



Estruturas pré-moldadas de concreto protendido - comportamento da estrutura e manifestações patológicas

ALVES, Cártes R M B; SANTOS, Amaro Francisco Codá dos.

Núcleo de Pesquisa em Planejamento e Gestão - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Informações do Artigo

Histórico:

Recebimento: 14 Ago 2020

Revisão: 14 Ago 2020

Aprovação: 14 Ago 2020

Palavras-chave:

Concreto pré-moldado

Concreto protendido

Manifestação patológica

Resumo:

As obras em concreto armado são amplamente utilizadas no Brasil e a partir dos anos 20 evoluiu-se essa tecnologia ao concreto protendido. Apesar do uso dessas metodologias possuir diversas vantagens, a falta de expertise na elaboração dos projetos, na execução e no uso correto da edificação leva à redução da sua vida útil. Uma das principais formas de preservar a estrutura da sua degradação precoce é conhecer bem a tecnologia adotada e o ambiente em que a obra será construída. Uma vez que identificado uma ou mais manifestações patológicas, se faz necessário verificar os mecanismos de degradação e os possíveis erros daquela construção. Para isso, além da inspeção visual podem ser aplicados ensaios não destrutivos de forma a preservar o estado da construção. A análise da evolução de uma manifestação patológica é fundamental para a tomada de decisão da recuperação antes que parte ou o todo da edificação entre em colapso, resultando em grande investimento financeiro para a sua recuperação ou até mesmo comprometendo a segurança dos seus usuários.

1. Introdução

A escolha de um método construtivo deve ser realizada considerando as recomendações das normas e os recursos disponíveis para elaboração do projeto, execução da obra e conservação da edificação ao longo do tempo.

A avaliação inadequada de parâmetros de projetos em conjunto à baixa qualidade de execução e a falta de manutenção da estrutura podem ocasionar em elevados custos de recuperação, na ruína da construção e em perdas materiais, além de poder apresentar riscos de utilização aos seus usuários.

As metodologias construtivas abordadas neste artigo é o concreto pré-moldado armado e protendido. Serão abordados como as determinações de projetos e o controle de

qualidade, durante a execução da obra, podem influenciar nos mecanismos de degradação da estrutura, diminuindo sua vida útil.

Ao final, será apresentado um estudo de caso de um galpão industrial em condições ambientais desfavoráveis à durabilidade da estrutura e as possíveis causas da sua degradação precoce.

2. Concreto pré-moldado protendido

As estruturas em *concreto pré-moldado* (CPM) são formadas por elementos de concreto que são moldados e curados em um local diferente do local de instalação definitiva da obra. Essas estruturas podem ser empregadas em componentes de uma edificação, como fundações, vigas, pilares, sistemas de

coberturas, lajes, fechamentos laterais, escadas, etc.; em superestrutura de pontes rodoviárias, ferroviárias e de pedestres, como vigas, pilares, travessas, pórticos, pré-laje, etc.; em galerias; em canais de drenagem; em muros de arrimo; em reservatórios; em monumentos arquitetônicos, etc. [1]

O início das construções em CPM se deu em 1891, nas vigas do cassino de Biarritz, na França. No entanto, o estímulo para maior aplicação dessa técnica ocorreu após a Segunda Guerra Mundial, em 1945, com a alta demanda de obras, a falta de mão de obra e a evolução do concreto protendido. No Brasil, há indício que a primeira construção com CPM foi realizada em 1925, na fabricação das estacas de fundação do Jockey Clube do Rio de Janeiro. [2]

Os componentes base para o CPM são o aglomerado cimentício e a armadura de reforço. Embora há diversos materiais de reforço, como as fibras de polipropileno, de vidro e de carbono, o material mais utilizado é o aço. Entre as aplicações do aço, destacam-se o *concreto armado* (CA) e o *concreto protendido* (CP).

O CA é caracterizado pela aderência entre o concreto e a armadura de aço, sem que as armaduras sofram alongamentos iniciais antes da efetividade dessa aderência. No CP, ocorrem os alongamentos iniciais da armadura, que vão propiciar melhor aproveitamento da resistência dos aços especiais no estado-limite último (ELU), além de impedir ou diminuir as fissurações e os deslocamentos dos elementos. [2,3]

O processo de fabricação do CA pré-moldado é similar ao *concreto moldado no local* (CML); no entanto, devido a produção ser em escala, o local de execução é preparado para aumentar a velocidade da produção das peças, com o emprego de maquinários e mão de obra especializada. [2]

O processo de fabricação do CP difere do CA pelo emprego do pré-tracionamento nas armaduras, que pode ser feito: em pistas de protensão, onde vários elementos podem ser executados juntos; por forma móvel, onde cada elemento é executado individualmente;

ou por cintamento contínuo, técnica para a execução de lajes e treliças, menos utilizada. [2]

2.1 Tipos de protensão

A armadura dos elementos em CP podem ser pré-tracionadas ou pós-tracionadas (com ou sem aderência posterior). Nos elementos pré-tracionados, os apoios externos ao elemento são utilizados para realizar o alongamento da armadura antes da concretagem. Após a concretagem, a armadura é solta e sua ancoragem é a aderência ao concreto endurecido. [3]

