



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE - UFS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E SUAS TECNOLOGIAS - CCET
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL - DEC
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

JUSSIANE NUNES DA PAIXÃO SANTIAGO

Reforço Estrutural por Encamisamento em Pilares de Concreto Armado

São Cristóvão

2021

JUSSIANE NUNES DA PAIXÃO SANTIAGO

Reforço Estrutural por Encamisamento em Pilares de Concreto Armado

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Sergipe – UFS, para encerramento do componente curricular e conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Figueiredo dos Santos

São Cristóvão

2021

TERMO DE APROVAÇÃO

Reforço Estrutural por Encamisamento em Pilares de Concreto Armado

por

JUSSIANE NUNES DA PAIXÃO SANTIAGO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 05/08/2021 como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Emerson Figueiredo dos Santos
Orientador

Nilma Fontes de Araújo Andrade
Membro titular

Rejane Martins Fernandes Canha
Membro titular

RESUMO

A concepção dos pilares é uma das fases mais delicadas de um projeto estrutural. O mau posicionamento destes elementos, ou mesmo a má avaliação do dimensionamento, pode levar a diversos problemas, como estruturas que não atendem às condições de serviço ou até mesmo a um aumento no custo total da obra. Por se tratar de um elemento ligado ao colapso de uma estrutura, existem casos de desabamento de edifícios que tiveram como causa algum comprometimento nos pilares. Um problema que pode gerar perda de estabilidade dos pilares é a utilização de concreto com resistência característica inferior àquela especificada em projeto. Obviamente, a redução da resistência infere perda de capacidade de carga, implicando numa possível redução dos coeficientes de segurança. Sendo assim, o presente trabalho realiza o dimensionamento do reforço estrutural em um pilar central de concreto armado que sofreu perda de capacidade de carga por não ter alcançado a resistência característica no momento da execução, determinando as áreas de aço e concreto a serem acrescentadas para que o elemento desempenhe sua função de forma estável e segura. Além disso, reúne os procedimentos a serem seguidos para que a execução do reforço atenda ao dimensionamento.

Palavras-chave: Pilar. Reforço. Dimensionamento. Resistência.

ABSTRACT

The conception of columns is one of the most delicate phases of a structural project. The bad positioning of these elements, or even a bad evaluation of the dimensioning, can lead to several problems, such as structures that do not satisfy the service conditions or even an increase in the total cost of the work. Because it is an element linked to the collapse of a structure, there are cases of building collapse that were caused by a commitment in the columns. A problem that can cause loss of stability of the columns is the use of concrete with a characteristic strength lower than that specified in the project. Obviously, the reduction in strength infers a loss in load capacity, implying a possible reduction in safety coefficients. Thus, the present work makes the dimensioning of the structural reinforcement in a reinforced concrete central column that suffered loss of load capacity for not having reached the characteristic strength at the time of execution, determining the areas of steel and concrete to be added so that the element performs its function in a stable and safe way. Also, it gathers the procedures to be followed so that the execution of the reinforcement attends the dimensioning.

Keywords: Column. Reinforcement. Dimensioning. Resistance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Arte do Edifício Andrea e suas colunas danificadas.....	14
Figura 2: Escombros do Edifício Coroa do Meio.....	15
Figura 3: Posição dos pilares em edifícios	19
Figura 4: Tramo da viga do pilar de extremidade	20
Figura 5: Excentricidade inicial em pilares central, lateral e de canto	22
Figura 6: Excentricidade de forma em pilares	23
Figura 7: Casos de possíveis imperfeições geométricas (falta de retilinidade e desaprumo, respectivamente).....	24
Figura 8: Fissuras, trincas e rachaduras.....	26
Figura 9: Corrosão de armadura em pilar.....	27
Figura 10: Nicho de concretagem em pilar	28
Figura 11: Armadura do reforço por encamisamento.....	30
Figura 12: Reforço de pilar com perfis.....	31
Figura 13: Locação dos pilares	36
Figura 14: Corte da estrutura (A e B, respectivamente).....	37
Figura 15: Armadura do pilar P5	38
Figura 16: Nova armadura do pilar P5	42
Figura 17: Vigas escoradas.....	44
Figura 18: Saturação de pilar com saco de aniagem	45
Figura 19: Posicionamento da armadura do reforço.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados do dimensionamento do P5	38
Tabela 2: Áreas e taxa de armadura na fase de projeto	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 NOÇÕES SOBRE PILARES	18
3.1.1 Classificação dos Pilares Quanto à Posição em Planta	18
3.1.1.1 Pilares centrais ou intermediários	19
3.1.1.2 Pilares laterais ou de extremidade	19
3.1.1.3 Pilares de canto	20
3.1.2 Classificação dos Pilares Quanto à Esbeltez	21
3.1.3 Excentricidades Consideradas para o Dimensionamento de Pilares.....	22
3.1.3.1 Excentricidade inicial	22
3.1.3.2 Excentricidade de forma	23
3.1.3.3 Excentricidade acidental	23
3.1.3.4 Excentricidade de segunda ordem	24
3.2 PATOLOGIAS EM PILARES	25
3.2.1 Fissuras.....	25
3.2.2 Corrosão de Armaduras.....	26
3.2.3 Nichos de Concretagem	27
4 REFORÇO ESTRUTURAL	29
4.1 ENCAMISAMENTO DE CONCRETO ARMADO	29
4.2 REFORÇO COM PERFIS METÁLICOS.....	30
4.3 CONDIÇÕES DE REFORÇO ESTRUTURAL	31
4.3.1 Hipóteses de Cálculo.....	32
5 APLICAÇÃO DE REFORÇO ESTRUTURAL EM PILAR DE RESERVATÓRIO ELEVADO	36
6 PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO DO REFORÇO	43
6.1 CUIDADOS INICIAIS	43
6.2 ADERÊNCIA	44
6.3 PREPARAÇÃO DO CONCRETO	45
6.4 INSERÇÃO DE ARMADURA E APLICAÇÃO DO CONCRETO.....	45
7 CONCLUSÃO.....	48
REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

Pilar é um elemento estrutural geralmente vertical (em algumas situações pode ser inclinado) e recebe ações predominantemente de compressão (Carvalho, 2009). São elementos de grande importância estrutural, pois recebem cargas das vigas ou lajes e as conduzem para as fundações. Os pilares devem suportar as cargas de cada pavimento cumulativamente. Este elemento estrutural também tem grande importância na estabilidade da estrutura.

A concepção dos pilares é uma das fases mais delicadas de um projeto estrutural. O mau posicionamento destes elementos, ou mesmo a má avaliação do dimensionamento, pode levar a diversos problemas, como estruturas que não atendem às condições de serviço ou até mesmo a um aumento no custo total da obra.

O desempenho dos pilares pode ser afetado diante da presença de patologias, tais como a corrosão de armadura e a redução de seção, muito comuns devido à exposição do referido elemento às intempéries. Na mesma proporção, a recuperação estrutural desses elementos requer um procedimento cuidadoso e eficaz, de modo a evitar o agravamento da estabilidade.

Outro problema que pode gerar perda de estabilidade dos pilares é, não raro, a utilização de concreto com resistência característica inferior àquela especificada em projeto. Obviamente, a redução da resistência infere perda de capacidade de carga, implicando numa possível redução dos coeficientes de segurança. Ainda neste sentido, problemas construtivos, como nichos de concretagem, corroboram para a perda da capacidade de carga. Em adição, a mudança do tipo de ocupação da estrutura pode implicar em aumento da carga.

As condições adversas listadas anteriormente podem conduzir a uma redução da capacidade de carga não cobertos pelos coeficientes de segurança, necessitando, pois, de um reforço estrutural no elemento a fim de desempenhar sua função de forma estável e segura.

Reforço estrutural é um recurso utilizado sempre que se prevê ou se diagnostica que um elemento estrutural perde sua capacidade de carga. Existem diversos métodos e formas de reforço, tais como aumento de seção, aumento da área de aço, uso de perfil metálico, fibra de carbono, etc. Convém informar que o reforço estrutural difere da recuperação estrutural, onde este atém-se a reconstituir as condições iniciais do elemento, sem, necessariamente, aumentar a capacidade de carga do elemento.

Sendo assim, é possível resumir que as principais funções dos pilares estão atreladas à sustentação dos demais elementos estruturais (e também os não estruturais) e à contribuição significativa na estabilidade global da estrutura.

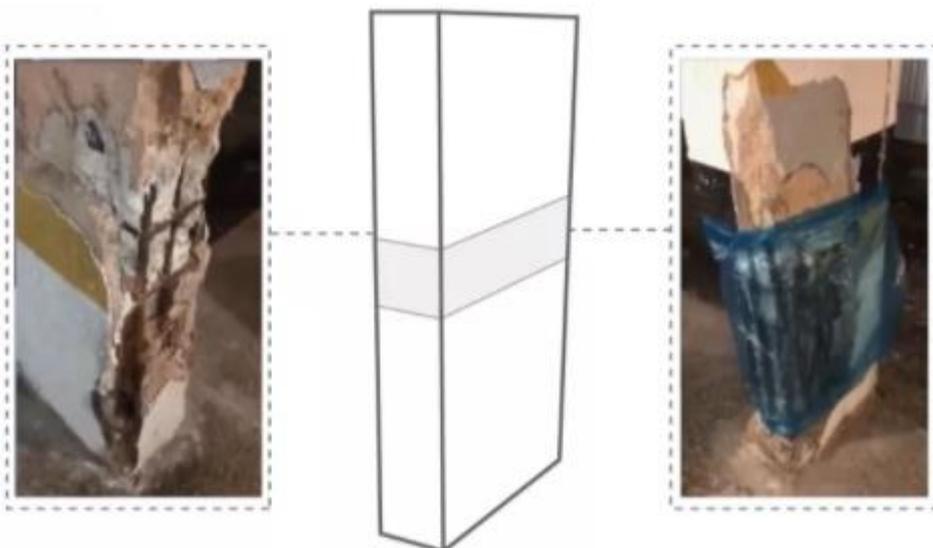
Por se tratar de um elemento ligado ao colapso de uma estrutura, existem, no Brasil e no mundo, casos de desabamento de edifícios que tiveram como causa algum comprometimento nos pilares.

