

UNIVERSIDADE CESUMAR - UNICESUMAR
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS TECNOLÓGICAS E AGRÁRIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**REFORÇO ESTRUTURAL COM UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DA PROTENSÃO
EXTERNA**

GREGORIO FERREIRA SILVA

MARINGÁ – PR
2022

Gregorio Ferreira Silva

**REFORÇO ESTRUTURAL COM UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DA PROTENSÃO
EXTERNA**

Artigo apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Cesumar – UNICESUMAR como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação do Prof. Dr. Fernando Pereira Calderaro.

MARINGÁ – PR

2022

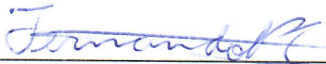
FOLHA DE APROVAÇÃO
GREGORIO FERREIRA SILVA

**REFORÇO ESTRUTURAL COM UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DA PROTENSÃO
EXTERNA**

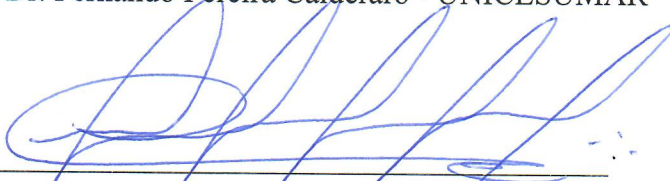
Artigo apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Cesumar – UNICESUMAR como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação do Prof. Dr. Fernando Pereira Calderaro.

Aprovado em: 17 de 11 de 2022.

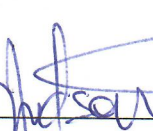
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Fernando Pereira Calderaro - UNICESUMAR



Prof. Me. Claudio de Souza Rodrigues - UNICESUMAR



Prof. Me. Judson Ricardo Ribeiro da Silva - UNICESUMAR

REFORÇO ESTRUTURAL COM UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DA PROTENSÃO EXTERNA

Gregorio Ferreira Silva

RESUMO

O concreto armado tem sido o método de construção mais utilizado pela humanidade durante as últimas décadas, substituindo materiais e possibilitando a criação de edificações antes jamais vistas. Porém o alto uso desse método converge com aparecimento de diversas patologias que surgem, devido ao uso equivocado da estrutura ou aumento de cargas, deixando-a subdimensionada, como também a falta de conhecimento aprofundado, tanto de profissionais na área como de usuários, com a não execução de manutenções preventivas habituais. Este trabalho apresenta algumas formas de reforços para combater as patologias recorrentes nas estruturas, dando ênfase na protensão externa, técnica que diminui as tensões atuantes, sendo bem eficiente e prática, mas que exige mão de obra especializada. Além disso, apresentando os principais equipamentos utilizados nessa técnica e o uso dela em campo, tendo o estudo de caso de dois casos distintos, o primeiro sendo um prédio, aderindo essa técnica, localizado em Portugal, no ano de 2005, e o segundo caso sobre reservatório de água, localizado na cidade de Santa Maria (RS), demonstrando formas de uso e objetivos diferentes para a mesma técnica.

Palavras-chave: Patologia. Protensão externa. Reforma estrutural.

STRUCTURAL REINFORCEMENT USING THE EXTERNAL PRESTRESSING METHOD

ABSTRACT

Reinforced concrete has been the most used construction method by mankind for the last few decades, making materials and preserving the creation of buildings never seen before. However, the high use of this method converges with the emergence of several pathologies that arise, due to the wrong use of the structure or increase in loads, leaving it undersized, as well as the lack of in-depth knowledge of professionals in the field and also of users, with the failure to perform usual preventive maintenance. This paper presents some ways of reinforcements to treat the recurrent pathologies in the structures, emphasizing external prestressing, a technique that reduces the acting stresses, being very efficient and practical, but which requires specialized labor. In addition, presenting the main equipment used in this technique and its use in the field, having the case study of two different cases, the first being a building, adhering to this technique, located in Portugal, in 2005, and the second case on water reservoir, located in the city of Santa Maria (RS), demonstrating ways of use and different goals for this technique.

Keywords: Pathology. External prestressing. Structural change.

1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos e avanços da tecnologia, novas formas de construção foram criadas e colocadas em prática, atendendo a alta demanda e objetivos da sociedade em geral, prezando a eficiência, qualidade e segurança dos mesmos.

De acordo com Bastos (2006), o concreto armado, como conhecemos, foi concebido em 1849 por Joseph-Louis Lambot, que idealizou o primeiro objeto registrado a se utilizar desse material, um barco. Porém somente em 1850, por Thaddeus Hyatt, que se descobriu a função da armadura no concreto armado, por meio de ensaios e experimentos.

Ainda de acordo com Bastos (2006), demorando alguns anos a ser introduzido no Brasil, somente em 1901, na execução de galerias de água e em seguida de casas e sobrados, posteriormente em até estruturas especiais, como pontes ou obras maiores de grande porte. Um exemplo é um dos edifícios mais antigos do Brasil e um dos primeiros da cidade de São Paulo, sendo construído em 1907, contendo três pavimentos, sendo construído com concreto.

Segundo Andrade (2016), desde 1924, os cálculos estruturais, que antes eram feitos fora do Brasil, passaram majoritariamente a ser feito em território nacional. Em consequência desse desenvolvimento, vieram as patologias desse método de construção, exigindo o desenvolvimento de técnicas de reabilitação estrutural. Vendo que, segundo Reis (1998), reabilitação seria a “recuperação”, que seria uma solução de problemas patológicos, e o “reforço estrutural”, aumentando a resistência ou capacidade portante da estrutura.

Existindo, portanto, várias técnicas de reforço estrutural, cada qual possuindo vantagens e desvantagens, sendo analisadas e aplicadas referente a cada tipo de exigência que a estrutura com anomalia requer e relacionando sempre o melhor custo-benefício.

O objetivo deste trabalho visa descrever brevemente os diferentes métodos de reforços estrutural, demonstrando suas vantagens e desvantagens, enfatizando o método da protensão externa, tema principal deste artigo. Definindo conceitos, características e aplicações da protensão externa, a partir de dois estudos de caso, que se utilizaram dessa técnica, sendo um a reabilitação de um elemento multifamiliar, que após o deslizamento de terra sofreu grandes danos em sua estrutura, e o outro o reforço de um reservatório, que estava subdimensionado para as cargas a que estava exposto, sofrendo assim patologias durante toda sua existência e uso.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

O presente artigo tem como finalidade o conhecimento científico, por meio de pesquisa qualitativa sobre protensão externa e por meio de revisão bibliográfica, de forma descritiva, com o uso de artigos, normas ABNT e trabalhos acadêmicos.

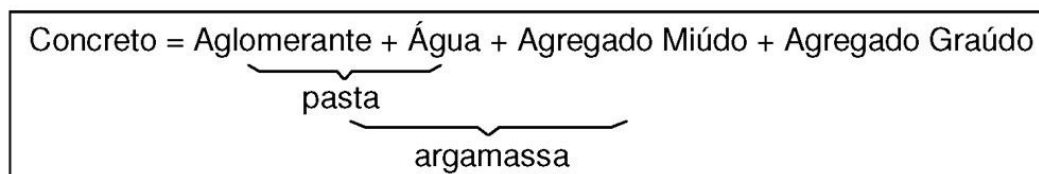
Tendo como foco o estudo de caso em duas situações, um edifício multifamiliar, que sofreu graves danos em sua estrutura, e um reservatório de água que estava subdimensionado para as cargas de empuxo aplicadas a ele, vindo assim a se utilizar o mesmo método de reforço estrutural.

