comparadas com as fissuras, já que possuem ruptura dos elementos, afetando a segurança dos componentes estruturais (AVARIBENE, 2015). De acordo com a NBR 9575 (ABNT, 2010), as trincas são “aberturas ocasionadas por ruptura de um material ou componente com abertura superior a 0,5 mm e inferior a 1,0 mm”.

Segundo Moraes (2020), as principais causas para o aparecimento de trincas é a falta de intertravamento (amarração) dos blocos cerâmicos, revestimento muito espesso, a não obediência à abertura para encunhamento e a falta de juntas de dilatação, essas trincas podem se apresentar em grande variedade de formatos e aberturas.

É importante destacar também que as trincas no concreto podem aparecer em todas as fases da obra, caso a execução ou o projeto estrutural sejam feitos de maneira incorreta. Nas fundações, por exemplo, elas podem ser originadas por recalques diferenciados, em decorrência de tensões de tração de grande intensidade (MORAIS, 2020). A título de exemplo, a FIG. 3 apresenta algumas trincas em alvenaria.

Figura 3 – Trincas em alvenaria



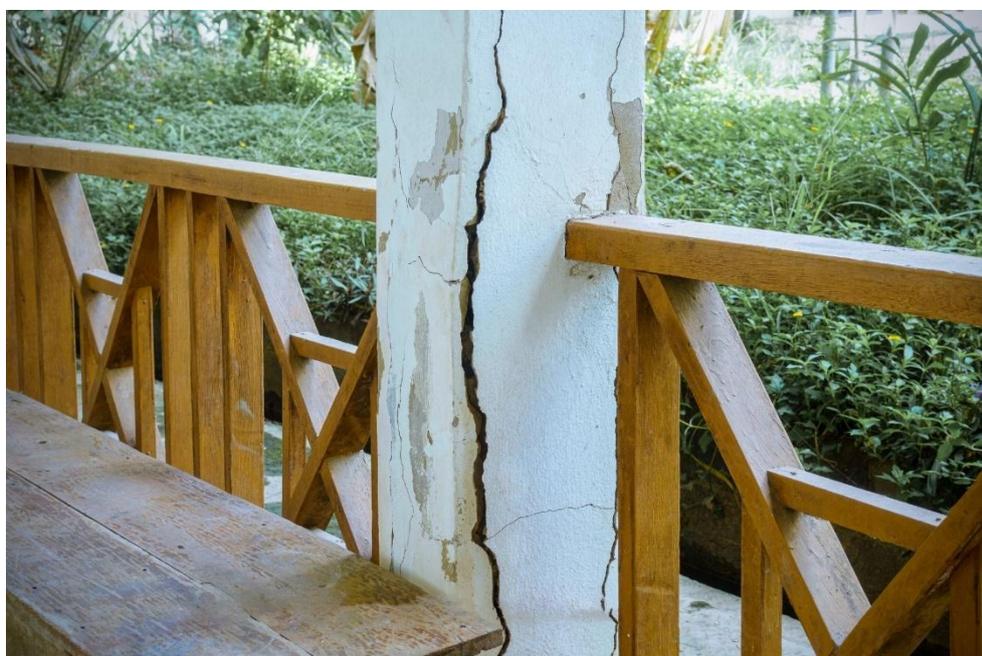
Fonte: Mapa da Obra³

³ mapadaobra.com.br/inovacao/entendendo-as-trincas-e-fissuras/

De acordo com Lottermann (2013), as rachaduras, por sua vez, possuem as mesmas características das trincas quando se trata da separação entre partes, porém as aberturas são maiores, acentuadas e profundas como podemos ver na FIG. 4, essas aberturas são superiores a 1 mm de espessura, o que pode possibilitar a passagem de luz, vento e água.

Por serem parecidas com as trincas, mas em um estágio mais agravado, as rachaduras precisam de atenção imediata, sendo necessário procurar o problema que as originaram e corrigi-lo (LOTTERMANN, 2013).

Figura 4 - Estrutura com rachadura



Fonte: FiberSals⁴

2.2.3 Degradação superficial do concreto

De acordo com Gonçalves (2015), a degradação do concreto, como observado na FIG. 5, é a perda de massa do mesmo, o que acontece devido a um ataque químico expansivo de produtos inerentes ao concreto e/ou devido à sua baixa resistência. O desgaste das superfícies dos elementos de concreto pode ocorrer principalmente em pilares e vigas expostas, por conta do atrito, da abrasão e da erosão.

⁴ fibersals.com.br/blog/rachaduras-no-predio/

Figura 5 - Degradação do concreto



Fonte: Minapim Magazine⁵

Em conformidade com Souza e Murta (2012), o ar e a água são os principais agentes para a abrasão, pois podem conter elementos químicos prejudiciais ao concreto, como sais, ácidos, sulfatos e gases. Esses elementos são carregados pela água e pelo ar e, quando ambos entram em contato com o concreto, ocorre a erosão, cujas características e intensidade podem diferenciar dependendo da forma, quantidade, tamanho e dureza das partículas, bem como a velocidade de deslocamento da água ou do ar, ou mesmo da resistência do concreto utilizado para a confecção do elemento estrutural.

Outro tipo de desgaste que pode ocorrer nas estruturas de concreto é a cavitação. O processo de cavitação consiste na formação de pequenas cavidades, provindas da ação de águas correntes, que resultam em vazios que se formam e desaparecem quando a água está se movimentando rapidamente (SOUZA & MURTA, 2012).

Ainda de acordo com Souza e Murta (2012), pode-se dizer que as causas físicas da degradação do concreto podem ser classificadas em duas categorias: a primeira é o desgaste superficial, que tem origem pela abrasão, erosão e cavitação; a segunda é a fissuração, ocasionadas devido a fatores internos e externos do concreto, como pressões de cristalização de sais nos poros, e índices normais de temperatura e umidade. Da mesma maneira, as causas químicas da deterioração do concreto

⁵ minapim.com/desvendando-a-corrosao/

podem ser classificadas em hidrólise causada por água, trocas iônicas entre líquidos agressivos e a pasta de cimento, além de reações que geram produtos expansíveis, como a reação de expansão por sulfatos, a reação álcali-agregado e reações de corrosão das armaduras.

2.2.4 Infiltração

A infiltração é muito comum de ser encontrada em algumas partes das edificações, principalmente em lajes. Essas infiltrações acontecem pela falta ou falha da impermeabilização, podendo causar danos aos edifícios e diminuir a sua vida útil (RIBEIRO, 2019). A FIG. 6 exemplifica a infiltração em uma laje.

Figura 6 - Infiltração em laje



Fonte: Kantro⁶

Segundo Osório (2018), para se ter a estanqueidade de água e prevenir infiltrações e futuros problemas, os projetos deverão obedecer às recomendações da norma NBR 9575 (ABNT, 2010), que estabelece sistemas de impermeabilização de lajes e outros elementos que constitui uma edificação. De acordo com esta norma, os materiais que constituem a camada de impermeabilização podem ser asfálticos, poliméricos ou cimentícios.

⁶ kantro.com.br/infiltracao-um-dos-piores-pesadelos-de-um-gestor-de-facilities/

Os materiais asfálticos são utilizados para impermeabilizações flexíveis e são divididos em dois tipos, membranas e mantas. Nas membranas são utilizados produtos líquidos ou pastosos onde são moldados *in loco* diretamente na base a ser impermeabilizada. As mantas são materiais pré-moldados que são estruturados com véu de fibra de vidro, polietileno ou poliéster e são industrializados com asfalto oxidado (DE AVILA, 2013)

Os poliméricos possuem grande variedade de classificações e também possuem membranas e mantas. As membranas poliméricas são vistas como impermeabilizações flexíveis, pois possuem a capacidade de absorver as deformações da base. As mantas poliméricas são pré-fabricadas a partir de vários tipos de materiais sintéticos e elas se adaptam com facilidade as movimentações e vibrações do local onde são aplicadas. Dependendo da sua composição, são resistentes a ataques químicos e a raios ultravioleta (EGGERS, 2018).

