



Universidade Federal de Alagoas
Centro de Tecnologia
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



Cidade Universitária – Campus A. C. Simões
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas

ALISSON DOS SANTOS LIMA

*ESTUDO SOBRE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO PROTENDIDO: DIAGNÓSTICO E PREVENÇÃO*

Maceió/AL, agosto de 2022

ALISSON DOS SANTOS LIMA

*ESTUDO SOBRE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO PROTENDIDO: DIAGNÓSTICO E PREVENÇÃO*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: **Professora Dr.^a Karoline Alves de Melo Moraes**

Maceió, agosto de 2022

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Jone Sidney A. de Oliveira – CRB-4 – 1485

L732e Lima, Alisson dos Santos.
Estudo sobre manifestações patológicas em estruturas de concreto protendido: diagnóstico e prevenção. / Alisson dos Santos Lima. – Maceió, 2022. 61 f. : il., graf. e tabs. color.

Orientadora: Karoline Alves de Melo Moraes.
Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 58-61.

1. Construção civil. 2. Manifestação patológicas - concreto. 3. Estrutura protendidas. I. Título.

CDU: 624.012.45

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Abias dos Santos Neves e José Miranda Lima Filho, que foram pilares fundamentais para essa conquista, sendo meu porto seguro para me manter firme e seguro durante toda a minha jornada acadêmica.

Agradeço à minha falecida avô materna, Maria Aparecida dos Santos Neves, por todo o apoio e admiração em todo momento que precisei dela, e que sempre estará me protegendo e guiando.

Deixo um agradecimento especial à minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Karoline Alves de Melo Moraes, por sua orientação, paciência e dedicação do seu tempo ao meu Trabalho de Conclusão de Curso, contribuindo de forma imensurável para a conclusão deste trabalho.

Agradeço ao grupo de pesquisa MECOEFIGON (Materiais Ecoeficientes para Construção Civil) do CTEC da UFAL, em especial ao Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes e ao Prof. Msc. Karlisson André Nunes da Silva que me orientaram durante esse período, sendo fundamental para meu aprendizado durante os ciclos de iniciação científica.

Agradeço ao PEC (Programa Especial de Capacitação Discente), do CTEC da UFAL, que me ajudou a melhorar no trabalho em equipe, além de contribuir com minha evolução como discente pesquisador.

Agradeço à Uchôa Construções Ltda e sua equipe que me proporcionaram a oportunidade de aprendizado profissional durante o estágio.

Agradeço, por fim, a todos meus colegas da graduação que, além de compartilharmos grandes momentos, sempre estiveram ao meu lado durante todo esse percurso acadêmico.

RESUMO

As tecnologias desenvolvidas para a construção civil estão se modernizando ao longo dos anos, trazendo diversos benefícios aos consumidores. Nesse sentido, destacam-se as estruturas de concreto protendido que é um avanço em relação ao concreto armado. Nos elementos protendidos, aplica-se um estado prévio de tensões que melhora sua resistência e seu comportamento. Entretanto, essa tecnologia necessita de uma mão de obra especializada para sua utilização, visto que a maneira incorreta no uso resulta em manifestações patológicas, um sinal que o elemento protendido foi prejudicado. Desse modo, o trabalho, que foi realizado por meio de uma revisão bibliográfica, buscou encontrar as manifestações patológicas mais comuns que ocorrem nas estruturas de concreto protendido, informando suas respectivas origens, bem como suas ações preventivas. Além disso, são apresentados ensaios que podem ser realizados nessas estruturas para que se obtenha a origem do problema. Dessa forma, notou-se a importância de uma mão de obra especializada nessas estruturas, uma vez que a execução correta da tecnologia junto às ações preventivas consegue evitar que as estruturas sofram com manifestações patológicas e, com isso, essas estruturas atuam de forma segura e durável.

Palavras-chave: **concreto protendido; manifestações patológicas; ações de prevenção.**

ABSTRACT

The technologies developed for civil construction are being modernized over the years, bringing several benefits to consumers. In this sense, the prestressed concrete structures stand out, which is an advance in relation to reinforced concrete. In the prestressed elements, a previous state of tension is applied that improves its resistance and its behavior. However, this technology requires a specialized workforce for its use, since the incorrect use results in pathological manifestations, a sign that the prestressed element was damaged. In this way, the work, which was carried out through a bibliographic review, sought to find the most common pathological manifestations that occur in prestressed concrete structures, informing their respective origins, as well as their preventive actions. In addition, tests that can be performed on these structures are presented in order to obtain the origin of the problem. Thus, the importance of a specialized workforce in these structures was noted, since the correct execution of the technology together with preventive actions manages to prevent the structures from suffering from pathological manifestations and, with this, these structures act in a safe and durable way.

Keywords: prestressed concrete; pathological manifestations; prevention actions

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Viga de concreto: a) sem armadura; b) com armadura.....	17
Figura 2 - Viga de concreto: a) sem armadura; b) executada em concreto armado; c) executada em concreto protendido	19
Figura 3 - Pistas de protensão em fábrica para produção de pré-fabricados protendidos ...	20
Figura 4 - Tracionamento dos cabos.....	20
Figura 5 - Exemplo de procedimento de viga em protensão	21
Figura 6 - Modelo divisão entre perdas de tração	22
Figura 7 - Especificação de fios para protensão	23
Figura 8 - Radier protendido	24
Figura 9 - Armadura de protensão em uma laje a ser concretada.....	25
Figura 10 -Representação das consequências da corrosão	28
Figura 11 - Lançamento e adensamento do concreto	31
Figura 12 - Esquema simplificado de pista de protensão para fabricação de peças.....	32
Figura 13 - Ferrovia com dormentes de concreto.....	33
Figura 14 - Rachaduras no centro do dormente.....	34
Figura 15 - Esquema simplificado de fabricação de peça protendida com pós-tensão	35
Figura 16 - Fratura no meio do vão de vigas protendidas pré-fabricadas	36
Figura 17 - Cabo de protensão rompido na zona de encunhamento.....	37
Figura 18 - Ressecamento e quebra da bainha de protensão	37
Figura 19 - Cordoalha engraxada de sete fios	38
Figura 20 - Acessórios componentes do sistema de protensão não aderente	40
Figura 21 - Placa de ancoragem para cordoalha engraxada	40
Figura 22 - Conjunto com placa de ancoragem.....	41
Figura 23 - Cadeirinha segurando os cabos.....	42
Figura 24 - Aplicação de cunhas na ancoragem ativa	43
Figura 25 - Pontas das Cordoalhas cortadas	43
Figura 26 - Ensaio de Pacometria.....	44
Figura 27 - Ensaio de Esclerômetria.....	45
Figura 28 - Ensaio de Ultrassonografia	45
Figura 29 - Ensaio de Carbonatação.....	46
Figura 30 - Ensaio de Resistividade Elétrica.....	46

Figura 31 - Ensaio de Potencial de Corrosão	47
Figura 32 - Ensaio de Tomografia Ionizante	47
Figura 33 - Ensaio de Termografia Infravermelha	48
Figura 34 - Ensaio RIMT.....	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Manifestações patológicas e suas origens nos elementos pretendidos	53
Quadro 2 – Lista de ensaios que podem ser realizados nos elementos pretendidos	54
Quadro 3 – Ações preventivas a realizar nos elementos pretendidos	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	14
1.2	Objetivos	14
1.3	Estrutura do Trabalho	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	Concreto Armado.....	17
2.2	Concreto Protendido	19
2.2.1	Tipos de protensão.....	19
2.2.2	Perdas de protensão	22
2.2.3	Aços para protensão.....	23
2.2.4	Vantagens e desvantagens	25
3	METODOLOGIA.....	26
4	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NAS ESTRUTURAS PROTENDIDAS	27
4.1	Mecanismos de degradação	27
4.1.1	Corrosão do aço de protensão.....	27
4.1.2	Desagregação e fissuração no concreto	29
4.2	Causas das manifestações patológicas em estruturas protendidas	30
4.2.1	Manifestações patológicas nos elementos pré-tracionados	32
4.2.2	Manifestações patológicas nos elementos pós-tracionados com aderência posterior.....	34
4.2.3	Manifestações patológicas nos elementos pós-tracionados sem aderência posterior.....	38
5	ACOMPANHAMENTO DO DESEMPENHO DAS ESTRUTURAS PROTENDIDAS	44
6	AÇÕES PREVENTIVAS NAS ESTRUTURAS.....	50

6.1	Ações de manutenção	50
6.2	Ações preventivas na obra	51
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
	REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

A construção civil ao longo dos anos vem se modernizando, por meio dos avanços tecnológicos, a fim de atender com determinados pré-requisitos às suas demandas, sendo uma delas a industrialização de processos a partir de uma mão de obra especializada. Nesse sentido, há as estruturas de concreto protendido, em que são utilizadas armaduras ativas para aumentar a resistência do concreto a fim de reduzir as chances de fissuras, além da obtenção de outros benefícios (CAIXETA e MORAIS, 2018).

De maneira complementar, Schmid (2009) informa que protender uma estrutura de concreto diz respeito a fazer uso de uma tecnologia inteligente, eficaz e duradoura, uma vez que permite o aproveitamento máximo da resistência mecânica do concreto e do aço, reduzindo a sua quantidade. Desse modo, a utilização dessa tecnologia além de possibilitar conforto e segurança à estrutura, assegura longa vida útil aos seus elementos, sendo uma das principais vantagens das construções em concreto protendido: o ótimo custo-benefício que ele proporciona.

Rosa (2021) ressalta que para a execução de uma estrutura de concreto protendido ocorrer de forma adequada e segura, os padrões estabelecidos pelas normas devem ser seguidos, requisitos como diâmetro dos aços, resistência característica do concreto, modelo de estrutura, entre outros fatores devem ser levados em consideração. Nessa linha, devido ao fato de as estruturas protendidas demandarem uma mão de obra mais especializada, é preciso compreender bem todo seu processo construtivo, a fim de evitar possíveis manifestações patológicas que podem acometer este tipo de estrutura, bem como fazer o seu monitoramento, manutenção, reparos e reforços, caso necessário (COSTA, 2021).

Nesse viés, as manifestações patológicas que as estruturas de concreto protendidas podem apresentar são variadas, sendo o surgimento de fissuras uma das mais comum e, por isso, tem sido gerados numerosos estudos sobre a fissuração do concreto protendido, em diferentes idades e por várias razões (ERCOLANI *et al.*, 2017). Além disso, os autores supracitados complementam, a título de exemplo, que em uma estrutura de concreto armado ou protendido fissurada, a entrada de agentes corrosivos que podem chegar ao aço é facilitada, com a circunstância agravante, no caso do aço de protensão, que é muito mais sensível à corrosão por tensão.

Dessa maneira, é fundamental que sejam realizadas pesquisas adequadas para obter a origem das manifestações patológicas nessas estruturas protendidas, para as quais pode-se

lançar mão de ensaios específicos. Com isso, a partir dos resultados das análises, define-se as ações a serem realizadas nessas estruturas, a fim de que possam funcionar de maneira segura.

1.1 Justificativa

É essencial que sejam realizadas ações de manutenção nas estruturas de concreto protendido para que estas possam funcionar de forma segura e, com isso, evitar contratempos maiores. Desse modo, por meio do levantamento dessas ações é possível constatar os serviços oferecidos para combater os problemas enfrentados por esse tipo de estrutura, além das técnicas em desenvolvimento que possam ser utilizadas para contribuir com o funcionamento dessas estruturas.

Nesse viés, por exemplo, sabe-se que uma atenção maior deve ser dada a essas estruturas com relação à corrosão do aço, uma vez que, conforme Costa (2021), os fios possuem diâmetros entre 4 e 9 mm, além de estarem submetidos a grandes tensões. Com isso, esses dois fatores combinados com um ambiente agressivo potencializam a corrosão, podendo ocorrer um fenômeno chamado de corrosão sob tensão (*stress corrosion*). Ou seja, mais sensíveis que as estruturas de concreto armado. Outrossim, Cauduro (2002) informa que medidas sejam adotadas durante a execução das estruturas protendidas no canteiro de obra, com o objetivo de evitar alguns problemas, dentre os quais destaca-se a correta montagem do sistema de protensão.

Portanto, é primordial, segundo Linck (2013), uma mão de obra especializada para o correto uso dessas estruturas para que possam proporcionar vantagens às construções, dentre elas o uso de grandes vãos. Por fim, é fundamental o conhecimento acerca dos ensaios específicos que podem ser realizados nessas estruturas, para saber o motivo do surgimento de determinados problemas, sendo o RIMT um dos ensaios utilizados com essa finalidade, em que é possível fazer uma análise das anomalias através de uma escala de integridade (COSTA, 2021). Com isso, a partir do resultado desse e/ou outros ensaios, determina-se a ação a ser tomada nas estruturas em estudo.

1.2 Objetivos

O objetivo do trabalho foi a realização de um estudo sobre manifestações patológicas em estruturas de concreto protendido, com vistas ao diagnóstico e mecanismos de prevenção.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho foi uma revisão bibliográfica acerca dos trabalhos estudados e, desse modo, foi dividido em oito capítulos.

No Capítulo 1 encontram-se a introdução acerca do trabalho, a justificativa para a elaboração deste trabalho e os objetivos que o trabalho buscou alcançar.

No Capítulo 2 encontra-se o referencial teórico que aborda sobre as estruturas de concreto, mostrando a importância dessas estruturas para a construção civil, em seguida é apresentado os tipos dessas estruturas e, por último, informado sobre a estrutura de concreto pretendido, sendo este o foco do capítulo.

No Capítulo 3 foi designado à metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, expondo os detalhes da forma de obtenção dos dados para a elaboração do trabalho, a qual, em resumo, tratou-se de uma revisão bibliográfica.