Em elementos com aderência posterior, após o concreto endurecer, a armadura é tracionada ancorando na própria estrutura do elemento. A primeira tecnologia usual no Brasil é caracterizada por armaduras protegidas por bainhas metálicas, que após a protensão, recebem a injeção de uma calda de cimento, garantindo a aderência da armadura ao concreto. Em 1997, difundiram-se as bainhas plásticas com cordoalhas engraxadas, sem a injeção de calda de cimento. Sendo importante ressaltar que as bainhas (metálicas e plásticas) e a graxa da cordoalha atuam como fatores de proteção aos agentes de corrosão do ambiente. [3,4,5]

Os elementos pós-tracionados sem aderência posterior, também são tracionados ancorando na própria estrutura do elemento, após o concreto endurecer. No entanto, ainda que as cordoalhas sejam engraxadas, essas não possuem bainhas, e por esse motivo, não há aderência ao concreto. [3,4]

2.2 Vantagens e Desvantagens

Se faz necessário o conhecimento das vantagens e das desvantagens da tipologia de construção do CPM protendido para avaliar se essa é a melhor escolha para um determinado projeto. A falta de uma análise prévia pode ocasionar em erros de projetos, aumento do custo e prazo da obra, antecipação de manifestações patológicas, etc.

• CML X CPM

A melhor forma de se avaliar as vantagens e desvantagens do emprego do método construtivo do CPM é comparar com outras técnicas construtivas. Para isso, o autor propõe que as características do CPM sejam ponderadas

em quatro vertentes: de projeto, de construção, de uso e social. [2]

No âmbito de projeto, o CPM: possibilita construções personalizadas e de melhor acabamento; apresenta restrições de gabaritos devido à restrição de transporte; em topografias irregulares, pode ocorrer dificuldade de acesso para os equipamentos de transporte e montagem da estrutura; exige alto nível de detalhamento dos projetos; e pode proporcionar menor consumo de materiais devido à redução de seção das peças. [2]

No âmbito da construção, o CPM: possibilita a execução das obras ganham mais velocidade; proporciona melhor gerenciamento de custo e de mão de obra; proporciona construções mais limpas; reduz desperdícios; tem alto custo de transporte das peças dos e equipamentos; e proporciona melhor controle e qualidade dos elementos estruturais. [2]

No âmbito do uso, o CPM: proporciona maior rapidez na entrega de obras para uso; possui baixa manutenção devido ao controle de qualidade; proporciona maior facilidade para desmonte e adaptações; possibilita melhor isolamento térmico; e pelo concreto possuir grande resistência às altas temperaturas, o seguro contra incêndios é mais barato. [2]

No âmbito social, o CPM: reduz a demanda de materiais e os desperdícios; possibilita a reciclagem de materiais e o reuso dos elementos estruturais; otimiza o consumo de energia da edificação, devido ao isolamento térmico; proporciona melhores condições de trabalho para operários; exige mão de obra especializada; proporciona o aumento da produtividade e qualidade dos serviços; proporciona as construções dos elementos em grandes escalas; e minimiza o impacto da obra no ambiente em torno da construção. [2]

• CA X CP

Dentro da tecnologia do CPM, deve-se considerar algumas vantagens e desvantagens no uso do concreto protendido, se comparado ao concreto armado. [4]

As peças em CP tem: maior durabilidade, uma vez que a inexistência ou diminuição das

fissuras restringem a entrada de agentes de deterioração na estrutura; menor deformabilidade, devido à diminuição das flechas; melhor qualidade dos materiais, devido à utilização de aços especiais; estruturas mais leves e esbeltas, vencendo vãos maiores com maior capacidade de carga; menor cisalhamentos nas vigas; maior resistência à fadiga; e a protensão pode ser considerada como prova de carga. [4]

Entre as desvantagens do CP estão: o efeito da corrosão nas armaduras ativas podem comprometer a segurança da estrutura; erros no projeto ou na execução podem ter efeito de ruína da estrutura; os projetos são mais complexos e devem ser melhor detalhados; e as construções exigem o controle de qualidade, o uso de equipamentos especiais e a mão de obra especializada. [4]

Outro fator importante é que o CA usa aços das classes CA25, CA50 e CA60, enquanto o CP usa aços especiais das classes CP190 e CP210. Isso implica que o CP possui uma resistência à tração no mínimo 3 vezes maior que o CA. Ou seja, no CP, o aço suporta tensões mais elevadas antes que ocorra o seu escoamento. [4]

2.3 Controle da Qualidade

Uma das características que possui grande influência na durabilidade da estrutura e consequentemente na sua segurança e manutenção é a qualidade dos elementos em CPM. A maior causa das manifestações patológicas em estruturas de concreto está na execução da obra, seguida por problemas em utilização/outros, concepção/projeto e materiais. [6]

A norma NBR 9062 possui uma seção específica para determinar os requisitos mínimos de controle de qualidade e de inspeção de todo o processo de execução dos elementos pré-moldados e pré-fabricados. [7]

Um elemento é classificado como pré-fabricado quando, além de ser pré-moldado, é executado em uma empresa destinada a essa atividade fim e possui, entre outros requisitos: mão de obra treinada e especializada, laboratórios próprios, rotina de inspeções dos produtos, equipamentos industriais e controle de

cura. [7]

O controle de qualidade e inspeção aborda todos os materiais utilizados na execução dos elementos, as armaduras passivas e ativas, a fôrma, o concreto, a concretagem e a cura, o produto acabado, o transporte do produto e a sua montagem. [7]

Em 2003, a Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto (ABCIC) criou o Selo de Excelência Abcic. Esse selo certifica as empresas no que tange ao cumprimento integral da NBR 9062, das Normas Regulamentadoras trabalhistas, além de outras normas de qualidade, responsabilidade ambiental e social. O selo possui 3 níveis de certificação, de caráter evolutivo. E, ainda que o selo tenha o objetivo de certificar a qualidade dos elementos produzidos nos canteiros e nas indústrias, ele não é obrigatório. [8]

2.4 Perda de protensão

O aço do CP sofre três tipos de perda da força de protensão que devem ser considerados na fase de projeto.