2.2 Concreto armado: breve histórico

De acordo com Teatini (2016), aplica-se o uso de certos materiais há milhares de anos, caso da pedra e madeira, outros utiliza-se há menos tempo, como as ligas metálicas em geral, sendo a mais utilizada o ferro fundido. Porém a aplicação estrutural desses materiais vem de três qualidades, que os mesmos apresentam: resistência, durabilidade e disponibilidade.

Os materiais aglomerantes obtiveram grande avanço ao decorrer do tempo, materiais esses que, com o contato com água, cristalizam-se, criando rochas artificiais. Esses materiais, junto a materiais inertes, chamados de agregados graúdos e miúdos, aumentariam as propriedades físico-químicas das peças, conforme figura 1.

Figura 1 – Diferentes composições de aglomerante com agregados



Fonte: Teatini (2016).

Segundo Bastos (2006), materiais aglomerantes já eram utilizados desde de 200 anos antes de Cristo, na ilha de Creta, como também os romanos, no terceiro século A.C, utilizavam areia fina vulcânica misturada com argamassa de cal, que resultava numa argamassa resistente. Os mesmos utilizavam também de pozolona de origem vulcânica, junto a areia e pedra e água,

criando concretos que duram até os dias de hoje. Isso se perdurou até 1824, quando Joseph Aspdin, após vários experimentos, criou e patenteou o cimento Portland, o qual se produziu industrialmente após 1850. Porém o concreto armado surgiu na França, em 1849, por meio de Joseph-Louis Lambot, criando um barco, primeiro objeto registrado com o uso do novo aglomerante, sendo apresentado somente em 1855.

Em 1850, os estudos e ensaios de Thaddeus Hyatt descobriram a verdadeira função das armaduras junto ao concreto, porém ganharam reconhecimento somente em 1877.

O desenvolvimento do concreto armado no Brasil iniciou em 1901, no Rio de Janeiro, com a construção de galerias de água, e em 1904 com a construção de casas e sobrados. Em 1908, foi construída uma primeira ponte, com 9 metros de vão. Em São Paulo, em 1910, foi construída uma ponte com 28 metros de comprimento. O primeiro edifício em São Paulo data de 1907, sendo um dos mais antigos do Brasil em “cimento armado”, com três pavimentos. A partir de 1924, quase todos os cálculos estruturais passaram a ser feitos no Brasil, com destaque para o engenheiro estrutural Emílio Baumgart. No século passado, o Brasil colecionou diversos recordes, destacando-se: marquise da tribuna do Jockey Clube do Rio de Janeiro, com balanço de 22,4 m (1926); ponte Presidente Sodré em Cabo Frio, com arco de 67 m de vão (1926); edifício Martinelli em São Paulo, com 106,5 m de altura e 30 pavimentos (1925); elevador Lacerda em Salvador, com altura de 73 m (1930); ponte Emílio Baumgart em Santa Catarina, com vão de 68 m (1930); edifício “A Noite”, no Rio de Janeiro, com 22 pavimentos (1928); Museu de Arte de São Paulo, com laje de 30 x 70 m (1969) (BASTOS, 2006).

A associação concreto-aço visa, portanto, superar a deficiência de estruturas de concreto nas regiões em que prevalece a tração, podendo também melhorar a capacidade resistente das peças à compressão. Ao mesmo tempo, o concreto de boa qualidade e com espessura adequada da camada de cobrimento que envolve as armaduras é um meio alcalino, que protege o aço da corrosão e de outras agressões ambientais, garantindo a durabilidade da estrutura.

O uso do concreto armado pode ser considerado recente, as primeiras peças surgiram há pouco mais de 150 anos, mas seu emprego efetivo em construções, com embasamento técnico e modelos de cálculo racionais, ocorre há menos de cem anos. Desde então, tem sido, pelas suas vantagens, empregado em larga escala na indústria da construção (TEATINI, 2016).

2.3 Elementos estruturais de concreto armado

Denomina-se estrutura o conjunto das partes consideradas resistentes de uma edificação. Para que uma estrutura tenha sua capacidade resistente assegurada, é necessário conhecer o comportamento de suas peças ou elementos estruturais (TEATINI, 2016).

De acordo com a ABNT, NBR 6118/2014, Projeto de estruturas de concreto: Procedimento, os elementos estruturais são classificados conforme sua forma e função.

Segundo Teatini (2016), elementos lineares são aqueles cujo comprimento longitudinal supera em pelo menos três vezes sua maior dimensão de seção transversal, que são eles:

- Vigas: elementos lineares em que a flexão é preponderante.
- Pilares: elementos lineares de eixo reto, usualmente dispostos na vertical, em que as forças normais de compressão são preponderantes.
- Tirantes: elementos lineares de eixo reto, em que as forças normais de tração são preponderantes.
- Arcos: elementos lineares curvos, em que as forças normais de compressão são preponderantes, agindo ou não simultaneamente, com esforços solicitantes de flexão, cujas ações estão contidas em seu plano.

2.4 Patologias: conceitos e generalidades

Define-se como patologia das estruturas a área responsável pelo estudo das origens, formas de manifestação e consequências, bem como os mecanismos responsáveis pela ocorrência dos defeitos em construções civis (WEIMER, 2018).

De acordo com Helene (1988), para se diagnosticar uma patologia, devem-se considerar diversos problemas que a estrutura vem apresentando, identificando-os da seguinte maneira:

- Sintoma: caracteriza a patologia, sendo classificada mediante inspeções visuais, sendo as mais comuns, fissuras ou trincas, eflorescências, deformações ou flechas excessivas, corrosão do aço das armaduras e até mesmo ninhos de concretagem.
- Causa: podem ser causadas por diversos agentes causadores, como cargas aplicadas nas estruturas, variação de umidade e temperatura, materiais de baixa qualidade ou incompatíveis e agentes biológicos e atmosféricos. Um exemplo seria as fissuras que

tem como agente causador a carga, sendo que, se não houvesse a mesma, não ocorreria a patologia exemplificada.

- Origem: essencial para se saber quando houve o início da patologia, facilitando a conclusão de qual etapa a patologia teve início e o motivo, como um projeto mal executado e material de baixa qualidade, por exemplo.
- Mecanismo: é um processo em que se manifesta a patologia, podendo ser um agente agressivo externo ou interno a estrutura.
- Consequências: a estrutura sujeita a patologias pode ser afetada nas condições de segurança (estado limite último e de serviço). Tendendo que a situação da patologia piore com o passar do tempo, trazendo instabilidades a estrutura, devendo ser aparada urgente o quanto antes.

Um exemplo dos diagnósticos citados, mecanismo, pode ser visto a seguir, conforme a figura 2.

Figura 2 – Processo de corrosão: presença de ar e água (agentes externos) em uma armadura de concreto armado (agentes internos)



Fonte: ASOPE Engenharia (2012).

A durabilidade é a característica relacionada à deterioração dos materiais e elementos estruturais e depende do ambiente em que estes estão inseridos – sendo determinante, portanto, para a vida útil das edificações. A vida útil, por sua vez, é o tempo em que a edificação apresenta níveis de desempenho satisfatórios para o uso que lhe foi determinado, levando em conta a execução adequada dos procedimentos de manutenção necessários (WEIMER, 2022).

Ainda, segundo Weimer (2022), as patologias estão diretamente ligadas à perda de desempenho da estrutura, que ocorrem nas etapas básicas do processo construtivo – concepção, execução e utilização – sendo mais comum durante a etapa de utilização.