Por fim, os cimentícios são argamassas ou concreto que são produzidos com adição de resinas poliméricas acrílicas ou aditivos diversos, estes são considerados como impermeabilizantes rígidos. Tais concretos e argamassas sofrem impermeabilização pela ação físico-química dos materiais adicionados que reagem com o cimento, gerando sais que agem como hidrofugantes (EGGERS, 2018).

No estudo realizado por Hussein (2013), afirma-se que falhas construtivas também podem ser um grande fator para o aparecimento de infiltrações, pois eles podem provocar a ineficiência da impermeabilização. De acordo com o autor, as principais falhas são:

- a) Trincas e fissuras em estruturas de concreto;
- b) Variações térmicas;
- c) Deformação excessiva do concreto armado;
- d) Recalques diferenciais;
- e) Retração hidráulica.

Além destes problemas, a infiltração é responsável por manifestações patológicas bastante prejudiciais à segurança dos elementos estruturais, como a corrosão das armaduras, a carbonatação do concreto e a eflorescência (HUSSEIN, 2013).

2.3 Confiabilidade estrutural em locais com situações adversas

Os sistemas estruturais devem ser capazes de atender a determinados requisitos para proporcionar segurança e adequadas condições de utilização. A segurança de uma estrutura está relacionada à resistência das cargas atuantes e às combinações de esforços, certificando que a estrutura não entrará em colapso durante sua vida útil. As boas condições de uso, por sua vez, referem-se às baixas deformações e deslocamentos na estrutura, assegurando que essas condições não irão prejudicar ou impedir a sua utilização. Além disso, deve ser analisada a melhor solução para a produção de um projeto estrutural econômico (MAPA, 2016).

No estudo da confiabilidade estrutural, analisam-se os estados-limites, parâmetros que definem a impropriedade para o uso da estrutura, por razões de segurança, funcionalidade ou estética. Para a segurança contra falhas e colapso estrutural, aplica-se o estado-limite último, e quanto à alteração no uso da estrutura, o estado-limite de serviço (NBR 6118, ABNT 2014). O cálculo dos níveis de segurança das estruturas é definido a partir desses estados, sendo assim, o primeiro passo no dimensionamento deve ser a definição das incertezas presentes nos projetos (MAPA, 2016). A NBR 6118 (ABNT, 2014) afirma que, quando ultrapassados os estados-limites, a estrutura perde a capacidade de resistência e segurança.

Neste sentido, os requisitos de qualidade a construção e serviço de uma estrutura está relacionada à sua resistência à ruptura, às condições desejáveis de utilização durante a sua vida útil, às cargas atuantes que a estrutura tende a resistir devido as influências ambientais e às cargas devido a ocupação. As cargas, por sua vez, são definidas pelo projetista em função do tipo de edificação definida pelo contratante (NBR 6118, ABNT 2014).

Santiago (2011) enfatiza que é comum em torno de um projeto estrutural a ocorrência de inúmeras incertezas, sendo capaz de existirem divergências de comportamento de uma estrutura real em comparação ao previsto em projeto. As incertezas são intrínsecas, não podem ser eliminadas, porém podem ser reduzidas de acordo com os dados coletados e o conhecimento da estrutura. O autor contextualiza que as principais incertezas que afetam esses projetos são: “incerteza física, incerteza de previsão, incerteza fenomenológica, incerteza estatística, incerteza de decisão, incerteza de modelo e erro humano” (SANTIAGO, 2011, P.63), definindo-as como se segue:

- a) Incerteza física: é estimada por meio de observações ou de experiências, normalmente não são conhecidas. Está relacionada à aleatoriedade das propriedades dos materiais, ações do vento e geometria dos elementos;
- b) Incerteza de previsão: está relacionada à previsão de circunstâncias futuras de um processo ou sistema. Um exemplo é a previsão da resistência dos materiais empregados e os carregamentos que atuarão na estrutura quanto da sua utilização;
- c) Incerteza fenomenológica: associa-se a eventos inimagináveis, estando comumente presente em projetos inovadores em que as possibilidades de falhas são grandes e podem acontecer de inimagináveis modos;
- d) Incerteza estatística: associa-se a um conjunto de amostras para a geração de uma curva de dados, contemplando as probabilidades de uma variável aleatória e seus respectivos parâmetros;
- e) Incerteza da decisão: relaciona-se com a incerteza da ocorrência de um evento. O estado-limite é um exemplo;
- f) Incerteza de modelo: relacionada com as teorias comportamentais dos materiais de acordo com o real e também com as simplificações das ações e efeitos sobre as estruturas;
- g) Erro humano: decorrente de erros nas fases de projeto, construção e utilização da estrutura.

Dentro deste contexto, é a partir dos conceitos de confiabilidade que se torna possível quantificar a probabilidade de falhas nos elementos estruturais. As estruturas apresentam inúmeros modos de falhas, podendo estar associados ao comportamento e à dependência entre os elementos. Para uma maior precisão na análise, representam-se os parâmetros de projeto como variáveis aleatórias, pois permite a adequada representação da variabilidade. Desta forma, verificam-se os valores da probabilidade de falha com base em coeficientes de segurança, determinando qual estado-limite pode ser atingido (LESSA *et al.*, 2018).

Deve-se levar em conta o conhecimento das condições ambientais em que a edificação se encontra para determinar ainda na fase de projeto das estruturas o sistema ideal a ser executado, considerando que o ambiente influencia na durabilidade dessas estruturas (AMORIM, 2010). Lima *et al.* (2006) abordam que

edificações em ambientes de regiões costeiras sofrem com o contato constante de sais que incidem sobre suas estruturas. Dentre esses sais destaca-se os íons cloreto, que constituem o principal fator da degradação do concreto e da corrosão de armaduras, afetando a segurança estrutural dessas estruturas. Desta forma, aponta-se que a confiabilidade de uma estrutura compreende o adequado comportamento através de um período e condições ambientais predeterminadas. As condições ambientais afetam a vida útil, de modo a acometer a confiabilidade dessas estruturas (LEEMIS, 2009 *apud* ROCHA, 2019).

2.4 Gerenciamento de projetos

Em meio ao desenvolvimento da construção civil, foi substancial o progresso de novas práticas ao sistema construtivo. Com as edificações cada vez mais robustas, a demanda de mão de obra especializada, o uso intensivo e criação de novos materiais, o surgimento de novos modelos construtivos, foi ponderada a necessidade de criar padrões de controle de qualidade nos empreendimentos desenvolvidos (SILVA, 2017). O uso racional dos materiais construtivos, uma análise eficiente de projetos e uma execução satisfatória podem, assim, garantir a qualidade e segurança esperada neste cenário.

Cierco *et al.* (2012) apontam a gestão como um conjunto de ações conduzidas em um projeto, envolvendo-a em todas as suas etapas e garantindo que o produto final atenda aos parâmetros de qualidade, acordados com todas as partes envolvidas, e aos propósitos idealizados.

Com esta perspectiva, a norma brasileira NBR ISO 9001 (ABNT, 2015) destaca que as organizações enfrentam desafios no que tange os planejamentos futuros, desta forma, aborda-se o sistema de gestão de qualidade como uma estratégia para o desenvolvimento de uma instituição. Esse sistema proporciona o aumento do desempenho e do desenvolvimento sustentável através dos processos de organização e planejamento. Uma metodologia bem estabelecida expõe fatores determinantes que induzem desvios no padrão de qualidade em relação aos resultados esperados.