O primeiro são perdas iniciais, na pré-tração, devido ao atrito no desvio das armaduras, ao escorregamento na ancoragem da armadura, à relaxação da armadura e à retração do concreto. Em seguida, há as perdas imediatas, no momento em que o concreto recebe a força de protensão, devido ao atrito, à acomodação das armaduras e ao encurtamento do concreto. Por último, ocorrem as perdas progressivas durante a vida útil da estrutura, devido à retração e fluência do concreto e relaxação do aço. [4]

3. Deterioração das estruturas em concreto

A durabilidade de uma estrutura é a resistência da mesma em um ambiente previsto em projeto, contemplando a segurança, a estabilidade e a utilização durante sua vida útil. [3]

A vida útil é o tempo em que uma estrutura atende a todas as funções ao qual foi inicialmente projetada, sem que se faça

necessário grandes intervenções. A seguir estão os valores de vida útil mínimo. [3,9]

- 10 anos: estruturas provisórias;
- 10 a 25 anos: componentes estruturais que possam ser substituídos;
- 15 a 30: estruturas agrícolas e semelhantes;
- 50 anos: estrutura de edifícios e outras estruturas correntes;
- 100 anos: estrutura de edifícios monumentais, pontes e outras estruturas similares.

Para que se possa tomar decisões de projeto de forma a garantir sua durabilidade e vida útil, é imprescindível conhecer as características do ambiente em que a obra estará inserida. Uma estrutura pode ser degradada por agentes físicos, químicos e/ou mecânicos. [10]

Dessa forma, a norma cria e define os ambientes em 4 categorias de *classe de agressividade ambiental* (CAA). Classe I: em ambientes rurais ou submersos, a agressividade é baixa e o risco de deterioração da estrutura é insignificante. Classe II: em ambientes urbanos, a agressividade é moderada e o risco de deterioração da estrutura é pequeno. Classe III: em ambientes marinhos ou industriais, a agressividade é forte e o risco de deterioração da estrutura é grande. E classe IV: em ambientes industriais ou com respingos de maré, a agressividade é muito forte e o risco de deterioração da estrutura é elevado. [3]

A classificação inadequada do ambiente, junto à falta de identificação de todos os agentes agressores do ambiente, em uma estrutura, podem levar a mesma a uma deterioração precoce, com ocorrência de diferentes manifestações patológicas.

Há dois fatores principais, intrínsecos às propriedades do concreto, que devem ser considerados ao avaliar a durabilidade de uma estrutura: a relação *água/cimento* (a/c) (determinante na resistência mecânica e nos indicadores de qualidade do concreto) e a sua capacidade de transportar fluidos (líquidos, gases ou vapores) em seu interior. [6,10]

A capacidade de transporte dos fluidos está diretamente relacionada ao sistema de poros do

concreto. Os poros mais relevantes são: os contínuos, em que sua forma contribui para a conexão com outros poros; e os com diâmetro mínimo entre 120nm e 160nm. Essas características podem ser encontradas nos poros dentro da pasta de cimento e entre a pasta de cimento e os agregados. E, como os poros dos agregados são normalmente descontínuos, a presença de agregados dificulta a movimentação dos fluidos no interior do concreto. [10]

A facilidade em transportar os fluidos no concreto ocorre devido à permeabilidade, à difusão e à sorção.

A permeabilidade é caracterizada pelo transporte de fluidos no interior do concreto devido à diferença de pressão. A difusão é devido à diferença de concentração. E a sorção é a movimentação de fluidos em poros expostos ao meio ambiente e está condicionada aos concretos que não estão completamente secos. [10]

Os fluidos transportados no interior do concreto podem ser a água, gases e vapores. Com relação ao transporte de água na pasta de cimento endurecida, quanto maior a relação a/c, menor a resistência mecânica e maior é o fluxo do fluido no concreto. Além disso, a escolha de cimentos mais grossos também contribui para a formação dos poros relevantes.

Os gases e vapores podem se transportar devido a permeabilidade ou por difusão. Os gases mais importantes para a degradação do concreto é o dióxido de carbono (CO_2), que causa a carbonatação da pasta de cimento hidratada; e o oxigênio (O_2), que acelera a corrosão das armaduras.

É importante citar a importância da cura adequada do concreto, pois a cura úmida confere maior permeabilidade ao concreto, comparada à cura seca. [10]

A seguir serão abordadas as principais causas das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado ou protendido, bem como suas consequências e fatores que aceleram a degradação nas estruturas.

3.1. Mecanismos de degradação

• Carbonatação – Relativo à armação

A carbonatação é causada pela reação entre o CO_2 , presente no ar, e o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou outros produtos da pasta de cimento. Essa reação faz com que o pH da água, encontrada nos poros da pasta de cimento, seja reduzido. E a água com pH reduzido, em contato com o aço, faz com que o mesmo perca sua camada passivada protetora. Sem sua camada protetora, o aço fica exposto para reagir com a água e o oxigênio, levando o mesmo à corrosão. A maior incidência de carbonatação é em concreto com umidade entre 50% e 70%, e sua velocidade de propagação diminui quanto maior for a distância da superfície. [10]

• Transporte de cloretos no cobrimento da armadura – Relativo à armação

Os cloretos (Cl^-) são íons que podem estar presentes em agregados contaminados, por água do mar ou água salobra, ou em aditivos que possuem o cloreto.