No Capítulo 4 são apresentadas as manifestações patológicas que ocorrem nas estruturas de concreto, iniciando o capítulo abordando sobre a durabilidade e os mecanismos de degradação dessas estruturas e, em seguida, são apresentadas as causas das manifestações patológicas nas estruturas pretendidas.

No Capítulo 5 são apresentadas as formas de acompanhar o desempenho dessas estruturas, apresentando os ensaios que podem ser realizados nas estruturas em concreto pretendido, visando obter as origens dos problemas apresentados.

No Capítulo 6 são abordadas as ações preventivas que podem ser realizadas nas estruturas, desde as anteriores a execução do sistema de protensão àquelas periódicas, a fim de evitar o surgimento das manifestações patológicas.

No Capítulo 7 são apresentados os resultados do trabalho, sendo apresentado um resumo acerca das manifestações patológicas, análises experimentais e ações de prevenção, a partir das informações apresentadas nos capítulos 4 a 6.

No Capítulo 8, por fim, encontram-se as considerações finais, apresentando as conclusões obtidas no trabalho e sugestões para pesquisas futuras, sugerindo possibilidades de continuidade e aprimoramento deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O concreto é um dos materiais mais antigos da construção civil, sendo aplicado nos mais diversos campos, como na construção de edifícios, casas, pontes, torres, rodovias, estádios de futebol, usinas hidrelétricas e nucleares, em obras de saneamento, plataformas petrolíferas entre outras (SILVA *et al.*, 2016). Assim, Almeida (2002) informa que o concreto é um material composto de quantidades adequadas de aglomerante (cimento), agregado miúdo (areia ou pó de pedra), agregado graúdo (pedra britada ou cascalho) e água.

Em paralelo a isso, Sathler *et al.* (2017) informam que com passar do tempo surgiu a necessidade em aperfeiçoar o concreto, corrigindo suas imperfeições e melhorando sua resistência. Nesse sentido, Almeida (2002) explica que o concreto simples apresenta resistência à tração muito baixa, cerca de 8 a 12 vezes menor que sua resistência à compressão. Logo, a associação do concreto com um material de boa resistência à tração permite que o conjunto – concreto armado – resista tanto aos esforços de compressão como aos de tração.

Nessa linha, a associação aço-concreto, além de superar a deficiência das estruturas de concreto simples nas regiões de tração, fornece um meio alcalino que protege o aço contra a corrosão, sendo essencial uma camada adequada de espessura de concreto conforme as recomendações normativas para isso (CARVALHO e PIMENTEL, 2013). Então, conforme as autoras, esses dois materiais passam a constituir um elemento único, do ponto de vista mecânico, quando submetido às ações externas, e isso só é possível graças à aderência, que permite a transferência dos esforços e a compatibilidade das deformações.

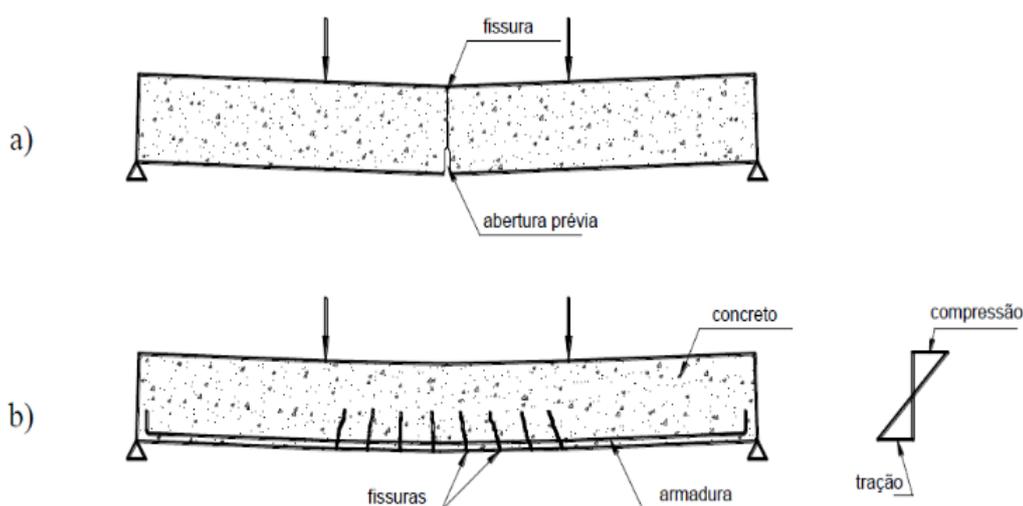
Por fim, é essencial que o método construtivo, utilizando o elemento de concreto, seja realizado considerando as recomendações das normas e dos recursos disponíveis para elaboração do projeto, execução da obra e conservação da edificação ao longo do tempo (ALVES e SANTOS, 2020). Dessa forma, os autores explicam que uma avaliação inadequada de parâmetros do projeto aliado à baixa qualidade de execução e a ausência de manutenção na 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.

2.1 Concreto Armado

O concreto é considerado um dos materiais mais importantes da construção civil devido à sua alta versatilidade (HELENE e ANDRADE, 2010). Porém, de acordo com Bastos (2018), o concreto apresenta uma grande desvantagem técnica quando submetido aos esforços de tração, uma vez que ele resiste a apenas cerca de 8% a 15% se comparado à sua resistência à compressão, sendo o aço um material que apresenta uma grande resistência tanto à tração quanto à compressão.

Dessa forma, visando suprir as deficiências do concreto em relação à tração, é realizada a inserção do aço nas peças a serem concretadas, formando, assim, o concreto armado (BASTOS, 2019). Nesse contexto, na Figura 1, é possível observar a relação carga-fissuração em peça composta totalmente em concreto sem o acréscimo do reforço do aço e a distinção da relação existindo a adição do aço em meio à estrutura.

Figura 1 - Viga de concreto: a) sem armadura; b) com armadura



Fonte: Bastos (2019)

A norma ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) define que os elementos de concreto armado (CA) são aqueles cujo comportamento estrutural depende da aderência entre concreto e armadura, e nos quais não se aplicam alongamentos iniciais das armaduras antes da materialização dessa aderência. Ademais, Pfeil (1988, p.1), em resumo, cita que “concreto armado é definido como o material de construção composto pela associação de concreto com barras de aço colocadas no seu interior. As barras de aço, que constituem a armadura, são posicionadas na fôrma, antes do lançamento do concreto plástico. Este envolve as barras de aço, obtendo-se, após endurecimento, um elemento de concreto armado”.

Portanto, para a existência do elemento de concreto armado é preciso que haja uma completa aderência entre o concreto e a armadura, afim de que suas deformações sejam iguais ao longo da superfície de contato, na quase totalidade da extensão da peça. A aderência entre ambos dá integridade e esta união e a proteção que o concreto oferece à oxidação da armadura lhe assegura durabilidade (ALMEIDA, 2002). Além disso, a norma ABNT NBR 6118 (ABNT, 2014) complementa que é imprescindível o detalhamento adequado em projeto, para que seja assegurada a disposição correta no momento da concretagem, evitando, assim, manifestações patológicas que possam vir a surgir ao longo do tempo na edificação.

Paralelamente, Souza e Murta (2012) explicam que uma estrutura de concreto armado é composta por uma série de “elementos” individuais que interagem entre si para resistir às cargas deliberadas à estrutura, em que a interação entre esses elementos deve ser assegurada através de uma análise completa da estrutura. Nesse viés, as autoras supracitadas informam que nas construções de concreto armado de pequeno ou de grande porte, quatro elementos estruturais são indispensáveis: as fundações, as lajes, as vigas e os pilares.

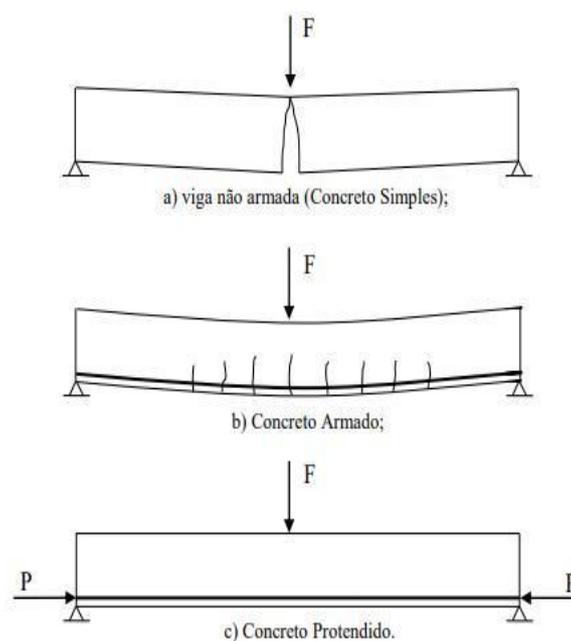
Em paralelo a isso, Rosa (2021) complementa que, em relação ao aço utilizado em estruturas de concreto armado, as características e definições são estabelecidas no Brasil pela NBR 7480 (ABNT, 2007), onde os vergalhões utilizados são classificados em barras tendo as categorias CA-25 e CA-50 e em fios tendo a categoria CA-60. De maneira complementar, a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) informa que haverá três tipos de superfície que dependendo de sua rugosidade apresentam valores de coeficientes diferentes para cálculo.

Por fim, em relação às vantagens e desvantagens no uso do concreto armado na construção civil, as referências informam, de maneira geral, o seguinte: em relação às vantagens, tem facilidade de adaptação às formas construtivas, economia na construção e na manutenção, boa resistência aos esforços dinâmicos (choques e vibrações), e segurança contra o fogo; e em relação às desvantagens, é possível citar o peso próprio elevado dos elementos e a grande quantidade de fôrmas e escoras utilizadas (BASTOS, 2019).

2.2 Concreto Protendido

A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) define que os elementos de concreto protendido são aqueles nos quais uma parte das armaduras será previamente alongada, por meio de equipamentos especiais de protensão, com o objetivo de, em condições de serviço, impedir ou limitar a fissuração e os deslocamentos da estrutura, além de propiciar o melhor aproveitamento de aços de alta resistência no estado-limite último (ELU). Ademais, Pfeil (1988), em resumo, informa que a protensão é um artifício que consiste em introduzir numa estrutura um estado prévio de tensões capaz de melhorar sua resistência ou seu comportamento, sob diversas condições de carga. Desse modo, observa-se, como exemplo, a Figura 2.

Figura 2 - Viga de concreto: a) sem armadura; b) executada em concreto armado; c) executada em concreto protendido



Fonte: Bastos (2018)

2.2.1 Tipos de protensão

A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) informa que as armaduras dos elementos em Concreto Protendido (CP) podem ser pré-tracionadas ou pós-tracionadas (com ou sem aderência posterior). Nesse contexto, Alves e Santos (2020) informam que nos elementos pré-tracionados, os apoios externos ao elemento são utilizados para realizar o alongamento da armadura antes da concretagem e, após a concretagem, a armadura é solta e sua ancoragem é a aderência ao concreto endurecido. Desse modo, esses cabos são tracionados

antes de o concreto ser lançado, como é apresentado na Figura 3 e, com isso, as peças de concreto protendido pré-tracionado serão transportadas para o canteiro de construção (CAUDURO, 2002).

Figura 3 - Pistas de protensão em fábrica para produção de pré-fabricados protendidos



Fonte: Cauduro (2002)

Em paralelo a isso, Alves e Santos (2020) informam que nos elementos com aderência posterior (Figura 4), após o concreto endurecer, a armadura é tracionada ancorando na própria estrutura do elemento. E os elementos pós-tracionados sem aderência posterior, também são tracionados ancorando na própria estrutura do elemento, após o concreto endurecer. Ou seja, os cabos de aço são tracionados no canteiro de obras depois que o concreto foi lançado e adquiriu a resistência suficiente (CAUDURO, 2002).

Figura 4 - Tracionamento dos cabos



Fonte: Cauduro (2002)

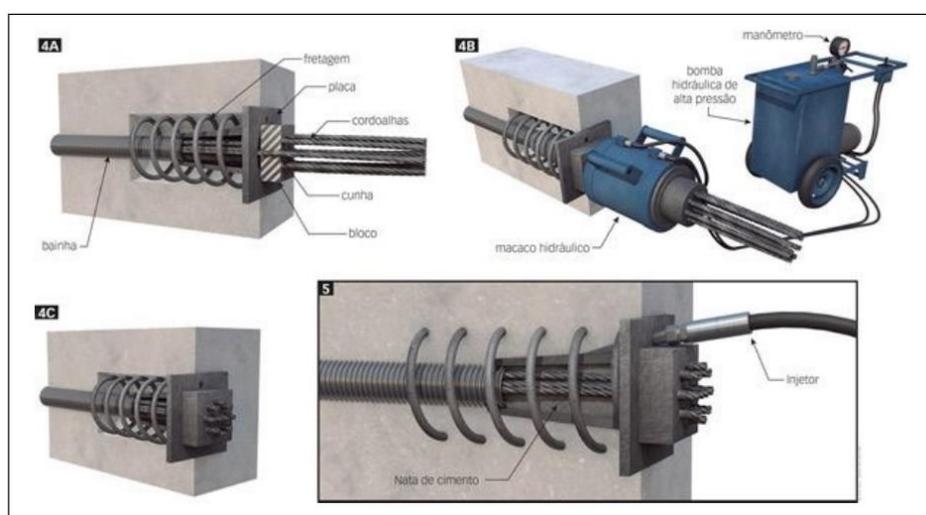
Além disso, Cauduro (2002) informa que o concreto protendido pós-tracionado proporciona as seguintes vantagens em relação ao concreto protendido pré-tracionado:

continuidade estrutural dos componentes (difícil de executar na pré-tração); protensão em estágios; protensão no campo; perdas de protensão reduzidas; conexões em campo para elementos pré-moldados; construção em áreas limitadas ou de acesso restrito; uso de mão-de-obra e materiais locais; e uso de cabos com catenária, diminuindo o custo da armadura frouxa.