2.5 Reforço estrutural

Segundo Almeida (2001), quando uma estrutura não tem mais capacidade de resistir aos esforços a que está sendo submetida ou quando não tem capacidade de suportar forças adicionais, que precisam ser aplicadas, é necessário reabilitá-la. Nesse caso, a reabilitação deve ser projetada de forma que o acréscimo de tensões gerado seja resistido pelo sistema estrutural existente mais reforço.

De acordo com Reis (1998), reforço seria uma “intervenção”, com o objetivo de aumentar a capacidade da estrutura de receber novas solicitações de uso.

De maneira geral, podemos utilizar a palavra “reabilitação”, que pode significar recuperação, bem com reforço de uma estrutura de concreto (ALMEIDA, 2001).

2.6 Métodos de reforços de estruturas de concreto

Segundo Almeida (2021), para todas técnicas existentes para reforço estrutural de estruturas de concreto existem vantagens e desvantagens, devendo ser colocado em comparação o custo benefício e o prazo de execução, atendendo as expectativas e necessidades da obra e projeto. Porém é primordial levar em conta qual tipo de técnica e sua forma de execução, e se a estrutura em geral irá se adaptar durante e pós conclusão da execução do reforço.

2.6.1 Reforço pelo método do aumento da seção transversal

Para reforço com adição de armadura, é necessário que o elemento a ser reforçado seja aliviado das cargas a que está submetido, para que as armaduras existentes não estejam pré-tensionadas em relação às armaduras adicionadas (ZUCCHI, 2015).

O reforço de peças estruturais com concreto armado ou com concreto projetado é muito utilizado, tendo em vista suas vantagens econômicas e a facilidade de execução. Apresenta como desvantagem a interferência arquitetônica e o tempo necessário para que a estrutura possa ser colocada em serviço. O concreto de alto desempenho no reforço pode ser uma alternativa ao concreto convencional, pois resulta na adoção de espessuras menores,

podendo não ser necessárias alterações de forma significativa nas dimensões originais dos elementos reforçados. O sucesso do reparo depende da boa aderência entre o concreto novo e o velho e da capacidade de transferência de tensões entre os mesmos (REIS, 2001).

Segundo Souza (2008), para que o reforço consiga atender sua função plenamente, é fundamental que o novo concreto seja aderido ao concreto existente. Para uma melhor aderência entre os materiais, pode-se aplicar um adesivo a base de epóxi, na superfície do concreto.

Porém outro autor, Camargos (2013) cita algumas vantagens e desvantagens do método de reforço com aumento da seção transversal da estrutura.

Vantagens:

- Não necessita de mão de obra especializada;
- Facilidade na aquisição dos materiais (fôrma, concreto e armação), próximo às obras;
- Permite a execução com a edificação em uso sem necessidade de demolição da estrutura existente.

Desvantagens:

- Perda de área livre devido ao aumento da seção das peças;
- Aumento considerável do peso da estrutura sendo um problema, principalmente, para estruturas elevadas;
- Consumo excessivo de materiais e mão de obra;
- Grande mobilização de equipamentos como fôrmas, escoramentos e equipamentos de transportes

2.6.2 Reforços com materiais poliméricos reforçados com fibras

Segundo Reis (2001), os FRP (polímeros reforçados com fibras – *fiber reinforced polymer*) são materiais que vem sendo utilizados no reforço de peças de concreto armado, sendo uma solução quanto a corrosão que ocorre em armaduras nessas estruturas. Segundo o autor, os FRP são compósitos formados por dois ou mais materiais, com características mecânicas distintas, sendo separas em fibras e matriz, na qual a primeira, a fibra, exerce a função de ser o reforço mecânico da matriz, sendo como mais usuais os poliésteres (usados para as fibras de vidro) e também vinilester e epóxi (usado para fibras de carbono).

Os materiais compósitos feitos com fibras de carbono (CFRP), vidro (GFRP) ou aramida (AFRP), em resina polimérica, têm sido empregados em construções de estruturas novas e em reforços de estruturas existentes com o objetivo de aumentar as características de

ductilidade, resistência, flexão e cisalhamento. Podem ser aplicados em outros substratos como a madeira e o aço. Apresentam-se na forma de barras de armadura, cabos de protensão, lâminas, mantas ou folhas flexíveis de FRP (REIS, 2001).

2.6.3 Reforço por meio de chapas metálicas

Um dos métodos de reforço em estruturas mais utilizados em emergências são os perfis metálicos, uma vez que a técnica apresenta como característica positiva a não geração de grandes alterações na geometria da peça original. Esses perfis são alocados mediante chumbamento com buchas expansivas e preenchimento com resinas por injeção; assim, é importante que a preparação do substrato seja feita com atenção, para que a aderência da chapa com o concreto do pilar original seja a melhor possível (REIS, 2001).

O reforço com colagem de chapas de aço é um processo de rápida execução, sem vibração e altos níveis de ruído e sem grandes acréscimos de seção, porém a colagem das chapas impede que sejam percebidas fissuras no elemento, que indicariam possível falha de capacidade portante, bem como a visualização de possíveis deteriorações por corrosão, e tanto a chapa metálica, devido a sua pequena espessura, quanto o adesivo epóxi apresentam baixa resistência a elevadas temperaturas, aumentando o risco de ruína em situações de incêndio (REIS, 1998).

As chapas e perfis de aço deverão ser protegidos contra a ação do fogo, por meio de barreiras de proteção ou pinturas que garantam proteção de, no mínimo, 30 minutos (JUVANDES, 2002).

2.6.4 Reforço estrutural pelo método da protensão externa

A técnica de reforço por protensão exterior consiste basicamente na aplicação de uma força que seja capaz de compensar a existência de indesejáveis acréscimos de tensões exteriores, ou que seja capaz de contribuir para um incremento na capacidade resistente de um determinado elemento estrutural. Em termos de concepção, é uma das maneiras mais simples de se proceder, porém o detalhamento dessa ideia não será tão simples assim e requererá especialização de pessoal, equipamento e material, que, por vezes, necessitará de alta sofisticação (SOUZA; RIPPER, 1998).

A aplicação da protensão externa reduz as deformações da estrutura existente e aumenta sua capacidade portante, com algumas vantagens e desvantagens, conforme Camargos (2013):

Vantagens:

- Relativa simplicidade do método construtivo;
- Ausência de problemas com o revestimento dos cabos;
- Possibilidade de inspeção visual e eventual troca dos cabos durante a vida útil da estrutura;
- Possibilidade, na maioria dos casos, da execução de reabilitação com a estrutura em uso;
- Pouca ou nenhuma necessidade de demolições durante a obra;
- As perdas por atrito dos cabos externos são menores que as dos internos.

Desvantagens:

- Necessidade de análise criteriosa pelo projetista, em função de fatores diversos como: possível falta de qualidade do concreto (normalmente antigo), para suportar as tensões necessárias. Se as novas tensões não forem calculadas de forma adequada, poderá ocorrer a ruptura da peça protendida.
- Vulnerabilidade a atos de vandalismo, ação do fogo e corrosão eletroquímica, demandando necessidade de proteção do sistema;
- Necessidade de mão de obra altamente qualificada para os serviços.

Segundo Camargos (2013), a proteção desse tipo de reforço é feita com isolamentos dos cabos, por meio do encapsulamento dos cabos com argamassa, executando um revestimento com concreto da própria estrutura, sendo esse convencional ou projetado.

2.7 Protensão

2.7.1 Conceito de protensão

O concreto protendido pode ser caracterizado como um concreto no qual é submetido a um estado permanente de tensões internas, resultantes de uma armadura previamente tracionada, que se opõe a tensões provocadas por cargas externas (RODRIGUES, 2008).