Os íons do cloreto em contato com a camada passivada protetora do aço, se reagem e formam o cloreto de ferro (FeCl_2). O FeCl_2 reage com a água (H_2O) e forma o o hidróxido ferroso ($\text{Fe}(\text{OH})_2$). Este, reage com a água e o oxigênio, formando o hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), a ferrugem. [10]

• Água do mar – Relativo ao concreto

Os sais presentes na água do mar, quando transportados no ar, podem se depositar na estrutura do concreto. Em locais onde o dia é quente e a noite é fria, os sais se dissolvem em contato com orvalho e formam cristais, esses cristais novamente umedecidos se expandem e causam a segregação da pasta de cimento e dos agregados miúdos.

A escolha de agregados mais densos e de baixa absorção, bem como a baixa relação a/c são fatores que dificultam a degradação da estrutura por sais. [10]

• Retração por secagem – Relativo ao concreto

Retração por secagem, ou seja, adiminuição do volume do concreto, ocorre quando o concreto perde água não substituível para o

ambiente, durante o período de cura. A retração ocorre da superfície para o interior da estrutura, lentamente.

Um dos fatores principais para controle da retração é a cura úmida do elemento, ao invés da seca, conforme citado anteriormente.

Os fatores tamanho e forma também influenciam a retração. A retração tende a ser maior em elementos menores, e quanto maior for a relação volume/superfície do elemento estrutural, menor será a retração.

A tensão de retração do concreto em conjunto à baixa resistência à tração pode provocar a fissuração da estrutura.

Outro fator causador da fissura é a alta relação a/c, que aumenta a retração e diminui a resistência do concreto. [10]

- **Lixiviação – Relativo ao concreto**

Um concreto de má qualidade, muito poroso, ou com fissuras permite que a água circule no interior da pasta de concreto. Isso provoca a dissolução e transporte do hidróxido de cálcio ($CA(OH)_2$) presente no cimento.

A circulação do $CA(OH)_2$ decompõe outros hidratos e, conseqüentemente, aumenta a porosidade. [6]

O $CA(OH)_2$ em contato com o dióxido de carbono (CO_2) presente no ar, gera o carbonato de cálcio ($CaCO_3$), identificado na superfície da estrutura em concreto com uma cor esbranquiçada. [9,10]

3.2. Conseqüências

Com relação às armaduras, a carbonatação e o transporte de cloretos causam a sua corrosão.

No concreto, a presença dos sais e a lixiviação causam a sua desintegração e a retração por secagem causa a sua fissuração.

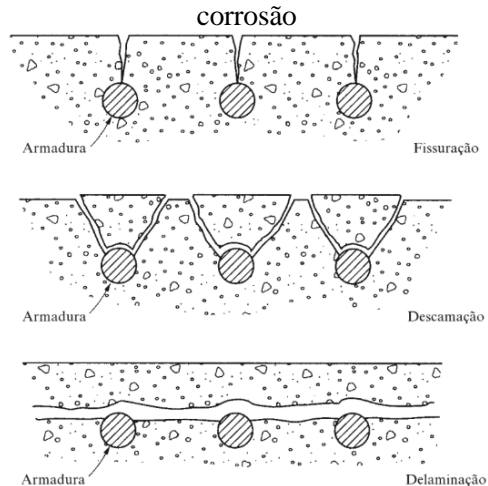
- **Corrosão em armaduras**

A corrosão nas armaduras é decorrente de um processo eletroquímico de natureza expansiva. A expansão das armaduras resulta em tensões que causam o rompimento da camada de cobrimento. [9,10]

Com a expansão formam-se as fissuras, as

descamações e/ou as delaminações do cobrimento do concreto, conforme a Figura 1, a seguir. Dessa forma, abre-se um caminho mais fácil e rápido para os agentes agressivos e aumentando a corrosão e a degradação do concreto. [10]

Figura 1 – Representação as conseqüências da



Fonte 1 – Neville [10]

Ressalta-se que na corrosão por cloretos, a área degradada é puntiforme, com segregações mais lentas.

Além de danificar o cobrimento, a corrosão gera a redução da seção do aço e das cordoalhas. [10]

- **Corrosão em cordoalhas**

A corrosão no aço das estruturas em CP exige maior atenção porque os seus fios possuem diâmetros pequenos, entre 4 e 9 mm, e estão submetidos a grandes tensões. Esses dois fatores combinados em ambiente agressivo, aumenta a sensibilidade do elemento à corrosão, podendo ocorrer um fenômeno chamado corrosão sob tensão (*stress corrosion*). Ou seja, o aço tensionado, na presença de umidade em ambiente que contenha cloretos, sulfatos, sulfetos, nitratos e ácidos, começa a passar por um processo de corrosão que pode levar o mesmo à ruptura frágil, causando o colapso da estrutura. [5,11,12]

- **Desagregação e fissuras**

As desagregações e as fissuras são processos físicos de deterioração do concreto. A ocorrência de fissuras facilita a entrada de agentes agressores, aumentando a velocidade de

deterioração do concreto e do aço. Já a desagregação é a separação dos componentes do concreto entre si, pasta de cimento e agregado, ou entre o concreto e a armadura. A desagregação pode ocasionar na perda de resistência dos esforços solicitantes na estrutura, levando a mesma a ruína local ou parcial. [6]

