



CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JOSÉ HENDRYX SANTANA XIMANGO

**COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE REFORÇO ESTRUTURAL
APLICADOS EM PILARES DE CONCRETO ARMADO**

FORTALEZA

2020

JOSÉ HENDRYX SANTANA XIMANGO

**COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE REFORÇO ESTRUTURAL
APLICADOS EM PILARES DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Faculdade Ari de Sá.

Orientador: Prof. Me. Ésio Magalhães Feitosa Lima.

Coorientador: Prof. Me. Jeferson Spiering Böes.

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Faculdade Ari de Sá
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

X1c Ximango, José Hendryx Santana.

Comparativo entre os métodos de reforço estrutural aplicados em pilares de concreto armado / José Hendryx Santana Ximango. – 2020.

85 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade Ari de Sá, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2020.

Orientação: Prof. Me. Ésio Magalhães Feitosa Lima.

Coorientação: Prof. Me. Jeferson Spiering Bões.

1. Reforço Estrutural. 2. Concreto Armado. 3. Pilares. 4. Fissuras. 5. Manifestações Patológicas. I.
Titulo.

CDD 620

JOSÉ HENDRYX SANTANA XIMANGO

**COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE REFORÇO ESTRUTURAL
APLICADOS EM PILARES DE CONCRETO ARMADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Faculdade Ari de Sá.

Orientador: Prof. Me. Écio Magalhães Feitosa Lima.

Coorientador: Prof. Me. Jeferson Spiering Böes.

Aprovada em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Écio Magalhães Feitosa Lima
Faculdade Ari de Sá

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita
Universidade Federal do Ceará

Prof. Me. Francisca Lilian Cruz Brasileiro
Faculdade Ari de Sá

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela minha vida e por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Aos meus pais, Silvana Maria Pereira Santana e José Rodrigues Ximango, que sempre estiveram ao meu lado me incentivando e apoiando ao longo de toda a minha trajetória, pela minha educação, pelo amor incondicional e por serem exemplos de determinação. Essa monografia é prova de que seus esforços pela minha educação valeram a pena.

À minha família, por todo apoio e ajuda que sempre me deram durante toda a minha vida.

Aos professores Ézio Magalhães Feitosa Lima e Jeferson Spiering Bões, por aceitarem o convite de orientar este trabalho e pelas valiosas contribuições dadas ao longo da graduação.

À Faculdade Ari de Sá e seu corpo docente, que oportunizaram um ensino de qualidade durante os anos de curso.

Aos meus amigos, companheiros de trabalhos e estudos, que fizeram parte da minha formação.

A todos que participaram, de forma direta ou indiretamente, da minha formação e do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu aprendizado.

RESUMO

XIMANGO, J. H. S. **Comparativo entre os métodos de reforço estrutural aplicados em pilares de concreto armado.** 2020. TCC (Graduação) – Faculdade Ari de Sá, Fortaleza, 2020.

Muitas estruturas obsoletas construídas em concreto armado estão chegando no limite de sua vida útil, outras, apesar de recentes, apresentam manifestações patológicas que estão degradando seus elementos estruturais, em ambos os casos, essas estruturas necessitam de reforço para garantir seu desempenho e a segurança de seus usuários. Os pilares, por serem elementos fundamentais e mais solicitados em uma estrutura, necessitam de atenção especial em caso de deterioração, sendo de fundamental importância a realização de um reforço para garantir a estabilidade de todos os elementos estruturais. Os indícios iniciais de que uma estrutura de concreto armado está sofrendo degradação são os aparecimentos de fissuras, que podem comprometer o aspecto estético e a capacidade resistente do elemento estrutural. Nos últimos anos, surge uma grande demanda para reforçar e sanar a aparição de manifestações patológicas, além de garantir e estender a durabilidade das estruturas de concreto armado, necessitando de contínuos aperfeiçoamentos das técnicas de reforço para este objetivo. No decorrer dos anos, várias técnicas de reforço foram surgindo, introduzindo novos materiais além do concreto armado, como a fibra de carbono e chapas metálicas. A escolha da técnica de recuperação mais adequada deve ser realizada após uma avaliação criteriosa, analisando os problemas patológicos apresentados pela estrutura, além de fatores como disponibilidade tecnológica e relação custo/benefício. Apesar do constante aperfeiçoamento das técnicas de reforço estrutural, os métodos ainda se baseiam na experiência empírica acumulada, uma vez que cada problema enfrentado tem suas próprias características. Além de mostrar os mais recorrentes tipos de manifestações patológicas que podem ocorrer em pilares de concreto armado, este trabalho focará nestes três tipos de intervenções: reforço estrutural através do método de aumento da seção transversal com concreto armado, da colagem de mantas de fibra de carbono e de chapas metálicas aderidas com epóxi. Assim como, procura-se explicar como funciona o processo executivo destes métodos de reforço, bem como apresentar um modelo de dimensionamento para cada e no fim, realizar um comparativo de qual método de reforço é mais indicado para cada manifestação patológica observada e para cada tipo de geometria da seção transversal do pilar que receberá a intervenção.