Para o desenvolvimento de projetos de qualidade, é indispensável avaliar as constantes do gerenciamento das atividades, diagnosticando as falhas, causas de erros e acertos, redirecionando para a obtenção das metas estabelecidas. (TRENTIM,

2014). Ottoni (2018) aborda que é substancial empregar metodologias para a gestão de projetos, ponderando dados da viabilidade, finanças, riscos, potencialidades e fraquezas.

Dentro deste contexto, em 1969 foi fundado nos Estados Unidos, por uma entidade sem fins lucrativos, o Instituto de Gerenciamento de Projetos (do inglês, *Project Management Institute* – PMI®), o qual elaborou um guia de Conhecimento e Gerenciamento de Projetos (PMBOK®). Segundo Ottoni (2018), este guia é aplicado mundialmente e foi desenvolvido para orientar, apresentar ferramentas e técnicas de gerenciamento de projetos aos profissionais.

O gerenciamento de um projeto pode ser descrito como a aplicação do conhecimento, habilidades, ferramentas e técnicas envolvidas de um projeto, elaborado de forma progressiva ao longo de todo o processo, contribuindo para a melhoria e o detalhamento de um plano com informações mais detalhadas, específicas e exatas. Ele é realizado e integrado em cinco grupos de processos, a saber: iniciação, planejamento, execução, monitoramento e controle, e encerramento (PMI, 2017).

O grupo de processo de iniciação e planejamento envolve a definição a e obtenção da autorização para o início de um projeto ou de uma nova fase de um já existente. A de execução se refere ao plano de gerenciamento e ao processo realizado para a conclusão do trabalho. O processo de monitoramento e controle acompanha, analisa e controla o desempenho do projeto, verificando as áreas quando for necessário iniciar as mudanças no plano. O grupo de encerramento é o processo ao qual conclui-se formalmente um projeto, fase ou contrato (PMI, 2017).

Os resultados do trabalho conduzido por Ferreira (2016) apontam que o sucesso da construção e da gestão de empreendimento está atrelado ao projeto. Um projeto eficiente proporciona qualidade na concretização dos empreendimentos, em contrapartida, um projeto com grandes anomalias resulta em consequências imprevisíveis e resultados inferiores ao desejado, sobretudo ao nível dos prazos, custos e qualidade.

Neste sentido, um projeto pode ser descrito como “um esforço temporário empreendido para criar um produto, serviço ou resultado único” (PMI, 2017, p. 4). Delesderrier (2015) afirma que para a garantia da qualidade de um produto, é fundamental considerar o processo de compatibilização de projetos na sua fase de desenvolvimento, possibilitando identificar e solucionar as falhas na etapa da concepção, permitindo a resolução de possíveis interferências e o aperfeiçoamento

na execução do projeto. Desta forma, é viabilizada a entrega final do produto dentro dos parâmetros exigidos.

A compatibilização de projetos, por sua vez, é apresentada como forma de minimizar os problemas surgidos pela elaboração de projetos fracionados, desenvolvidos por diversos autores. Esse processo envolve a unificação de projetos arquitetônicos e complementares, garantindo um bom desempenho no processo final. (DELESDERRIER, 2015).

No contexto da construção civil, é no canteiro de obras que ocorre todo o processo de execução do projeto e do planejamento em questão. Nele, os materiais necessitam ser armazenados, o descarte dos resíduos deve ser realizado de forma adequada e são obrigatórios ambientes apropriados e seguros para atividades de necessidades básicas dos operários. Além disso, pensando na eficiência, produtividade e segurança dos trabalhadores, é imprescindível que o canteiro de obras permaneça sempre organizado. Um canteiro de obras bem gerido representa o aumento da qualidade, produtividade, redução de prazos e custos pré-estabelecidos (BRAGA, 2016).

2.5 Manutenção de edificações

As edificações são estruturas responsáveis a atender seus usuários ao longo de todo o uso, carecendo sempre de apresentar condições satisfatórias ao que se destinam, resistindo as condições de aplicação e aos agentes ambientais. As edificações não são consideradas produtos descartáveis, passíveis de substituição quando atingida as condições mínimas de uso, essa prática é onerosa e traz inúmeros malefícios ao meio ambiente. Desta maneira, é exigido vistorias e manutenções para a adequação das exigências de utilização de seus usuários (NBR 5674, ABNT 2012).

As edificações, equipamentos e sistemas estão sujeitas ao desgaste em consequência da sua utilização ou por condições adversas. A manutenção está compreendida por um conjunto de ações que através de vistorias e reparos, asseguram que os níveis de operacionalidade e durabilidade sejam reestabelecidos através de limpezas, reparos, substituições de componentes danificados, pinturas, inspeções, entre outras ações responsáveis pela redução da vida útil dessas estruturas. Além do mais é válido destacar que, a adoção de boas práticas de

utilização é determinante para o bom desempenho das instalações (GONÇALVES, 2014).

Na gestão da manutenção as falhas são identificadas, as estratégias são elaboradas, como: a gestão estratégica de manutenção, o impacto da gestão da instalação e o desempenho da gestão do edifício, e sucessivamente realizam-se as correções conforme as características e o tipo de utilização do edifício (GONÇALVES, 2014). A NBR 16.280 (ABNT, 2020) trata que as reformas devem ser planejadas e acompanhadas por profissionais especializados, é levando em consideração os desgastes decorrentes do uso, a perda da qualidade e segurança, a norma preconiza ações e processos para os planos de reforma.

A falta de manutenção colabora para a evolução das manifestações patológicas, situação que provoca a redução do desempenho tornando o ambiente insalubre, deficiente no aspecto estético, e inseguro (ZUCHETTI, 2015). Júnior *et al.* (2021) aborda que esses problemas poderiam facilmente serem evitados com a adequada confecção de projetos, correta escolha dos materiais utilizados, uso responsável da estrutura, dentre outros, de forma a reduzir, atenuar ou anular a necessidade de reparos das estruturas ameaçadas. Destaca-se que a negligência dessas alterações poderá ser capaz de instabilizar as estruturas de concreto armado e de até levá-las ao colapso (JÚNIOR *et al.*, 2021).

O profissional de engenharia é visto pela legislação brasileira como o responsável pela segurança e estabilidade da edificação. Quando a edificação é executada sem profissionais qualificados para concepção, execução e manutenção das estruturas, é atribuído ao proprietário do imóvel ou síndico a responsabilidade da edificação em razão das patologias e acidentes (MENDONÇA; MOUNZER, 2021).

2.6 Colapso progressivo em edificações de concreto armado

É designado colapso progressivo a propagação de uma interrupção inicial em um elemento estrutural, localizado, estendendo-se aos demais elementos constituintes, caracterizando-se uma reação em cadeia. A característica principal desse tipo de ruptura consiste em que o dano total tenha proporções maiores que os danos iniciais, tais danos propagam para a ruptura parcial ou total em um edifício (LARANJEIRAS, 2011).

As causas do colapso progressivo ocorrem por inúmeros motivos, erros de projeto e execução, ações variáveis abusivas e ações excepcionais. Geralmente o colapso progressivo está relacionado a estruturas de grandes portes, pela clara visualização da desproporcionalidade e o efeito catastrófico ocasionados nessas estruturas, entretanto ocorrem também em estruturas de menor porte (RODRIGUES, 2018). Desta forma, são abordadas quatro razões para o colapso progressivo: as falhas em projetos estruturais, patologias, recalques e falhas estruturais.

Anteprojetos equivocados e estudos preliminares insuficientes, como a inadequada avaliação da resistência do solo, especificações de materiais construtivos, a falta de compatibilidade e padronização entre os projetos, erros de dimensionamento, cálculo estrutural deficientes e detalhes construtivos inexecutáveis constituem as causas mais frequentes de erros na concepção do projeto. Essas irregularidades são os grandes fatores responsáveis por graves problemas patológicos nas edificações (SOUZA & RIPPER, 1998 *apud* SOUZA & MURTA, 2012).