Outrossim, segundo a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) pode haver uma outro tipo de classificação, de acordo com a intensidade da protensão, que está associada à durabilidade das peças, e à maneira de evitar corrosão na mesma, em que os tipos são escolhidos conforme o tipo da construção, e a agressividade do meio ambiente. Assim, a norma informa o seguinte: em ambientes com agressividade fraca ou moderada (com aderência posterior), recomenda-se o uso de protensão parcial; em ambientes onde a agressividade é forte, recomenda-se a protensão limitada; e em ambientes com fraca agressividade e aderência inicial, é indicado o uso protensão parcial.

Por fim, no trabalho de Giovanaz e Fransozi (2017) é apresentado uma ilustração representando um exemplo de uma viga protendida em sua execução (Figura 5) com os seus componentes, e o macaco hidráulico, que é o responsável pelo pré-tensionamento do aço, além do aço (cordoalhas) utilizado em peças protendidas que possui uma maior resistência do que o aço do concreto armado simples, o que proporciona maior controle de fissuração do concreto.

Figura 5 - Exemplo de procedimento de viga em protensão



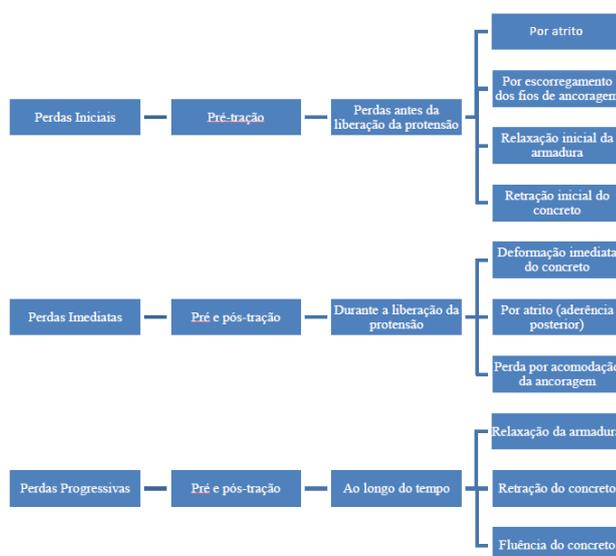
Fonte: Giovanaz e Fransozi (2017)

2.2.2 Perdas de protensão

Durante a protensão, as armaduras são expostas a uma força que ocasiona o seu alongamento, o qual é feito por meio de macacos hidráulicos, mas essa tensão inicialmente submetida tende a decrescer com o passar do tempo, por diversos fatores, sendo este processo conhecido como perda de protensão (COSTA, 2021). Além disso, o autor supracitado complementa que algumas das causas dessas perdas se dão por escorregamento na ancoragem, relaxação, encurtamento elástico inicial, retração, fluência e atrito. No final, todas as perdas são somadas para obter a perda de protensão total, que serve para calcular a força de protensão efetiva final

Nessa linha, a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) alerta sobre as perdas de protensão que podem e ocorrem antes, durante e após a execução do método de protensão. Nesse contexto, Rosa (2021) informa que essas perdas devem ser antecipadas no momento de desenvolvimento do cálculo de protensão, e, desse modo, faz com que seja segura a aplicação do modelo escolhido. Ademais, o autor supracitado apresenta na Figura 6 que as perdas de protensão estão divididas em perdas iniciais (sofridas apenas na pré-tração), perdas instantâneas (ocorridas durante o processo de protensão e também imediatamente após o término do processo de protensão) e em perdas progressivas (decorrem do esforço do aço ao longo do tempo).

Figura 6 - Modelo divisão entre perdas de tração



Fonte: Rosa (2021)

Dessa forma, Alves e Santos (2020) resumem que o aço do CP pode sofrer três tipos de perda da força de proteção, os quais 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.

2.2.3 Aços para protensão

Segundo Hanai (2005) é importante destacar que os aços utilizados em concreto protendido apresentam elevada resistência mecânica e ausência de patamar de escoamento. Em complemento, Alves e Santos (2020) informam que enquanto o CA usa aços das classes CA25, CA50 e CA60, os CP usa aços especiais das classes CP190 e CP210, conforme é apresentado na Figura 7. 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.

Figura 7 - Especificação de fios para protensão

ESPECIFICAÇÕES DOS PRODUTOS - FIOS PARA PROTENSÃO						
Produto	Diâmetro nominal (mm)	Área aprox. (mm ²)	Massa aprox. (kg/1.000m)	Carga mínima de ruptura (kN)	Carga mínima a 1% de deformação (kN)	Alongamento após ruptura (%)
Fio CP RB (Relaxação Baixa)						
CP 145 RB	9,0	63,6	499	89,5	80,5	3,0
CP 150 RB	8,0	50,3	395	73,0	65,7	3,0
CP 170 RB	7,0	38,5	302	63,3	56,9	3,0
CP 175 RB	4,0	12,6	98	21,0	18,9	3,0
	5,0	19,6	154	33,0	29,7	3,0
	6,0	28,3	222	47,7	43,0	3,0
*CP 190 RB	4,0	12,6	98	22,8	20,5	3,0
	5,0	19,6	154	35,9	32,3	3,0
	6,0	28,3	222	51,8	46,6	3,0

* Os fios podem ser fabricados sob consulta.

1- Todos os fios especificados acima podem ser fabricados lisos ou entalhados.

2- A profundidade do entalhe pode ser especificada pelo cliente.

3- Os fios lisos são fabricados sob consulta.

Fonte: ARCELORMITTAL (2021)

Nesse viés, Hanai (2005) adiciona que essas armaduras ativas se apresentam da seguinte forma: fios trefilados de aço carbono, cordoalhas, barras de aço-liga, aços aliviados (ou de relaxação normal (RN)), e aços estabilizados (ou de baixa relaxação (RB)). Assim, Costa (2021) informa, em resumo, que existem três tipos de aços de protensão: fios

trefilados, cordoalhas (fios enrolados em forma de hélice) e barras de alta resistência. Em complemento, as normas NBR 7482 (ABNT, 2020a) e NBR 7483 (ABNT, 2020b) explicam como é realizado a nomenclatura para os aços de protensão.

Assim, para as cordoalhas, a NBR 7483 (ABNT, 2020b) explica que as duas primeiras siglas indicam o do tipo de aço, os três números seguidos correspondem à resistência mecânica em quilogramas-força por milímetro quadrado, as duas siglas em seguida referem-se ao tipo de relaxação, em seguida é o diâmetro nominal, após é o número de fios (no caso de cordoalhas de três fios), em seguida o tipo de aspecto superficial (no caso de cordoalha entalhada), e, por fim, informado o tipo de recobrimento (no caso de cordoalha engraxada e plastificada – EGP; no caso de cordoalha encerada e plastificada – ECP). Nesse viés, a norma supracitada informa, como exemplo, o CP-190 RB 12,7 EGP que significa uma cordoalha de sete fios para concreto protendido (CP), categoria 190, relaxação baixa (RB) e diâmetro nominal de 12,7 mm, engraxada e plastificada (EGP).

Em paralelo a isso, conforme o catálogo da ARCELORMITTAL (2021), os fios para Concreto Protendido são fornecidos de acordo com as normas NBR 7482 (ABNT, 2020a), sendo utilizadas, principalmente, em dormentes, estacas e vigotas; e as Cordoalhas de 3 e 7 Fios para Concreto Protendido são fabricados de acordo com as normas NBR 7483 (ABNT, 2020b) sendo utilizadas, principalmente, em lajes de edifícios, lajes residenciais, pisos e radiers (Figura 8). Em adição, Schmid (2007) informa que as mais utilizadas são as compostas de sete fios com diâmetro de 12,7 mm ou 15,2 mm, que ficam soltas dentro da bainha, permitindo um deslocamento no processo de protensão.

Figura 8 - Radier protendido



Fonte: ARCELORMITTAL (2021)

2.2.4 Vantagens e desvantagens

Linck (2013) informa que com a utilização do concreto protendido, o número de vigas, pilares e capitéis é reduzido em comparação ao sistema de concreto armado. Assim, mesmo que a laje protendida (Figura 9) seja pouco utilizada em edificações residenciais, esta pode oferecer diversas vantagens, entre elas: utilizar grandes vãos; possibilita uso em ambientes agressivos; controle e redução de deformações e da fissuração; aplicação em peças pré-fabricadas; projetos arquitetônicos ousados; lajes mais esbeltas do que as equivalentes em concreto armado; podendo ser usada para recuperação e reforço de estruturas. Contudo, Alves e Santos (2020) informam que há empecilhos na utilização do concreto protendido, entre eles estão: o efeito da corrosão nas armaduras ativas que 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.

Figura 9 - Armadura de protensão em uma laje a ser concretada



Fonte: Rosa (2021)

Por fim, Hanai (2005) enumera uma série de aspectos relevantes da tecnologia do concreto protendido, os quais devem ser levados em conta numa possível análise de alternativas. Assim, é possível controlar de modo mais eficiente a fissuração, podendo-se até eliminá-la; pode-se empregar aços de alta resistência, sem acarretar com isso uma fissuração inaceitável; pode-se empregar concretos de resistência mais elevada, o que permite a redução do peso próprio das estruturas. Ademais, pode-se desenvolver novos processos construtivos, nos quais a protensão entra como fator determinante no peso próprio de elementos pré-moldados e no trabalho conjunto dos componentes; pode-se controlar melhor as deformações das estruturas, com melhor aproveitamento da seção transversal de concreto não fissurado.

3 METODOLOGIA

A metodologia para a elaboração desse Trabalho de Conclusão de Curso foi dividida em 03 etapas. Na primeira etapa, foram realizadas pesquisas por material bibliográfico em artigos de revistas, monografias, dissertações, teses e livros acerca do tema do trabalho, em que as bibliografias pesquisadas foram obtidas por meio de pesquisas a partir de palavras-chave (manifestações patológicas, defeitos, problemas; manutenção, restauração, reparo, reabilitação; e concreto protendido) buscadas em bancos de dados, como, por exemplo, nos Periódicos da CAPES.

Nesse sentido, para acessar os diversos trabalhos dos periódicos da CAPES foi utilizado o acesso do aluno através da Comunidade Acadêmica Federada (CAFe). Com isso, a partir dessas palavras-chave foi possível facilitar a busca pelos trabalhos almejados, sendo procuradas as ações de prevenção mais comuns realizadas para combater as manifestações patológicas nas estruturas de concreto protendido.

Na segunda etapa, com os trabalhos encontrados nos bancos de dados, foi elaborada uma lista de manifestações patológicas que foram observadas nas estruturas de concreto protendido. Nesta lista havia as manifestações patológicas e suas possíveis origens. Para facilitar a identificação dos problemas, as estruturas foram separadas por seu tipo de protensão. Desse modo, foram analisados nos elementos pré-tracionados; nos elementos pós-tracionados com aderência posterior; e nos elementos pós-tracionados sem aderência posterior.

Além disso, foi elaborada uma lista de ensaios que podem ser realizados para identificar essas manifestações patológicas nesse tipo de estrutura. Nesta lista, havia as possíveis análises experimentais e em que elas poderiam contribuir. Ambas as listas foram colocadas em uma planilha do excel para facilitar a análise posterior.

Por fim, na terceira etapa, foi elaborado uma lista de ações de prevenção que visavam combater as manifestações patológicas nas estruturas protendidas, sendo essas ações baseadas nos trabalhos estudados.

4 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NAS ESTRUTURAS PROTENDIDAS

De acordo com Arruda (2018), uma estrutura de concreto é projetada para ser durável, devendo ser capaz de resistir a fatores ambientais, ataques químicos e aos carregamentos impostos à estrutura, dentre outros fatores. Nesse sentido, Carvalho e Filho (2016) informam que para se atingir a durabilidade projetada, é necessário que a entenda não como um fator isolado, mas como um conjunto de medidas importantes, que devem ser obedecidas para que a edificação conserve sua segurança, estabilidade e comportamento adequado em serviço.

Nesse viés, Arruda (2018) ressalta que embora existam avanços na tecnologia de materiais, não é incomum a presença de danos, devido a problemas de composição ou de mal uso dos materiais na construção. Assim, o autor supracitado complementa que essas falhas são devido à sua utilização fora das especificações normativas, fazendo, dessa forma, com que o material não suporte às ações ambientais ou que seu desempenho seja abaixo do previsto, afetando diretamente a durabilidade da estrutura.