Em 15 de outubro de 2019, o prédio residencial chamado Edifício Andrea, desabou na cidade de Fortaleza-CE. A estrutura contava com 7 andares e foi construído em 1982 (Figura 1). No mesmo dia em que o desabamento ocorreu, operários faziam intervenção nas colunas do residencial. No depoimento que prestou à polícia, o zelador do prédio e sobrevivente da tragédia informou que foi iniciada a reforma nas colunas um dia antes do desabamento (G1 Ceará, 2021).

Figura 1: Arte do Edifício Andrea e suas colunas danificadas



Imagens mostram colunas danificadas:



Fonte: G1 Ceará (2021)

Conforme descrito no laudo técnico, confeccionado por peritos criminais engenheiros, o desabamento ocorreu devido a um somatório de fatores. Não obstante o conjunto de anomalias e falhas na edificação, o fator determinante para o desabamento foi a intervenção inadequada nos pilares da base do edifício, caracterizada pela falta de escoramento de sustentação, além da execução de técnicas equivocadas durante a reforma do prédio, ausência de projeto e não cumprimento de procedimentos mínimos para evitar o colapso, ou até mesmo a evacuação mediante o risco do desabamento (FREITAS, 2021).

Para o engenheiro perito que avaliou o caso, outra falha responsável pelo colapso, principalmente dos pilares, que eram restaurados sem a devida escora, foi a falta de recobrimento com concreto, que agiria na compressão.

Outro episódio referente a colapso estrutural ocorreu em Aracaju-SE, onde o Edifício Coroa do Meio veio à ruína em 9 de julho de 2014 (Figura 2). Já em dezembro do mesmo ano, foi emitido um parecer técnico pelo Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Sergipe, representado por uma comissão de peritos que analisaram o projeto estrutural e a estrutura do edifício no qual foram feitas alterações, a citar: adoção das cargas com valores recalculados e corrigidos; execução de mais um pavimento-tipo; substituição das lajes maciças por lajes pré-moldadas; alteração em planta da posição do reservatório superior; execução de concreto com resistência característica inferior à especificada em projeto. (Comissão de Peritos - CREA-SE, 2014).

Figura 2: Escombros do Edifício Coroa do Meio



Fonte: VEJA (2014)

A Comissão de Peritos chegou à conclusão que o desabamento ocorreu devido a uma associação de erros de projeto e de execução. Existiram erros no dimensionamento da fundação, das vigas, das lajes e dos pilares. Nestes últimos, foram verificadas resistências incompatíveis com as solicitações atuantes, tanto na versão original do projeto, quanto nas condições em que a obra foi executada. Além disso, considerando-se as análises feitas, pode-se concluir que a ruptura da edificação teve início por um dos pilares, desencadeando o colapso progressivo (Comissão de Peritos – CREA-SE, 2014).

Os fatos ocorridos expressam a essencial contribuição dos pilares na estabilidade estrutural. Neste sentido, como forma de preservar o desempenho desse importante elemento estrutural, o presente trabalho agrupa as etapas de execução e o dimensionamento do reforço estrutural em pilares centrais de concreto armado por meio de aumento de seção.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é reunir os procedimentos de dimensionamento de reforço estrutural de pilares e as etapas a serem seguidas para uma correta execução.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em seu item 14.4.1.2, a NBR 6118:2014 define pilares como elementos lineares de eixo reto, usualmente dispostos na vertical, em que as forças normais de compressão são preponderantes.

Pilares geralmente estão submetidos à flexão composta oblíqua, ou seja, são solicitados por momentos fletores nas duas direções e por esforço normal de compressão, o que torna mais complexa a análise do dimensionamento de pilares em comparação aos outros elementos que normalmente compõem uma estrutura (lajes e vigas).

3.1 NOÇÕES SOBRE PILARES

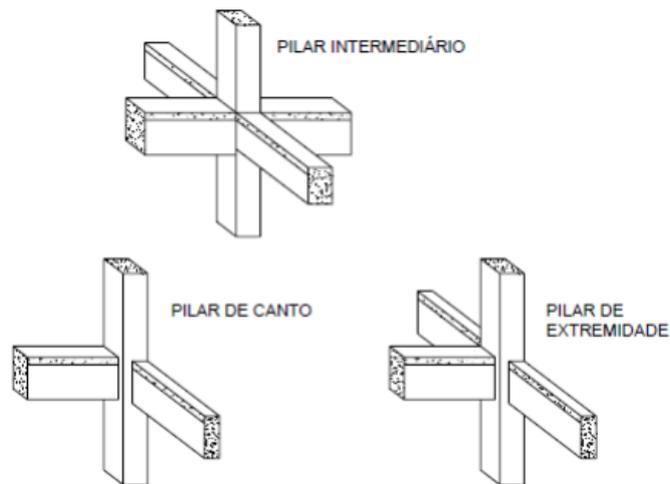
De acordo com Carvalho e Pinheiro (2009), para sistematizar o estudo e possibilitar uma abordagem mais prática, os diversos tipos de pilares são classificados:

- Quanto à posição em planta: central, lateral, canto;
- Quanto à esbeltez: curtos, medianamente esbeltos, esbeltos e muito esbeltos.

3.1.1 Classificação dos Pilares Quanto à Posição em Planta

A localização do pilar em planta (central, lateral ou de canto) determina como as excentricidades do carregamento vertical em relação ao centro da seção deverão ser consideradas e o tipo de solicitação a que ele estará submetido: compressão simples, flexão composta normal ou oblíqua (CARVALHO; PINHEIRO, 2009). A Figura 3 exhibe o arranjo estrutural dos pilares em edifícios.

Figura 3: Posição dos pilares em edifícios



Fonte: FUSCO (1981)

3.1.1.1 Pilares centrais ou intermediários

Estão localizados no interior do edifício e são submetidos, em princípio, só a cargas concentradas verticais (compressão simples).

As solicitações iniciais dos pilares intermediários podem ser calculadas sem consideração de momentos fletores. As solicitações iniciais resumem-se, neste caso, a força normal devida ao carregamento aplicado. A situação de projeto dos pilares intermediários é, portanto, a de compressão centrada. (FUSCO, 1981). Assim, uma força normal atua em um pilar de seção retangular no seu centro geométrico.

3.1.1.2 Pilares laterais ou de extremidade

Estão localizados nas bordas do edifício e são solicitados por cargas concentradas verticais e momento fletor transmitido pelas vigas na direção perpendicular (flexão composta). Na outra direção, há continuidade e, portanto, não há transmissão de momento para o pilar.

Os esforços solicitantes iniciais são constituídos pela força normal e por um momento fletor atuante no plano perpendicular a borda em que se situa o pilar. A situação de projeto dos pilares de extremidade é, portanto, a deflexão normal composta. Os momentos fletores dos nós dos pilares extremos poderão ser calculados pelas Equações (3.1) e (3.2) (FUSCO, 1981).

$$M_{inf} = M_{eng} \frac{r_{inf}}{r_{inf} + r_{sup} + r_{viga}} \quad (3.1)$$

$$M_{sup} = M_{eng} \frac{r_{sup}}{r_{inf} + r_{sup} + r_{viga}} \quad (3.2)$$

Onde:

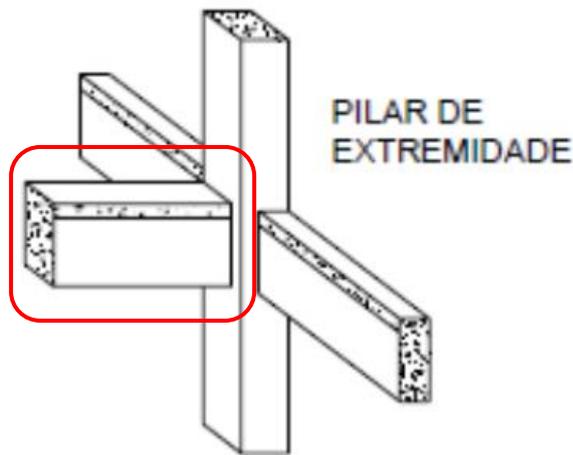
M_{eng} = momento de engastamento perfeito;

$r = \frac{I}{l}$ (índice de rigidez).

O tramo extremo da viga (Figura 4) estará solicitado por momentos negativos, cujo valor máximo é dado pela Equação (3.3).

$$M_{viga} = M_{eng} \frac{r_{viga}}{r_{inf} + r_{sup} + r_{viga}} \quad (3.3)$$

Figura 4: Tramo da viga do pilar de extremidade



Fonte: FUSCO (1981)

3.1.1.3 Pilares de canto

Estão localizados nos cantos do edifício e são solicitados por cargas concentradas verticais e momentos fletores transmitidos pelas vigas nas duas direções (flexão composta oblíqua). São considerados como pilares laterais em duas direções.

Os esforços solicitantes iniciais são constituídos pela força normal e por dois momentos fletores, os quais atuam nos planos verticais que contêm os eixos das vigas que formam o canto considerado. Para a determinação desses esforços, repetem-se, para cada um dos planos de flexão considerados, os raciocínios feitos para o caso do pilar de extremidade. (FUSCO, 1981).

3.1.2 Classificação dos Pilares Quanto à Esbeltez

O índice de esbeltez (λ) é uma grandeza que depende do comprimento do pilar, da sua seção transversal (forma e dimensões) e das condições de extremidade (CARVALHO; PINHEIRO, 2009).