Segundo Mariano (2015), a protensão é usada em vários tipos de estruturas com diferentes tipos de usos, atingindo sucesso em reforçar determinada estrutura. Podendo ser utilizada em vigas, lajes, pontes e até pisos de galpões industriais.

2.7.2 Materiais utilizados na protensão

2.7.2.1 AÇO DE PROTENSÃO

As especificações mínimas do tipo e qualidade de aço usado na protensão estão especificadas na NBR 7483/2004, Cordoalhas de aço para concreto protendido: Requerimentos. A norma cita que as cordoalhas são divididas conforme o número de fios, com sete e três fios ou conforme a resistência, sendo categoria CP-190 ou Cp-210, sendo os números 190 e 210 o limite mínimo de resistência a tração por kgf/mm^2 .

A norma ainda cita que os fios não podem haver emendas por soldas de qualquer tipo, tanto durante ou após o processo de fabricação.

2.7.2.2 CORDOALHA

Segundo Ribeiro (2018), as “cordoalhas engraxadas” são cabos de protensão usados na protensão externa. As mesmas consistem em um agrupamento de pelo menos seis fios em torno de um eixo atribuído.

Para prevenção contra corrosão, as cordoalhas são revestidas por uma bainha plástica e preenchida com graxa inibidora de corrosão.

Ainda, segundo Ribeiro (2018), os cabos de protensão tem que ser de baixa relaxação (RB), pois os mesmos recebem um tratamento termomecânico específico, melhorando suas características elásticas e dúcteis como também aumenta sua resistência comparando-se com aço comum utilizado em concreto armado, chegando a ser três vezes maior. Suas principais propriedades são ductilidade, que é característica do material não colapsar repentinamente sendo medida traves de testes, tendo um alongamento máximo de 2%, e a relaxação, característica que o material sofre uma perda plástica irreversível devido a grandes tensões.

2.7.2.3 CUNHA (ANCORAGEM)

As ancoragens têm como principal finalidade a fixação do cabo, impedindo o retorno desse ao comprimento inicial, após a aplicação da força de protensão pelo macaco hidráulico. Dessa forma, o cabo cria um estado de tensão gerando uma força sobre a estrutura fixada. O principal dispositivo utilizado, tanto na fixação da protensão em estruturas de concreto quanto em estruturas metálicas, é a cunha aprisionada a uma chapa de ancoragem (RIBEIRO, 2018).

Ainda, segundo Ribeiro (2018), as cunhas são classificadas em bipartidas ou tripartidas, sendo acionadas com a liberação do cabo, causando uma compressão da cunha contra a placa de ancoragem.

Outra alternativa seria a fixação usando o sistema com rosca e porca, que reduz as perdas de protensão. Esse tipo de fixação exige que o a ponta do cabo ou ele por completo seja rosqueado e que após a tração do cabo, a porca seja apertada contra a chapa.

2.7.2.4 DESVIADORES

Os desviadores são os elementos agregados à estrutura, com o objetivo de desviar a posição do cabo de protensão em determinados pontos. Representam um dos aspectos principais e que influem diretamente no custo da obra. É importante definir se eles vão ser utilizados, em que quantidade e em que posições. Eles podem ser utilizados mesmo quando se opta por cabos retos. Nesse caso, o desviador funciona não tanto como um “desviador” e sim como um “fixador”, mantendo a excentricidade do cabo de protensão quando a viga se deforma. Em relação aos cabos poligonais, é importante ressaltar que a mudança de direção nos desviadores deve ser suave, para que não se tenha uma concentração de tensões exageradas nesses pontos, que venha a acarretar sua ruptura prematura (MARTINS, 2001).

Segundo Martins (2001), existem vários tipos de desviadores utilizados em reforços de vigas e lajes, sendo que para alcançar a excentricidades ao longo do vão, os desviadores podem ser fixados na parte inferior do elemento, podendo ter uma altura que forneça a excentricidade desejada.

A autora também especifica que os desviadores podem ser tanto de concreto como metálico, colocando-se na parte inferior do elemento, no caso de vigas em seção caixão, utilizando septos ou diafragmas no interior das vigas, como também nas laterais das vigas, no caso de vigas de seção I, permitindo o desvio dos cabos. Além disso a autora reforça que os diafragmas ou septos devem ser vazados para a passagem dos cabos de protensão, conforme figuras 3 e 4 a seguir.

Figura 3 – Protensão externa em viga de seção caixão com utilização de diafragma

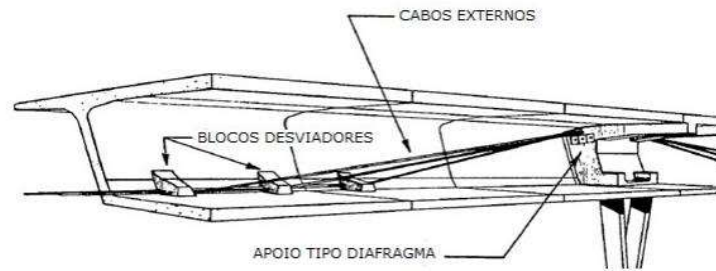


Figura 1-1 – Vista em perspectiva do perfil dos cabos externos e disposição dos desviadores da ponte Long Key (MACGREGOR, 1989, p. 2).

Fonte: Teles (2015).

Figura 4 – Viga com protensão externa em suas laterais, com desvio dos cabos de protensão



Fonte: Vitório e Barros (2011).

2.7.3 Corrosão na protensão

De acordo com Angelis (2012), é um dos problemas que podem afetar as estruturas que se utilizam de protensão, diminuindo a tensão dos cabos.

Segundo Godart (2012), alguns critérios são relevantes para manutenção das protensões, sempre que houver grande corrosão nos cabos, tendo como solução a protensão externa reta ou inclinada, sendo que a inclinada ainda auxilia contra os esforços cisalhantes ocorrentes na estrutura.

A NBR 6118/2014 cita uma classe ambiental de agressividade em que a estrutura está exposta, sendo a mesma relacionada a ações físicas e químicas atuantes na estrutura, independentemente de ações mecânicas, volumétricas de origem térmica entre outras previstas no dimensionamento da estrutura. Dividindo em quatro classes, conforme a figura 5 a seguir.

Figura 5 – Classes de agressividade ambiental da norma 6118:2014

Tabela 6.1 – Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
	I	Fraca	Rural Submersa
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a Industrial ^{a, b}	Grande
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c} Respingos de maré	Elevado

Fonte: NBR 6118/2014.

- I – Fraca tendo um risco de deterioração da estrutura insignificante.
- II – Moderada tendo um risco de deterioração da estrutura pequeno.
- III – Forte tendo um risco de deterioração da estrutura grande.
- IV – Muito forte tendo um risco de deterioração da estrutura elevado.

2.8 Protensão externa no concreto armado

Muito utilizado na década de 1950, esse método é uma excelente alternativa para o reforço de estruturas de concreto armado. A necessidade do aumento da carga de estruturas antigas, aumento na largura do tabuleiro de pontes para adequação a novos gabaritos, reabilitação de silos e tanques fazem com que essa técnica seja cada vez mais utilizada hoje em dia, com grande competitividade em relação aos sistemas convencionais existentes (MARIANO, 2015).

2.9 Diferença entre protensão interior e exterior

Segundo Mayán (2013), a protensão pode ser classificada de acordo com a situação da protensão em relação a seção transversal:

- a) Interna: a protensão (cordoalha) está situada no interior da seção transversal do elemento de concreto.
- b) Externa: a protensão (cordoalha) está situada fora do elemento de concreto.