A NBR 6118 aborda que “a avaliação da conformidade do projeto deve ser realizada por profissional habilitado, independente e diferente do projetista, requerida e contratada pelo contratante, e registrada em documento específico, que acompanhará a documentação do projeto” (ABNT, 2014. p. 14).

Bomtempo (2017) destaca que o erro de execução de um projeto, como a execução de forma incorreta da distribuição das ferragens de um elemento estrutural, pode levar o colapso de uma estrutura de forma lenta, deformando-se de modo plástico ou romper inesperadamente. Além disso, configuram outro erro comum as mudanças de uso de um edifício, que podem provocar o aumento de cargas, que, por vezes, não se consulta nenhum profissional nem mesmo se revisa o projeto.

Reis *et al.*, (2021) apontam que a deterioração estrutural está associada às patologias na edificação. O desgaste natural das edificações, a falta de manutenção preventiva, técnicas incorretas, materiais e mão de obra de baixa qualidade contribuem efetivamente para a degradação estética e a debilitação da estrutura, sucedendo a redução da sua resistência, tendo potencial de até levar ao colapso parcial ou total as peças estruturais.

Neste contexto, o recalque é o termo usado para designar o fenômeno que acontece quando uma construção sofre um rebaixamento em virtude de um adensamento do solo que está abaixo da fundação da edificação (FERREIRA, 2016).

De início, conhecer as características do solo é muito importante para que se possa escolher o tipo de fundação e calculá-la de acordo com as necessidades. Existem vários tipos de investigação do subsolo, sendo a sondagem de simples reconhecimento à percussão a mais comum e a mais barata. Ela visa classificar solo e verificar qual camada possui a resistência ideal para suportar a edificação. Todo esse estudo é fundamental para que se possa evitar o recalque da estrutura (MARCELLI, 2007).

De acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2010) o recalque pode causar danos que são classificados em três tipos:

- a) Danos estruturais: prejudicam a estrutura, provocando a fissuração em lajes, vigas, pilares e alvenaria estrutural, sendo capazes de causar a inclinação da edificação ou o seu colapso total;
- b) Danos funcionais: prejudicam a funcionalidade da estrutura, gerando dificuldade de abertura de janelas e portas, irregularidades nos pisos, avarias no sistema hidráulico;
- c) Danos arquitetônicos: prejudicam a parte estética da estrutura, como o acabamento de paredes, podendo levar à ruptura de painéis de mármore ou vidro, por exemplo.

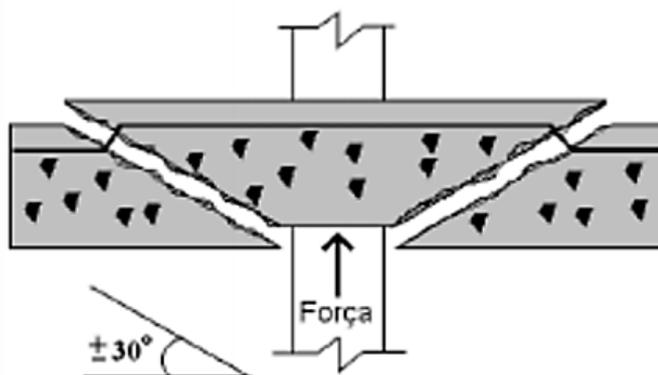
As falhas estruturais são episódios que afetam a estrutura de uma edificação. Normalmente há uma ocorrência de ações conjuntas de vários fatores ligados ao processo construtivo das estruturas, decorrendo desde a sua concepção e execução, até a utilização da mesma (SANTIAGO, 2014).

Alguns fatores que aumentam a probabilidade do surgimento de acidentes estruturais são o envelhecimento da estrutura e o meio ambiente onde ela se encontra. Quando isso é combinado com as falhas ocorridas na fase de concepção do projeto, da execução das estruturas e da utilização incorreta pelos usuários, a edificação acaba se tornando um local propício a acidentes estruturais (SANTIAGO, 2014).

De acordo com Vale (2018), outro exemplo de falha que pode ocorrer em uma estrutura é a punção, definida pela perfuração do elemento em função de grandes tensões de cisalhamento, que são geradas por forças concentradas ou distribuídas em pequenas áreas próximas da ligação laje-pilar. Segundo o autor, essa ruptura por cisalhamento, exemplificada na FIG. 7, pode ocorrer sem aviso prévio, sendo capaz

de causar danos à estrutura e em toda a edificação, devido a um colapso progressivo provocado pelo rompimento de somente uma ligação.

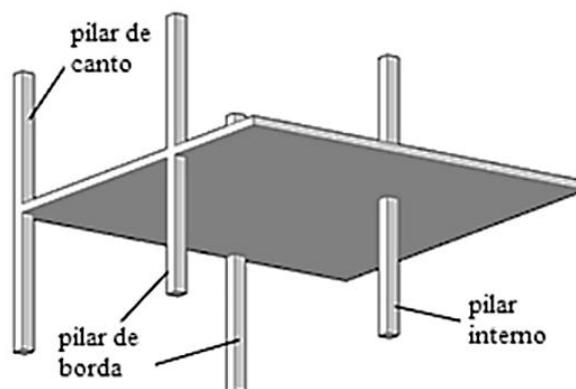
Figura 7 – Mecanismo de punção de lajes



Fonte: VALE (2018)

A punção também pode acometer as lajes lisas, as quais dispensam o uso de vigas, pois se apoiam diretamente sobre os pilares, como mostra o esquema da FIG. 8. O uso de lajes lisas apresenta algumas desvantagens, como o aumento da espessura da laje e a diminuição da rigidez da estrutura. Esse tipo de estrutura exige um dimensionamento que dê à laje a capacidade de suportar o fenômeno da punção, caso contrário existe grande possibilidade de ocorrer o colapso da laje ou até mesmo a ruína total da edificação (SILVA, 2017).

Figura 8 – Esquema do sistema de lajes lisas



Fonte: VALE (2018)

2.6.1 O Condomínio Champlain Towers South

O Champlain Towers South, localizado na cidade de Surfside, região costeira do estado da Florida, nos Estados Unidos, era um condomínio residencial de três edifícios (Champlain Tower North, Champlain Tower South, Champlain Tower East, doravante denominados Norte, Sul e Leste, respectivamente), todos com 12 andares e 136 apartamentos, conforme apresentado na FIG. 9. No dia 24 de junho de 2021, as torres Sul e Leste entraram em colapso, deixando 98 vítimas fatais.

Toda a estrutura era de concreto armado, constituída por lajes planas com duas paredes de concreto localizadas nas torres de escadas e nos núcleos de elevadores/escadas. O pavimento-tipo e o piso do saguão tinham 20,30 e 22,80 cm de espessura, nesta ordem.

Os edifícios Norte e Sul foram construídos em 1981 e o Leste em 1994. Em 2018, o complexo passou por uma vistoria para identificar problemas existentes nos edifícios para que fosse programada uma reforma, porém, até a data do colapso a reforma não havia iniciado. Destaca-se que, de acordo com a Seção 8-11 do Código de Construção do condado de Miami-Dade, uma nova vistoria para recertificação aconteceria em 2021, ano em que os edifícios completariam 40 anos.

Na primeira vistoria supracitada, inspecionou-se um total de 68 unidades (aproximadamente 50% do total), áreas comuns, *deck* da piscina e estruturas do estacionamento. Verificou-se que o edifício apresentava alguns danos estéticos e estruturais, condições que serão abordadas a seguir.