De acordo com a NBR 6118:2014 (item 15.8.2), o índice de esbeltez é calculado em função do comprimento de flambagem (l_e) e do raio de giração (i). Assim:

$$\lambda = \frac{l_e}{i} \quad (3.4)$$

Os efeitos locais de 2ª ordem em elementos isolados podem ser desprezados quando o índice de esbeltez for menor que o valor limite λ_1 (ABNT NBR 6118:2014). O valor de λ_1 é dado por:

$$\lambda_1 = \frac{25+12,5e_1/h}{\alpha_b} \quad (3.5)$$

Onde:

$$35 \leq \lambda_1 \leq 90$$

o valor de α_b varia de acordo com a vinculação dos extremos do pilar e do carregamento atuante. (NBR 6118:2014 (item 15.8.2))

Sendo assim, quanto à esbeltez, os pilares são classificados como:

- Pilares curtos ($\lambda < \lambda_1$)
- Pilares medianamente esbeltos ($\lambda_1 < \lambda \leq 90$)
- Pilares esbeltos ($90 < \lambda \leq 140$)
- Pilares muito esbeltos ($140 < \lambda \leq 200$)

3.1.3 Excentricidades Consideradas para o Dimensionamento de Pilares

De acordo com Carvalho e Pinheiro (2009), a distância do centro geométrico de um pilar para o ponto de atuação da força normal é chamada de excentricidade e deve ser conhecida para o dimensionamento de pilares isolados.

Essas excentricidades podem ser divididas em: excentricidade inicial, excentricidade de forma, excentricidade acidental e excentricidade de segunda ordem.

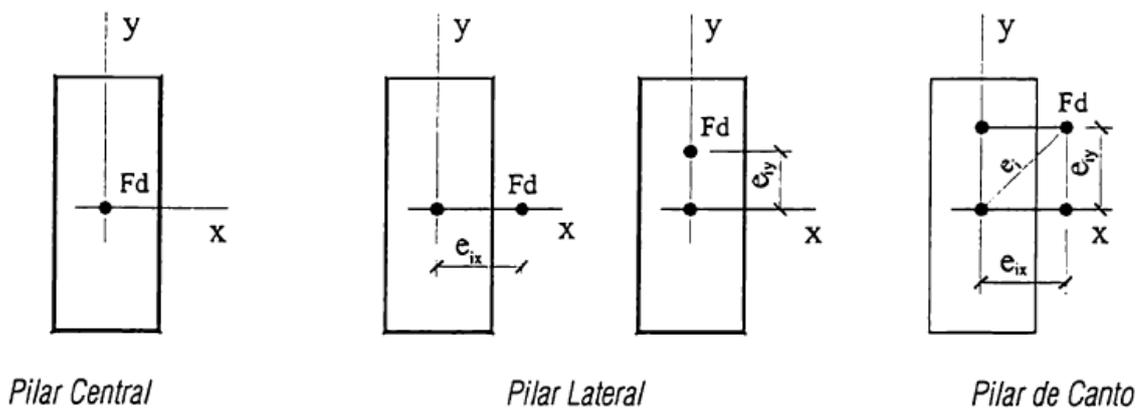
3.1.3.1 Excentricidade inicial

Os pilares laterais e de canto estão submetidos a um momento fletor inicial. Esse momento pode ser representado por uma excentricidade inicial e_i da força de compressão atuante. A excentricidade inicial ocorre em pilares de qualquer esbeltez e nas direções x ou y ou em ambas, e são dadas pela razão entre os momentos na ligação (M_x , M_y) e as forças normais (N) atuantes. Assim:

$$e_{iy} = \frac{M_y}{N} \quad (3.6)$$

$$e_{ix} = \frac{M_x}{N} \quad (3.7)$$

Figura 5: Excentricidade inicial em pilares central, lateral e de canto

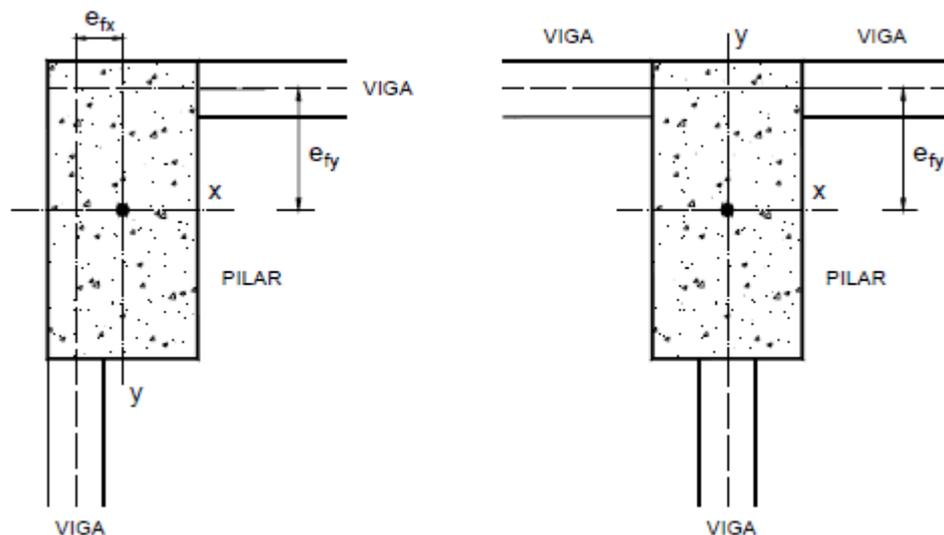


Fonte: CARVALHO (2009)

3.1.3.2 Excentricidade de forma

Nem sempre é possível fazer com que eixos de vigas e pilares sejam coincidentes. É comum fazer com as faces externas ou internas das vigas coincidam com as faces dos pilares nos quais estão apoiadas (CARVALHO; PINHEIRO, 2009). Sendo assim, os eixos das vigas não necessariamente passam pelo centro geométrico da seção transversal do pilar, fazendo com que as reações das vigas apresentem excentricidades em relação ao centro do pilar. Essa excentricidade é denominada excentricidade de forma, demonstrada na Figura 6.

Figura 6: Excentricidade de forma em pilares



Fonte: AGUIAR (2000)

3.1.3.3 Excentricidade acidental

De acordo com Carvalho e Pinheiro, 2009, “é a excentricidade que, como o próprio nome diz, pode acidentalmente ocorrer (por exemplo, incerteza na localização da força normal ou desvio do eixo da peça durante a construção, em relação à posição prevista no projeto).”

Na verificação de um lance de pilar, deve ser considerado o efeito do desaprumo (Figura 7). Nos casos usuais, a consideração apenas da falta de retilinidade ao longo do lance de pilar é suficiente. Nesse caso, o valor da excentricidade acidental pode ser calculado pelas Equações (3.8) e (3.9).

$$e_a = \theta_1 \cdot \left(\frac{l}{2}\right) \quad (3.8)$$

$$\theta_1 = \frac{1}{100 \cdot \sqrt{l}} \geq \theta_{1min} \quad (3.9)$$

Onde:

θ_1 – desaprumo de um elemento vertical contínuo;

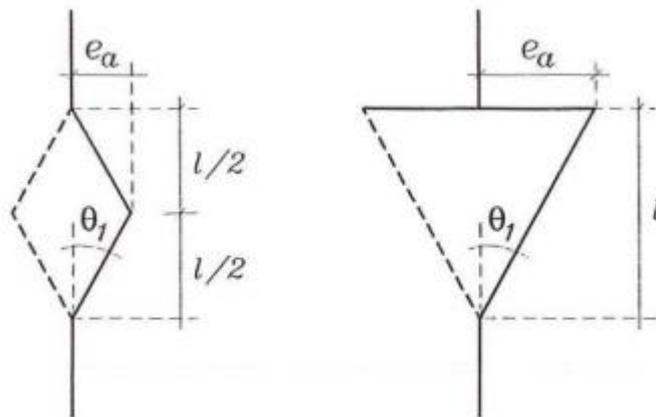
l – altura de um pavimento;

$\theta_{1min} = 1/300$ para imperfeições locais;

$\theta_{1máx} = 1/200$

Assim, a excentricidade acidental, que ocorre em pilares de qualquer esbeltez, deve ser adicionada à excentricidade inicial, quando houver.

Figura 7: Casos de possíveis imperfeições geométricas (falta de retinidade e desaprumo, respectivamente)



Fonte: AGUIAR (2000)

3.1.3.4 Excentricidade de segunda ordem

O fenômeno da flambagem causa uma deformação na peça, chamada de segunda ordem, que influi no próprio esforço interno, podendo causar sua instabilidade (CARVALHO; PINHEIRO, 2009). A teoria que trata desse fenômeno é chamada de teoria de segunda ordem. Para reproduzir o efeito da flambagem, admite-se que a força de compressão atue com uma

excentricidade (e_2) em relação ao centro do pilar, chamada de excentricidade de segunda ordem.

3.2 PATOLOGIAS EM PILARES

Patologia pode ser entendida como a parte da Engenharia que estuda os sintomas, os mecanismos, as causas e as origens dos defeitos das construções civis (HELENE, 1992). É o estudo das partes que compõem o diagnóstico do problema. Um diagnóstico adequado e completo é aquele que esclarece todos os aspectos do problema, desde a origem até as consequências.

Os problemas patológicos, salvo raras exceções, se manifestam externamente, permitindo deduzir a provável origem e estimar as previsíveis consequências. Esses sintomas são denominados manifestações patológicas.

Com a ação do tempo ou mudança no tipo de utilização dos locais, algumas manifestações patológicas podem acometer as estruturas de concreto, como os pilares, por exemplo. É indispensável realizar procedimentos de manutenção da estrutura, objetivando impedir o surgimento ou agravamento dessas aparições.

Os sintomas de maior incidência nas estruturas de concreto, inclusive pilares, são as fissuras (ou trincas ou rachaduras, a depender do grau de abertura), a corrosão de armaduras e os nichos de concretagem (segregação dos materiais constituintes do concreto) (HELENE, 1992).