Palavras-chave: Reforço Estrutural. Concreto Armado. Pilares. Fissuras. Manifestações Patológicas.

ABSTRACT

XIMANGO, J. H. S. **Comparison between structural reinforcement methods in reinforced concrete columns**. 2020. Faculdade Ari de Sá, Fortaleza, 2020.

Many obsolete structures built in reinforced concrete are reaching the limit of their useful life, others, although recent, present pathological manifestations that are degrading their structural elements, in both cases, these structures need reinforcement to guarantee their performance and the safety of their users. The columns, for being fundamental elements and more requested in a structure, need special attention in case of deterioration, being of fundamental importance the accomplishment of a reinforcement to guarantee the stability of all the structural elements. The initial signs that a reinforced concrete structure is suffering degradation are the appearance of cracks, which can compromise the aesthetic aspect and the resistant capacity of the structural element. In recent years, there has been a great demand to reinforce and remedy the appearance of pathological manifestations, besides guaranteeing and extending the durability of reinforced concrete structures, requiring continuous improvement of reinforcement techniques for this purpose. Over the years, several reinforcement techniques have appeared, introducing new materials besides reinforced concrete, such as carbon fiber and metal sheets. The choice of the most adequate recovery technique should be made after a careful evaluation, analyzing the pathological problems presented by the structure, besides factors such as technological availability and cost/benefit ratio. Despite the constant improvement of the structural reinforcement techniques, the methods are still based on accumulated empirical experience, since each problem faced has its own characteristics. Besides showing the most recurrent types of pathological manifestations that can occur in reinforced concrete columns, this work will focus on these three types of interventions: structural reinforcement through the method of increasing the cross section with reinforced concrete, the gluing of carbon fiber blankets and metal sheets adhered with epoxy. As well as explaining how the executive process of these reinforcement methods works, as well as presenting a dimensioning model for each and at the end, carrying out a comparison of which reinforcement method is most suitable for each pathological manifestation observed and for each type of geometry of the column cross section that will receive the intervention.

Keywords: Structural Reinforcement. Reinforced Concrete. Columns. Cracks. Pathological Manifestations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação do pilar de acordo com sua localização.....	22
Figura 2 - Solicitações presentes nos pilares de acordo com sua localização.....	23
Figura 3 - Disposição das armaduras em um pilar.....	23
Figura 4 - Fissuras de falsa pega.....	26
Figura 5 - Fissuras de assentamento plástico.....	27
Figura 6 - Fissuras causadas pela segregação do concreto em pilar.....	28
Figura 7 - Fissura causada pela ausência de junta de dilatação em pilar.....	29
Figura 8 - Evolução da carbonatação no concreto.....	30
Figura 9 - Pilar com camada externa carbonatada.....	31
Figura 10 - Evolução do processo de corrosão.....	32
Figura 11 - Pilar com fissuras causadas por expansão devido corrosão das armaduras.....	32
Figura 12 - Pilar degradado por ataque de cloretos.....	34
Figura 13 - Pilar degradado pela ação de sulfatos.....	35
Figura 14 - Fissuras causadas por flexão.....	36
Figura 15 - Fissuras causadas por tração.....	37
Figura 16 - Fissura causada por esforço cortante.....	38
Figura 17 - Fissuras causadas pelo esmagamento do concreto.....	39
Figura 18 - Fissuras devido à flambagem das barras.....	39
Figura 19 - Diferentes desempenhos de uma estrutura de acordo com diferentes fenômenos patológicos.....	41
Figura 20 - Reforço por aumento da seção transversal com concreto armado.....	44
Figura 21 - Modelagem de um pilar com seção transversal danificada.....	45
Figura 22 - Disposição das variadas formas de aumento da seção transversal.....	46
Figura 23 - Escoramento em volta de um pilar que será reforçado.....	47
Figura 24 - Reentrâncias e saliências em toda altura do pilar que será reforçado.....	48
Figura 25 - Aplicação de produto neutralizador de corrosão.....	48
Figura 26 - Inserção das novas armaduras transversais e longitudinais.....	49
Figura 27 - Montagem das formas executada (esquerda) e Representação do cachimbo (direita).....	50
Figura 28 - Pilares reforçados através de chapas metálicas.....	52
Figura 29 - Escoramento próximo de pilar que será reforçado.....	54
Figura 30 - Aplicação da resina epóxi para maior aderência das chapas.....	55
Figura 31 - Base metálica no trecho inferior do pilar (esquerda) e Pilar com capitel metálico no topo e base metálica no trecho inferior (direita).....	56
Figura 32 - Exemplos de fixação das chapas metálicas.....	57
Figura 33 - Diagrama de tensão normal x deformação específica.....	60
Figura 34 - Pilares reforçados através da colagem externa de manta de fibra de carbono.....	61
Figura 35 - Camadas de um pilar reforçado com FRP.....	62
Figura 36 - Pilar reforçado com encamisamento contínuo (esquerda) e discreto (direita).....	63