3.3. Requisitos de projeto

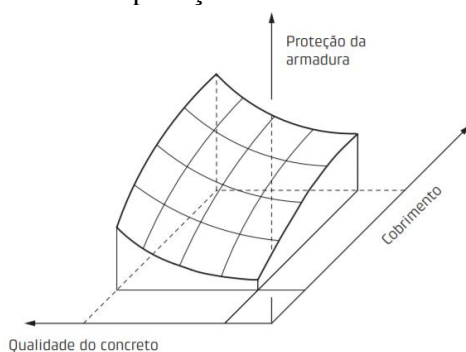
• Cobrimento da armadura

O cumprimento à norma quanto ao cobrimento da armadura é um dos fatores fundamentais para evitar as causas das manifestações patológicas.

O cobrimento tem função de proteção física e química da armadura. No primeiro caso, o cobrimento protege a armação de choques mecânicos e de altas temperaturas. No segundo caso, o cobrimento é responsável por proteger a armadura da agressividade do ambiente. A Figura 2 mostra como a qualidade do concreto de cobrimento e a sua espessura influenciam na proteção da armadura. [2]

Para elementos em CPM, a norma determina um valor mínimo de cobrimento nominal de acordo com a CAA, o tipo de elemento (laje, viga, pilar e elementos estruturas em contato com o solo), e se a estrutura é em CA ou em CP. Os cobrimentos mínimos variam de: 20 à 30 mm para a CAA I; 25 à 35 mm para a CAA II; 35 à 45 mm para a CAA III; e de 45 à 55 mm para a CAA IV. [3,7].

Figura 2 – Influência da qualidade e do cobrimento na proteção da armadura



Fonte 2 – Debs [2]

A norma também determina que, devido aos elementos pré-fabricados possuírem

controle elevado de qualidade, em elementos submetidos a ensaios laboratoriais ou em que o concreto tenha o $f_{ck} \geq 40$ MPa e a relação $a/c \leq 0,45$, os cobrimentos podem ser reduzidos em 5 mm, desde que respeitados os limites do item 9.2.1.1.2 da NBR 9062. [7]

No caso das telhas protendidas, o cobrimento mínimo é de 15 mm e a norma determina que essas só podem ser empregadas em ambientes de classe de agressividade I e II. Para as demais CAA, devem ser realizados ensaios e/ou a aplicação de revestimento protetor. [7]

Ainda que seja permitido a redução do cobrimento da armadura, uma forma de proteger o concreto e a armadura de agentes de deterioração e de prolongar sua vida útil é especificar valores de cobrimento maiores que os mínimos de norma. No entanto, deve-se lembrar que, além de atuar como proteção das armaduras, o cobrimento também é responsável por transferir as tensões do aço para o concreto. Portanto, em geral, cobrimentos maiores que 80 a 10 mm podem comprometer a função estrutural do elemento, causando fissurações. [2,10]

• Resistência e qualidade do concreto

A norma prescreve que a qualidade do concreto é fundamental para garantir a efetividade do cobrimento das armaduras. Dessa forma, são estabelecidos valores máximos da relação a/c , uma vez que a maior quantidade de água favorece a porosidade e os valores mínimos de resistência do concreto, de acordo com a classe de agressividade ambiental e com o tipo de concreto (armado ou protendido). [3]

Os valores máximos de a/c variam de 0,65 (CAA I e CA) à 0,45 (CAA IV, CA e CP). Os valores mínimos de resistência do concreto variam de 20 MPa (CAA I e CA) à 40 MPa (CAA IV, CA e CP).

• Controle de fissuração

O controle de fissuração é fundamental para garantir a durabilidade das construções e a proteção das armaduras. Sendo assim, a norma estabelece limites de projeto aos valores de fissuras de acordo com a CAA e o tipo de concreto (simples, armado e protendido). [3]

As estruturas de concreto protendido são menos propícias à ocorrência de fissuras; no entanto, quando elas acontecem, são extremamente nocivas, devido à corrosão sob tensão, apresentada anteriormente. [3]

- **Decisão de projetos**

Além da identificação correta da CAA, a escolha de bons materiais e a garantia da qualidade do concreto armado, durante sua execução, há algumas decisões de projetos que podem potencializar a durabilidade da estrutura, como: [3,9]

Revestimentos de proteção: a especificação correta de proteções como cerâmicas, impermeabilizantes, pinturas e chapas metálicas, protege a estrutura de agentes químicos, físicos e mecânicos;

Geometrias e sistemas de drenagem: projetar geometrias que não contribuam para o acúmulo de água e que facilitem o acesso para a realização de manutenções;

Mão de obra e recursos: projetista, executante e cliente devem trabalhar em conjunto para que as escolhas de projetos condizem com a mão de obra e recursos disponíveis na região, de forma a não comprometer a qualidade de execução;

Manual de utilização, inspeção e manutenção: o projetista deve entregar, junto aos projetos, o manual que irá descrever a utilização, a periodicidade e o tipo de manutenção dos componentes da estrutura.

4. Ensaios

Uma forma de avaliar a qualidade e as propriedades das estruturas já construídas é a realização de ensaios. Os ensaios podem ser destrutivos ou não destrutivos. [10]

Os ensaios destrutivos podem ser realizados durante ou após a execução de uma obra. Em ambos casos, é retirado um corpo de prova para a avaliação de suas propriedades, normalmente, em laboratórios.