O sistema de protensão externa baseia-se em cordoalhas, colocadas depois de ter feito a concretagem da peça. Quando essa adquiriu a resistência necessária, entesam-se as cordoalhas externas. Ao contrário do sistema de protensão interior, a trajetória da cordoalha não se marca com as bainhas, mas com as ancoragens e desviadores, tendo as bainhas só a função de proteção contra a corrosão.

Ademais, isso faz com que a trajetória da cordoalha não seja parabólica, senão poligonal e, portanto, se diferencia da protensão interior em que não há compatibilidade em deformações entre aço e concreto. As forças compensatórias do protendido só se exercem sobre as ancoragens e desviadores.

Devido a isso, as tensões e deformações na cordoalha entre ancoragens são constantes, bem como entre desviadores se supõe nulo o deslizamento. Portanto a compatibilidade deve ser aplicada às deslocamentos do concreto e das cordoalhas nas ancoragens e nos desviadores que não permitem a deslocação (MAYÁN, 2013).

Ainda, segundo Mayán (2013), uma diferença significativa entre os dois tipos de protensão é a variação da excentricidade das cordoalhas em relação a carga, sendo que as cordoalhas externas não seguem as deformações do elemento de concreto. Quando a carga aumenta, assim aumentando também a deformação da peça, a excentricidade crítica, que seria o centro do vão, diminui, implicando na diminuição da carga última que resiste a peça. Tendo como solução para combater esse efeito, os desviadores.

2.10 Geometria dos cabos e tipos de desviadores

Segundo Almeida (2001), a distribuição dos cabos depende da situação e tipo de esforço aplicado no elemento estrutural, podendo ser reto ou poligonais, respaldado em outros elementos, contendo ou não desviadores.

Outro ponto importante é que a protensão pode ser utilizada para aumentar a capacidade portante do elemento protendido, devido à mudança no nível das solicitações.

Sendo necessário um estudo para saber a configuração do cabo a ser usado na protensão, levando em conta alguns fatores, como: limitação do pé direito, tempo de execução e condições para realizar o reforço, equipamentos e mão de obra disponível, e relacionar tudo com o custo-benefício.

Sendo os desviadores um dos aspectos que mais influenciam no custo da obra, devendo ser cotado a ser ou não utilizado e em qual quantidades e posições, caso utilize desse recurso.

Tendo a função de desviar a posição dos cabos de protensão em determinados pontos, levando em conta que esse desvio feito pelos desviadores exige ser suave, para que não haja tensões exageradas, não ocorrendo rupturas prematuras nos cabos.

Os desviadores podem também ser utilizados em cabos retos. Porém, nesses casos, os desviadores mudam de função de desviar a direção dos cabos e passam a ter a função de fixá-los, para manter a excentricidade dos mesmos enquanto a viga se deforma.

Ainda, segundo Almeida (2001), quando tem como objetivo aumentar a excentricidade do cabo de protensão ao longo do vão, os desviadores podem ser fixados no inferior do elemento a ser protendido e ter uma altura que forneça a excentricidade desejada. Porém os desviadores podem também ser fixados nas laterais do elemento estrutural, para não comprometer o pé direito da edificação ou por questão particular do responsável da edificação.

Quando se deseja fazer o desvio (ou fixação) dos cabos na lateral das vigas, são muito utilizados septos metálicos ou de concreto. Nos casos em que o desvio é feito na face inferior, são utilizadas chapas metálicas grossas arredondadas na face em contato com o cabo (ALMEIDA, 2001).

2.11 Traçado do cabo

Segundo Oliveira (2020), graças aos desviadores, há a possibilidade de criar um traçado poligonal. Com essa técnica e mecanismo, permite-se que esse traçado do cabo combata os momentos positivos e negativos, caso existentes na estrutura protendida, podem ser combatidos, conforme figura 6.

Figura 6 – Desviadores com traçado reto e poligonal



Fonte: Vitório (2015).

Em seguida, determina-se o traçado dos cabos de protensão na estrutura, levando em consideração que quanto maior a distância entre os cabos e o CG da seção transversal da peça maior os esforços obtidos pela protensão (PINHEIRO, 2018).

2.12 Níveis de protensão

Segundo a ABNT, NBR 6118/2014, existe três níveis de protensão: completa, limitada e parcial.

De acordo com Oliveira (2020), em meios agressivos em que não se admite fissurações no elemento de concreto, utiliza-se a protensão completa, sendo que a mesma não admite tensões normais de tração devido a flexão.

Já a protensão limitada é geralmente utilizada em pontes e passarelas, permitindo tensões de tração, desde que a estrutura suporte as combinações prementes e frequentes de ações, junto aos estados limites de descompressão e de formação de fissuras.

Por fim, a protensão parcial, que considera condições semelhantes a da protensão limitada, com uma diferença, a protensão parcial permite valores de tração maiores, permitindo fissuras de até 0,2mm.

2.13 Perda de protensão

São as perdas que ocorrem no ato da protensão, podem resultar do encurtamento do concreto, acomodação da armadura junto aos dispositivos de ancoragem, atrito entre as armaduras e o concreto e entre outros. As perdas imediatas são subdivididas em perdas por atrito, nas ancoragens e por encurtamento do concreto (PFEIL, 1988).

O projeto deve prever as perdas da força de protensão em relação ao valor inicial aplicado pelo aparelho tensor, ocorridas antes da transferência da protensão ao concreto (perdas iniciais, na pré-tração), durante essa transferência (perdas imediatas) e ao longo do tempo (perdas progressivas) (NBR 6118:2014).

2.13.1 Perdas por encurtamento imediato do concreto (perdas elásticas)

As perdas elásticas, denominadas por alguns autores de perdas por encurtamento elástico na fase de protensão, são denominadas pela NBR 6118/2014, de perdas por encurtamento imediato do concreto. Nas peças pós-tracionadas, no caso de protensão

simultânea de todos os cabos, essas perdas são inexistentes. Nas peças pós-tracionadas, a protensão sucessiva de cada um dos cabos provoca um afrouxamento dos cabos já protendidos, devido ao encurtamento imediato do concreto (KLEIN, 2002).

2.13.2 Perdas nas ancoragens

Segundo a NBR 6118/2014, as perdas devem ser determinadas experimentalmente ou adotadas os valores indicados pelos fabricantes dos dispositivos de ancoragem.

2.13.3 Perdas progressivas

As perdas progressivas ocorrem ao longo do tempo de vida da estrutura, levam em consideração os fenômenos de fluência, retração do concreto e relaxação do aço (EMERICK, 2005).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo de caso deste artigo tem base em dois casos com usos distintos, demonstrando que essa técnica pode ser usada em diversas situações, ambientes e estruturas diferentes. O primeiro se utilizou da protensão como forma auxiliar e de solução em uma edificação multifamiliar situada em Portugal. O segundo caso relata sobre o uso permanente em um reservatório de estação de tratamento de água situado no Brasil.

3.1 Utilização auxiliar de protensão externa em estrutura multifamiliar com danos estruturais

Estudo de caso refere-se a um artigo científico feito por Tiago e Júlio, sobre um edifício de 16 andares nos anos 2000, localizado na cidade de Coimbra em Portugal, que sofreu danos em sua estrutura, mais precisamente em seus pilares, após deslizamento de terra de um terreno vizinho. Esse fato transformou parte do prédio em um balanço, com um vão de 7 metros e 12 andares acima, porém o dano não foi maior, pois o prédio em questão possuía um estacionamento de 2 andares que acabou sendo soterrado e amorteceu o deslizamento evitando danos maiores, conforme figura 7 a seguir.

Figura 7 – Prédio que sofreu deslizamento, sofrendo danos em sua estrutura



Fonte: Tiago; Júlio, 2010.