4.1 Mecanismos de degradação

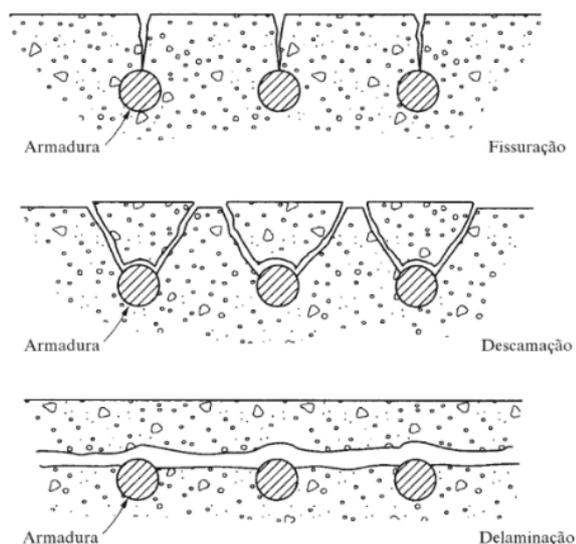
Conforme a norma NBR 6118 (ABNT, 2014), a durabilidade de uma estrutura consistirá na sua resistência em um ambiente previsto em projeto, contemplando a segurança, a estabilidade e a utilização durante sua vida útil, sendo esta o tempo em que uma estrutura atende a todas as funções para as quais foi inicialmente projetada, sem que se faça necessário grandes intervenções. Nessa linha, para que se possa tomar decisões de projeto de forma a garantir sua durabilidade e vida útil, é preciso conhecer as características do ambiente em que a obra estará inserida, sendo que uma estrutura pode ser degradada por agentes físicos, químicos e/ou mecânicos (NEVILLE, 2016). Nesse contexto, a partir dos trabalhos estudados, observou-se que as manifestações patológicas podem ocorrer nos diversos elementos de concreto protendido e nas diversas fases de aplicação. Dessa maneira, Alves e Santos (2020) notaram que com relação às armaduras, a carbonatação e o transporte de cloretos causam a sua corrosão; e no concreto, a presença dos sais e a lixiviação causam a sua desintegração e a retração por secagem causa a sua fissuração.

4.1.1 Corrosão do aço de protensão

De acordo com Alves e Santos (2020), a corrosão nas armaduras é decorrente de um processo eletroquímico de natureza expansiva, sendo que a expansão das armaduras resulta em tensões que causam o rompimento da camada de cobrimento. Assim, com a expansão

formam-se as fissuras, as descamações e/ou as delaminações do cobrimento do concreto, conforme a Figura 10. Dessa forma, abre-se um caminho mais fácil e rápido para os agentes agressivos e aumentando a corrosão e a degradação do concreto (NEVILLE, 2016).

Figura 10 -Representação das consequências da corrosão



Fonte: Neville (2016)

Embora o aço no concreto seja, normalmente, protegido da corrosão pela alta alcalinidade da pasta de cimento (e sua permeabilidade relativamente baixa à umidade, oxigênio e cloretos), a corrosão será iniciada se a alcalinidade do concreto de cobertura for reduzida por carbonatação ou se estiver contaminado por cloretos (BRUCE *et al.*, 2008). Os íons do cloreto em contato com o aço, reagem e formam o cloreto de ferro (FeCl_2), sendo que este reage com a água (H_2O) e forma o hidróxido ferroso ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) e, este, reage com a água e o oxigênio, formando o hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), a ferrugem (ALVES e SANTOS, 2020).

Nesse sentido, Bruce *et al.* (2008) informam que a corrosão do aço de protensão é rara, visto que a seção transversal de cada cordão de protensão é pequena e o aço já está sob tensão significativa, e, dessa forma, uma perda de seção transversal resultaria em uma ruptura do cordão e, eventualmente, um dano no elemento de concreto. Além disso, o autor supracitado informa que essa corrosão pode ocorrer sem produzir evidências externas, como manchas de ferrugens, uma vez que as tensões de tração, que a pequena seção transversal do aço gera no concreto de cobertura, são pequenas. Conseqüentemente, o cordão ou fio pode descolar ou romper sem aviso.

Nesse viés, devido aos riscos envolvidos (e porque os sinais externos de corrosão no aço de protensão, geralmente, estão ausentes), a inspeção de estruturas protendidas pode precisar ser mais rigorosa do que as estruturas armadas. Nessa linha, Bruce et al. (2008) informam que as características que podem indicar uma maior probabilidade de corrosão em elementos protendidos são as seguintes: drenagem do escoamento superficial; rachaduras, principalmente se não forem esperadas de carregamento normal; profundidade insuficiente de cobertura de concreto, principalmente em superfícies expostas ao escoamento ou ingresso de cloreto; danos físicos que reduzem a profundidade de cobertura efetiva; vazamento nas juntas do convés ou outras características de drenagem superficial deficiente que fornecem uma fonte de umidade para corrosão; consolidação inadequada do concreto, evidenciada pelos vazios superficiais; redução da alcalinidade do recobrimento do concreto, principalmente em superfícies expostas ao escoamento; e teor elevado de íons cloreto no concreto de cobrimento.

Por fim, é necessário destacar que uso de um concreto de boa qualidade e boa compactação ajudam a combater a corrosão no aço, a qual, geralmente, está relacionada à presença de vazios de ar. Desse modo, o uso de concreto altamente poroso pode prejudicar o elemento protendido, já que permitirá que os fios mais finos percam uma proporção significativa de sua seção transversal sem evidência externa, porque os produtos de corrosão podem ser acomodados nos vazios sem gerar as tensões de expansão que, de outra forma, rachariam ou fragmentariam o concreto de cobertura (BRUCE et al., 2008).

4.1.2 Desagregação e fissuração no concreto

Alves e Santos (2020) informam que as desagregações e as fissuras são processos físicos que deterioram os elementos de concreto, sendo que o surgimento 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 à ruína local ou parcial (SOUZA e RIPPER, 1998).

Além disso, há a retração por secagem que ocorre quando o concreto perde água não substituível para o ambiente, durante o período de cura, ocorrendo da superfície para o interior da estrutura, lentamente (ALVES e SANTOS, 2020). Nesse contexto, os autores explicam um dos fatores principais para controle da retração é a cura úmida do elemento,

bem como os fatores tamanho e forma também influenciam a retração, sendo que a retração tende a ser maior em elementos menores, e quanto maior for a relação volume/superfície do elemento estrutural, menor será a retração. Outrossim, a tensão de retração do concreto aliado à baixa resistência à tração pode provocar a fissuração da estrutura, além da alta relação a/c, que aumenta a retração e diminui a resistência do concreto (NEVILLE, 2016).

Paralelamente, segundo Souza e Ripper (1998), um concreto de má qualidade, muito poroso, ou com fissuras facilita que a água circule no interior da pasta de concreto, provocando, assim, a dissolução e transporte do hidróxido de cálcio (CA(OH)_2) presente no cimento, sendo que a deste decompõe outros hidratos e, conseqüentemente, aumenta a porosidade. Assim, 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 do elemento de concreto por meio de uma cor esbranquiçada (NEVILLE, 2016).

Dessa forma, norma NBR 6118 (ABNT, 2014) recomenda o controle de fissuração, uma vez que 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 classe de agressividade ambiental e o tipo de concreto (simples, armado e protendido). Contudo, a norma ressalta que a abertura máxima característica (w_k) das fissuras, desde que não exceda valores da ordem de 0,2 mm a 0,4 mm sob ação das combinações frequentes, não tem importância significativa na corrosão das armaduras passivas. No entanto, como no caso das armaduras protendidas há a possibilidade de corrosão sob tensão, esses limites devem ser mais restritos em função direta da agressividade do ambiente, dada pela classe de agressividade ambiental.

4.2 Causas das manifestações patológicas em estruturas protendidas

Conforme Souza e Ripper (1998), uma estrutura pode apresentar-se doente em vários graus e, quando isto ocorre, é preciso intervir para que a sua integridade seja garantida. Nesse viés, o detalhamento do projeto na construção civil representa uma medida de prevenção de manifestações patológicas (ARAUJO, 2013). Logo, é imprescindível que a estrutura esteja em conformidade com as etapas previstas, a fim de evitar os possíveis problemas. Nessa linha, Vitério (2003) explica que um elevado percentual dos problemas nas edificações são originados nas fases de planejamento e projeto, sendo, geralmente, mais graves que os relacionados à qualidade dos materiais e aos métodos construtivos, principalmente devido à

falta de investimento dos proprietários, sejam eles públicos ou privados. Dessa forma, o autor alerta que essa busca por projetos mais “baratos” resulta muitas vezes na necessidade de adaptações durante a fase de execução e futuramente em problemas de ordens funcional e estrutural.

Costa (2021) informa que na fase de concepção, é necessário estar atento às características do concreto, à classe de agressividade ambiental, ao tipo de aço, ao sistema de protensão, ao microclima local e também ao detalhamento do projeto, tanto na fase de cálculo estrutural quanto na sua execução. Na fase de execução, é preciso ter cuidado ao transporte dos materiais, lançamento do concreto (Figura 11), condições de ancoragem, protensão dos cabos, dentre outros, e, além disso, é necessário ter especial atenção quanto à mão de obra utilizada, que precisa ser especializada, a fim de evitar que apareçam problemas futuros. E, por fim, na fase pós uso, as falhas podem vir provenientes de mal uso da edificação como a aplicação de sobrecarga não prevista, ou também por falta de uma inspeção regular na construção.

Figura 11 - Lançamento e adensamento do concreto



Fonte: Costa (2021)

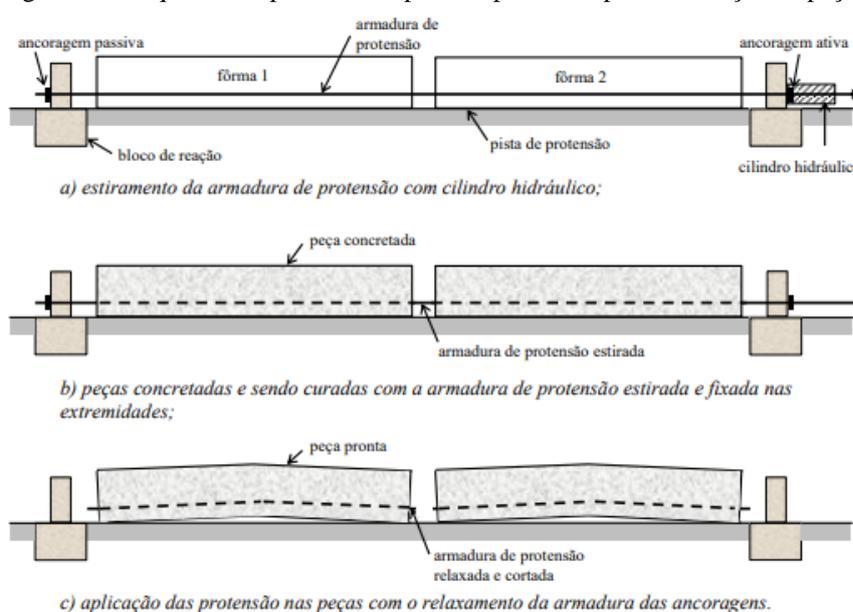
Em complemento, Freitas (2020) informa que em algumas etapas durante a montagem das fôrmas e durante a concretagem dos elementos protendidos, deve-se haver uma atenção especial. Na conferência das fôrmas, é fundamental o correto posicionamento delas, já que podem resultar em um comprometimento relacionado ao posicionamento das cordoalhas, e, dessa forma, comprometer o desempenho do sistema de protensão. Já na concretagem é necessário um acompanhamento adequado, visto que um adensamento mal executado pode derivar em espaços da fôrma não preenchidos, prejudicando assim o

elemento estrutural. Esses espaços vazios na forma, segundo o autor, prejudicam no posicionamento correto das cordoalhas, visto que podem abrir espaço para uma movimentação das faixas de cordoalhas, e, desse modo, causar ruptura ou deslocamento das faixas de cordoalhas. Em adição, Cauduro (2002) alerta que se deve evitar o contato entre o vibrador e o cabo durante o adensamento do concreto para que não haja deslocamento dos cabos.

4.2.1 Manifestações patológicas nos elementos pré-tracionados

Conforme Cauduro (2002), os elementos protendidos pré-tracionados são produzidos em fábricas de construções. Nesses locais, o aço é tracionado antes do lançamento do concreto e suportado por estruturas colocadas nas extremidades de longas pistas de pré-fabricação. Dessa forma, após isso, o concreto é lançado, envolvendo e aderindo às cordoalhas. Assim que o concreto atinge cerca de 75% da resistência especificada, é realizada a transferência da força das cordoalhas para o concreto cortando-se as cordoalhas entre ele e a estrutura da extremidade da pista. A efetiva aderência das cordoalhas ao concreto faz com que este seja comprimido. Na Figura 12, é apresentado um exemplo ilustrativo da fabricação desses elementos pré-tracionados. Nesse contexto, destaca-se os dormentes de concretos protendidos que são esses tipos de elementos pré-tracionados.

Figura 12 - Esquema simplificado de pista de protensão para fabricação de peças



Fonte: Bastos (2021)

Bastos (2021) reforça que o método da pré-tensão é bastante utilizado na produção de elementos pré-moldados, uma vez que o ambiente de fábrica possibilita a industrialização

e a produção de grandes quantidades de peças, com maior controle de qualidade de todo o processo de produção. A cura natural, bem como a térmica com vapor aquecido, pode também ser utilizada a fim de permitir a transferência da força de protensão em até 24 horas.

Segundo Clack *et al.* (2017), os dormentes de concreto protendido (ou dormentes) são elementos críticos de segurança em trilhos ferroviários que distribuem as cargas das rodas dos trilhos para o sistema de suporte da via (Figura 13). Em complemento, Taherinezhad *et al.*, (2013) informam que esses elementos desempenham um papel essencial no desempenho, comportamento e segurança da pista. Contudo, Clack *et al.* (2017) alertam que, ao longo do tempo, esses elementos envelhecem e se deterioram, além de experimentar vários tipos de condições de carga estática e dinâmica. Essas condições são atribuíveis às operações dos trens, sendo, em muitos casos, rachaduras estruturais que podem se desenvolver dentro dos dormentes devido a cargas de impacto de alta intensidade ou devido à má manutenção da via.