Os ensaios não destrutivos são realizados em campo e não danificam a estrutura, permitindo que um mesmo local seja

analisado mais de uma vez e por diferentes ensaios. Dessa forma, é possível acompanhar o desenvolvimento das propriedades da estrutura ao longo do tempo. [10]

Os ensaios abordados neste artigo serão os não destrutivos, uma vez que estamos avaliando estruturas já existentes.

4.1. Ensaio de dureza superficial

Este ensaio mede a dureza de uma superfície lisa de concreto endurecido e deve ser conduzido de acordo com a NBR 7584. As informações são colhidas através de 16 impactos com um equipamento chamado esclerômetro de reflexão.

Este método fornece parâmetros para avaliação da qualidade do concreto e pode ser usado para estimar a resistência à compressão do concreto, no entanto ele abrange uma profundidade de apenas 30 mm. [10]

4.2. Ensaio de pacometria

Este ensaio é utilizado para determinar o cobrimento do concreto, a localização e o diâmetro das armaduras. Dessa forma, pode-se verificar se esses parâmetros estão de acordo com o projeto e as normas, bem como, se for necessário, determinar o local de retirada de corpos de prova, sem danificar as armaduras existentes. [13]

4.3. Ensaio de onda ultrassônica

Este ensaio deve ser conduzido de acordo com a NBR 8802 e determina a velocidade de uma onda longitudinal de compressão através do tempo para percorrer uma determinada distância. Como é possível fazer uma relação entre velocidade e massa específica do concreto, este método pode ser utilizado para verificar a resistência à compressão do concreto, estimar a profundidade de fissuras, verificar a homogeneidade do concreto e determinar os módulos de elasticidade. [10,13,14].

4.4. Ensaio de força de arrancamento

Neste ensaio, um *insert* metálico é concretado no elemento estrutural e, através de um equipamento de tração, é realizado uma

força de arrancamento para retirá-lo. Como a força utilizada pode ser comparada com a resistência de compressão do concreto, se o elemento atingir a resistência esperada, o *insert* não irá romper o concreto. [10]

4.5. Ensaio de potencial de corrosão

Este ensaio determina a probabilidade de corrosão da armadura por meio de dados qualitativos. O ensaio avalia a facilidade de uma carga elétrica se mover entre a armação e a solução dentro dos poros do concreto, devido a diferença de potencial. Dessa forma, é possível identificar se as armaduras de uma determinada região estão em processo de corrosão ativo. [15]

4.6. Ensaio de resistividade elétrica

Este ensaio mede a resistância do concreto sob a ação de uma corrente elétrica e fornece informações sobre o processo eletroquímico que influencia diretamente no processo e na velocidade de corrosão das armaduras. [13,16]

A resistividade do concreto pode ser afetada por vários fatores, como: relação a/c, grau de hidratação do concreto, presença do agregado, temperatura, carbonatação, adições de minerais, entre outros. É importante ressaltar que o concreto sob condições úmidas irá apresentar menores valores de resistividade do que um concreto seco. [16]

4.7. Ensaio de carbonatação

Este ensaio mede a profundidade de carbonatação do concreto com o intuito de verificar como está havendo deterioração por este mecanismo e a evolução do mesmo na estrutura. [13]

5. Manutenção

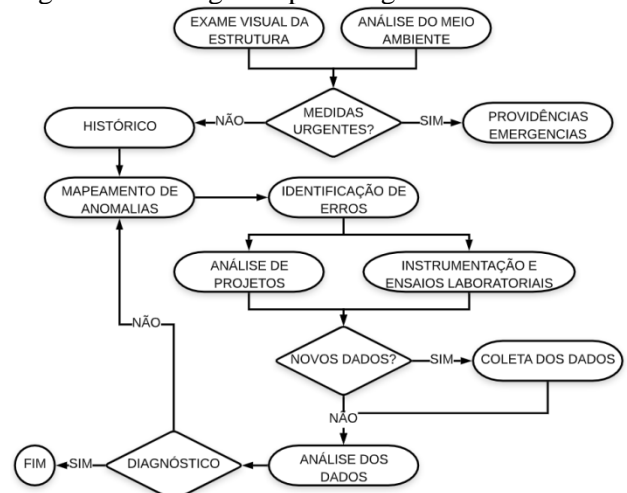
Como já citado anteriormente, a segunda principal causa de manifestações patológicas é a utilização incorreta de uma edificação. A falta de manutenção adequada da edificação pode diminuir o tempo de vida devido aos mecanismos de deterioração citados no item 3.1, causando inconveniências e custos não previstos ao usuário. Desta forma, é de responsabilidade do proprietário da edificação

o cumprimento à NBR 5674, ao manual de utilização e a outras normas técnicas aplicáveis. [6,17]

A NBR 5674 descreve um sistema de gestão de manutenção para edificações com modelos para implementação de um programa de manutenção preventiva. Nos casos em que já há a ocorrência de uma manifestação patológica, deve ser implementado um programa de manutenção corretiva. [6,17]

Em caso de manutenção corretiva, Souza e Ripper [6] sugerem de forma clara e objetiva um modelo de diagnóstico para uma estrutura já em deterioro, conforme a Figura 3 a seguir.