3.2.1 Fissuras

Fissuras são aberturas que afetam a superfície do elemento estrutural tornando-se um caminho rápido para a entrada de agentes agressivos à estrutura. (GONÇALVES, 2015).

As fissuras podem ser consideradas como a manifestação patológica característica das estruturas de concreto, sendo assim o dano de ocorrência mais comum e aquele que, a par das deformações muito acentuadas, mais chama a atenção dos leigos, proprietários e usuários. (SOUZA e RIPPER, 1998).

Para Gonçalves (2015), o conceito de fissura pode conflitar com os conceitos de “trinca” e “rachadura”. As trincas se assemelham às fissuras no que diz respeito ao tratamento, diferenciando-se na dimensão. Trincas possuem aberturas maiores que 0,5mm. As rachaduras

têm características que diferenciam das demais, possuem abertura acentuada e profunda, tendo dimensão superior a 1mm (Figura 8).

Figura 8: Fissuras, trincas e rachaduras



Fonte: JACQUES (2020)

Helene (1992) afirma que, em pilares, as fissuras podem ser, por exemplo, de compressão localizada (ou flambagem de armaduras), dando como diagnóstico a má colocação ou insuficiência de estribos, carga superior à prevista, concreto de resistência inadequada ou mau adensamento do concreto.

3.2.2 Corrosão de Armaduras

Helene (1992) define a corrosão das armaduras de concreto como um fenômeno de natureza eletroquímica que pode ser acelerado pela presença de agentes químicos externos ou internos incorporados ao concreto (Figura 9).

Os danos causados pela corrosão de armadura geralmente são manifestados por fissuras no concreto paralelas à direção da armadura, delimitando e ou desprendendo o recobrimento (MIOTTO, 2010). Em componentes estruturais que apresentam uma elevada quantidade de umidade, os primeiros sintomas de corrosão evidenciam-se por meio de manchas de óxido nas superfícies do concreto.

Figura 9: Corrosão de armadura em pilar



Fonte: DESIMONE (2010)

As causas mais comuns da ocorrência da corrosão de armaduras no concreto são: má execução das peças estruturais, concreto com alta permeabilidade e/ou elevada porosidade, agentes agressivos do ambiente impregnados na estrutura (cloretos), e cobrimento insuficiente das armaduras (HELENE, 1992).

É importante destacar que a corrosão é um processo evolutivo que se agrava com o passar do tempo. Sendo assim, após analisar adequadamente o componente estrutural e estabelecer o diagnóstico e as consequências do problema, deve-se utilizar alternativas para correção do problema antes que a segurança estrutural seja comprometida. Em casos avançados de corrosão, por exemplo, deve-se reforçar o componente estrutural aumentando as dimensões originais (HELENE, 1992).

3.2.3 Nichos de Concretagem

O concreto é um elemento composto por areia, pedras (brita), água e cimento, e quando preparado e lançado corretamente, transforma-se em uma mistura homogênea. Se ocorrer um erro de lançamento ou de vibração, as pedras se separam do resto da pasta, formando um concreto cheio de vazios, permeável, que permite a passagem de água facilmente. (LOTTERMANN, 2013).

Para Helene (1992), essa separação (ou segregação) tem como causas principais: dosagem inadequada, dimensão máxima característica do agregado gráudo inadequada, lançamento e adensamento inadequados, e taxa excessiva de armaduras.

Figura 10: Nicho de concretagem em pilar



Fonte: CONDÉ (2018)

Após analisar adequadamente o componente estrutural e entender as consequências do problema, pode ser necessário, em casos de reparos superficiais, utilizar alguns tipos de argamassa (polimérica base cimento, base epóxi) para preencher os vazios (HELENE, 1992). Já em casos de reparos mais profundos, pode ser utilizado graute – tipo de concreto ou argamassa de alta resistência e grande fluidez que não apresenta retração e é utilizado para preencher vazios de concretagem (SOUZA e RIPPER, 1998) –, base cimento ou até mesmo concreto. Logo em seguida, aplica-se o revestimento de proteção.

4 REFORÇO ESTRUTURAL

Os serviços de reforço requerem sempre a prévia elaboração de trabalhos de cálculo estrutural, sejam estes serviços derivados de alteração na funcionalidade da estrutura (ex: aumento da carga) ou como consequência de danificação sofrida pela estrutura, casos em que o reforço estará inserido nos trabalhos de recuperação (SOUZA e RIPPER, 1998). Além disso, outra necessidade está associada à utilização de concreto com resistência característica inferior àquela especificada em projeto, causando perda de capacidade de carga.

Após definir as causas da necessidade de um reforço estrutural e estudar os efeitos produzidos, passa-se à escolha da técnica adequada, que inclui a seleção dos materiais e equipamentos a serem empregados.

Do ponto de vista do projeto estrutural, o reforço de pilares torna-se problemático se comparado com os demais elementos estruturais. Isso ocorre porque os pilares são os últimos elementos de sustentação antes das fundações. Logo, uma etapa considerada complexa é o alívio das cargas que atuam sobre o pilar que necessita do reforço, pois para executar o descarregamento seria necessário dimensionar uma estrutura auxiliar que recebesse o carregamento existente. É justamente por isso que, na maioria das vezes, o reforço de pilares é feito sem o descarregamento da estrutura e o reforço é dimensionado para receber cargas adicionais (MOURA, 2013).

Como citado no item 3.2.2, em casos avançados de corrosão, uma técnica é reforçar o componente estrutural por encamisamento de concreto armado, que cria uma área adicional por meio do envolvimento total ou parcial do pilar por concreto aliado ou não às armaduras.

4.1 ENCAMISAMENTO DE CONCRETO ARMADO

O conceito básico do reforço por encamisamento consiste em criar uma área adicional, ou aumento de seção, com objetivo de diminuir a tensão solicitante no trecho reforçado (COUTO, D.; ÁVILA, J.A.; BRITTEZ, C.; HELENE, P., 2016).

O reforço dos pilares pode ser feito a partir do aumento da seção transversal, com concreto de resistência adequada e com utilização de armaduras longitudinal e transversal (TAKEUTI, 1999) (Figura 11).

Figura 11: Armadura do reforço por encamisamento



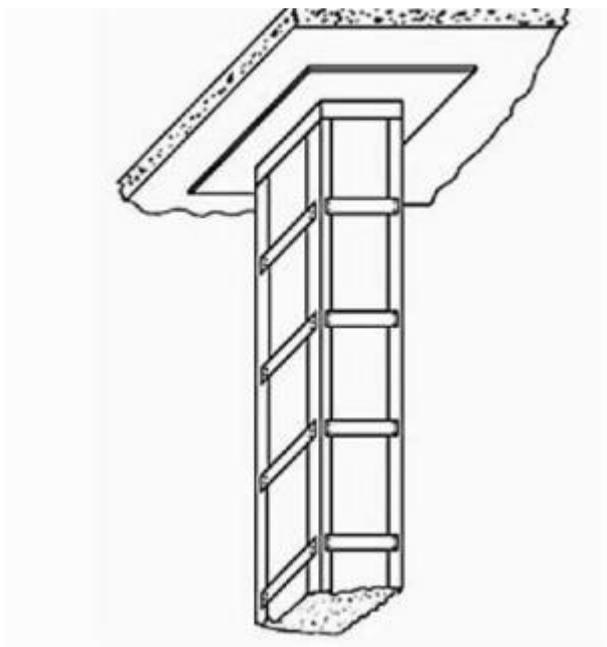
Fonte: M2P Engenharia (2021)

Para casos de grandes volumes de concreto, pode-se utilizar o concreto projetado, e para pequenos volumes o processo tradicional com o emprego de formas (TAKEUTI, 1999). Um dos principais campos de aplicação do concreto projetado é em serviços de recuperação/reforço estrutural (FIGUEIREDO, 1992).

Para Figueiredo (1992), a aderência é uma propriedade fundamental para o concreto projetado pois não é possível se executar nenhuma camada estrutural com o material se ele não permanecer aderido à superfície que é alvo da projeção. No entanto, a obtenção da aderência é facilitada pelo próprio processo, uma vez que, com o jateamento do concreto contra a superfície, procede-se ao tamponamento dos poros e fissuras do mesmo com pasta de cimento. Essa camada atua, após o endurecimento, como uma ponte de aderência entre o substrato e a camada de concreto projetado.

4.2 REFORÇO COM PERFIS METÁLICOS

A Figura 12 mostra o reforço típico de um pilar de concreto armado com o recurso da utilização de perfis, chapas e conectores metálicos.

Figura 12: Reforço de pilar com perfis

Fonte: SOUZA e RIPPER (1998)

Esse tipo de reforço é utilizado devido à rapidez na execução e carregamento da estrutura. É recomendado que, para pilares, deve-se dar continuidade à estrutura até atingir a fundação (TAKEUTI, 2003). Em geral, nesses elementos, os reforços com elementos metálicos são realizados sem que se retirem as cargas atuantes sobre eles.

Se um pilar inicialmente solicitado por uma carga P é reforçado, após a execução do reforço esta carga será elevada para $P + \Delta P$. Este incremento de carga se dividirá de tal forma que um percentual irá atuar na seção de concreto armado, e o restante irá solicitar os perfis metálicos acrescentados. Se a seção de concreto armado já estiver trabalhando no limite antes da execução do reforço, será incapaz de suportar este incremento de carga, e romperá por esmagamento. Com isto, a totalidade da carga ($P + \Delta P$) deverá ser suportada pelos perfis metálicos (SOUZA E RIPPER, 1998).

4.3 CONDIÇÕES DE REFORÇO ESTRUTURAL

O procedimento exato para o projeto e reforço de pilares é complexo e trabalhoso, uma vez que se faz necessária a inclusão dos deslocamentos iniciais obtidos na fase atual de uso do

elemento estrutural para o projeto do reforço (GRAZIANO, 2005). Neste trabalho, será adotado um método aproximado de abordagem ao problema, válido para inúmeros casos práticos, com resultados normalmente a favor da segurança.