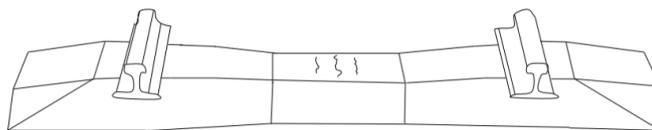
Figura 13 - Ferrovia com dormentes de concreto



Fonte: You *et al.* (2017)

Nesse sentido, as rachaduras devido a efeitos dinâmicos que aparecem no assento do molinete e no meio do vão são classificadas como uma das principais preocupações para os dormentes, observando-se que eles diminuem a rigidez estrutural e tornam esses elementos suscetíveis à penetração de água e íons cloreto, o que pode levar a uma redução da vida útil (TAHERINEZHAD *et al.*, 2013). Outrossim, Clack *et al.* (2017) completam que, muitas vezes, rachaduras de dormentes se desenvolvem e se apresentam no meio do vão, como mostrado na Figura 14, devido à flexão negativa excessiva, sendo que essas rachaduras podem causar dormentes quebrados e, às vezes, chamado de problema de 'limite central' em linhas ferroviárias.

Figura 14 - Rachaduras no centro do dormente



Fonte: You *et al.* (2017)

Dessa forma, embora muitos sejam os fatores que causam a falha de dormentes de concreto protendido, a fissuração é, comumente, considerada como critério de falha por fadiga. Nesse viés, You *et al.* (2017) sintetizam que o dano por fadiga de um dormente de concreto protendido é, principalmente, devido ao acúmulo de defeitos causados pela carga repetida da interação roda-trilho. Então, o autor explica que é preciso avaliar a vida útil à fadiga das travessas de concreto protendido conforme os seguintes aspectos do trabalho: análise estatística da carga dinâmica de fadiga, carga de impacto do trem e momento fletor do dormente de concreto protendido; estudo das características de fadiga de travessas de concreto protendido (incluindo curvas S – N de concreto e barras de aço) e seus materiais; e desenvolvimento de critérios razoáveis de discriminação de vida em fadiga, de acordo com o momento de carga e características do material, para calcular a vida em fadiga de um dormente de concreto protendido.

Por fim, no trabalho de Clack *et al.* (2017) foi apresentado um método para a detecção de danos baseada em confiabilidade dos dormentes. Assim, por meio da emissão acústica, foi possível determinar e localizar a magnitude das rachaduras nos dormentes, sendo que a investigação experimental da sonda de emissão acústica guiou com sucesso seus recursos de monitoramento de integridade estrutural. Desse modo, a curva de deflexão forneceu um método simples de detecção de danos em tempo real, já que os registros de deslocamento vertical podiam identificar mudanças na integridade estrutural.

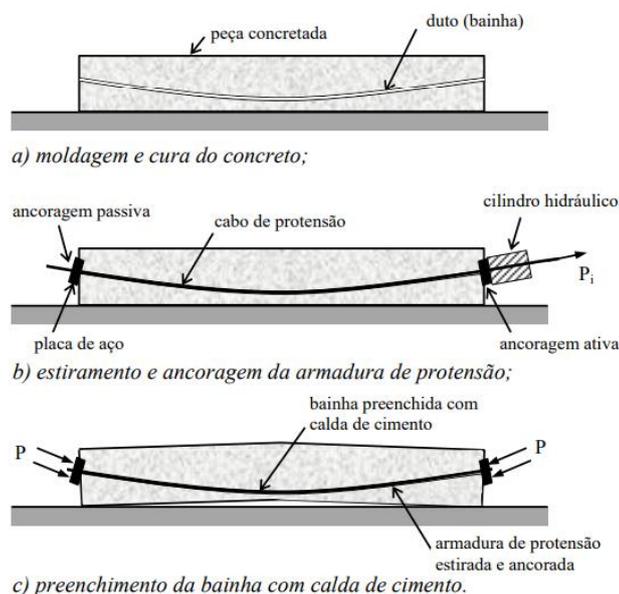
4.2.2 Manifestações patológicas nos elementos pós-tracionados com aderência posterior

De acordo com Cauduro (2002), os elementos pós-tracionados são executados nos canteiros de obras. O aço é tracionado após o concreto ter atingido perto de 75% de sua resistência especificada. Nesse momento o concreto é comprimido pelo aço, podendo ser com aderência posterior ou sem aderência posterior. Nesse viés, a NBR 6118 (2014) define que os elementos de concreto com armadura ativa pós-tracionada (com aderência posterior) corresponde àqueles em que o pré-alongamento da armadura ativa é realizado após o endurecimento do concreto, sendo utilizadas, como apoios, partes do próprio elemento

estrutural, criando posteriormente aderência com o concreto, de modo permanente, através da injeção das bainhas.

Ademais, Bastos (2021) complementa que os cabos de protensão (conjuntos de cordoalhas) podem ser tracionados em estágios diferentes, proporcionando aumentos de força de protensão na peça quando necessários, conforme existam diferentes estágios de construção e as cargas vão sendo progressivamente aumentadas. Além disso, o autor destaca que após a operação de estiramento, a bainha é normalmente preenchida com calda (nata) de cimento sob pressão, a fim de que possa proteger o aço e proporcionar aderência com o concreto, fazendo, assim, com que os dois materiais trabalhem de modo solidário, em conjunto, e com melhor comportamento da peça na resistência à fissuração e à flexão, sendo esse sistema com aderência posterior bastante utilizado em pontes. Na Figura 15, é apresentado um esquema ilustrativo da produção desses elementos.

Figura 15 - Esquema simplificado de fabricação de peça protendida com pós-tensão



Fonte: Bastos (2021)

As pontes de concreto protendido são obras fundamentais para a infraestrutura das cidades, mas elas são suscetíveis a diferentes tipos de processos de deterioração, como exemplos de danos e deficiências tem-se as trincas, a corrosão, os vazios, a perda de aderência, a redução da camada de cobertura, a delaminação, a fadiga, e perda de rigidez e resistência (TÄLJSTEN *et al.*, 2020). Logo, devido a essas obras serem suscetíveis à deterioração ao longo do tempo, é vital avaliá-las continuamente para manter sua integridade estrutural e prolongar sua vida útil (TÄLJSTEN *et al.*, 2019).

Nesse contexto, Taljsten *et al.* (2019) alertam que além da deterioração normal do concreto ao longo dos anos, há também um risco severo de corrosão e/ou fadiga da armadura de pós-esforço, visto que já houve acidentes que mostraram pontos críticos no projeto e na construção (Figura 16). Nesse viés, os autores explicam que a taxa de corrosão será aumentada se o aço for submetido a tensões de tração, uma vez que pode levar à falha repentina de metais normalmente dúcteis submetidos a uma tensão de tração, especialmente, em temperaturas elevadas. Com isso, as tensões de tração levarão ao crescimento da formação de trincas em um ambiente corrosivo, sendo isso chamado de fissuração por corrosão sob tensão, e tem sido um problema para as primeiras qualidades de tubos e aços de protensão.

Figura 16 - Fratura no meio do vão de vigas protendidas pré-fabricadas



Fonte: Taljsten *et al.* (2019)

Paralelamente, Barbosa (2021) informa que pode haver rompimentos nos cabos nas zonas de encunhamento, como pode ser visto na Figura 17. Além disso, há a deterioração do concreto, em que as rachaduras podem ser causadas por retração por secagem, expansão térmica, ciclo de congelamento e degelo e reações químicas, além de poderem ser causadas por processos mecânicos, como fadiga ou sobrecarga. Em relação às fissuras, pode-se discutir a delaminação, que muitas vezes é induzida pela corrosão e aparece como camadas de fissuras horizontais, muitas vezes 5 a 15 cm abaixo da superfície do concreto. Eventualmente a delaminação pode causar fragmentação reduzindo severamente a durabilidade da estrutura. Neste caso, a detecção de corrosão seria útil para prolongar a vida útil (TALJSTEN *et al.*, 2019).

Figura 17 - Cabo de protensão rompido na zona de encunhamento



Fonte: Barbosa (2021)

Nesse contexto, Barbosa (2021) altera que uma outra preocupação se relaciona à corrosão do aço, que acontece sob tensão (*stress-corrosion*), que pelo fato dos cabos que compõe a cordoalha serem de pequeno diâmetro, podem fragilizar a seção da armadura e ocasionar a sua ruptura. Dessa forma, é essencial o uso das bainhas de proteção. Caso estas estejam ressecadas ou danificadas, como é apresentada na Figura 18, pode comprometer a estrutura da ponte.

Figura 18 - Ressecamento e quebra da bainha de protensão



Fonte: Barbosa (2021)

Outro problema é a fragilização por hidrogênio, que é o processo pelo qual ligas metálicas formadoras de hidretos, como titânio, vanádio, zircônio, tântalo e nióbio, tornam-se quebradiças e fraturam devido à introdução e subsequente difusão de hidrogênio no metal. Esse átomos de hidrogênio individuais dentro do metal se recombinaem, para formar moléculas de hidrogênio, criando pressão de dentro do metal. Com isso, essa pressão pode

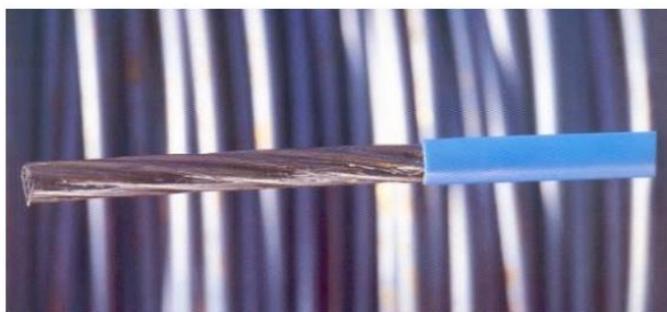
umentar para níveis em que o metal tenha ductilidade, tenacidade e resistência à tração reduzidas, até o ponto em que se abre (TÄLJSTEN *et al.*, 2019).

Por fim, notou-se que um defeito comum observado nas pontes de concreto protendido pós-tensionado é a falta de argamassa nos dutos pós-tensionados. Assim, se o duto do tendão não tiver argamassa, pode iniciar a corrosão, levando a um modo de falha “frágil” (TÄLJSTEN *et al.*, 2019). No mais, a fim de evitar problemas que possam levar a uma vida útil mais curta ou redução da integridade estrutural, é preciso haver inspeção, monitoramento e avaliação adequadas e contínuas, para que a segurança estrutural dessas obras seja garantida (TÄLJSTEN *et al.*, 2020).

4.2.3 Manifestações patológicas nos elementos pós-tracionados sem aderência posterior

Segundo a NBR 6118 (2014), os elementos de concreto com armadura ativa pós-tracionada (sem aderência posterior) correspondem àqueles em que o pré-alongamento da armadura ativa é realizado após o endurecimento do concreto, sendo utilizadas, como apoios, partes do próprio elemento estrutural, porém não sendo realizadas aderência com o concreto, ficando, assim, a armadura ligada ao concreto apenas em pontos localizados. Nessa linha, Bastos (2021) explica que nesse sistema é utilizado a cordoalha engraxada (Figura 19), a qual vem sendo muito aplicada no Brasil e no mundo nas últimas duas décadas, especialmente em lajes maciças e nervuradas, pisos industriais, vigas e em reforço estrutural.

Figura 19 - Cordoalha engraxada de sete fios



Fonte: Bastos (2021)

Ademais, Bastos (2021) explica que a cordoalha é envolta com graxa para diminuir o atrito com a capa de polietileno durante a movimentação na operação de estiramento. A capa funciona como uma bainha, impedindo o contato do concreto com a cordoalha. Assim, as cordoalhas são colocadas na fôrma da peça ou estrutura, fixadas em uma das extremidades por dispositivos apropriados de ancoragem, e são envolvidas pelo concreto após o

lançamento na fôrma. Então, após o concreto adquirir a resistência exigida, as cordoalhas são estiradas por um cilindro hidráulico, e fixadas na ancoragem ativa. Como não há aderência entre o concreto e as cordoalhas, então a força que comprime o concreto da peça se concentra apenas nas extremidades (ancoragens).

Freitas (2020) informa que embora o mercado da construção civil utilize dois tipos de cordoalhas (as cordoalhas aderentes (para protensão aderente) e as cordoalhas engraxadas (para protensão não aderente)), as cordoalhas engraxadas são as mais utilizadas. Assim, Vasconcelos (2010) explica que nas engraxadas a execução é mais simples e o material mais leve, podendo ser utilizada em obras de pequeno e médio porte e, com isso, possibilitou um aumento da utilização da protensão.

Nesse contexto, Emerick (2002) explica que as cordoalhas plastificadas engraxadas são cordoalhas tradicionais que possui um revestimento de PEAD que é um polietileno de alta densidade, impermeável a água, resistente e possui uma vida útil longa. Ademais, Vasconcelos (2010) complementa que na protensão não aderente as cordoalhas são envolvidas em uma capa plástica, de forma que sua aderência ao concreto ocorra indiretamente, e que possua uma graxa entre o aço e a cordoalha que a permita deslizar para que seja feita a protensão posterior à concretagem.

Em paralelo a isso, Freitas (2020) explica que as causas de sinistros (ou manifestações patológicas estruturais nas estruturas protendidas) podem ser por diversos motivos. Dentre as mais comuns, segundo a autora, estão as relacionadas aos materiais componentes, seja devido à sua má qualidade ou à insuficiência na execução. Assim, a autora cita, como exemplo, a insuficiência ou inexistência da graxa em cordoalhas engraxadas em lajes de concreto que precisam de aplicação dessa graxa em quantidade certa nas monocordoalhas.

Além disso, Costa (2021) informa que também pode ocorrer a fragilização por hidrogênio nas cordoalhas, em que uma grande presença de hidrogênio atômico pode resultar na diminuição da ductilidade, aparecimento de trincas e, em casos mais graves, na ruptura das cordoalhas. Outrossim, é necessário o uso das bainhas plásticas que são os tubos onde a armadura de protensão é depositada, com a finalidade de proteger a cordoalha do concreto para que este não se molde àquele (FREITAS, 2020).