Figura 37 - Correção da superfície de concreto que receberá o reforço.....	64
Figura 38 - Aplicação do imprimador epoxídico.....	64
Figura 39 - Aplicação das camadas de mantas de fibra de carbono.....	65
Figura 40 - Aplicação da resina sobre a primeira camada (esquerda) e aplicação da segunda camada (direita).....	65
Figura 41 - Aplicação da manta para reforço para flexão e reforço para confinamento.....	66
Figura 42 - Distribuição da pressão de confinamento antes e depois do reforço com CFRP e arredondamento dos cantos em seções quadradas.....	67
Figura 43 - Distribuição da pressão de confinamento antes e depois do reforço com CFRP e arredondamento dos cantos em seções retangulares.....	68
Figura 44 - Seções transversais ensaiadas.....	69
Figura 45 - Tensão x deformação de pilares de seção transversal circular e quadrada reforçados com FRP.....	69
Figura 46 - Representação do pilar estudado.....	73
Figura 47 - Representação em corte de uma cantoneira metálica.....	76
Figura 48 - Seção transversal do pilar estudado reforçado pela técnica EBR (esquerda), Seção transversal do pilar estudado reforçado por cantoneiras metálicas (meio) e Seção transversal do pilar estudado reforçado por encamisamento com concreto armado (direita).....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores do coeficiente de redução ambiental para fibra de carbono.....	71
Tabela 2 – Propriedades do perfil da cantoneira metálica escolhida para o reforço.....	76
Tabela 3 – Comparativo entre os métodos de reforço considerando a mesma capacidade resistente.....	77
Tabela 4 – Métodos de reforço recomendados para cada tipo de fissura encontrada.....	79
Tabela 5 – Métodos de reforço recomendado para cada tipo de seção transversal.....	80

LISTA DE SIGLAS

EBR	<i>Externally Bonded Reinforcement</i>
PRF	Polímeros Reforçados com Fibras
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i>
FRP	<i>Fiber Reinforced Polymer</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Nd	Força normal de compressão
fck	Resistência característica do concreto à compressão
Fu	Capacidade resistente
A	Área
Acr	Área da seção transversal de concreto de reforço
Ac	Área da seção transversal do concreto
Ar	Área total da seção transversal das cantoneiras de reforço
As	Área da seção transversal das barras de aço
Fy	Resistência do aço
$Fcmr$	Resistência média do concreto de reforço
Fcm	Resistência média do concreto
$A's$	Soma das áreas das seções transversais das barras de aço e perfis metálicos
F	Força
Fr	Força resistida pelas cantoneiras de reforço
Fp	Força resistida pelo maciço do pilar
ΔF	Acréscimo de força
ε	Deformação
L	Comprimento
ΔL	Variação do comprimento
Lr	Comprimento longitudinal das cantoneiras de reforço
Lp	Comprimento longitudinal do pilar
σ	Tensão
E	Módulo de elasticidade ou de Young
Er	Módulo de elasticidade do aço das cantoneiras de reforço
Ec	Módulo de elasticidade do concreto
f_{fu}	Valor de projeto de tensão última do FRP
ε_{fu}	Valor de projeto de deformação axial última do FRP
f_{fu}^*	Tensão máxima à tração do FRP
ε_{fu}^*	Deformação axial do FRP
Ce	Coefficiente de redução ambiental
ε_{fe}	Deformação efetiva do FRP