Em geral, os métodos de reforço de pilares consideram que a seção a ser recuperada encontra-se deformada e que o material do reforço está sujeito a uma deformação por fluência maior do que o material da seção original, pois eles têm idades diferentes. Além disso, o aço envolvido pelo concreto trabalha com a mesma deformação do reforço.

4.3.1 Hipóteses de Cálculo

Para apresentar a formulação necessária para o dimensionamento de um reforço por encamisamento (áreas de concreto e de aço), parte-se do pressuposto de que as seções transversais permanecem planas após a deformação (GRAZIANO, 2005). Para maior clareza, são consideradas três fases: fase de projeto ($f_{ck} = 30MPa$), fase real ($f_{ck} = 22MPa$) e fase de reforço (após realização do serviço de reforço). Assim, inicialmente, calcula-se a normal centrada do pilar de projeto ($N_{d, cen, proj}$) e do pilar atual ($N_{d, cen, at}$) através da equação de equilíbrio para situação de compressão centrada (Equação (4.1)), variando apenas o f_{ck} .

$$N_{d, cen} = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot A_c + f_{scc} \cdot A_s \quad (4.1)$$

onde:

f_{cd} – resistência do concreto à compressão em valor de cálculo;

A_c – área bruta da seção transversal do elemento de concreto

A_s – área de aço que constitui a armadura da seção.

f_{scc} – resistência do aço em condição de compressão centrada com encurtamento de 2%.

Para aços com tensão de escoamento de projeto acima de 420MPa, f_{scc} assume valor constante e igual a 42 kN/cm². Para aços abaixo desta resistência os mesmos desenvolverão suas capacidades máximas pois atingirão o escoamento;

A relação entre $N_{d, cen, proj}$ e a normal utilizada em projeto (N_{d0}) pode ser denominada como coeficiente aparente majorador (γ_f^*), dado pela Equação (4.2).

$$\gamma_f^* = \frac{N_{d, cen, proj}}{N_{d0}} \quad (4.2)$$

É entendível que a seção a ser recuperada encontra-se deformada. Assim, é preciso determinar tal deformação na situação real. Para isso, usa-se o valor de pico (ε_p) de 2‰ para o concreto solicitado a compressão centrada, valor adotado quando a peça se encontra totalmente comprimida. Sendo assim, é necessário determinar a deformação característica específica da seção através da Equação (4.3).

$$\varepsilon = \alpha \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{V_{eq,cen}}{0,85 \cdot \alpha^2}} \right) \cdot \varepsilon_p \quad (4.3)$$

onde:

$$V_{eq,cen} = \frac{N_{d,cent,at}}{f_{cd} \cdot A_c}, \text{ com } N_{d,cent,at} = N_{d0,at} \cdot \gamma_f^* \quad (4.4)$$

ε_p é o valor de pico de 2‰;

$$\alpha = \left(1 + \rho \cdot \eta \cdot \frac{\varepsilon_p}{2‰} \right) \quad (4.5)$$

ρ é a taxa geométrica do aço;

η é a relação de rigidez entre o concreto e o aço, dada por:

$$\eta = \frac{E_S}{850 \cdot f_{cd}} \quad (4.6)$$

onde:

E_S é o módulo de elasticidade do aço, com valor igual a 210 GPa;

f_{cd} é a resistência de projeto do concreto.

Entretanto, utiliza-se o diferencial de deformação, ou seja, a diferença entre o valor de pico e a deformação específica atual do pilar real. Isso quer dizer que o concreto do reforço desenvolverá sua capacidade portante para uma deformação específica correspondente ao diferencial de deformação para, assim, preservar a seção original.

O concreto do reforço não é utilizado na sua totalidade de capacidade. Sendo assim, essa porcentagem de capacidade é dada pela Equação (4.7).

$$K_{ref} = \frac{\varepsilon_{ref}}{\varepsilon_p} \left(2 - \frac{\varepsilon_{ref}}{\varepsilon_p} \right) \quad (4.7)$$

onde ε_{ref} corresponde ao diferencial de deformação ($\Delta \varepsilon$), que será a deformação específica do concreto do reforço. Contudo, por se tratar de concretos de diferentes idades (seção original e acréscimo), é levada em consideração a capacidade de deformação por fluência (maior em materiais com menos idade). Sendo assim, o valor da deformação de pico passa a levar em conta o coeficiente de fluência (φ). Assim:

$$\varepsilon_p = 2\% \cdot (1 + \varphi) \quad (4.8)$$

Os valores de φ são tabelados pela NBR 6118:2014 (ANEXO A, item A.2.3, Tabela A.1).

A. 1: Valores usuais para determinação de fluência e retração

Ambiente	Umidade U %	Fluência φ_{1c} ^{a, c}			Retração $10^4 \varepsilon_{1s}$ ^{b, c}			γ ^d
		Abatimento de acordo com a ABNT NBR NM 67 cm						
		0 – 4	5 – 9	10 – 15	0 – 4	5 – 9	10 – 15	
Na água	–	0,6	0,8	1,0	+ 1,0	+ 1,0	+ 1,0	30,0
Em ambiente muito úmido imediatamente acima da água	90	1,0	1,3	1,6	– 1,9	– 2,5	– 3,1	5,0
Ao ar livre, em geral	70	1,5	2,0	2,5	– 3,8	– 5,0	– 6,2	1,5
Em ambiente seco	40	2,3	3,0	3,8	– 4,7	– 6,3	– 7,9	1,0

^a $\varphi_{1c} = 4,45 - 0,035U$ para abatimento no intervalo de 5 cm a 9 cm e $U \leq 90\%$.
^b $10^4 \varepsilon_{1s} = -8,09 + (U/15) - (U^2/2284) + (U^3/133765) - (U^4/7608150)$ para abatimentos de 5 cm a 9 cm e $40\% \leq U \leq 90\%$.
^c Os valores de φ_{1c} e ε_{1s} para $U \leq 90\%$ e abatimento entre 0 cm e 4 cm são 25% menores e, para abatimentos entre 10 cm e 15 cm, são 25% maiores.
^d $\gamma = 1 + \exp(-7,8 + 0,1U)$ para $U \leq 90\%$.

NOTA 1 Para efeito de cálculo, as mesmas expressões e os mesmos valores numéricos podem ser empregados, no caso de tração.
NOTA 2 Para o cálculo dos valores de fluência e retração, a consistência do concreto é aquela correspondente à obtida com o mesmo traço, sem a adição de superplastificantes e superfluidificantes.

Fonte: (ABNT NBR 6118, 2014)

Vale ressaltar que o aço envolvido pelo concreto do reforço também terá uma deformação correspondente a do concreto (GRAZIANO, 2005). Sendo assim, a tensão do aço do reforço é dada pela Equação (4.9).

$$\sigma_{s,ref} = E_S \cdot \varepsilon_{ref} \quad (4.9)$$

Onde:

$\sigma_{s,ref}$ é a tensão do aço do reforço;

E_S é o módulo de elasticidade do aço (210 GPa);

ε_{ref} é a deformação específica do concreto do reforço.

Partindo para o aumento de área de aço e de concreto, é utilizada a equação da força normal equivalente com o acréscimo do reforço. Assim:

$$N_{d,cen,proj} = N_{d,cen,at} + K_{ref} \cdot 0,85 \cdot f_{cd,ref} \cdot A_{c,ref} + \sigma_{s,ref} \cdot A_{s,ref} \quad (4.10)$$

Onde:

$N_{d,cen,proj}$ é a normal centrada do pilar de projeto;

$N_{d,cen,at}$ é a normal máxima na fase atual;

K_{ref} é a capacidade do concreto do reforço;

$f_{cd,ref}$ é a resistência de projeto do concreto do reforço;

$A_{c,ref}$ é a área de concreto do reforço;

$\sigma_{s,ref}$ é a tensão do aço do reforço;

$A_{s,ref}$ é a área de aço do reforço.