Paralelamente, Schmid (2009) informa que, nos cabos não aderentes, a força de protensão é transferida ao concreto por meio das ancoragens, exigindo, assim, que as

mesmas tenham uma proteção especial contra a corrosão e conservem indefinidamente suas características iniciais, visando a durabilidade do elemento. Nesse viés, Freitas (2020) explica que caso as placas de ancoragem não estejam com as especificações de material ou dimensões corretas, isso poderá comprometer todo o sistema de protensão, uma vez que esse equipamento está presente quando a protensão será realizada por meio de cunhas, que são peças, normalmente de ferro fundido dúctil, usadas para transferir a força de protensão para o concreto. Então, na Figura 20 são apresentados os equipamentos componentes do sistema de protensão não aderente que devem ser conferidos para que não apresentem sinistros.

Figura 20 - Acessórios componentes do sistema de protensão não aderente



Fonte: Freitas (2020)

Outrossim, Freitas (2020) informa que o estoque desses materiais deve garantir que estarão em uma área limpa e seca e possuindo identificações de acordo com o pavimento que será executado conforme for a sequência de concretagem programada para cada material. Além disso, Costa (2021) complementa que há a corrosão que atinge as placas de ancoragens (Figura 21). Essa corrosão ocorre, principalmente, pelo fato de após feita a protensão, não ser realizado o grauteamento dos nichos, ou também quando este é feito de forma inadequada, possuindo uma quantidade de cloretos e sulfatos acima do que a norma estabelece.

Figura 21 - Placa de ancoragem para cordoalha engraxada



Fonte: Cauduro (2002)

Ademais, é imprescindível que os cabos sejam suavemente posicionados na direção das placas de ancoragem (Figura 22), posicionamento esse apresentado em projeto e verificando a colocação dos cabos dentro das placas de ancoragem vertical e horizontalmente. Contudo, se esse equipamento não estiver posicionado corretamente poderá resultar em uma ruptura da cordoalha, ocasionando um estouro do concreto, um sinistro na cravação das cunhas, alongamento baixo, perda excessiva na cravação ou outros problemas na protensão (FREITAS, 2020).

Figura 22 - Conjunto com placa de ancoragem



Fonte: Freitas (2020)

Além disso, é preciso abordar sobre as lajes protendidas que utilizam a tecnologia de protensão sem aderência posterior. As lajes protendidas são muito utilizadas devido às diversas vantagens trazidas por esse elemento, sendo necessário obedecer aos critérios da norma NBR 6118 (ABNT, 2014) para que sejam executadas de forma segura. Dentre esses critérios, Schimid (2009) destaca os seguintes: a classe de agressividade ambiental, os espaçamentos máximo e mínimo entre as cordoalhas, o cobrimento dos cabos em relação à face de abertura das lajes, a sequência de execução, o nível e tipo de protensão. Portanto, algumas medidas são precisas para que a execução da laje seja correta, visto que se trata de um sistema mais complexo e com maiores detalhes que o convencional.

Em primeiro lugar, um dos cuidados iniciais é no recebimento, recomendando-se utilizar correia de náilon, bem como recomenda-se realizar a descarga já no local de armazenamento das cordoalhas, para assim evitar seu transporte excessivo, devendo a área ser um local seco sobre um estrado e mantida coberta (COSTA, 2021). Além disso, o autor informa que, durante a montagem, na ancoragem ativa são utilizados *pocket form*, os quais são unidos à ancoragem e isolados por disco plástico, e que tem a finalidade de impossibilitar a entrada de concreto se houver alguma fenda entre a forma e *pocket form*.

Em segundo lugar, Schimid (2009) informa que antes da distribuição dos cabos, é necessária a correta colocação das barquetas (Figura 23), que servem para receber os dispositivos que garantem a elevação dos cabos, bem como garantir o cobrimento das armaduras passivas das lajes. Ademais, o autor complementa que junto das barquetas é preciso utilizar os agarra-cabos, que tem a finalidade de fixar as elevações referentes ao traçado do cabo previsto em projeto, e que confina e sustenta o feixe de cabos sobre as barquetas. Outrossim, o autor recomenda realizar a distribuição dos cabos da ancoragem passiva para a ativa, garantindo o afastamento necessário do cabo até a fôrma lateral, sem que este precise ser afastado novamente.

Figura 23 - Cadeirinha segurando os cabos



Fonte: Costa (2021)

Em terceiro lugar, na etapa da protensão dos cabos, é preciso atenção na hora de retirar os *Pocket Forms*, para que não quebrem. Assim, após sua retirada, é necessário adotar as seguintes medidas: a cavidade deve ser limpa e verificada quanto à presença de natas de cimento, que necessitam ser retiradas; é preciso inspecionar a integridade do concreto nos nichos e em toda sua superfície, e, caso alguma anormalidade seja encontrada, deve-se avisar aos responsáveis antes da protensão; e as cunhas, mostrada na Figura 24, necessitam ser espaçadas igualmente e inseridas uniformemente dentro da placa de ancoragem (COSTA, 2021).

Figura 24 - Aplicação de cunhas na ancoragem ativa



Fonte: Costa (2021)

Em quarto lugar, Cauduro (2002) informa que depois que as pontas de cordoalhas do lado ativo foram cortadas (Figura 25), é fundamental que a parte externa da placa de ancoragem seja coberta com um material preventivo contra corrosão. Em adição, o autor destaca que os nichos de protensão precisam ser preenchidos com aplicação de graute que não sofra retração e não contenha metálicos, não podendo essa mistura conter cloretos, sulfatos ou nitratos.

Figura 25 - Pontas das Cordoalhas cortadas



Fonte: Cauduro (2002)

Por fim, Schmid (2009) ressalta que opção pela laje protendida deve se basear na viabilidade técnica, viabilidade econômica e conveniências arquitetônicas - funcionais e de execução. Desse modo, o autor explica que se deve considerar também o menor tempo de execução, o melhor reaproveitamento das fôrmas, a própria aparência final da estrutura e algumas vantagens adicionais que a laje protendida pode oferecer, em relação à laje cortada por vigas.

5 ACOMPANHAMENTO DO DESEMPENHO DAS ESTRUTURAS PROTENDIDAS

Muitas das construções em concreto que formam a infraestrutura civil estão se aproximando do final de sua vida útil de projeto. Dessa forma, há uma preocupação crescente sobre o estado de deterioração e segurança das mesmas (SILVA FILHO *et al.*, 2011). Com isso, o autor informa que é de vital importância o desenvolvimento de alternativas que permitam, de forma eficaz, avaliar a qualidade das estruturas de concreto. Nesse contexto, há diversos ensaios que podem ser realizados nas estruturas de concreto, sejam os não destrutivos ou os destrutivos, ambos com a finalidade de descobrir a origem das manifestações patológicas que podem aparecer nas estruturas protendidas. Nesse viés, observou-se que os ensaios comumente realizados nas estruturas de concreto são os seguintes: Pacometria; Esclerometria; Ultrassonografia; Carbonatação; Resistividade Elétrica; Potencial de Corrosão; Tomografia Ionizante; e Termografia Infravermelha.

No ensaio de Pacometria (Figura 26), é possível 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 (ALVES e SANTOS, 2020).

Figura 26 - Ensaio de Pacometria



Fonte: Costa (2021)

No ensaio de Esclerometria (Figura 27), é possível medir a dureza de uma superfície lisa de concreto endurecido. 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 (ALVES e SANTOS, 2020).

Figura 27 - Ensaio de Esclerometria



Fonte: Costa (2021)

No ensaio de Ultrassonografia (Figura 28), é possível determinar a velocidade de uma onda longitudinal de compressão através do tempo para percorrer uma determinada distância. Assim, será 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 presença de vazios e a homogeneidade do concreto, e determinar os módulos de elasticidade (ALVES e SANTOS, 2020).

Figura 28 - Ensaio de Ultrassonografia



Fonte: Costa (2021)

No ensaio de carbonatação (Figura 29), é possível verificar a espessura de carbonatação, utilizando uma solução líquida em fenolftaleína, que é um indicador de pH e consiste em uma mistura de álcool etílico com fenolftaleína em pó e água ou álcool. Assim,

a solução quando borrifada no concreto torna-se incolor quando o pH é inferior a 8,3, o que indica que o concreto está carbonatado, e rosa para valores superiores a 8,3, que indicam que ele não está carbonatado, ressalta-se que o pH normal do concreto varia entre 12,5 a 14. Com isso, mede-se ao final do ensaio a profundidade carbonatada com auxílio de uma trena ou régua (COSTA, 2021).

Figura 29 - Ensaio de Carbonatação



Fonte: Gindri *et al.*(2014)

No ensaio de resistividade elétrica (Figura 30), é possível medir a resistência do elemento de concreto sob a ação de uma corrente elétrica e, além disso, fornece informações sobre o processo eletroquímico que influencia diretamente no processo e na velocidade de corrosão das armaduras, sendo importante destacar que o concreto sob condições úmidas irá apresentar menores valores de resistividade do que um concreto seco (ALVES e SANTOS, 2020).

Figura 30 - Ensaio de Resistividade Elétrica

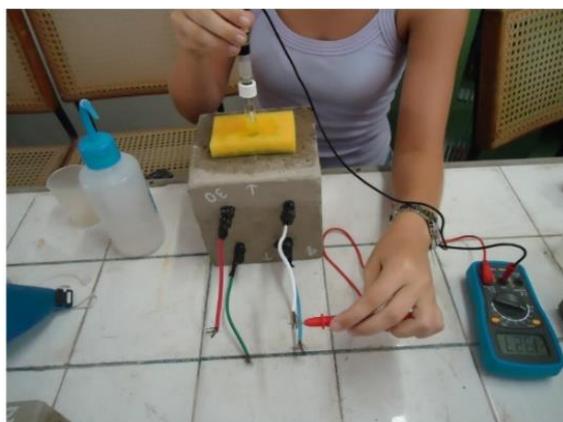


Fonte: Silva (2016)

No ensaio de Potencial de Corrosão (Figura 31), é possível determinar a probabilidade de corrosão da armadura por meio de dados qualitativos e, assim, por meio

desse ensaio avalia-se a facilidade de uma carga elétrica se mover entre a armadura e a solução dentro dos poros do concreto, devido à diferença de potencial. Dessa forma, é possível identificar se as armaduras de uma determinada região estão em processo de corrosão ativo (ALVES e SANTOS, 2020).

Figura 31 - Ensaio de Potencial de Corrosão



Fonte: Silva (2010)

No ensaio de Tomografia Ionizante (Figura 32), é possível extrair informações como a região de vazios do concreto e a corrosão em que se encontram as barras de aço. Além disso, pode-se obter posição, diâmetro e condições das barras de aço, além de indicação de estribos observados, além também da presença de vazios, rachaduras ou qualquer outro elemento de interesse (COSTA, 2021).

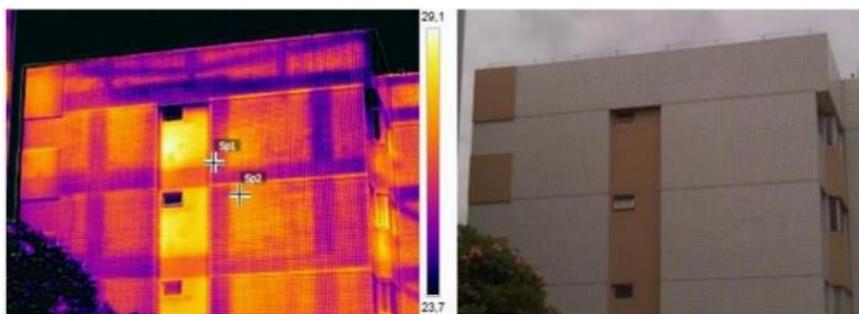
Figura 32 - Ensaio de Tomografia Ionizante



Fonte: Costa (2021)

No ensaio de Termografia Infravermelha (Figura 33), é possível obter as temperaturas das superfícies que são analisadas, sendo realizado com a câmera termográfica, a qual permite verificar infiltrações, vazamentos e até mesmo fissuras, através da diferença de temperatura. No entanto, alguns cuidados são necessários para realizar o ensaio de termografia, pois variáveis como o vento, radiação solar e umidade podem mascarar os resultados, por isso é recomendável que o ensaio seja realizado no início da manhã ou quando o sol está para se por, por causa da variação térmica que ocorre nestes momentos (COSTA, 2021).

Figura 33 - Ensaio de Termografia Infravermelha



Fonte: Santana (2017)

Outrossim, existem ensaios específicos que podem ser realizados nas estruturas de concreto protendido, sendo um deles o RIMT. Conforme Berenguer *et al.* (2016), o RIMT (*Reflectometric Impulse Measurement Technique*) é utilizado para avaliar a integridade em cabos protendidos (Figura 34). Nesse sentido, Costa (2021) detalha que por meio desse ensaio é possível detectar, localizar e qualificar anomalias em cabos de concreto protendido (aderentes e não aderentes) e, com isso, é possível localizar a corrosão, vazios de injeção e a presença de água nos cabos.

Ademais, o autor informa que o ensaio consiste em conectar o equipamento a um cabo ou tirante próximo, e, logo após, um sinal é lançado e refletido ao emissor através de um fio, com a análise do sinal é possível determinar as anomalias presentes nos cabos ou tirantes. Dessa forma, é possível fazer uma análise das anomalias através de uma escala de integridade de 1 a 6, sendo o nível 6 informando que é necessário um reforço estrutural (COSTA, 2021).