Figura 9 - Edifício Champlain Towers South



Fonte: LIMA (2021) - BBC News Brasil⁷

2.6.2 Condições do complexo

No ano de 2018, a empresa Morabito Consultants realizou uma vistoria no condomínio para verificar as suas condições e apontar medidas para sua recertificação. Após a vistoria, a empresa emitiu um relatório com todos os problemas que os edifícios apresentavam.

De acordo com a Morabito Consultants (2018), as varandas de alguns apartamentos provavelmente possuíam danos estruturais, uma vez que os revestimentos apresentavam algumas fissuras e trincas. Verificou-se que as bordas das lajes das varandas apresentavam trincas e que elas seriam fontes de infiltração de água. Em uma das varandas, observou-se a deterioração do concreto, o que deixou as ferragens em contato com o meio externo, como exemplificado na FIG. 10. Também foram encontradas fissuras significativas na fachada, mas a empresa não viu essas fissuras como fonte de infiltração.

⁷ [bbc.com/portuguese/internacional-57609214](https://www.bbc.com/portuguese/internacional-57609214)

Figura 10 - Deterioração do intradorso da varanda



Fonte: Morabito Consultants (2018)

No *deck* da piscina, foi observado que o vedante de juntas excedeu sua vida útil, assim como a impermeabilização do *deck* da piscina e da entrada. A laje de concreto era uma estrutura plana e a água ficava na estrutura até secar, falha na impermeabilização que estava prejudicando a laje de concreto abaixo dessas áreas, em razão da infiltração, da degradação do concreto e da oxidação das armaduras de aço. O relatório aponta ainda que na parte de baixo do *deck* da piscina e da entrada já tinha sido realizada a injeção de epóxi nas rachaduras da laje, no entanto novas trincas haviam surgido a partir das fissuras antigas, encontrando-se inclusive vergalhões expostos e deteriorados.

No estacionamento foi identificada a presença de injeções de epóxi e reparos nas estruturas de concreto. A Morabito Consultants. encontrou sinais de fadiga nas estruturas, pois foi possível observar muitas fissuras de vários graus nos pilares, vigas e paredes. A FIG. 11 evidencia a degradação do concreto, e a FIG. 12 representa um estágio mais avançado dessa degradação, evidenciando que as armaduras estavam em contato com o meio externo, ambos pilares se encontravam na garagem da edificação. A empresa constatou que muitos consertos que foram realizados nos elementos estruturais de concreto estavam falhando, o que resultou em mais fissuras, infiltração, vazamentos e lixiviação do concreto, apresentados na FIG. 13. Além disso,

verificou-se que no chão da garagem houve a delaminação do concreto, deixando as ferragens visíveis, como retratado na FIG. 14.

Figura 11 - Pilar danificado



Fonte: Morabito Consultants (2018)

Figura 12 - Armadura exposta e degradação do concreto em pilar da garagem



Fonte: Morabito Consultants (2018)

Figura 13 - Infiltração, fissura e lixiviação na laje da garagem



Fonte: Morabito Consultants (2018)

Figura 14 – Delaminação do concreto e armaduras expostas



Fonte: Morabito Consultants (2018)

2.6.3 Plano de reformas

Em abril de 2021, a empresa Morabito Consultants concluiu o plano de reparo e restauração do condomínio Champlain Towers South, porém ela não foi designada a executar tais reparações. O plano foi fundamentado com base no projeto das edificações, sendo as principais alterações sugeridas apresentadas a seguir.

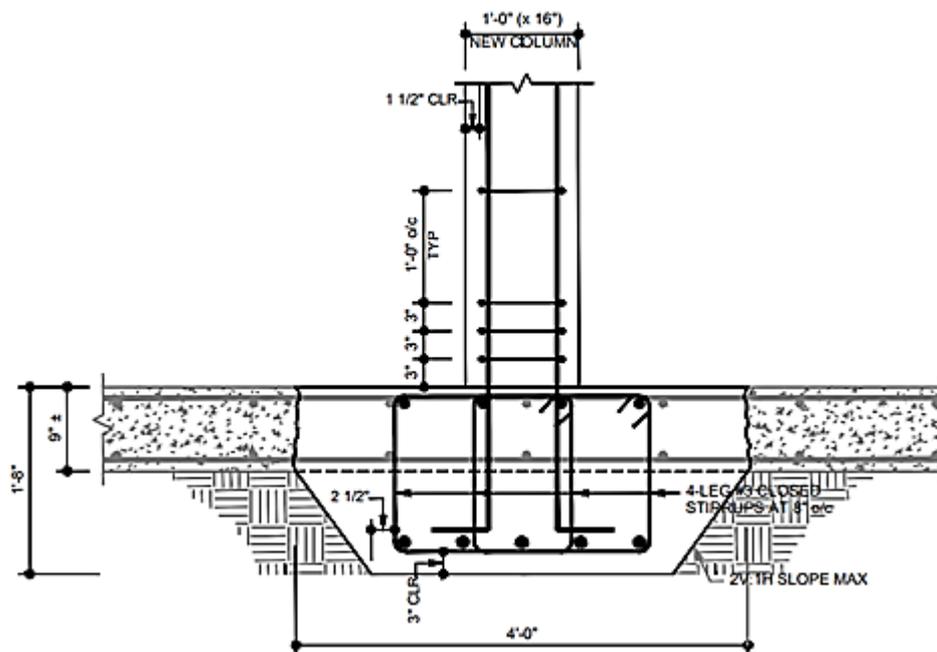
2.6.3.1 Subsolo

O nível do subsolo é constituído pela garagem e casas de bombas, sendo o local onde mais se observou a presença de patologias nas estruturas de concreto armado. As medidas listadas para a manutenção desse pavimento são (MORABITO CONSULTANTS, 2021):

- a) Remoção do concreto das lajes estruturais expostas, devendo ser feitas pesquisas em torno do concreto deteriorado;
- b) Escorar temporariamente todas as lajes, vigas, parede e colunas de concreto existentes que estão danificadas para a realização dos reparos necessários. O escoramento deve ser projetado para todas as cargas sobrepostas durante a construção, em adição o peso próprio da estrutura;
- c) A laje de concreto do estacionamento apresenta reparos anteriores de injeção epóxi nas rachaduras, porém foi executada de forma incorreta e precisa ser refeita;
- d) Remover toda a sujeira, graxa, óleo e compostos das superfícies do concreto por jateamento de areia ou limpeza mecânica. Remover graxa, óleo e ferrugem do aço existente, e retirar as placas de ancoragem e reforço do aço por jateamento de areia ou com a utilização de escova de arame. Então, revestir todo o aço exposto com anticorrosivo para proteção;
- e) As fissuras e trincas devem ser seladas com gel epóxi e selante poliuretano, respectivamente. Assim, todas as conexões, âncoras e placas existentes que serão expostas durante os reparos deverão ser devidamente jateadas ou limpas mecanicamente e revestidas com anticorrosivo de coloração alaranjada;
- f) A laje da rampa da garagem deverá ser reforçada de modo a ter no mínimo 21,6 cm de espessura;

- g) Executar um novo pilar com dimensões 30x40 cm na rampa de entrada da garagem. A FIG. 15 apresenta o detalhamento deste pilar, bem como da sapata que constitui sua fundação;

Figura 15 – Detalhamento do pilar e sapata a serem executados



Fonte: Morabito Consultants (2018)

- h) Reforço estrutural das estruturas de fundação com cobrimento mínimo de 7,5 cm; para vigas e pilares, mínimo de 5 cm e, para lajes, de 2 cm.