O prédio foi evacuado imediatamente após o acidente e um dia após o ocorrido, houve uma inspeção visual para se analisar as condições preliminares do prédio.

No interior, foram observadas algumas fissuras finas distribuídas nas paredes de alvenaria e foram detectadas fissuras maiores, com largura máxima de 2 mm, concentradas nos cantos das aberturas (TIAGO; JÚLIO, 2010).

O baixo nível de danos foi atribuído ao comportamento da articulação da estrutura com paredes externas, não sendo estruturais, assim permitindo um sistema de travamento para resistir as forças atuantes após o acidente. Na parte danificada do edifício, as cargas que eram suportadas e transmitidas pelos pilares destruídos, tornaram equilibradas por tensões de compressão nas paredes exteriores (bielas) e tensões de tração nas lajes (tirantes), resultando compressão na parte superior das lajes e tração na inferior e compressão adicional na fundação.

Além disso, foi feita uma modelagem 2D e posteriormente uma mais completa e precisa 3D, que converteu com os mesmos resultados da primeira, para quantificar o estado de tensões resultantes na estrutura.

De acordo com o modelo 2D, o prédio não corria risco de colapso iminente. Por meio do modelo foi calculado tensões máximas nas aberturas de 4 MPa (em que houve fissuras) e tensões de compressão, variando de 3 a 5 Mpa. No modelo 2D, as paredes externas aguentavam até 13 MPa, mesmo que não fosse nas mesmas direções, portanto adotou-se que as paredes estavam em segurança.

Já as lajes, que foram calculadas com cálculos simples e rápido, devido à circunstância da situação, aproximou-se com tensões de 600 KN, considerando os tirantes combinado com

as vigas de concreto armado, calculou-se que 880 KN, portanto assumindo segurança, estando acima do exigido.

E por último, nas fundações, de acordo com o estudo realizado, houve um aumento de 50%, porém, de acordo com as normas vigentes no país naquela época, tanto o peso próprio como as cargas aplicadas foram multiplicados por 1,5 em combinações de ações e ações variáveis em todos os pavimentos, portanto nem os pilares nem as fundações sofreram cargas superiores para que foram projetadas.

Por meio dessas análises, foi feita uma intervenção no interior do edifício, colocando um sistema de travamento provisório, visando diminuir as tensões das paredes de alvenaria e diminuir as fissuras, além de ser bem simples e eficaz o método. O escoramento foi feito com barras de aço extensíveis, em pontos no interior e barras de madeiras nas aberturas, em todos os pavimentos.

As fissuras foram acompanhadas e registradas durante certo período, tanto nas paredes internas como nas externas. Nas paredes internas, o acompanhamento foi observado que as trincas maiores não aumentaram de tamanho, porém surgiram algumas rachaduras novas, mas bem menores. Então deixou-se de monitorar as fissuras, tanto por motivos de estabilização como por segurança, após o período de 3 dias.

Essa primeira intervenção foi momentânea, para aumentar segurança da estrutura, porém necessitava de um reforço maior, então foi desenvolvido um escoramento em duas etapas. Na primeira parte, foi executado um reforço por meio de protensão externa, equilibrando o prédio e permitindo a retirada de toda terra e entulho causado pelo desmoronamento. Na segunda etapa, foi elaborada um escoramento com cinco escoras metálicas, ficando abaixo do balanço livre de 12 pavimentos.

Para implantação da protensão externa na lateral do prédio, foi construído um dispositivo de desvio de canto, coberto com uma camada de politetrafluoroetileno (PTFE) para garantir que não ocorressem perdas de protensão, durante a aplicação da força de protensão, como também a execução de uma viga metálica na laje superior no topo do prédio, para ancorar os cabos de aços, que, no caso, foram utilizados dois cabos, tendo uma protensão de aproximadamente de 300KN no total, conforme figura 8.

Figura 8 – Protensão externa, viga de ancoramento e dispositivo de desvio



Fonte: Tiago; Júlio, 2010.

Com a protensão ativa, retirou-se o entulho e executou as sapatas das 5 escoras metálicas, utilizadas como escoramento ativo, foram aplicadas nelas uma força de protensão de 150 KN em cada, por meio de macacos hidráulicos e um sistema de contraventamento de formato triangular.

Após a conclusão do escoramento e estancar os danos presente e futuros a estrutura, começou a etapa de reabilitação da parte estrutural e não estrutural.

Um estudo de solo do local em que o prédio estava localizado verificou que o edifício estava localizado num solo arenoso duro, denominado Grés de Silves, comum em algumas regiões da Península Ibérica, tendo pressão admissível de 400 KPa, porém se assumiu um valor de 200 KPa.

Para isso, decidiu executar 3 pilares, porém, ao invés de usar sapatas isoladas para cada um, utilizou-se uma sapata corrida para todos. Essa sapata foi executada com parafusos na parte superior, pronta para receber o pilar metálico.

Também foi executado uma parede de cisalhamento na parede de alvenaria na parte traseira, visando melhor acomodar as cargas que a estrutura estava submetida para nova estrutura de reforma e os sistemas provisórios de escoramento. Em seguida, a estrutura de aço foi instalada na edificação junto à fundação, contendo diagonais de aço soldadas, servindo como contraventamento e, por fim, utilizou-se mais 3 escoras de aço adicionais, com intuito de segurança enquanto efetuava a transferência de cargas, conforme figura 9.

Figura 9 – Processos de escoras e execução de pilares metálicos



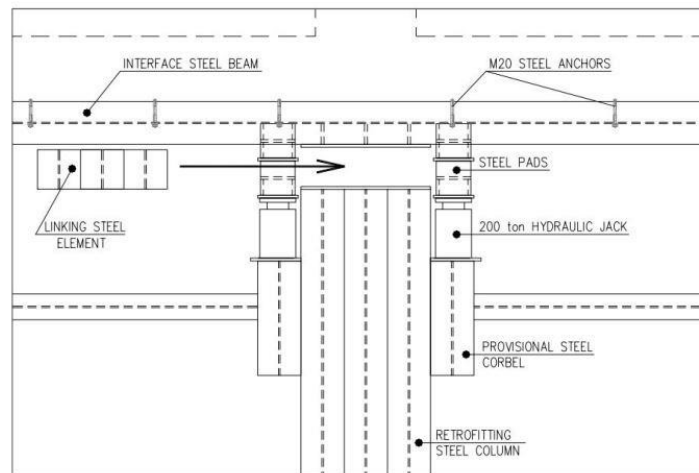
Fonte: Tiago; Júlio, 2010.

Para a transferência de carga, era necessário a instalação da viga de interface, para se conectar aos pilares, mas não era possível devido à protensão externa instalada, portanto foi necessário aumentar um pouco a protensão das 5 escoras, podendo assim, retirar a protensão externa e seus desviadores com segurança para andamento dos serviços de recuperação do prédio.

Consoles de aço foram soldados provisoriamente aos pilares metálicos, em suas laterais, para transferência de cargas, que o sistema de escoras, no momento sem a protensão externa, estavam resistindo, em uma única etapa, porém o empreiteiro tinha a disponibilidade de 2 macacos hidráulicos, fazendo assim a execução ser feita em várias etapas, utilizando almofadas de aço para mover os macacos hidráulicos e finalmente todo o sistema.

Após a etapa de transferências de forças, foi iniciada a retirada das escoras provisórias, dos contraventos e dos consoles. Em hipótese, se houvesse um sismo ou evento excepcional, haveria tensões de tração entre a estrutura original do prédio e a estrutura metálica, portanto reforçou a ligação, utilizando elementos de ligação (placas de aço de ligação), sendo esses projetados especialmente para a situação, foram soldados entre os pilares e a viga de interface.