Figura 3 – Fluxograma para diagnóstico de estrutura



Fonte 3 – Souza e Ripper [6]

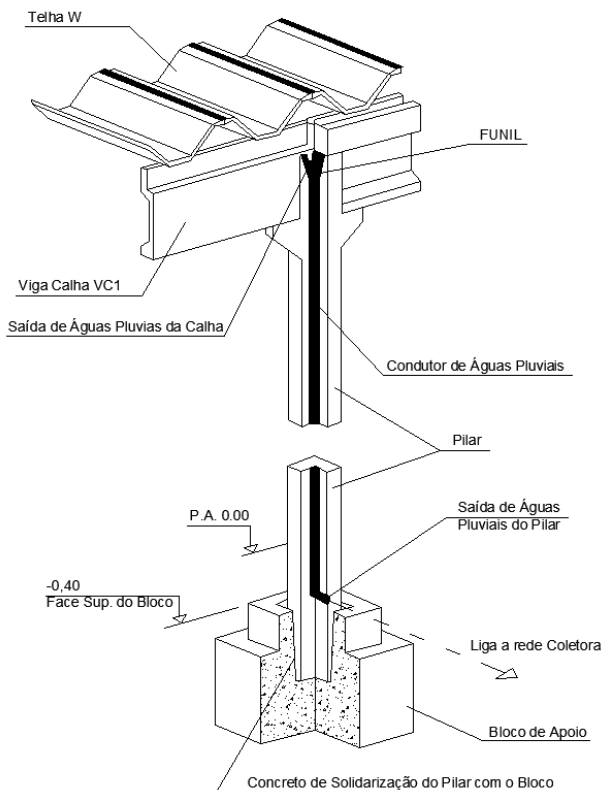
6. Estudo de Caso

O objeto de estudo deste artigo é um galpão industrial de aproximadamente 20.000 m², pé direito de 10,5 m, localizado próximo ao mar e construído no final dos anos 80. A estrutura do galpão é formada por elementos de concreto pré-moldado protendido.

O galpão apresenta manifestações patológicas, com recorrência principalmente nas vigas calhas e nas telhas, como deslocamento do cobrimento das armaduras, fissuras, segregação do concreto, tonalidade esbranquiçada (eflorescências) da superfície do concreto, esmagamento do concreto e corrosão das armaduras e cordoalhas.

A Figura 4 representa os elementos estruturais e suas interligações.

Figura 4 – Esquema representativo da estrutura



Fonte – Munte Soluções Concretas [18]

6.1 Detalhes de projeto

A cobertura do galpão é formada por telhas W em concreto pré-moldado protendido, com poucas inserções de domos, para ajudar na iluminação interna. Essas telhas possuem seção transversal delgada, normalmente com espessuras que variam entre 5 e 7 cm. Além disso, são projetadas para vencerem grandes vãos. Neste estudo, o vão é de 19 metros, mas há fabricantes que projetam telhas para vãos de até 30 metros.

As telhas são apoiadas nas laterais da viga calha. Essas laterais também são esbeltas, com 14 cm de espessura. As vigas calhas são de geometria I que, por sua vez, são apoiadas nos consoles dos pilares.

Além da função estrutural, esses três elementos (telha, viga calha e pilar) fazem parte do sistema de coleta das águas pluviais.

As telhas protendidas possuem uma contra-flecha que, ao receberem as águas da chuva, as conduzem para as calhas, embutida na geometria da viga. As calhas possuem

caimento para que a água seja conduzida para o topo dos pilares. Nos pilares, centralizado internamente, há um tubo que irá conduzir as águas pluviais até a caixa coletora em sua base.

6.2 Causas das manifestações patológicas

Considerando que o edifício deste estudo de caso foi construído no final dos anos 80, ou seja, possui menos que 40 anos de existência, o fato de já possuir vários pontos com manifestações patológicas é um indicador de possíveis erros de projeto, de execução e/ou de utilização.

• Possíveis erros de projeto

Com relação às vigas, os valores de cobrimentos registrados estão entre 20 e 30 mm, ou seja, inferior aos 55 mm estabelecidos por norma.

Com relação às telhas, não há indícios visuais ou registros documentais que confirmem a aplicação de uma camada protetora no concreto. Como a CAA desta edificação é da classe IV, a falta de proteção adequada confere à estrutura maior vulnerabilidade, aumentando a velocidade de deterioração.

Com relação à resistência do projeto, há o registro de que o f_{ck} utilizado foi ≥ 26 MPa, ou seja, provavelmente menor que os 40 MPa exigidos pela norma atual. Isso implica em um concreto mais poroso e potencializa a ocorrência de todas as causas de manifestações patológicas citadas anteriormente.

No caso do projeto deste estudo de caso, também não há registros de projeto de impermeabilização. Além disso, a distância entre as telhas, que estão apoiadas sobre as vigas calhas, é muito estreita, o que impossibilita verificar se houve a aplicação da impermeabilização, bem como escutar a limpeza e a manutenção das calhas.

• Possíveis erros de execução

Conforme apresentado e citado anteriormente, tanto as vigas quanto as telhas apresentam estruturas muito esbeltas, com relação volume/superfície muito baixa. A falta de um controle de qualidade rígido na execução dos elementos pode ter propiciado a retração por secagem, causando a fissura.

• Possíveis erros de manutenção

Não há registro da existência do manual de utilização e de programas de manutenções preventivas ou corretivas. Dessa forma, é possível que a edificação nunca tenha passado por nenhum tipo de manutenção preventiva durante todo o seu tempo de vida. Há apenas indícios de ações corretivas pontuais.