Figura 34 - Ensaio RIMT



Fonte: Costa (2021)

6 AÇÕES PREVENTIVAS NAS ESTRUTURAS

De acordo com Souza e Ripper (1998), manutenção de uma estrutura é o conjunto de atividades necessárias à garantia do seu desempenho satisfatório ao longo do tempo, isto é, o conjunto de rotinas que tenham por objetivo o prolongamento da vida útil da obra, a um custo compensador. Nesse contexto, os autores explicam que manutenção preventiva se trata daquela executada a partir das informações fornecidas por inspeções levadas a efeito em intervalos regulares de tempo, de acordo com critérios pré-estabelecidos de redução das probabilidades de ruína ou de degradação da estrutura, visando uma extensão programada de sua vida útil. Outrossim, os mesmos complementam que poderão ocorrer casos em que as inspeções periódicas precisem ser complementadas por outras, adicionais, específicas a determinadas peças estruturais que, numa dada inspeção rotineira, tenham demonstrado estar com desempenho prejudicado e passam a condicionar, daí em diante, o ritmo das inspeções, e até, em alguns casos, das recuperações.

6.1 Ações de manutenção

Nesse sentido, no trabalho de Costa (2021) são apresentadas algumas ações preventivas de manutenção que podem ser realizadas periodicamente em lajes protendidas, por meio de empresas especializadas, a fim de evitar as possíveis manifestações patológicas nesses elementos. Nesse contexto, são apresentados os seguintes ensaios: ensaio de termografia, realizado a cada 3 anos, para verificar se há infiltrações na laje; ensaio de RIMT, realizado a cada 5 anos, para verificar a integridade da armadura ativa quanto à corrosão ou perda de seção; e ensaio de extensometria, realizado a cada 10 anos, para verificar a deformações na laje.

Em complemento, no trabalho de Zhai *et al.* (2021), é apresentado um método para reparar tubos de concreto cilíndrico protendido (PCCP) danificado com fios quebrados, por ligação externa de polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP), sendo apresentada, no trabalho de Goldaran *et al.* (2020), a técnica de emissão acústica (EA) que pode ser empregada para detectar corrosão no PCCP. No trabalho de Zhai *et al.* (2021), os resultados mostraram que em um certo número de fios quebrados, o uso de CFRP para reparo de tubos pode reduzir significativamente as deformações para cada componente do tubo e aumentar a resiliência do PCCP.

Em adição, no trabalho de Obaydullah *et al.* (2021) utilizou-se uma técnica de combinação, que os autores chamaram de CEBPNSM, que foi considerada uma nova técnica

de reforço eficaz para vigas de concreto protendido, visto que foi capaz de melhorar muito o desempenho de flexão da viga de concreto protendido em termos de aumento da capacidade de carga na primeira fissura, serviço, escoamento e último, e redução da deflexão, largura das fissuras, deformações de compressão e de tração.

6.2 Ações preventivas na obra

Freitas (2020) destaca que é primordial um bom detalhamento do projeto antes de sua execução, para evitar dúvidas na leitura e interpretação, além de garantir a compatibilização. Assim, analisando todos os aspectos da estrutura, visto que alterações na estrutura após a execução poderá comprometer seu funcionamento ou gerar um custo não programado para um reparo.

Em complemento, Cauduro (2002) ressalta que é essencial que medidas sejam adotadas durante a execução das estruturas protendidas na obra, com o objetivo de evitar alguns problemas. Nesse contexto, o autor informa que antes do lançamento do concreto, é preciso fazer uma checagem da montagem do sistema de pós-tração verificando diversos itens, dentre eles: as fôrmas para nicho, cordoalha exposta sem a bainha plástica, vazios e estouros, e se não há ruptura da cordoalha.

Primeiramente, Cauduro (2002) informa que a qualidade da montagem pode ser comprometida por pessoas caminhando sobre os cabos antes da concretagem. Nessa linha, Freitas (2020) ressalta que é preciso se atentar ao correto posicionamento das fôrmas antes e durante a concretagem, visto que as fôrmas para nicho devem estar presas e apertadas contra as placas de ancoragem impedindo que a pasta de concreto escorra para dentro da cavidade da placa. Além disso, Costa (2021) complementa que é fundamental um controle em relação ao alongamento das cordoalhas, bem como a marcação das canaletas, para facilitar no posicionamento e altura das cordoalhas.

Nesse sentido, Cauduro (2002) explica que é essencial que uma pequena quantidade de graxa seja aplicada na ponta da fôrma para nicho antes de inseri-la na cavidade da placa de ancoragem. Forma-se, assim, uma camada protetora entre as duas partes que manterá a pasta de concreto fora, mesmo que uma pequena abertura aconteça. Nesse viés, o autor supracitado alerta que caso o concreto se molde à parte da cordoalha sem a bainha plástica, poderá impedi-la de se movimentar, podendo torcê-la quando protendida. Dessa forma, o enrolamento helicoidal da cordoalha fará com que o macaco de protensão gire rapidamente no ciclo final de protensão podendo ferir o profissional que estiver operando o equipamento

ou estourar as mangueiras do macaco. Com isso, esse movimento giratório da cordoalha poderá causar um desgaste prematuro das mandíbulas do macaco. Portanto, é importante consertar a cordoalha exposta antes da concretagem.

Paralelamente, Costa (2021) alerta que a falta de experiência da equipe quanto ao sistema construtivo poderá atrasar o início do sistema, visto que a ausência de algumas peças antes da execução pode comprometer a protensão. Dessa forma, o autor salienta que é necessário que sejam feitos treinamentos e capacitações da mão de obra quanto as particularidades deste método construtivo, para que assim seja possível usufruir dos seus benefícios.

Em adição, Cauduro (2002) destaca que quando as cunhas falham ao segurar a cordoalha, a causa mais comum é uma presença de pasta de concreto na cavidade da placa de ancoragem. Se houver uma separação entre a fôrma para o nicho e a placa de ancoragem, a pasta de concreto poderá fluir para dentro da cavidade da placa de ancoragem e, com isso, instalar-se na forma de um anel ao redor da cordoalha na parte final da placa de ancoragem.

Em complemento, Costa (2021) alerta que é fundamental que nichos sejam reparados antes da operação de protensão, sendo esse conserto de responsabilidade da construtora ou empreiteira de concretagem, utilizando uma mistura de graute de alta resistência (que não retraia) com um ligante de epóxi, em que a resistência do graute deve ser igual ou superior à resistência do concreto especificada.

Ademais, Cauduro (2002) explica que as causas mais comuns de estouros são devidas à existência de bicheiras, falta de reforço (armaduras e ferragens) na zona de ancoragem ou curvas reversas do cabo. Além disso, os estouros podem ser causados por outros fatores, incluindo concreto abaixo da resistência ou uma junta fria na zona de ancoragem. Nesse viés, Costa (2021) ressalta que é primordial garantir a qualidade da ancoragem, a qual precisa ser conforme o projeto, uma vez que se feita de outra forma poderá resultar em um momento fletor não previsto na estrutura.

Por fim, a ruptura da cordoalha pode também ocorrer devido aos seguintes fatores: ao desalinhamento das cunhas quando elas estão mal ajustadas antes da protensão; à protensão em excesso devido a algum erro de leitura da medida de pressão ou por uso de macaco e manômetro que estejam fora de calibração ou que não sejam do mesmo conjunto, bem como a cordoalha pode fraturar ou ser protendida além da carga de escoamento; e/ou devido algum ao dano interno no cabo (CAUDURO, 2002).

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos trabalhos estudados, foi possível fazer uma análise e, com isso, observar, quais manifestações patológicas podem ocorrer nas estruturas de concreto protendido, bem como suas respectivas causas. Ademais, listaram-se os ensaios que podem ser realizados nessas estruturas para contribuir para encontrar o problema nessas estruturas. Por fim, foi possível listar quais ações preventivas podem contribuir para evitar que se desenvolvam manifestações patológicas futuras.

Em primeiro lugar, foram notadas algumas manifestações patológicas que ocorrem nos elementos de concreto protendido com suas possíveis causas. Nesse viés, no Quadro 1 é apresentado uma lista dessas manifestações patológicas observadas e suas respectivas causas.

Quadro 1 - Manifestações patológicas e suas origens nos elementos protendidos

Manifestação patológica	Origem
Cabos de protensão deslocados	Contato com os cabos antes da concretagem
Escorregamento das cordoalhas	Pasta de concreto dentro da cavidade da placa de ancoragem
Cordoalha travada (não deslizante)	Concreto que se moldou a parte da cordoalha sem a bainha plástica
Rompimento do elemento com pouca deformação, aparecimento de trincas e/ou ruptura das cordoalhas	Grande presença de hidrogênio atômico nas cordoalhas
Corrosão nas placas de ancoragem	Grauteamento não realizado nos nichos externos as placas de ancoragem
Presença de pasta de concreto na cavidade da placa de ancoragem	Falha das cunhas ao segurar a cordoalha
Ruptura da cordoalha, cravação das cunhas e/ou alongamento baixo	Cabos não posicionados na direção da placa de ancoragem, desalinhamento das cunhas, protensão em excesso e/ou algum ao dano interno no cabo
Rachaduras no meio do vão de dormentes	Flexão negativa excessiva
Falha por fadiga	Acúmulo de defeitos causados pela carga repetida da interação roda-trilho
Entrada de concreto em alguma fenda na fôrma	Insuficiente ou inexistência de <i>pocket formna</i> ancoragem ativa
Insuficiência de cobrimento de concreto entre a laje e a armadura passiva	Ausência das barquetas para a elevação correta das armaduras passivas
Elevações incorretas dos cabos previstos em projeto	Ausência de agarra-cabos para a elevação dos cabos protendidos

Corrosão na parte externa da placa de ancoragem	Falta de aplicação de graute nos nichos de protensão
Corrosão nos cabos da ponte	Falta de argamassa nos dutos pós-tensionados nas pontes
Estouros no elemento de concreto protendido	Presença de bicheiras, falta de reforço na zona de ancoragem, curvas reversas do cabo, concreto abaixo da resistência e/ou uma junta fria na zona de ancoragem

Fonte: Autor (2022)

Com base no Quadro 1, observou-se que boa parte desses problemas poderiam ser evitados por meio de práticas preventivas alinhada a uma mão de obra especializada para a execução da tecnologia. Desse modo, o desalinhamento de cabos, a ausência ou insuficiência de peças, erros na montagem de sistemas, presença indevida de pasta de concreto, e ausência de grauteamento podem levar a contratemplos futuros.

Em segundo lugar, foram listadas as análises experimentais que podem realizadas nas estruturas de concreto, a fim de que seja realizado um diagnóstico das manifestações patológicas citadas. Nesse sentido, no Quadro 2 é apresentado uma lista desses ensaios que podem ser realizados.

Quadro 2 - Lista de ensaios que podem ser realizados nos elementos protendidos

Ensaio ou procedimento	Objetivo
Ensaio de Pacometria	Determinar o cobrimento do concreto, a localização e o diâmetro das armaduras
Ensaio de Esclerometria	Medir a dureza de uma superfície lisa de concreto endurecido
Ensaio de Ultrassonografia	Estimar a profundidade de fissuras, verificar a presença de vazios e a homogeneidade do concreto, e determinar os módulos de elasticidade
Ensaio de Carbonatação	Medir a espessura de carbonatação no elemento de concreto
Ensaio de Resistividade Elétrica	Determinar a resistência do elemento de concreto sob a ação de uma corrente elétrica
Ensaio de Potencial de Corrosão	Determinar a probabilidade de corrosão da armadura e determinar a região que está em processo de corrosão
Ensaio de Tomografia Ionizante	Obter vazios do concreto, posição e condição das barras de aço e bainhas e cabos metálicos

Ensaio de Termografia Infravermelha	Medir a temperatura da superfície de concreto, a fim de identificar pontos de umidade, infiltração e fissuras
Ensaio RIMT	Avaliar a integridade de cabos protendidos: localiza a corrosão, vazios de injeção e a presença de água nos cabos

Fonte: Autor (2022)

Com base no Quadro 2, observou-se que boa parte desses ensaios podem contribuir diretamente para avaliar a integridade das armaduras na estrutura, além de avaliar outros aspectos do objeto analisado. Dessa forma, notou-se que é possível localizar suas armaduras, determinar o cobrimento de concreto, a resistência à compressão do elemento de concreto, a presença de vazios de injeção, localização pontos em processo de corrosão, bem como avaliar a integridade de cabos protendidos.

Em terceiro lugar, foram listadas quais ações preventivas que devem ser tomadas para que evitem o surgimento das manifestações patológicas nas estruturas protendidas. Nesse sentido, no Quadro 3 é apresentado uma lista de ações preventivas acompanhadas das manifestações patológicas que visam combater.