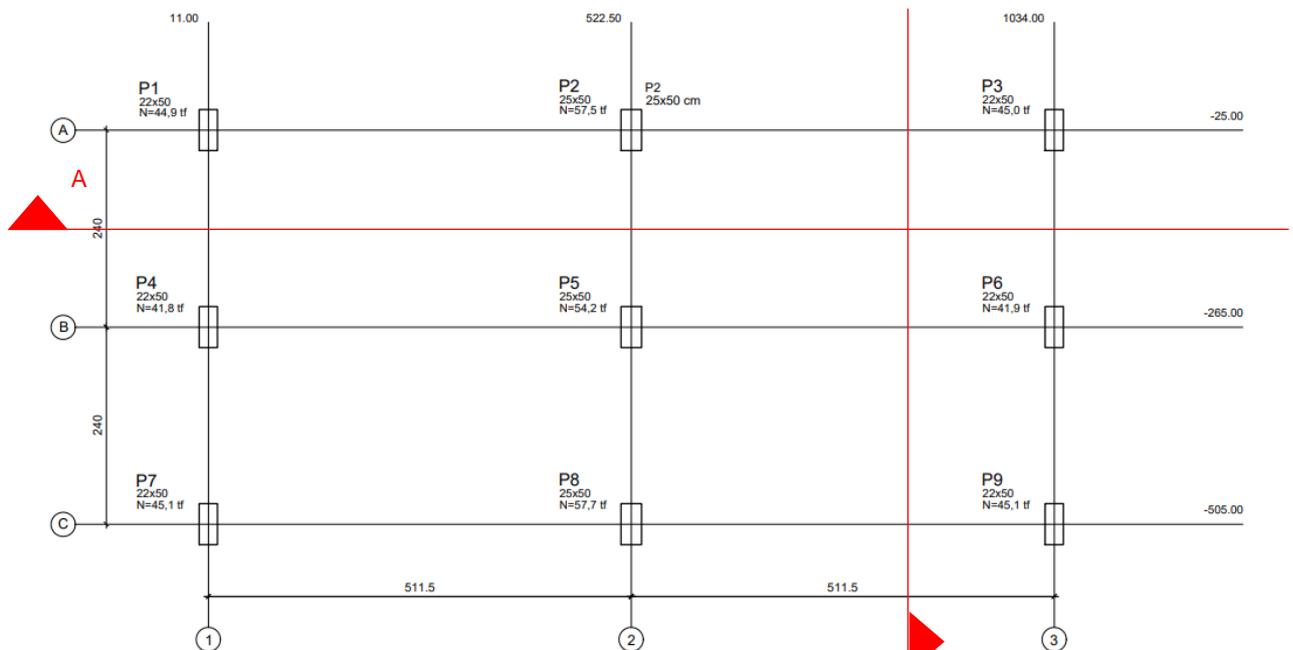
5 APLICAÇÃO DE REFORÇO ESTRUTURAL EM PILAR DE RESERVATÓRIO ELEVADO

Para demonstrar a execução de um reforço estrutural por encamisamento de concreto armado, é utilizado o projeto de um reservatório elevado de água potável. Consiste em uma estrutura com capacidade para 168,0m³ de água que está apoiada sobre 9 pilares, sendo 6 deles com dimensões de 25x50cm e três com 22x50cm, travados por vigas em quatro elevações ao longo do seu comprimento. A fundação é do tipo profunda, com estacas sob blocos.

Para os pilares, o projeto especifica aço CA-50 (armadura longitudinal) e aço CA-60 (armadura transversal), além de um f_{ck} superior a 30 MPa e cobrimento das armaduras de 4cm, pois toda a estrutura foi projetada considerando classe de agressividade ambiental III, baseada na NBR 6118:2014.

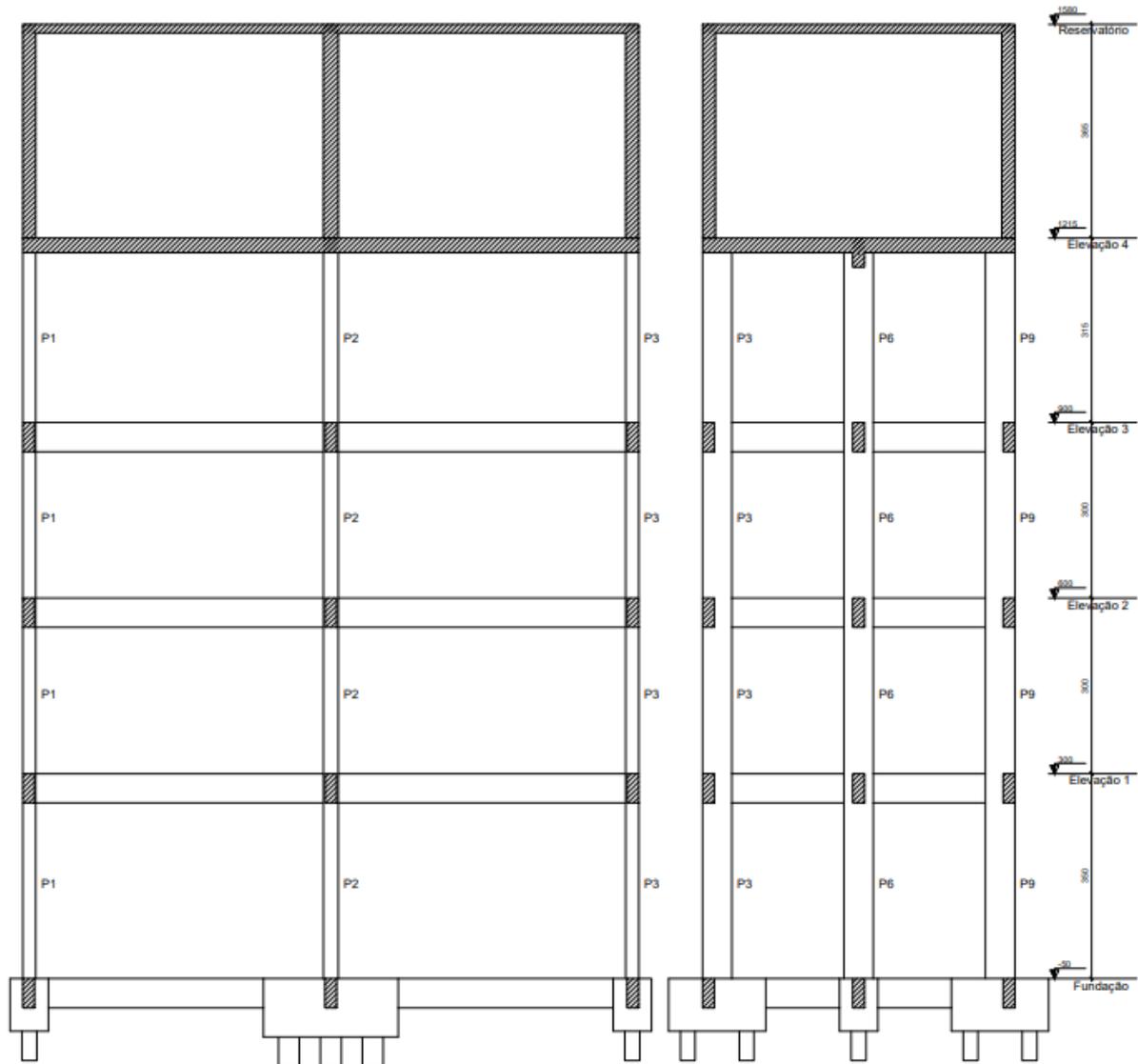
Por se tratar de um dimensionamento de reforço de pilares, é importante destacar a locação desses elementos com suas devidas dimensões e cargas máximas (Figura 13). A Figura 14 mostra o esquema da estrutura do reservatório que, no total, possui uma altura de 15,80m.

Figura 13: Locação dos pilares



Fonte: GEOTEC (2018)

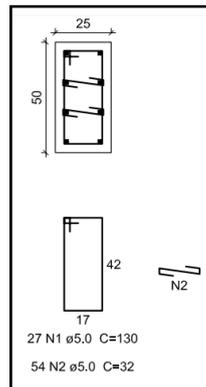
Figura 14: Corte da estrutura (A e B, respectivamente)



Fonte: GEOTEC (2018)

Parte-se do pressuposto de que o pilar central (P5) perdeu parte de sua capacidade portante devido ao inalcance de f_{ck} no momento da execução. Assim, o pilar em estudo pode ter como diagnóstico o concreto de resistência inadequada. A partir daí, são reunidas as etapas de execução do reforço deste elemento, detalhando os procedimentos a serem seguidos para a correta execução do serviço.

Trata-se de um pilar central, sendo possível acessar todas as suas faces, o que facilita o processo de execução. A armadura de tal elemento é exibida na Figura 15.

Figura 15: Armadura do pilar P5

Fonte: GEOTEC (2018)

Assim, o procedimento de execução e o dimensionamento do reforço do pilar P5 levará em conta os dados exibidos na Tabela 1.

Tabela 1: Dados do dimensionamento do P5

Seção transversal (cm)	25x50
fck na fase de projeto (MPa)	30
fcd na fase de projeto (MPa)	21,43
fck na fase atual (MPa)	22
fcd na fase atual (MPa)	15,71
Normal de projeto (kN)	542
Bitola da armadura longitudinal (mm)	10
Abatimento (mm)	70-100
Classe de agressividade	III

Fonte: Autor (2021)

A partir desses dados, foram calculadas área de concreto, área de aço e taxa de armadura da seção transversal do pilar P5 na condição original.

Tabela 2: Áreas e taxa de armadura na fase de projeto

Área de concreto (cm ²)	1250
Área total de aço (cm ²)	6,28
Taxa de armadura (%)	0,50

Fonte: Autor (2021)

As grandezas obtidas obedecem aos valores máximos e mínimos de área de armadura longitudinal estabelecidos na NBR 6118:2014 (itens 17.3.5.3.1 e 17.3.5.3.2).

Logo, é possível determinar a força normal centrada do pilar de projeto e do pilar na fase atual e, assim, determinar a perda da capacidade da seção afetada pela falha na resistência do concreto através da Equação (4.1).

- Fase de projeto

$$N_{d,cent,proj} = 0,85 \cdot 21430 \cdot 0,125 + 420000 \cdot (6,28 \cdot 10^{-4}) = 2540,70 \text{ kN}$$

- Fase atual

$$N_{d,cent,at} = 0,85 \cdot 15710 \cdot 0,125 + 420000 \cdot (6,28 \cdot 10^{-4}) = 1932,95 \text{ kN}$$

Usando a Equação (4.2), é possível determinar um coeficiente majorador aparente (γ_f^*) que relaciona a normal centrada do pilar de projeto com a normal de projeto obtida no dimensionamento.

$$\gamma_f^* = \frac{N_{d,cent,proj}}{N_{d0}} = \frac{2540,70}{542} = 4,69$$

Assim, pela mesma equação, a normal de projeto na fase atual vale:

$$\gamma_f^* = \frac{N_{d,cent,at}}{N_{d0,at}} \rightarrow 4,69 = \frac{1932,95}{N_{d0,at}} \rightarrow N_{d0,at} = 412,14 \text{ kN}$$

Assim, fazendo a relação entre as normais, percebe-se que a seção perdeu 23,96% da sua capacidade portante e é necessário recuperar tal perda. Sendo assim, para a força normal de projeto (542 kN) está havendo o esmagamento do concreto. Logo, sua normal de projeto máxima na fase atual corresponde a aproximadamente 412 kN. Através das Equações (4.3), (4.4), (4.5) e (4.6), é possível determinar a deformação específica em que se encontra a seção.