2.6.3.2 Primeiro pavimento

Constituído pela piscina, *deck*, jardins e unidades residenciais, as reformas a serem executadas consistem em (MORABITO CONSULTANTS, 2021):

- Remoção da vegetação, do solo, da membrana impermeabilizante e do concreto deteriorado existente, para expor a laje estrutural e fazer os reparos necessários. O novo solo e vegetação usados sobre a laje da garagem deve ser leve, com densidade máxima de aproximadamente 1,28 g/cm³;
- Reparar os drenos danificados do *deck*;

- c) Revestir o concreto no *deck* com no mínimo 5 cm de espessura, para obter a inclinação adequada para o escoamento. Todo o revestimento deverá ser impermeabilizado;
- d) Remoção do acabamento da piscina e reparação de sua estrutura;
- e) Na área do *deck* da piscina, remover as membranas impermeabilizantes, a camada de areia existente, a camada de argamassa e o revestimento da laje de concreto para expor a laje e reparar sua estrutura;
- f) A piscina e a jacuzzi apresentam vazamentos, os quais devem ser vedados com selante poliuretano.

2.6.3.3 Demais pavimentos

Para os demais pavimentos, os reparos se concentram nas unidades residenciais, incluindo as varandas, e na fachada da edificação. As principais medidas propostas foram (MORABITO CONSULTANTS, 2021):

- a) As varandas necessitam ser reparadas e niveladas para evitar o acúmulo de água, podendo-se aplicar epóxi ou areia para o nivelamento;
- b) Na face superior da varanda, preparar adequadamente o substrato de concreto para a aplicação de novas membranas impermeabilizantes, removendo qualquer superfície existente;
- c) Impermeabilizar a varanda com manta líquida em poliuretano ou com a aplicação de pisos;
- d) Algumas áreas no acabamento nas paredes em alvenaria e bordas da laje estão descascando, levando ao aumento da umidade nas paredes internas. Recomenda-se que toda a alvenaria seja reparada com argamassa, selando-se todas as fissuras e trincas;
- e) Nas áreas em que o concreto está deteriorado e que as ferragens estão expostas, o reparo consiste na limpeza do aço e posterior aplicação de um agente galvanizador.

2.6.4 Colapso da estrutura

O colapso parcial do condomínio Champlain Towers South ocorreu no dia 24 de junho de 2021 por volta de 01:30 da manhã. Por ser recente, o laudo pericial do sinistro ainda não foi concluído. As torres que entraram em colapso foram a Sul e a Leste. Para que as buscas tivessem continuidade, a torre Norte precisou ser demolida. Entende-se que uma das possíveis causas para que ela não desabasse possa estar associada à rigidez da caixa dos elevadores, construída em concreto armado. A FIG. 16 é uma comparação entre o antes e depois da edificação, o retângulo preto representa as torres que entraram em colapso. A FIG. 17 expõem outro ângulo do edifício colapsado.

Figura 16 - Antes e depois das torres colapsadas



Fonte: LIMA (2021) - BBC News | Brasil⁸

⁸ [bbc.com/portuguese/internacional-57609214](https://www.bbc.com/portuguese/internacional-57609214)

Figura 17 - Torres colapsadas



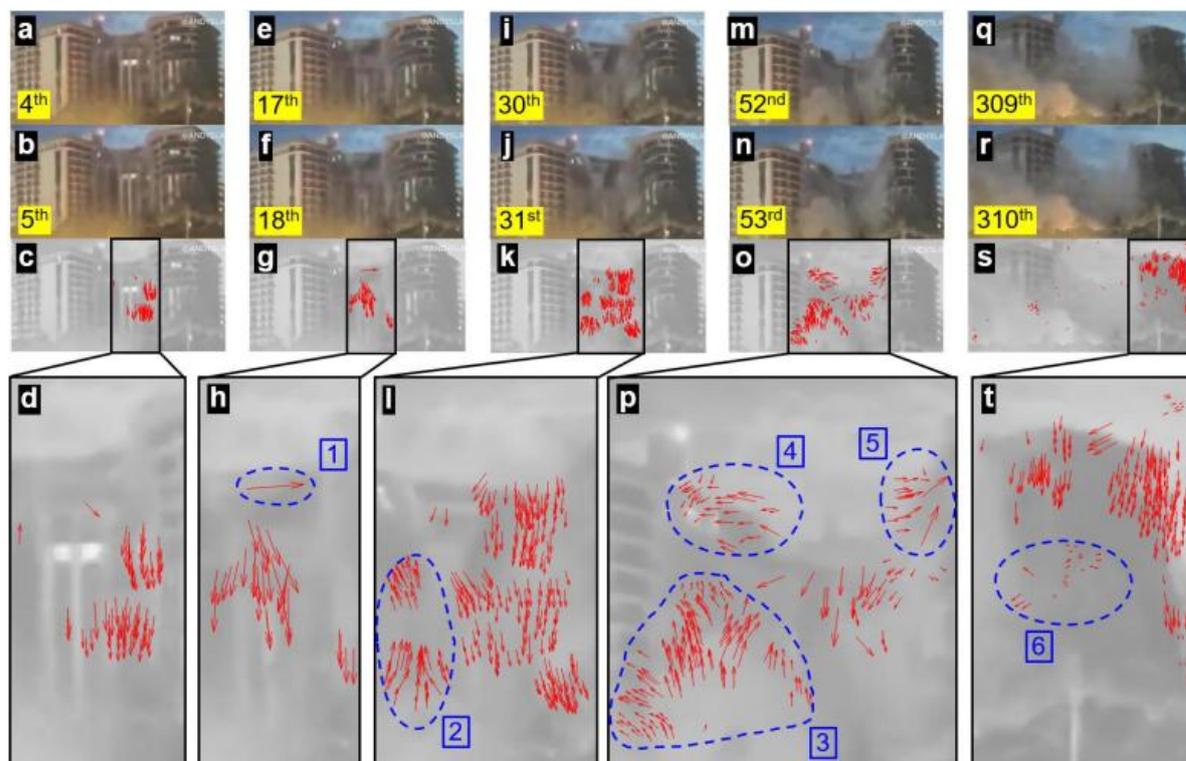
Fonte: HERBERT (2021) - Reprodução CNN⁹

Para a análise da queda, um grupo de pesquisadores juntamente com apoio e financiamento de universidades realizaram um estudo através da filmagem do momento exato da queda dos edifícios, que foi capturada por uma câmera de vigilância do edifício vizinho. Com esta perspectiva, Kong e Smyl (2021) aplicaram algoritmos computacionais através dessas imagens para a obtenção de informações que não são capazes de serem constatadas apenas por olhos humanos. Foi utilizada uma ferramenta de monitoramento de integridade estrutural. No escaneamento das imagens, os autores exploraram os minúsculos movimentos e avaliaram os componentes estruturais, examinando as direções e a influência de seus movimentos durante a queda.

Diante das medidas supracitadas e com base no estudo conduzido por Kong e Smyl (2021), entende-se que o colapso dos prédios pode ser considerado como um colapso progressivo, em que a falha de um elemento estrutural ocasiona a falha de outros elementos adjacentes. Além disso, pode-se inferir que o início do desabamento aconteceu na torre Leste (ao centro) e posteriormente na torre Norte (à direita), permanecendo apenas a torre Sul (à esquerda), como se verifica na FIG. 18.

⁹ edition.cnn.com/2021/06/24/us/gallery/photos-building-collapse-near-miami/index.html

Figura 18 – Imagens escaneadas para monitoramento da integridade estrutural



Fonte: KONG E SMYL (2021).