k_s	Coeficiente de eficiência da deformação
f_l	Pressão de confinamento última
E_f	Módulo de Elasticidade do FRP
t_f	Espessura do compósito
D	Diâmetro do pilar
n	Número de camadas do compósito
f_{ccu}	Tensão de compressão última do concreto confinado
ψ_f	Coeficiente de redução de resistência
κ_a	Coeficiente de redução devido à forma da seção transversal
ε_{ccu}	Deformação última do concreto confinado
ϕP_n	Força resistente do pilar reforçado
ϕ	Coeficiente de redução de resistência

LISTA DE EQUAÇÕES

- Equação (1) Capacidade resistente do modelo de reforço por encamisamento com concreto armado
- Equação (2) Verificação da área da seção transversal das chapas metálicas de reforço
- Equação (3) Equação da deformação
- Equação (4) Equação da tensão
- Equação (5) Equação do módulo de elasticidade ou de Young
- Equação (6) Equação do módulo de elasticidade manipulada
- Equação (7) Variação do comprimento longitudinal de um material
- Equação (8) Variação do comprimento longitudinal do conjunto pilar-chapas metálicas
- Equação (9) Cálculo da área total da seção transversal das cantoneiras utilizadas como reforço
- Equação (10) Valor de projeto de tensão última do FRP
- Equação (11) Valor de projeto de deformação axial última do FRP
- Equação (12) Deformação efetiva do FRP
- Equação (13) Pressão de confinamento última de pilar de seção circular
- Equação (14) Tensão de compressão última do concreto confinado
- Equação (15) Força resistente do pilar reforçado com FRP

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 JUSTIFICATIVA.....	18
1.2 OBJETIVOS.....	19
1.2.1 Objetivo Geral.....	19
1.2.2 Objetivos Específicos.....	19
2 CONCRETO ARMADO.....	20
2.2 PILARES.....	21
3 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS.....	24
3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS.....	24
3.1.1 Causas Intrínsecas.....	24
3.1.2 Causas Extrínsecas.....	25
3.2 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM PILARES DE CONCRETO ARMADO.....	25
3.2.1 Fissuras Originadas por Fenômenos Físicos.....	26
3.2.1.1 Fissuras de falsa pega.....	26
3.2.1.2 Fissuras de assentamento plástico.....	27
3.2.1.3 Fissuras causadas pela segregação do concreto.....	27
3.2.1.4 Fissuras causadas pela ausência de juntas de dilatação.....	28
3.2.2 Fissuras Originadas Por Agentes Químicos.....	29
3.2.2.1 Carbonatação do concreto.....	29
3.2.2.2 Fissuras causadas pela corrosão das armaduras.....	31
3.2.2.3 Fissuras causadas por ataques de cloretos.....	33
3.2.2.4 Fissuras causas por ataques por sulfatos.....	34
3.2.3 Fissuras Originadas Por Ações Mecânicas.....	36
3.2.3.1 Fissuras causadas por flexão.....	36
3.2.3.2 Fissuras causadas por tração.....	37
3.2.3.3 Fissuras causadas por esforço cortante.....	37
3.2.3.4 Fissuras causadas por esmagamento do concreto.....	38
3.2.3.5 Fissuras causadas por flambagem.....	39
4 REFORÇO ESTRUTURAL.....	41
4.1 ESCOLHA DA TÉCNICA.....	43
4.2 REFORÇO PELO AUMENTO DA SEÇÃO TRANSVERSAL COM CONCRETO ARMADO.....	44
4.2.1 Execução do Reforço.....	46
4.2.2 Cálculo da capacidade resistente de um pilar reforçado por encamisamento.....	50
4.3 REFORÇO ATRAVÉS DE CHAPAS METÁLICAS ADERIDAS COM EPÓXI.....	52
4.3.1 Execução do Reforço.....	53
4.3.2 Verificação da área da seção transversal das chapas metálicas utilizadas como reforço.....	57
4.3.3 Dimensionamento do reforço através de chapas metálicas aderidas com epóxi.....	58
4.4 REFORÇO POR COLAGEM DE MANTA DE FIBRA DE CARBONO.....	60