Quadro 3 - Ações preventivas a realizar nos elementos protendidos

Ação preventiva	Manifestação patológica
Verificar o posicionamento correto das fôrmas e sistema de protensão antes da concretagem	Comprometimento do desempenho do sistema de protensão
Evitar o contato indevido com os cabos antes da concretagem	Cabos de protensão deslocados
Remover a pasta de concreto dentro da cavidade placa de ancoragem	Escorregamento das cordoalhas
Constatar que a bainha plástica está envolvendo todo o comprimento da cordoalha	Impedimento de movimento da cordoalha
Proteger corretamente os cabos protendidos para evitar o hidrogênio atômico nas cordoalhas	Diminuição da ductilidade, aparecimento de trincas e/ou ruptura das cordoalhas
Realizar grauteamento correto nos nichos externos à placa de ancoragem	Corrosão nas placas de ancoragem
Posicionar corretamente as cunhas	Presença de pasta de concreto na cavidade da placa de ancoragem

Verificar o correto posicionamento dos cabos na direção da placa de ancoragem, o alinhamento das cunhas, a força de protensão e se há algum cabo danificado	Ruptura da cordoalha, cravação das cunhas e/ou alongamento baixo
Colocar <i>pocket form</i> suficiente na ancoragem ativa	Entrada de concreto em alguma fenda na fôrma
Verificar a presença suficiente de barquetas para a elevação correta das armaduras passivas	Insuficiência de cobrimento de concreto entre a laje e a armadura passiva
Verificar a presença suficiente de agarra-cabos para a elevação dos cabos protendidos	Elevações incorretas dos cabos previstos em projeto
Aplicar graute nos nichos de protensão	Corrosão na parte externa da placa de ancoragem
Aplicar argamassa nos dutos pós-tensionados	Corrosão nos cabos da ponte
Verificar se o adensamento está sendo feito corretamente, se há curvas acentuadas dos cabos protendidos, e/ou evitar junta fria na zona de ancoragem	Estouros no elemento de concreto protendido

Fonte: Autor (2022)

Com base no Quadro 3, observou-se que as ações preventivas são essenciais para combater as manifestações patológicas, visto que elas são medidas atuam na raiz do problema. Desse modo, uma mão de obra alinhada com os detalhes do projeto e que segue as recomendações normativas conseguirá evitar que as manifestações patológicas apareçam no futuro.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estruturas protendidas estão cada vez mais em uso devido às suas diversas vantagens. No entanto, é preciso entender o funcionamento dessas estruturas para que manifestações patológicas não ocorram. Desse modo, o trabalho mapeou algumas das manifestações patológicas que ocorrem nesses elementos, suas respectivas origens, os ensaios que podem auxiliar na determinação dos problemas encontrados e quais ações preventivas devem ser realizadas para que as estruturas possam funcionar corretamente.

Inicialmente, é preciso notar que o sistema de protensão e as fôrmas devem estar corretamente posicionadas, bem como deve-se evitar o deslocamento dos cabos de protensão. Com isso, o sistema não será comprometido, além dos cabos estarem nos lugares corretos. Ademais, é essencial, em relação as cordoalhas, conferir se há graxa suficiente entre a bainha plástica e a cordoalha, observar se a bainha plástica está envolvendo todo o comprimento da cordoalha, e se as cunhas e os cabos estão posicionados corretamente. Assim, evitam-se o escorregamento das cordoalhas, o impedimento de movimento da cordoalha, ruptura da cordoalha, e/ou a cravação das cunhas.

Em paralelo a isso, é fundamental, em relação as placas de ancoragem, verificar se não há pasta de concreto dentro da cavidade placa de ancoragem, realizar grauteamento correto nas cavidades da placa de ancoragem, bem como colocar pocket form suficiente na ancoragem ativa. Então, será possível evitar a corrosão na parte externa da placa de ancoragem, impedir a entrada de concreto em alguma fenda na fôrma e/ou escorregamento das cordoalhas. Outrossim, é necessário utilizar agarra-cabos suficientes para a elevação dos cabos protendidos e verificar se antes da concretagem há curvas acentuadas dos cabos protendidos ou se existe algum cabo danificado. Desse modo, evitará as elevações incorretas dos cabos protendidos previstos em projeto, e/ou possíveis estouros no elemento de concreto protendido.

Por fim, observou-se que alguns ensaios podem ser utilizados nos elementos protendidos para obter o motivo da manifestação patológica observada. Dentre esses ensaios, destacaram-se os seguintes ensaios: o Ensaio de Pacometria (para obter a localização e o diâmetro das armaduras); o Ensaio de Ultrassonografia (para estimar a profundidade de fissuras e verificar a presença de vazios); o Ensaio de Tomografia Ionizante (para determinar posição e condição das barras de aço); e o Ensaio RIMT (para avaliar a integridade de cabos protendidos, podendo localiza a corrosão, vazios de injeção e a presença de água nos cabos).

A partir deste trabalho, ficam como sugestões para futuros estudos: a aplicação dos ensaios em estruturas protendidas que estejam apresentando manifestações patológicas, para estudo de caso; e um mapeamento das principais técnicas de reparo utilizadas nas estruturas protendidas que apresentam manifestações patológicas.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 7480: Barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado. **ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 7, 2007.
- _____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. **ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 238, 2014.
- _____. NBR 7482: Fios de aço para estruturas de concreto protendido - Especificação. **ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2020a.
- _____. NBR 7483: Cordoalhas de aço para estruturas de concreto protendido - Especificações. **ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2020b.
- _____. NBR 14931: Execução de estruturas de concreto - procedimentos. **ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2004.
- ALMEIDA, L. C. de. **Fundamentos do concreto armado**. Campinas-SP. 2002.
- ALVES, C. R. M. B.; SANTOS, A. F. C. Estruturas pré-moldadas de concreto protendido - comportamento da estrutura e manifestações patológicas. v. 17, p. 61–72, 2020.
- ARAÚJO, A. Cathodic protection for concrete structures. **Ibracon Structures and Materials Journal**, v. 6, n. 2, p. 178–193, 2013.
- ARCELORMITTAL. Fios e Cordoalhas para Concreto Protendido. p. 12, 2021.
- ARRUDA, I. D. C. **Análise de metodologias de manutenção em estruturas de concreto**. BRASÍLIA-DF. Trabalho de Curso apresentado como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia Civil do UniCEUB - Centro Universitário de Brasília, 2018.
- BARBOSA, A. H. **IDENTIFICAÇÃO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS NO CONCRETO ARMADO E PROTENDIDO DA PONTE PRESIDENTE DUTRA**. XVI CONGRESSO LATINOAMERICANO DE PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN, 2021.
- BASTOS, P. S. S. **Concreto protendido**. Notas de aula, Curso de Graduação em Engenharia Civil – UNESP, 2018.
- _____. **Fundamentos de concreto armado**. Notas de aula, Curso de Graduação em Engenharia Civil – UNESP, 2019.
- _____. **Fundamentos do concreto protendido**. Notas de aula, Curso de Graduação em Engenharia Civil – UNESP, 2021.
- BERENGUER, R. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, E. R. de; SILVA, M. W. P. da; SOUZA, G. B. de; HELENE, P.; MONTEIRO, E. C. B. Guy Structure with Galvanic Corrosion: Case Study. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 10, n. 7, p. 792–797, 2016.

BRUCE, S.; MCCARTEN, P.; FREITAG, S.; HASSON, L. **Deterioration of Prestressed Concrete Bridge Beams**. 72 p, 2008.

CAIXETA, B. E. P.; MORAIS, R. W. **Lajes lisas em concreto protendido**. Anápolis: Centro Universitário de Anápolis, 2018.

CARVALHO, G. V. C.; PIMENTEL, L. L. Revisão de literatura sobre métodos de cálculo da aderência entre concreto e aço. **XVIII Encontro de Iniciação Científica**, 2013.

CARVALHO, R. C.; FILHO, J. R. D. F. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado segundo a NBR 6118:2014**, 2016.

CAUDURO, E. L. **Manual para a Boa Execução de Estruturas Protendidas Usando Cordoalhas de Aço Engraxadas e Plastificadas**. 111 p, 2002.

CLARK, A.; KAEWUNRUEN, S.; JANELIUKSTIS, R.; PAPAELIAS, M. Damage Detection in Railway Prestressed Concrete Sleepers using Acoustic Emission. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 251, n. 1, 2017.

COSTA, H. D. O. **MANUAL DE USO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE LAJES PLANAS PROTENDIDAS**. Aracaju-SE. Monografia (Graduação - Bacharelado em Engenharia Civil.) - Instituto Federal de Sergipe, 2021.

EMERICK, A. A. **Projeto e Execução de Lajes Protendidas**. Brasília. 2002.

ERCOLANI, G. D; ORTEGA, N. F; FELIX, D. H. Metodologias para a localização de danos em vigas de concreto protendido. v. 3, p. 262–273, 2017.

FREITAS, A. B. C. **ANÁLISE DE SINISTROS EM CORDOALHAS DE PROTENSÃO NÃO ADERENTE EM LAJE MACIÇA DE CONCRETO ARMADO: ESTUDO DE CASO EM EDIFÍCIO RESIDENCIAL LOCALIZADO NA CIDADE DE FORTALEZA**. Fortaleza-CE. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao curso de Engenharia Civil, 2020.

GINDRI, B.; NEIVOCK, M.; FLEMING, R. DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS AGREGADOS RECICLADOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NO CONCRETO SUBMETIDO AO ENSAIO DE CARBONATAÇÃO ACELERADA. **21º CBECIMAT - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 09**, 2014.

GOLDARAN, R.; TURER, A.; KOUHDARAGH, M.; OZLUTAS, K. Identification of corrosion in a prestressed concrete pipe utilizing acoustic emission technique. **Construction and Building Materials**, v. 242, p. 118053, 2020.

HANAI, J. B. de. **Fundamentos do Concreto Protendido**. São Carlos - SP. Universidade de São Paulo: Escola de Engenharia de São Carlos - Departamento de Estruturas, 2005.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de Cimento Portland**. 905–944 p, 2010.

LINCK, R. B. **Lajes lisas protendidas por cordoalhas engraxadas: avaliação do**

processo executivo em comparação ao do concreto armado convencional em edificações residenciaisPorto Alegre. 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. 2016

OBAYDULLAH, M.; JUMAAT, M. Z.; ALENGARAM, U. J.; KABIR, M. H.; RASHID, M. H. Combining ebr cfrp sheet with prestressed nsm steel strands to enhance the structural behavior of prestressed concrete beams. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 27, n. 8, p. 637–650, 2021.

PFEIL, W. **Concreto armado**. Rio de Janeiro-RJ: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1988.

ROSA, P. E. DA. **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS CONSTRUTIVOS DO CONCRETO ARMADO E DO CONCRETO PROTENDIDO: ANÁLISE DE UMA EDIFICAÇÃO MULTIFAMILIAR**Tubarão. 2021.

SANTANA, T. M. D. O. **INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA DE PATOLOGIAS EM ESTRUTURAS : ESTUDO DE CASO DE PONTES DE CONCRETO ARMADO**. p. 1–71, 2017.

SATHLER, J. E. V.; SANTOS, L. M. dos; BARBOSA, F. A.; CABRAL, S. C. **COMPARATIVO DO CONCRETO CONVENCIONAL COM O CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL**. n. Ccv, p. 1–38, 2017.

SCHMID, M. R. L. Por que protender uma estrutura de concreto ? **Revista Concreto & Construções**, p. 33–36, 2007.

SCHMID, M. T. **Lajes planas protendidas**: Publicação técnica n. 1. [s.l: s.n.].

SILVA, C. M. M. A. e; PINTO, E. N. M. G.; PEREIRA, M. M. L.; SILVA, I. P. D.; CABRAL, K. C. Influência da granulometria do agregado miúdo nas propriedades do concreto. **22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais 06 a 10 de Novembro de 2016, Natal, RN, Brasil**, p. 1790–1798, 2016.

SILVA, E. P. DA. **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO DE CONCRETOS ESTRUTURAIS PRODUZIDOS SEGUNDO AS PRESCRIÇÕES DA NBR 6118, SUBMETIDO A ENSAIO DE CORROSÃO ACELERADO**Fortaleza-CE. 2010.

SILVA, L. M. A. e. **RESISTIVIDADE ELÉTRICA SUPERFICIAL DO CONCRETO: INFLUÊNCIA DA CURA**Goiânia-GO. . Monografia de Projeto Final de Curso, apresentada à Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, 2016.

SILVA FILHO, L.C. P.; LORENZI, A.; CAMPAGNOLO, J.L.; STRIEDER, A.J.; QUININO, U.C.DE M.; CAETANO, L.F. **ESTUDOS DE CASO SOBRE AVALIAÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ATRAVÉS DA**

UTILIZAÇÃO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS. Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, 2011.

SOUZA, M. I.; MURTA, M. M. **Patologias, Recuperação e Reforço estrutural em concreto armado.** 2012.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação E Reforço De Estruturas De Concreto.** [s.l: s.n.]257 p.

TAHERINEZHAD, J.; SOFI, M.; MENDIS, P. A.; NGO, T. A review of behaviour of Prestressed concrete sleepers. **Electronic Journal of Structural Engineering**, v. 13, n. 1, p. 1–16, 2013.

TÄLJSTEN, B.; PAULSSON, B.; ELFGREN, L. **Prestressed Concrete Bridges Condition Assessment and Future Challenges** Structural Engineering - Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, 2019.

TÄLJSTEN, B.; PAULSSON, B.; POPESCU, C.; BAGGE, N.; NILFOROUSH, R.; EMBORG, M.; BLANKSVÄRD, T.; SAS, G.; ELFGREN, L. Assessment of prestressed concrete bridges-challenges. **IABSE Symposium, Wroclaw 2020: Synergy of Culture and Civil Engineering - History and Challenges, Report**, n. 1951, p. 487–494, 2020.

VASCONCELOS, K. S. **Análise comparativa entre lajes nervuradas em concreto armado e concreto protendido.** Rio de Janeiro. 2010.

VITÓRIO, J. A. P. Fundamentos da patologia das estruturas nas perícias de engenharia. **Instituto Pernambucano de Avaliações e Perícias de Engenharia**, p. 58, 2003.

YOU, R.; LI, D.; NGAMKHANDONG, C.; JANELIUKSTIS, R.; KAEWUNRUEN, S. Fatigue life assessment method for prestressed concrete sleepers. **Frontiers in Built Environment**, v. 3, n. November, p. 1–13, 2017.

ZHAI, K.; FANG, H.; GUO, C.; FU, B.; NI, P.; MA, H.; HE, H.; WANG, F. Mechanical properties of CFRP-strengthened prestressed concrete cylinder pipe based on multi-field coupling. **Thin-Walled Structures**, v. 162, n. March, p. 107629, 2021.