A FIG. 18 apresenta cinco instantes críticos do momento do colapso, selecionados através do vídeo. A primeira e segunda linha são os momentos selecionados (a, b = 0,13 e 0,17 s; f = 0,57 e 0,60 s; i, j = 1 e 1,03 s; m, n = 1,73 e 1,77 s; e q, r = 10,3 e 10,33 s), enquanto a terceira linha apresenta a indicação da direção do movimento das estruturas através de setas, e a quarta apresenta de forma ampliada esse movimento, destacando-os em círculos pontilhados em azul. No círculo pontilhado 1, acredita-se que a seta horizontal seja uma correspondência incorreta e foi descrita pelos autores como um *outlier*, apresentando um dado discrepante. Nos círculos 2,3 e 6, as setas apontam para cima devido à nuvem de poeira originada. As setas do círculo 4, por sua vez, representam direções horizontais para a esquerda devido aos esforços e ao movimento da estrutura em direção ao núcleo rígido, que impediu a torre Sul de colapsar. No círculo 5, as setas horizontais representam o movimento da estrutura e as setas para cima representam os movimentos das partículas de poeira (KONG & SMYL, 2021).

Como se observa, as causas responsáveis pelo colapso parcial do condomínio Champlain Towers South ainda são desconhecidas. Kong e Smyl (2021), acreditam que este colapso foi causado pela associação de diversas falhas e danos. As causas

mais prováveis são; a corrosão de armaduras de aço, problemas de impermeabilização, fissuração do concreto e recalque diferencial do solo, sendo que as duas últimas podem ter causado um desgaste progressivo na estrutura do edifício, tendo a capacidade de causar o colapso parcial do condomínio.

De acordo com Milton (2021), o condado de Miami-Dade que é onde o edifício se localizava é uma ilha praticamente plana e que fica em uma elevação muito baixa, aproximadamente 25% da região se encontra a menos de 1 m de elevação e a média de elevação é de 1,8 m. Devido a mudanças climáticas o nível do mar aumentou 20 cm desde o ano de 1930 dos quais 9,9 cm foi entre 2000 a 2017 o que faz com que o nível do lençol freático também aumente, conseqüentemente o solo que um dia já foi pantanoso fica mais saturado o que facilita a ocorrência de recalque do solo. Isso reforça a hipótese de Kong e Smyl (2021), de que o recalque sofrido pode ter influenciado a perda da resistência da estrutura gerando algumas patologias que podem ter causado o colapso.

Referente aos problemas estruturais, Laranjeiras (2011) enfatiza que lajes lisas podem apresentar maior vulnerabilidade em suas ligações, a vulnerabilidade estrutural está relacionada a inexistência ou insuficiência da continuidade e ductilidade dos materiais nos elementos e ligações estruturais. Isto posto, é possível inferir que uma das prováveis razões para o início do colapso progressivo, possa ter sucedido por efeito do punctionamento das juntas dos pilares com as lajes. Em relação à análise do momento do desabamento, foi levantada a hipótese de o dano inicial tenha originado na parte inferior da edificação, o que corresponde à laje da garagem. É ponderado que essa laje apresentava danos significativos como a lixiviação, corrosão de armaduras e infiltrações, o que poderia ocasionar a perda da sua resistência e conseqüentemente a descontinuidade ou deficiência dos elementos ligantes. Na FIG. 19 e 20 é possível analisar a vulnerabilidade das ligações dos pilares com as lajes.

Figura 19 - Vulnerabilidade nas ligações dos pilares com as lajes



Fonte: GLANZ; BAKER; SINGHVI - reprodução The NY Times¹⁰

Figura 20 - Pilares do estacionamento



Fonte: MIÉRCOLES - Vistazo (2021)¹¹

Outro possível motivo a ser abordado, é em relação ao ambiente a qual a estrutura está inserida, sabe-se que edificações costeiras sofrem constantemente pela presença de agentes químicos, conduzidos por meio de respingos de maré e pelo

¹⁰ [nytimes.com/es/2021/07/09/espanol/torre-surfside-fallo-construccion.html](https://www.nytimes.com/es/2021/07/09/espanol/torre-surfside-fallo-construccion.html)

¹¹ [vistazo.com/actualidad/internacional/testigo-vio-como-la-piscina-de-champlain-towers-colapso-un-minuto-antes-del-edificio-GF474877](https://www.vistazo.com/actualidad/internacional/testigo-vio-como-la-piscina-de-champlain-towers-colapso-un-minuto-antes-del-edificio-GF474877)

auxílio dos ventos, que levam as partículas de água contendo esses agentes até as estruturas. Como já ressaltado por Amorim (2010), as propriedades da água salina têm alto potencial para a degradação do concreto e favorece significativamente para a corrosão das armaduras. Como descrito nos laudos da Morabito Consultants, muitas estruturas de concreto armado estavam desgastadas e que em algumas peças estruturais, como representado na da FIG. 21, o aço já aparente apresentava corrosão, o que era intensificado de acordo com o ambiente a qual estava inserido. Essas condições ambientais afetam a vida útil da edificação, de modo a comprometer a sua confiabilidade (LEEMIS, 2009 *apud* ROCHA,2019).

Figura 21 – Aço aparente na casa de bombas



Fonte: Reprodução/The Miami Herald (2021)¹²

Além disso, o mau gerenciamento pode ter contribuído para o colapso dessa edificação. Como abordado por Ferreira (2016), os projetos ineficientes e a execução inadequada de uma edificação podem causar graves problemas nas estruturas. O plano de reforma realizado pela empresa Morabito Consultants previa o reforço estrutural de sapatas, lajes e a execução de um novo pilar, pode-se inferir que a

¹² noticias.uol.com.br/internacional/ultimas-noticias/2021/06/29/empreiteiro-fotografou-rachaduras-na-garagem-de-predio-que-desabou-em-miami.html

estrutura não fora projetada para a real condição empregada. Ainda, a laje acima da garagem que comportava a piscina e os jardins, foi executada de forma irregular, não apresentando inclinação, o que ocasionava o empoçamento de água colaborando para as infiltrações, e posteriormente para a oxidação das ferragens. Em adição, quando a empresa realizou a vistoria da edificação em 2018, já havia sinais de degradação das estruturas e não aparentavam ser recentes, ainda sim, apenas três anos depois, em 2021, que o plano de reforma foi finalizado. Essas negligências foram suficientes para que a estrutura entrasse em colapso, e ocasionasse perdas humanas e materiais.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como reportado anteriormente, as estruturas de concreto armado são amplamente empregadas no Brasil e no mundo, contudo, caso utilizadas de forma incorreta ou sem as devidas manutenções, haverá grandes possibilidades de aparecerem deficiências nessas estrutura. Diante disso, realizou-se pesquisas que abrangessem as possíveis causas, capazes de levar um edifício ao colapso total ou parcial.

As pesquisas foram realizadas com a finalidade de correlacionar os principais motivos para o colapso de uma estrutura, os quais podem ser decorrentes das negligências ocorridas desde a etapa de concepção do projeto até a utilização da estrutura, da falta de manutenções necessárias e de patologias que podem ser intensificadas por condições adversas presentes no ambiente em que a estrutura está inserida.

O intuito deste trabalho é trazer a questão que, embora as estruturas de concreto armado apresentem condições satisfatórias de resistência, é ponderado aos profissionais que atuam nessa área, a realização de estratégias para a adoção de processos de gestão, de modo a reduzir o surgimento de patologias, estabelecer condições construtivas necessárias para a adequação da edificação inserida em ambientes com condições adversas, e elaborar planos efetivos de manutenção. Reforçando que o colapso de estruturas ocorre com frequência, sendo os erros construtivos um dos maiores motivos.

Chegou-se ao entendimento que o colapso de um edifício ocorre por diversos motivos, sejam por questões isoladas ou em conjunto, como observado no

edifício Champlain Towers South, em que mesmo sem a conclusão definitiva do que colaborou de fato para o colapso desse edifício, pôde-se inferir através do laudo da vistoria, do plano de reformas e com as imagens de monitoramento da integridade estrutural registradas no momento do desabamento, que os motivos para o colapso se deu pela junção dos fatores, sendo os principais: manifestações patológicas, recalque diferencial do solo, gerenciamento inadequado, falhas estruturais, e as condições adversas ambientais.