4.4.1 <i>Externally Bonded Reinforcement</i> (EBR).....	61
4.4.1.1 Execução do reforço.....	63
4.4.1.2 Comportamento do reforço em pilares de seção retangular e circular.....	67
4.4.1.3 Dimensionamento do reforço através da técnica EBR.....	70
5 COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE REFORÇO ESTRUTURAL ESTUDADOS.....	73
5.1 Reforço através da técnica EBR.....	73
5.2. Reforço através de chapas metálicas aderidas com epóxi.....	75
5.3 Reforço por encamisamento com concreto armado.....	76
5.4 Resumo dos dimensionamentos.....	77
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

Os elementos estruturais de uma edificação têm a função de assegurar sua integridade e desempenho durante sua vida útil estipulada em projeto, no caso de estruturas de concreto armado, podendo chegar a 75 anos.

Ao sofrerem deterioração, as estruturas de concreto armado têm o seu aspecto estético e sua capacidade resistente comprometidos. Além disso, estas estruturas também são prejudicadas no que se refere ao atendimento dos requisitos básicos de desempenho, durabilidade e vida útil desejados (SANTOS, 2012).

Segundo Takeuti (1999), a consequência dessas deteriorações está relacionada aos níveis de qualidade de uso (Estado Limite de Serviço), que gera desconforto aos usuários, e à estabilidade das estruturas (Estado Limite Último), podendo chegar até mesmo a um colapso total da estrutura.

Ocasionalmente, as estruturas de concreto armado precisam de reforços para garantir sua segurança e estender sua durabilidade. Os indícios iniciais de que uma estrutura de concreto armado está sofrendo degradação são os aparecimentos de fissuras, essa manifestação patológica pode estar relacionada com a degradação natural do concreto no decorrer do tempo, aumento das solicitações, como momento, compressão, tração, cisalhamento ou flexão; mudança de utilização da estrutura e erros de projetos e execução.

O concreto armado também pode sofrer deterioração por ação de agentes químicos, como fissuras originadas pela corrosão das armaduras, ataques de sulfatos, cloretos ou ácidos em locais com agressividade ambiental elevada.

Dito isto, nos últimos anos, surge uma grande demanda para reforçar, sanar a aparição de manifestações patológicas, além de garantir e estender a durabilidade de pilares de concreto armado, foco deste trabalho, necessitando de contínuos aperfeiçoamentos das técnicas de reforço para este objetivo.

Segundo a NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto: Procedimento (ABNT, 2014), o pilar é um elemento linear de eixo reto, usualmente disposto na vertical, em que as forças normais de compressão são preponderantes. E, de acordo com Clímaco (2008), na análise estrutural de uma edificação, os pilares se destacam em grau de importância, pois são utilizados para transpor as ações dos pavimentos para as fundações, garantindo o equilíbrio estrutural nas edificações com estruturas convencionais de concreto.

Em estudo realizado por Sussekind (1984, *apud*. TRAZZI e GIANDON, 2016), os pilares foram considerados as peças de maior responsabilidade da estrutura, pois qualquer ruptura pode ser de difícil recuperação, diferente das vigas e lajes.

De acordo com Santos (2017), a escolha da técnica de recuperação de pilares mais adequada deve ser realizada após uma avaliação criteriosa, analisando os problemas patológicos apresentados pelo elemento estrutural, além de fatores como disponibilidade tecnológica e relação custo/benefício. Além disso, Helene (1988) ressalta que a escolha da técnica de correção a ser empregada depende não só do diagnóstico do problema, mas também das características da região a ser corrigida e das exigências de funcionamento do elemento que será objeto da correção.

Além de mostrar os mais recorrentes tipos de manifestações patológicas que podem ocorrer em pilares de concreto armado, este trabalho focará nestes três tipos de intervenções: reforço estrutural através do método de aumento da seção transversal com concreto armado, da colagem de mantas de fibra de carbono e de chapas metálicas aderidas com epóxi. Assim como, procura-se explicar como funciona o processo executivo destes métodos de reforço, bem como apresentar um modelo de dimensionamento para cada e no fim, realizar um comparativo de qual método de reforço é mais indicado para cada manifestação patológica observada e para cada tipo de geometria da seção transversal do pilar que receberá a intervenção.