$$\eta = \frac{210 \cdot 10^9}{850 \cdot 15,71 \cdot 10^6} = 15,73$$

$$\alpha = (1 + 0,0050 \cdot 15,73 \cdot 1) = 1,079$$

Por questão de segurança, trabalha-se com uma carga de projeto abaixo da máxima, que equivale a 412 kN, fazendo com que o reforço seja responsável por suportar a outra parcela. A normal adotada corresponde a 300 kN, valor indicado por cada projetista. Quanto menor a carga adotada que deverá ser suportada pela seção original, maior será o reforço.

$$V_{eq,cen} = \frac{300 \cdot 4,69}{15,71 \cdot 10^3 \cdot 0,1250} = 0,716$$

Assim, a deformação específica do pilar na fase atual é:

$$\varepsilon_{at} = 1,079 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{0,716}{0,85 \cdot 1,079^2}} \right) \cdot 2\text{‰} = 1,02 \text{‰}$$

Para não haver risco de a seção original ser rompida antes do conjunto reforçado atingir a capacidade esperada, o reforço desenvolve sua capacidade portante para uma deformação específica igual ao diferencial de deformação, isto é, $\Delta \varepsilon = 2\text{‰} - 1,02\text{‰} = 0,98\text{‰}$. Como citado anteriormente, o valor da deformação de pico passa a levar em conta o coeficiente de fluência (φ) obtido através da NBR 6118:2014 (ANEXO A, item A.2.3, Tabela A.1).

$$\varepsilon_{p,ref} = 2\text{‰} \cdot (1 + 2)$$

A partir daí, a capacidade do concreto do reforço que é utilizado é dada pela Equação (4.7).

$$K_{ref} = \frac{0,98}{2 \cdot (1 + 2)} \cdot \left(2 - \frac{0,98}{2 \cdot (1 + 2)} \right) = 0,30$$

Partindo do pressuposto de que o aço envolvido pelo concreto trabalha com a mesma deformação do reforço, sua tensão é limitada pela Equação (4.9).

$$\sigma_{s,ref} = 210 \cdot 10^6 \cdot 0,98 \cdot 10^{-3} = 205800 \text{ kN/m}^2 = 20,58 \text{ kN/cm}^2$$

Agora é possível escrever a equação que estabelece a força normal equivalente requerida em projeto através do acréscimo do reforço. Assumindo um $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$ (superior ao da seção a ser reforçada), é possível determinar a quantidade de armadura necessária. Como foi adotada em projeto a classe de agressividade III, o cobrimento mínimo é de 4cm de acordo com a NBR 6118:2014. Adota-se 10 cm para a coroa externa de concreto armado. Assim, o pilar P5 possui, agora, dimensões de 70x45 cm.

- Área de concreto do reforço

$$A_{c,ref} = 0,70 \cdot 0,45 - 0,50 \cdot 0,25 = 0,19 \text{ m}^2 = 1900 \text{ cm}^2$$

Para determinação da área de armadura, é utilizada a Equação (4.10) da força normal equivalente com o acréscimo do reforço.

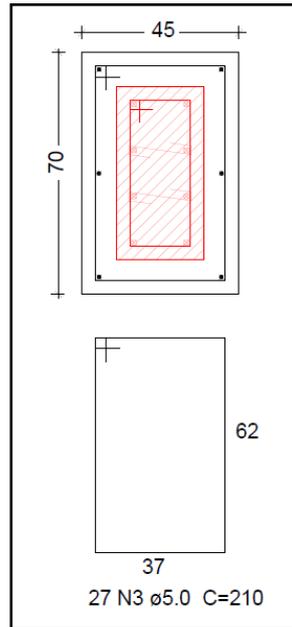
$$2540 = 1932,95 + 0,30 \cdot 0,85 \cdot \frac{35000}{1,4} \cdot 0,19 + 20,58 \cdot A_{s,ref}$$

$$A_{s,ref} = -29,36 \text{ cm}^2$$

Conclui-se que o pilar P5 necessita de reforço estrutural composto por acréscimo de 1900cm² de área de concreto e armadura mínima estabelecida pela NBR 6118:2014. A área de aço é, então, dada pela Equação (4.11).

$$A_{s,min} = 0,15 \frac{N_d}{f_{yd}} = 0,15 \cdot \frac{542 - 300}{\frac{50}{1,15}} = 0,835 \text{ cm}^2$$

Usando barras de aço CA-50 com bitola de 8mm, são necessárias 2 barras para execução do reforço estrutural. Entretanto, de acordo com o item 18.4.2.2 da NBR 6118:2014, “o espaçamento máximo entre eixos das barras, ou de centros de feixes de barras, deve ser menor ou igual a duas vezes a menor dimensão da seção no trecho considerado, sem exceder 400 mm.”. Logo, obedecendo à armadura mínima e ao critério de espaçamento máximo, o arranjo das armaduras do reforço é esquematizado na Figura 16. São necessárias 6 barras de 8mm.

Figura 16: Nova armadura do pilar P5

Fonte: Autor (2021)

6 PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO DO REFORÇO

Quando uma estrutura necessita ser reforçada estruturalmente, existe um procedimento a ser seguido para que a execução atenda ao dimensionamento. O acréscimo de seção não precisa, necessariamente, ser executado em todo o contorno do pilar, podendo ser feito apenas em algumas faces (Takeuti, 1999). Os pilares da estrutura do reservatório em questão são travados por vigas em quatro elevações. Assim, o procedimento de reforço é realizado a cada nível (de baixo para cima).

6.1 CUIDADOS INICIAIS

Ao ser diagnosticado a necessidade de um reforço estrutural em pilares, pressupõe-se que se execute um sistema de escoramento. As escoras podem ser metálicas ou de madeira. O uso das escoras metálicas permite que sejam realizados ajustes na altura, podendo ser reutilizadas ao longo do serviço.

A NBR 15696:2009 (Formas e escoramentos para estruturas de concreto - Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos) estabelece em seu item 4.1.2.1 o que deve constar em um projeto de escoramento, a saber: a) especificar as cargas admissíveis dos equipamentos utilizados; b) definir clara e exatamente o posicionamento de todos os elementos; c) definir as cargas nas bases de apoio; d) ser detalhado com plantas, cortes, vistas e demais detalhes.

No estudo em questão, o reforço é executado em toda a extensão do pilar, a cada elevação, assim como o escoramento. Para prosseguir com o processo do reforço, as escoras da elevação inferior não são removidas sem antes levar em consideração os aspectos estabelecidos pela NBR 15696:2009 (item 6.5), a saber:

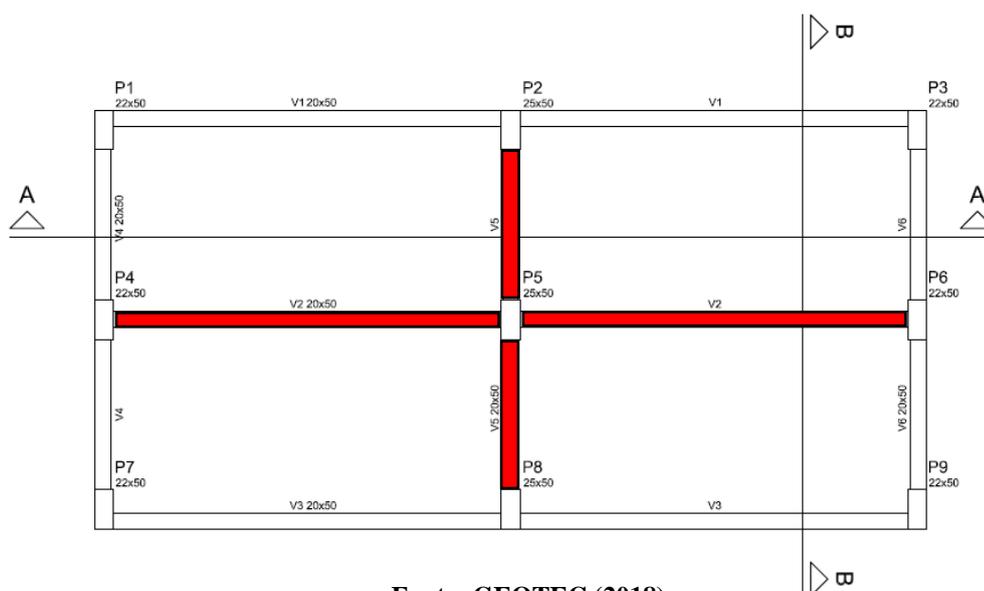
a) nenhuma carga deve ser imposta e nenhum escoramento removido de qualquer parte da estrutura, enquanto não houver certeza de que os elementos estruturais têm resistência suficiente para suportar com segurança as ações a que estarão sujeitos;

b) o projetista da estrutura deve informar ao responsável pela execução da obra os valores mínimos de resistência à compressão e módulo de elasticidade que devem ser obedecidos concomitantemente para a retirada do escoramento. O ciclo de remoção (ou remanejamento) deve ser de no mínimo 14 dias.

As distâncias máximas recomendadas para posicionamento dos elementos verticais de suporte são 2,0 m x 2,0 m (NBR 15696:2009 Anexo C, item C.4). Para o reservatório, são escoradas as vigas ao redor do pilar P5, ou seja, V2 e V5 (Figura 17).

Para determinar a quantidade de escoras necessária para suportar as cargas no momento da execução do reforço, é necessário consultar o projetista para desenvolver o dimensionamento do escoramento, com as especificações estabelecidas na NBR 15696:2009. Para isso, Helene (1992) alerta que a estrutura deve ser escorada descarregando o pilar.