Figura 10 – Detalhamento da ligação os pilares metálicos com a viga de interface



Fonte: Tiago; Júlio, 2010.

A última laje que foi destruída pelo deslizamento também foi refeita, utilizando laje maciça de concreto, apoiada em vigas metálicas, formando um pórtico de aço, reaproveitando elementos de aço utilizados nos contraventamentos. Finalizando, todos elementos de aço foram revestidos com uma argamassa de alto desempenho, a fim de proteger contra fogo e corrosão e, em seguida, fizeram todo o acabamento estético, tornando novamente a estrutura seguramente habitável, conforme figura 11.

Figura 11 – Finalização do reforço e acabamento



Fonte: Tiago; Júlio, 2010.

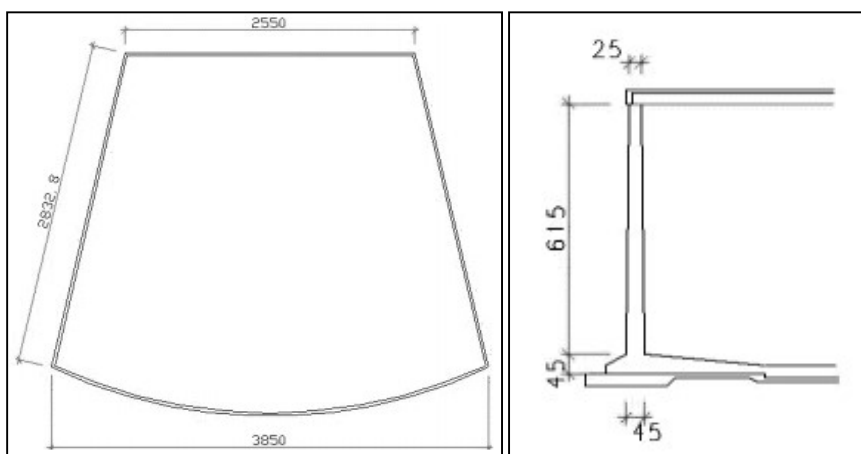
3.2 Recuperação de reservatório com utilização da técnica de protensão externa

O segundo estudo de caso refere-se a um trabalho científico feito por Jorge Martins Sarkis, Paulo Jorge Sarkis e Christian Donin, apresentado no congresso de Pontes e Estruturas da Universidade Federal de Santa Maria no Rio grande do Sul em 2017.

O trabalho relata o caso de um reservatório constituído de concreto armado localizado na cidade de Santa Maria (RS), que foi construído em 1970 e que inicialmente era semienterrado, mas que, após as recuperações necessárias, se tornou apoiado. Tendo uma capacidade de 5,5 mil metros cúbicos, sendo o mesmo, o principal elemento de abastecimento da cidade, contanto com 200 mil habitantes.

O reservatório havia forma original, quase trapezoidal, devido a sua parede sul, sendo um pouco curvada, sua cobertura era formada por laje e por vigas ortogonais apoiadas em pilares internos e nas paredes do reservatório, sendo que todas as paredes e a laje de fundo do reservatório apresentavam uma seção variável, tendo aumento de espessura em suas ligações, conforme a imagem 12 a seguir.

Figura 12 – Planta baixa e corte simplificado da parede e laje do reservatório



Fonte: Sarkis; Sarkis; Donin (2005).

As primeiras patologias ocorridas na estrutura foram na parede curva do reservatório, na parede sul, logo nos primeiros meses de uso. Foram analisadas as condições adotadas para o projeto da mesma e verificou-se que não foi considerado todos os esforços necessários a se considerar, porém, como a parede estava engastada, sendo um engaste hiperestático e que as cargas estavam em equilíbrio, considerou-se desnecessário o reforço dessa parede, corrigindo as fissuras com preenchimento e impermeabilização das mesmas.

Entretanto, 20 anos após o contínuo uso do reservatório, por conta de grande volume de chuvas ocorrida no local do reservatório, deixando o solo saturado, houve o aparecimento

de novas fissuras nos dois terços inferiores da parede leste, havendo perda de água tratada considerável.

Então um estudo interno e geral efetuado no reservatório constatou que houve um deslizamento da laje de fundo, gerando um esforço nas outras paredes, ocasionando as fissuras. Isso ocorria dado que toda a estrutura havia uma deficiência em armadura horizontal, fazendo que a mesma não resiste aos esforços horizontais.

O mesmo estudo também demonstrou que a estrutura se manteve em equilíbrio, devido a ação do solo, sendo que três faces do reservatório e o aterro em volta era considerável e equilibrava a força de empuxo, impedindo o deslizamento das bases das paredes, porém na parede sul o aterro era mínimo, mas com o atrito da base da parede com o solo foi suficiente para aguentar alguns anos, só não se tornando sustentável essa condição devido às grandes chuvas, que alteraram as condições do solo, fazendo a parede sul recalcar assim, produzindo fissuras na parede leste e na laje de fundo.

Por conta de ser o reservatório principal da cidade e evitar a interrupção do mesmo durante muitos dias, optou-se por fazer uma contensão na base da parede curva, tendo uma breve interrupção, ao invés do uso mais indicado, que seria a protensão externa, porém por um período maior. Tirantes foram ancorados no solo, após a execução dos mesmos, foi feito a recuperação das fissuras e o funcionamento do reservatório voltou ao normal, conforme a figura 13 a seguir.

Figura 13 – Ancoragem das paredes do reservatório



Fonte: Sarkis; Sarkis; Donin (2005).

Entretanto, nove anos após a última recuperação, devido às chuvas intensas novamente, a alteração do solo afetou os tirantes ancorados, causando ressurgimento de trincas

na parede leste, porém acompanhadas de fissuras nas paredes oeste e escorregamento novamente da parede sul.

Finalmente optou-se pela protensão externa para solução do problema, porém somente das paredes que haviam acusado patologia, mesmo sabendo-se de que toda a estrutura havia insuficiência de armadura horizontal, isso se dava pelo período de paralização do reservatório, optando pelo menor tempo possível. As possíveis fissuras da parede norte e sul só seriam resolvidas, caso surgissem, caso futuramente, mais precisamente nos anos de 2002, as paredes norte e sul, junto com a laje de fundo, apresentaram fissuras e uma grande perda de água tratada.

A parede sul, figura 14, por ser curvada, teve sua protensão sendo externa, entretanto as paredes norte, leste e oeste tiveram protensão tanto externa como interna, por serem planas. Além da recuperação das fissuras por meio de injeções de argamassas e recuperação da compacidade do solo por meio de furos na laje de fundo, aplicando injeções de argamassas para conter qualquer alteração pelos vazamentos ocorridos.

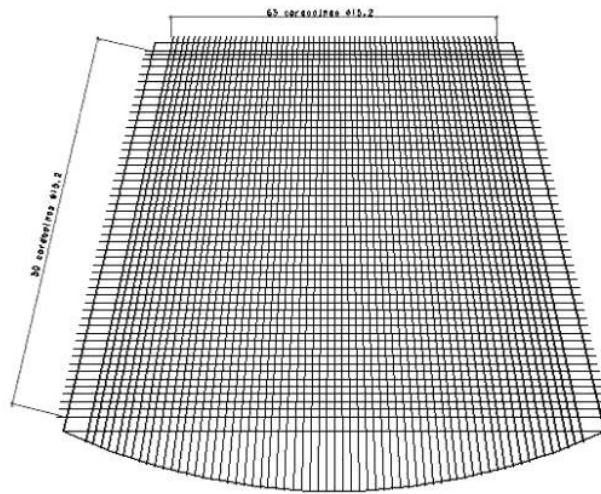
Figura 14 – Parede sul com protensão externa



Fonte: Sarkis; Sarkis; Donin (2005).