1.1 JUSTIFICATIVA

Muitas estruturas obsoletas construídas em concreto armado estão chegando no limite de sua vida útil, outras, apesar de recentes, apresentam manifestações patológicas que estão degradando seus elementos estruturais, em ambos os casos, essas estruturas necessitam de reforço para garantir seu desempenho e a segurança de seus usuários.

No decorrer dos anos, várias técnicas de reforço foram surgindo, introduzindo novos materiais além do concreto armado, como a fibra de carbono e chapas metálicas.

Segundo Takeuti (1999), apesar do constante aperfeiçoamento das técnicas de reforço estrutural, os métodos se baseiam na experiência empírica acumulada, uma vez que cada problema enfrentado tem suas próprias características. Além disto, em muitos casos não existe uma metodologia específica de análise de comportamento estrutural da peça reabilitada, nem diretrizes que orientem o projetista durante o processo de redimensionamento e reprojeto.

Nesse contexto, é de extrema importância e necessidade estudos voltados para entender e aperfeiçoar métodos e execuções das técnicas de reforço de estruturas de concreto armado, neste caso, de pilares, visando uma contribuição ao meio científico da área.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Comparar os métodos de reforço estrutural aplicados em pilares de concreto armado (aumento da seção transversal com concreto armado, chapas metálicas aderidas com epóxi e colagem de manta de fibra de carbono) de acordo com o respectivo modelo de dimensionamento apresentado, bem como detalhar seus processos executivos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Apresentar um modelo de dimensionamento para cada método de reforço abordado.
- Evidenciar a importância dos pilares para a estabilidade global de uma estrutura.
- Indicar o(s) método(s) de reforço mais interessante(s) para cada tipo de manifestação patológica encontrada.
- Indicar o(s) método(s) de reforço recomendado(s) para cada tipo de geometria da seção transversal do pilar que receberá a intervenção.
- Listar os fatores que se devem levar em consideração na escolha da melhor técnica de reforço estrutural.
- Listar os tipos de fissuras mais recorrentes em pilares de concreto armado e explicar suas origens.

2 CONCRETO ARMADO

Segundo Graziano (2005), o concreto é um material que no estado fresco é bastante plástico, podendo ser moldado em quase qualquer forma, e após o tempo de cura, tem ótima resistência à compressão.

Porém, sua resistência à tração é pequena, cerca de 10 vezes menor que a resistência à compressão, o que gera a necessidade de associação com algum outro material para suprir essa deficiência, e poder absorver os esforços de tração nas estruturas. Esse material é o aço, uma liga formada por ferro e carbono, que possui grande resistência à tração, entretanto, necessita de proteção contra a corrosão. Assim, juntando as barras de aço e o concreto tem-se o chamado concreto armado.

Segundo Carvalho e Filho (2014), as principais características estruturais do concreto armado que o fazem ser amplamente utilizado na construção civil são:

- a) Boa resistência à maioria das solicitações;
- b) Boa trabalhabilidade, que garante a adaptação às diversas formas;
- c) Estrutura monolítica, pela aderência entre o concreto e o aço;
- d) Material com durabilidade e resistência ao fogo superiores à madeira e ao aço, desde que bem executado e de acordo com as normas;
- e) Resistência a choques, vibrações, efeitos térmicos, atmosféricos e desgastes mecânicos.

Segundo Beber (2003), juntamente com o advento do concreto surgiu a demanda pelo reforço estrutural como uma resposta aos diversos problemas das construções. As estruturas de concreto são muito utilizadas pelo fato de serem otimizadas do ponto de vista estrutural e econômico. Entretanto, são mais sensíveis a qualquer defeito dos materiais, da execução ou do cálculo, podendo gerar situações de risco.

Modificações, envelhecimento natural e a deterioração por meio de ações de agentes agressivos alteram as condições iniciais consideradas no projeto original (BEBER, 2003). Depois de consolidada a estrutura, é difícil reajustar o concreto, principalmente em relação à sua capacidade de carga.