Sabemos que existem algumas lacunas de pesquisa que podem e devem ser preenchidas, através de estudos mais aprofundados sobre o tema em questão. Foi considerado que os objetivos sugeridos para a realização desta pesquisa, bem como a questão que conduziu o trabalho, foram alcançados e contemplados, todavia, as possibilidades de entendimento não foram esgotadas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**. Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16280**. Reforma em edificações - Sistema de gestão de reformas - Requisitos. Rio de Janeiro, 2020.

_____. **NBR 5674**. Manutenção de edificações - Requisitos para o sistema de gestão de manutenção. 2012.

_____. **NBR 6118**. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 2014.

_____. **NBR 6122**. Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 9575**. Impermeabilização: Seleção e projeto. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR ISO 9001**. Sistema de Gestão da Qualidade. Rio de Janeiro, 2015.

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.

ARIVABENE, Antonio Cesar. Patologias em estruturas de concreto armado: Estudo de caso. **Revista Especialize On-line IPOG**, Goiânia, v. 3, n. 10, p. 1-22, 2015.

BOMTEMPO, Tullio Barros Silva. Engenharia civil forense: principais causas de incidentes em obras de engenharia civil e procedimentos de investigação. **Acta de Ciências e Saúde**, v. 2, n. 1, p. 1-13, 2017.

BRAGA, Camila dos Santos Quintanilha. **A Gestão de Qualidade Aplicada ao Canteiro de Obras**. Orientador: Jorge dos Santos. 2016. 124 f. Projeto de Graduação (Obtenção do título de Engenheira.) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2016

CIERCO, Agliberto Alves. *et al.* **Gestão de projetos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2012.

DE AVILA, Pierre. **Impermeabilização de alvenarias**. 2013.

DELESDERRIER, Ariane Bonato. **Estudo de falhas em obras de edificações oriundas da falta de compatibilidade entre projetos**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

DUARTE, Hiago Simões; BARBOSA, Melissa; DE FARIAS, Bruno Matos. Fissuras em Estruturas de Concreto Armado: Estudo de Caso. **Epitaya E-books**, v. 1, n. 6, p. 41-91, 2021.

EGGERS, Angelo Rodrigo. **Levantamento dos tipos de impermeabilizantes utilizados por construtoras na construção civil: estudo de caso**. 2018.

FÉLIX, Emerson Felipe. **Modelagem da deformação do concreto armado devido à formação dos produtos de corrosão**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

FERREIRA, Ana Marta Freitas. **Qualidade do Projeto e da Construção Uma Revisão Bibliográfica Atualizada**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto – Portugal, 2016.

GONÇALVES, César Duarte Freitas. **Gestão da manutenção em edifícios: modelos para uma abordagem LARG (Lean, Agile, Resilient e Green)**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Industrial, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2014.

GONÇALVES, Eduardo Albuquerque Buys. **Estudo de patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2015.

GONÇALVES, Eduardo Albuquerque Buys. **Estudo de patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações**. Orientador: Jorge dos Santos. 2015. 174 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

HUSSEIN, Jasmim Sadika Mohamed. **Levantamento de patologias causadas por infiltrações devido à falha ou ausência de impermeabilização em construções residenciais na cidade de Campo Mourão – PR**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná., 2013.

JÚNIOR, Joaquim Júlio Almeida *et al.* Patologia em concreto armado e seus métodos de recuperação estrutural. **Revista Científica Novas Configurações-Diálogos Plurais**, v. 2 n. 1, 2021.

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

LARANJEIRAS, A. C. R. **Colapso Progressivo dos Edifícios – breve introdução**. **TQS News**, n. 33, p 36-47, 2011.

LESSA, João Paulo Leão; JUNIOR, Eduardo Toledo de Lima; DE LIMA, Flávio Barboza. **Confiabilidade estrutural aplicada à análise da resistência de lajes maciças em edifícios de concreto armado**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC'2018. Maceió - Alagoas, 2018.

LESSA, João Paulo Leão; JUNIOR, Eduardo Toledo de Lima; LIMA, Flávio Barboza de. **Confiabilidade Estrutural Aplicada À Análise da Resistência de Lajes Maciças em Edifícios de Concreto Armado**. **CONTECC 2018**. Agosto, 2018.

LIMA, Maryangela Geimba de, *et al.* **Durabilidade de estruturas de concreto em ambiente marinho – importância dos estudos envolvendo micro-clima**¹. 2006.

LOTTERMANN, André Fonseca. **Patologias em estruturas de concreto: estudo de caso**. 2013.

MAPA, Danilo Luiz Santana. **Confiabilidade Estrutural de Pórticos Metálicos Planos**. 149 p. Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

MARCELLI, Maurício. Sinistros na construção civil. São Paulo: **Pini**, 2007.

MENDONÇA, Beatriz Costa de; MOUNZER, Elie Chandan. Estudo de caso: Engenharia Forense e a responsabilidade civil no desabamento de três edifícios no Rio de Janeiro. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 10, n. 10, pág. e216101018648-e216101018648, 2021.

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

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

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

MORAIS, João Marcos Pereira, *et al.* Análise de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, 2020.

OSÓRIO, Gustavo Sanches Moreira. **Infiltrações no envelope da edificação: causas e prevenções**. 2018.

OTTONI, Ana Lúcia Andrade Tomich. **Ferramentas e técnicas de gerenciamento de projetos aplicadas na gestão da segurança e saúde do trabalho na indústria da construção civil**. 149 p. Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Teófilo Otoni, 2018.

PMI. Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos (Guia PMBOK). In: **Project Management Institute**. 2017.

REIS, Elvys Dias; MENDES, Daisson Lucas; SILVA, Ygor Paulino. Reabilitação estrutural por encamisamento de concreto armado: um estudo de caso. In: **Anais do Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia**. 2021.

RIBEIRO, Andressa Clécia; Ribeiro Gonçalves *et al.* Impermeabilização a base de polímero acrílico: estudo de caso no tratamento de infiltração da laje de cobertura. **Revista Eletrônica da Estácio Recife**, v. 5, n. 2, 2019.

ROCHA, Henrique Martins. **Confiabilidade: Volume único**. Fundação Cecierj/ Consórcio Cederj, Rio de Janeiro, 2019.

RODRIGUES , Lucas Fuhr. **Análise de colapso progressivo para um edifício com estrutura de concreto armado**. Orientador: Prof. Dr. Gustavo Savaris. 2018. 123 f. TCC (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2018.

SANTIAGO, José Eduardo Dallacqua, *et al.* **Acidentes estruturais na construção civil**. 2014.

SANTIAGO, Wagner Carvalho. **Estudo da (Não-) Conformidade de concretos produzidos no Brasil e sua influência na confiabilidade estrutural**. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2011.

SILVA, Gustavo Ribeiro da. **Análise da confiabilidade da ligação laje-pilar interno sob punção de acordo com a NBR-6118:2014**. 2017.

SOUZA, Marilsa Inês; MURTA, Mirna Moreira. **Patologias, recuperação e reforço estrutural em concreto armado**. 2012.

TRENTIM, Márcio Henrique. **Gerenciamento de Projetos: Guia para as Certificações CAPM® e PMP®**. 2 ed. São Paulo: Atlas, 2014.

VALE, Paulo Augusto Ferreira, *et al.* **Estudo da punção em lajes lisa–modelo teórico e análise em códigos computacionais**. 2018.

ZUCHETTI, Pedro Augusto Bastiani. **Patologias da construção civil: investigação patológica em edifício corporativo de administração pública no Vale do Taquari/RS**. Orientador: Prof. M.Sc. João Batista Gravina. 2015. 128 f. TCC (Graduação) - Centro Universitário Univates Curso de Engenharia Civil, Lajeado, novembro de 2015.