Referente a laje de fundo, a estrutura teve um acompanhamento durante anos, com medidas de deformação, acompanhamento de fissuras etc. Em 1999, houve instalação de poços de observação de lençol freático. Por meio desses acompanhamentos, foi possível detectar os vazamentos da água pela laje de fundo do reservatório. Portanto, para evitar recalques da estrutura e a própria perda de água tratada, optou-se pela protensão da laje, sendo essa interna, contudo optou-se pela execução de uma nova laje, figura 15, sendo a mesma protendida nas duas direções, evitando novamente a abertura de canaletas ao redor da estrutura, fazendo os trabalhos serem executados de forma mais rápida, diminuindo a interrupção de água a população.

Figura 15 – Nova laje do reservatório



Fonte: Sarkis; Sarkis; Donin (2005).

4 CONCLUSÃO

Determinar as origens e causas das patologias existentes na estrutura, junto com a melhor escolha de reforço estrutural, de acordo com o custo benefício, é essencial para uma reforma de qualquer estrutura de concreto armado.

Este artigo teve como objetivo demonstrar uma introdução aos reforços estruturais, devido às patologias encontradas nas estruturas, dando ênfase ao reforço de protensão externa, técnica eficaz contra esforços indesejados à estrutura de concreto armado ou estruturas que terão aumento de esforço, devido à alteração de seu uso, demonstrando suas vantagens e desvantagens, conforme tabela 1 a seguir.

Tabela 16 – Vantagens e desvantagens da protensão externa

PROTENSÃO EXTERNA

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Método construtivo simples e eficaz	Mão de obra qualificada
De baixa duração de execução	Precisão de cálculos
Intervir na estrutura com a edificação em uso	Precisão de projeto e execução
Tendo poucas demolições ou nenhuma	Custo elevado
Método pode ser utilizado: estruturas habitacionais como estruturas de concreto submetidas a cargas elevadas	
Provisório quanto permanente	

Fonte: Autor (2022).

A técnica de protensão externa possui método construtivo simples, eficaz e de baixa duração, se comparado a outros tipos de reforços, contando com a possibilidade de intervir na estrutura com a edificação em uso, tendo poucas demolições ou nenhuma, dependendo do caso. Porém exige mão de obra qualificada e precisão de projeto e cálculos para a não ruptura dos cabos, devido às tensões que ela propõe combater, podendo causar colapso na estrutura, caso ocorra. Lembrando que os esforços a que a estrutura estará exposta deverá ser resistido pela estrutura inicial mais o reforço.

De acordo com os estudos de casos apresentados, percebe-se que essa técnica pode ser usada em diversos tipos de estruturas, tanto habitacionais, como também em estruturas de concreto submetidas a cargas elevadas, podendo ser um reforço provisório ou permanente.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, T. G. M. **Reforço de vigas de concreto armado por meio de cabos externos protendidos**. Dissertação (mestrado em engenharia de estruturas) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos: 2001. 201p.

ANDRADE, Bruno Souza Oliveira et al. **Concreto armado**: um estudo sobre o processo histórico, características, durabilidade, proteção e recuperação de suas estruturas. 2016.

ANGELIS, E.; INCELLI, F.; RINALDI, B.; MANCINI, S. **Reinforcement of structural elements by the use of composite materials and external pre-stressing**. Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability, Taylor & Francis Group, Londres, Reino Unido, 2012.

ASOPE Engenharia. **Corrosão em estruturas de concreto armado**: armaduras de aço. Disponível em link: <<https://www.asope.com.br/single-post/2018/03/27/corrosao-em-estruturas-de-concreto-armado>>. Acesso em 9 nov. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7483**: Cordoalhas de aço para concreto protendido: Requerimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do Concreto Armado**: notas de Aula. Bauru (SP): UNESP, 2006.

CAMARGOS, U. A. **Patologia nas obras civis**. (Palestra sobre reforço estrutural). Belo Horizonte: Instituto IDD, 2013.

EMERICK, A. A. **Projeto e Execução de Lajes Protendidas**. 1. ed. Brasília: Interciência, 2005.

GODART, B. F. **Pathology, appraisal, repair and management of old prestressed beam and slab bridges**. Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability, Taylor & Francis Group, Londres, Reino Unido, 2012.

HELENE, P. R. L. **Manual prático para reparo e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1988.

JUVANDES, L. F. P. **Reforço e Reabilitação de Estruturas**: Módulo 2. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2002. 184f. Formação Profissional – Ordem dos Engenheiros. Universidade do Porto, Madeira, Portugal, 2002.

KLEIN, Ralf et al. **Dimensionamento por computador de vigas simplesmente apoiadas de concreto protendido pós-tracionadas**. 2002.

MARIANO, Jose Roberto et al. **Recuperação estrutural com ênfase no método da protensão externa**. 2015.

MAYÁN, C. T. **Patologias, recuperação e reforço com protensão externa em estruturas de pontes**. Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, v. 129, 2013.

OLIVEIRA, Mariana Borges et al. **Reforço estrutural de pontes rodoviárias em concreto armado utilizando protensão externa**. 2020.

PINHEIRO, Luís Henrique B. **Reforço de pontes em concreto armado por protensão externa**. Campinas, 2018.

PFEIL, W. **Concreto protendido**: introdução. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988.

REIS, L. **Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2001.

REIS, A. P. A. **Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho**. Dissertação (mestrado em engenharia de estruturas). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 1998. 239p.

RIBEIRO, Mário César dos Reis et al. **Análise numérica e experimental de vigas metálicas submetidas a protensão externa**. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

RODRIGUES, Glauco. **Concreto Protendido**. Notas de Aula. (Apostila). 2008.

SARKIS, Jorge; SARKIS, Paulo; DONIN, Christian. **Recuperação de reservatório apoiado com protensão externa**. 2005.

SOUZA, Vicente Custodio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

SOUSA, A. F. V. S. **Reparação, Reabilitação e Reforço de Estruturas de Betão Armado**. 2008. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Especialização em Estruturas). Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.

TEATINI, João C. **Estruturas de Concreto Armado**. Barueri-SP: Grupo GEN, 2016. 9788595155213. Disponível em:
<<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595155213/>>. Acesso em: 12 mai. 2022.

TELES, Vinicius Lube. **Análise de vigas de concreto armado reforçadas com protensão externa**. 2015

TIAGO, P.; JÚLIO, E. Case study: Damage of an RC building after a landslide: inspection, analysis and retrofitting. **Engineering Structures**, v. 32, n. 7, p. 1814-1820, 2010.

VITÓRIO, José A. P. **Conservação, segurança estrutural e reforço de pontes rodoviárias de concreto**. 2015.

VITÓRIO, José Afonso Pereira; BARROS, Rui Carneiro de. Reforço e Alargamento de Pontes Rodoviárias com a Utilização de Protensão Externa. *In: Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas*. 2011.

WEIMER, Bianca F.; THOMAS, Maurício; DRESCH, Fernanda. **Patologia das estruturas**. Porto Alegre: Grupo A, 2018. 9788595023970. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595023970/>>. Acesso em: 23 mai. 2022.

ZUCCHI, Fernando Luiz. **Técnicas para o reforço de elementos estruturais**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2015. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/engcivil/images/PDF/2_2015/TCC_FERNANDO%20LUIZ%20ZUCCHI.pdf>. Acesso em 8 de jul. 2022.