6.3 Plano de ação

No item anterior, foi identificado algumas das possíveis causas da deterioração precoce do edifício. Dessa forma as medidas imediatas a serem tomadas, baseadas no conteúdo apresentado neste artigo, são:

- Elaborar o manual de utilização;
- Elaborar o programa de manutenção preventiva;
- Elaborar o programa de manutenção corretiva, aplicando o fluxograma de diagnóstico do item 5;
- Remover ou escorar os elementos que proporcionam o risco iminente de colapso;

A partir das ações imediatas concluídas, é possível fazer as devidas manutenções preventivas nos períodos determinados.

7. Conclusão

As especificações normativas são criadas e atualizadas ao longo do tempo para que, dentre outras finalidades, possam determinar os parâmetros que garantam maior durabilidade e segurança aos usuários.

Difícilmente a deterioração de uma estrutura em concreto armado ou protendido é devido a erro específico, seja ele de natureza de projeto, execução ou uso; normalmente, o que se identifica, nas construções, é um conjunto de fatores.

Para obras novas, cabe ao profissional da construção civil buscar soluções que atendam ao propósito final de uso da construção e que sejam viáveis do ponto de vista econômico e de qualidade para execução.

Para obras já existentes e que, principalmente, são mais antigas, cabe ao profissional da construção civil criar, se ainda

não existir, o manual de utilização da edificação, se atentar para as atualizações das normas e implementar a execução de manutenções periódicas, evitando que a vida útil de projeto seja reduzida ou que a construção se torne obsoleta. O colapso ou a interdição de parte ou do todo de uma edificação residencial, comercial ou industrial, além de se tornar um risco aos usuários, irá trazer transtornos de uso e financeiro.

8. Referências

- [1] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas.. **NBR 14931**: Execução de estruturas de concreto - Procedimento. 2 ed. Rio de Janeiro: 2004. 53 p.
- [2] DEBS, Mounir Khalil El. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 456 p.
- [3] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 238 p.
- [4] CHOLFE, Luiz; BONILHA, Luciana André Sanvito. **Concreto Protendido: teoria e prática**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2018. 344 p.
- [5] CAUDURO, Eugenio Luiz. **Manual para a boa execução de estruturas protendidas usando cordoalhas de aço engraxadas e plastificadas**. 2ª Edição. Disponível em: http://www.set.eesc.usp.br/mdidatico/protendido/arquivos/manual_para_a_boa_execucao_de_estruturas_protendidas.pdf. Acesso em: 18 jul. 2020.
- [6] SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 2009. 257 p.
- [7] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9062**: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. 3 ed. Rio de Janeiro. 2017. 86 p.
- [8] ABCIC. Associação Brasileira da Construção Industrializada de (org.). **O selo**

- de excelência ABCIC**. Disponível em: <http://www.abcic.org.br/Artigos/o-selo-de-excelencia-abcic>. Acesso em: 28 jun. 2020.
- [9] ARAÚJO, José Milton de. **Curso de Concreto Armado**. 4. ed. Rio Grande: Dunas, 2014. 330 p. Volume 1. (4ª edição).
- [10] NEVILLE, A. M.. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p. Tradução: Ruy Alberto Cremonini.
- [11] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7482**: Fios de aço para estruturas de concreto protendido — Especificação. 3 ed. Rio de Janeiro. 2020. 9 p.
- [12] VERÍSSIMO, Gustavo de Souza; CÉSAR JUNIOR, Kléos M Lenz. **Concreto Protendido: fundamentos básicos**. Fundamentos Básicos. 1998. 4ª Edição. Disponível em: <http://www.feb.unesp.br/lutt/Concreto%20Protendido/CP-vol1.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2020.
- [13] SAHUINCO, Melquiades Hermógenes Choquepuma. **Utilização de métodos não destrutivos e semi destrutivos na avaliação de pontes de concreto: estudo de caso**. 2012. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil – Série BT/PCC/575. Disponível em: http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/bt_00575.pdf. Acesso em: 19 jul. 2020.
- [14] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8802**: Concreto endurecido. Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. 3 ed. Rio de Janeiro: 2019. 11 p.
- [15] SILVA, Edvaldo Pereira da. **Avaliação do potencial de corrosão de concretos estruturais produzidos segundo as prescrições da NBR 6118, submetido a ensaio de corrosão acelerado**. 2010. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010. Disponível em: http://www.deecc.ufc.br/Download/Projeto_de_Graduacao/2010/Edvaldo_Silva_Avaliacao%20de%20Potencial%20de%20Corrosao%20de%20Concretos%20Estruturais%20Submetidos%20a%20Ensaio%20de%20Corrosao%20Acelerado.pdf. Acesso em: 19 jul. 2020.
- [16] SILVA, Leandro Melo Andrade e. **Resistividade elétrica superficial do concreto: influência da cura**. 2016. 68 f. TCC (Graduação) - Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/RESISTIVIDADE_EL%3%89TRICA_SUPERFICIAL_DO_CONCRETO_INFLU%3%8ANCIA_DA_CURA.pdf. Acesso em: 19 jul. 2020.
- [17] ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5674**: Manutenção de edificações – Requisitos para o sistema de gestão de manutenção. 2 ed. Rio de Janeiro. 2012. 25 p.
- [18] MUNTE. Munte Soluções Concretas (org.). **Manual Técnico Munte**. 2007. Elaborado pelo Departamento de Marketing. Disponível em: <http://www.feb.unesp.br/pbastos/pre-moldados/Manual%20Munte.pdf>. Acesso em: 25 maio 2020