Figura 17: Vigas escoradas

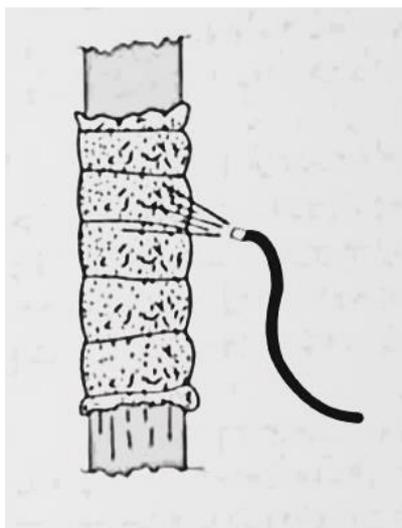


Fonte: GEOTEC (2018)

6.2 ADERÊNCIA

No caso em estudo, o próximo passo consiste em melhorar a aderência do pilar onde será realizado o serviço, garantindo a união entre o concreto novo e o antigo. Para o uso de concreto projetado, o substrato deve estar saturado e com superfície seca sem empoçamentos (Helene, 1992). Em superfícies verticais, é necessário, quando a submersão for inviável, formar um filme contínuo de água na superfície com o auxílio de sacos de aniagem e mangueira perfurada como mostrado na Figura 18.

Figura 18: Saturação de pilar com saco de aniagem



Fonte: Helene (1992)

A aderência é facilitada pelo próprio processo de jateamento, entretanto, é preciso escarificar o pilar original, retirando o material solto e segregado até atingir o concreto são, obtendo uma superfície coesa e rugosa. Esse procedimento pode ser feito de forma manual (com uso de ponteiro, talhadeira e marreta) ou mecânica (com uso de rebarbador eletromecânico). Após a escarificação, é preciso efetuar limpeza para remoção do pó.

6.3 PREPARAÇÃO DO CONCRETO

O concreto utilizado para o reforço possui 5 MPa a mais que o concreto antigo para prevenir a aparição de fissuras por retração (Takeuti, 1999). A preparação é feita com traço em massa 1 de cimento para 2 a 2,5 de areia mais agregados graúdos, com dimensão máxima característica de 19mm e relação água/cimento de 0,35 a 0,50 (Helene, 1992).

6.4 INSERÇÃO DE ARMADURA E APLICAÇÃO DO CONCRETO

A Figura 19 mostra como a armadura do reforço deve ficar posicionada. Para aplicar o concreto após a inserção da armadura de reforço, Helene (1992) indica que a viga seja furada para ancoragem das barras longitudinais em uma profundidade maior ou igual a 6 cm. Limpe-se os furos a seco e chumba-se as barras com adesivo para ancoragem a base de resina poliéster.

Figura 19: Posicionamento da armadura do reforço



Fonte: M2P Engenharia (2021)

É necessário utilizar espaçadores para afastar as armaduras (longitudinal e transversal) do núcleo e para garantir o cobrimento. A projeção do concreto é iniciada pelos cantos e pelas cavidades, revestindo a seguir as armaduras e formando camadas sequenciais com espessuras menores que 5cm até atingir a espessura desejada. É indicado, também, que se utilize aditivo acelerador de pega.

A retirada do excesso de concreto para acabamento da superfície pode ser feita mediante sarrafeamento. Além disso, o processo de cura acontece durante os primeiros 14 dias, podendo ser a execução tradicional de cura úmida ou por aplicação de aditivo redutor de retração para argamassas e concretos.

Após o trecho executado na primeira elevação apresentar resistência adequada, inicia-se o mesmo procedimento para o próximo trecho, e assim sucessivamente até o término do reforço.

É importante destacar a possibilidade de se reforçar a fundação, já que o reforço do pilar contribuirá como uma carga permanente. Além disso, pode ser analisado a viabilidade de se reforçar somente as elevações inferiores, já que as cargas são menores nos pavimentos superiores e o f_{ck} atingido pode ser suficiente para suportá-las.

7 CONCLUSÃO

Todo procedimento de execução de reforço estrutural deve ser estudado cuidadosamente antes de ser iniciado. Em geral, para se evitar o uso de sistemas de escoramento em vários pavimentos, sugere-se que a execução do reforço seja feita por etapas (elevações). Assim, em cada pavimento, devem ser escoradas as vigas no entorno do pilar, de modo que a remoção de parte do concreto do pilar não cause impactos negativos no restante da estrutura.

No dimensionamento apresentado, o pilar central do reservatório foi reforçado com acréscimo de 6 barras de aço CA-50 com bitola de 8mm, além de um aumento da seção transversal com 1900cm² de concreto com $f_{ck} = 35 MPa$, valores necessários para a recuperação da capacidade de carga do elemento.

Por mais que esse método altere a geometria da estrutura, neste caso não havia restrições arquitetônicas, o que tornou o procedimento viável. Sobre os aspectos executivos, os cuidados se voltam para o planejamento do escoramento, uma vez que o pilar já tinha perdido a capacidade de carga e, no momento na execução, sofreu perda de área de concreto (pelo processo de escarificação). Nesse aspecto, é necessário executar esse tipo de trabalho com mão-de-obra devidamente qualificada.

Outro ponto importante a se considerar é que cada trecho do pilar foi reforçado isoladamente, sendo necessário aguardar o alcance da resistência adequada antes de partir para o próximo trecho.

Torna-se extremamente recomendável que, durante a fase de execução do reforço, haja um monitoramento e uma interação entre o projetista estrutural e a equipe de campo, de modo a evitar situações de riscos nas quais a segurança da estrutura se encontra comprometida.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se verificar uma situação de reforço estrutural em pilares de extremidade e de canto. Também, confrontar os resultados com reforço utilizando perfis metálicos.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 15696:2009 Formas e escoramentos para estruturas de concreto — Projeto, dimensionamento e procedimentos executivos**. São Paulo: ABNT, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 6118:2014 Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. São Paulo: ABNT, 2014.
- AGUIAR, E. A. B. **Projeto de Pilares de Concreto de Alto Desempenho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos. 2000.
- CARVALHO, R. C; PINHEIRO, L. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. São Paulo: Pini, v. 2, 2009.
- COMISSÃO DE PERITOS. **Parecer Técnico de Análise das Causas do Desabamento do Edifício Coroa do Meio**. Conselho Regional de Engenharia e Agronomia - CREA-SE. Aracaju. 2014.
- CONDÉ, E. dos R. **Patologias em Pilares de Concreto Armado**, 2018. Disponível em: <<https://www.engenheirodeestruturas.com.br/patologia-pilar-concreto>>. Acesso em 10 de julho de 2021.
- COUTO, D.; ÁVILA, J.A.; BRITZ, C.; HELENE, P. Como Reforçar Pilares em Concreto Armado Sem Mudar a Sua Concepção Arquitetônica? **IBRACON**, Belo Horizonte, Outubro 2016.
- DESIMONE, M. R. **Trincas em paredes, pilares e lajes**, 2010. Disponível em: <<https://www.sindiconet.com.br/informese/trincas-em-paredes-pilares-e-lajes-manutencao-checkup-e-inspecao-predial>>. Acesso em: 10 de julho de 2021.
- FIGUEIREDO, A. D. D. **Concreto projetado: fatores intervenientes no controle da qualidade do processo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 1992.
- FREITAS, C. **Engenheiros e pedreiro do Edifício Andrea vão responder por homicídio com dolo eventual, em Fortaleza. G1 Ceará**, 2021. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2021/04/27/engenheiros-e-pedreiro-do-edificio-andrea-va-responder-por-homicidio-com-dolo-eventual-e-va-ser-julgados-por-tribunal-do-juri-em-fortaleza.ghtml>>. Acesso em: 10 maio 2021.

FUSCO, P. B. **Estruturas de Concreto: Solicitações Normais**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A, 1981.

GONÇALVES, E. A. B. **Estudo de patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2015.

GRAZIANO, F. P. **Recuperação de Estruturas – Reforço em pilares**. São Paulo: [s.n.], 2005.

HELENE, P. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

JAQUES, E. **Rachaduras no imóvel: quando devo me preocupar?**, 2020. Disponível em: <<https://www.idealjr.com/post/rachaduras-no-imovel-quando-devo-me-preocupar>>. Acesso em: 10 de julho de 2021.

LOTTERMANN, A. F. **Patologias em estruturas de concreto: estudo de caso**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí. 2013.

M2P ENGENHARIA. **Execução de Recuperação e Reforço Estrutural de Pilar de Concreto – Copacabana / RJ**, 2021. Disponível em: <<https://www.m2pengenharia.com/portfolio/execucao-de-recuperacao-e-reforco-estrutural-de-pilar-de-concreto-copacabana-rj/>>. Acesso em: 10 de julho de 2021

MIOTTO, D. **Estudo de caso de patologias observadas em edificação escolar estadual no município de Pato Branco-PR**. Monografia (Pós-graduação em Construção de Obras Públicas) - Universidade Federal do Ceará. Pato Branco-PR. 2010.

MOURA, M. **Reforço estrutural em estruturas de concreto armado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa. Alegrete - RS. 2013.

PRÉDIO de quatro andares desaba em Aracaju. **Revista VEJA**, 2014. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/brasil/predio-de-quatro-andares-desaba-em-aracaju/>>. Acesso em: 10 de julho de 2021.

SOUZA, V. C. M. D.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

TAKEUTI, A. R. **Comportamento resistente imediato e ao longo do tempo de pilares reforçados por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho**. Tese

(Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos. 2003.

TAKEUTI, A. R. **Reforço de pilares de concreto armado por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo. São Carlos. 1999.

TRÊS pessoas são indiciadas pelo desabamento do edifício Andrea em Fortaleza. **Secretaria da Segurança Pública e defesa social do Ceará**, 2020. Disponível em: <<https://www.sspds.ce.gov.br/2020/01/30/tres-pessoas-sao-indiciadas-pelo-desabamento-do-edificio-andrea-em-fortaleza/>>. Acesso em: 10 maio 2021.

VIEIRA, J. B. R. G. **Estudo sobre dimensionamento de reforço de pilar**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília. Brasília. 2015.