2.2 PILARES

Resolveu-se estudar os pilares de concreto armado pela importância exercida por eles no conjunto da estrutura. Em uma estrutura, os esforços atuantes nas vigas e lajes de uma edificação são transferidos para os pilares, e assim são transmitidos dos andares superiores para os elementos inferiores até a fundação (PINHEIRO, 2007).

Nesse contexto, os pilares tem fundamental importância na estabilidade global de uma edificação, segundo Clímaco (2008), uma estrutura é conjunto das partes resistentes de uma edificação. A superestrutura de uma edificação se subdivide em três categorias, de acordo com a finalidade e a responsabilidade na segurança da edificação:

- A **estrutura terciária** tem como finalidade de suportar a aplicação direta das cargas distribuídas em superfície e é composta pelas lajes.
- Uma **estrutura secundária**, composta pelas vigas, confere resistência localizada às diferentes partes da construção e recebe cargas diretas ou apenas as reações da estrutura terciária.
- A **estrutura primária**, composta pelos pilares, tem a finalidade de garantir a resistência global da construção.

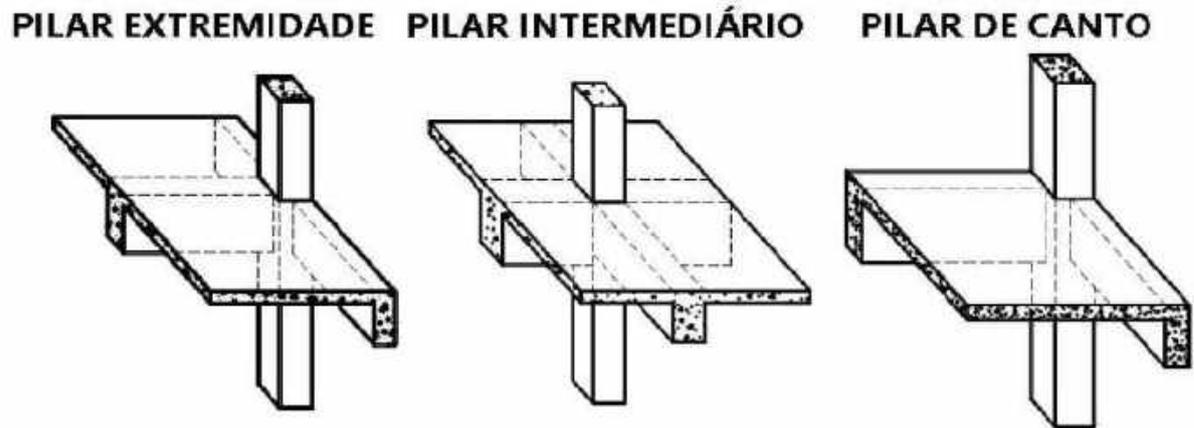
A NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, define os elementos estruturais básicos de acordo com a sua forma geométrica e função estrutural. Os pilares são considerados como “elementos lineares de eixo reto, usualmente dispostos na vertical, em que as forças normais de compressão são preponderantes”. Os elementos lineares são aqueles em que o comprimento longitudinal é pelo menos três vezes maior que a dimensão da seção transversal (ABNT, 2014).

De acordo com Bastos (2015), os pilares também podem ser classificados em três tipos de acordo com sua localização dentro da estrutura (Figura 1) e solicitações atuantes (Figura 2):

- **Pilar de canto:** encontram-se posicionados nos cantos dos edifícios. Na situação de projeto, ocorre a flexão composta oblíqua, decorrente da não continuidade das vigas apoiadas no pilar. Existem, portanto, os momentos fletores de 1ª ordem nas duas direções do pilar;
- **Pilar intermediário:** considera-se a compressão centrada na situação de projeto, pois como as lajes e vigas são contínuas sobre o pilar, pode-se admitir que os momentos fletores transmitidos ao pilar sejam pequenos e desprezíveis. Não existem, portanto, os momentos fletores de 1ª ordem nas extremidades do pilar;

- **Pilar de extremidade:** encontram-se posicionados nas bordas das edificações. O termo advém do fato do pilar ser extremo para uma viga, aquela que não tem continuidade sobre o pilar. Na situação de projeto, ocorre a flexão composta normal, decorrente da não continuidade da viga. Existem, portanto, os momentos fletores de 1ª ordem em uma direção do pilar.

Figura 1 - Classificação do pilar de acordo com sua localização.

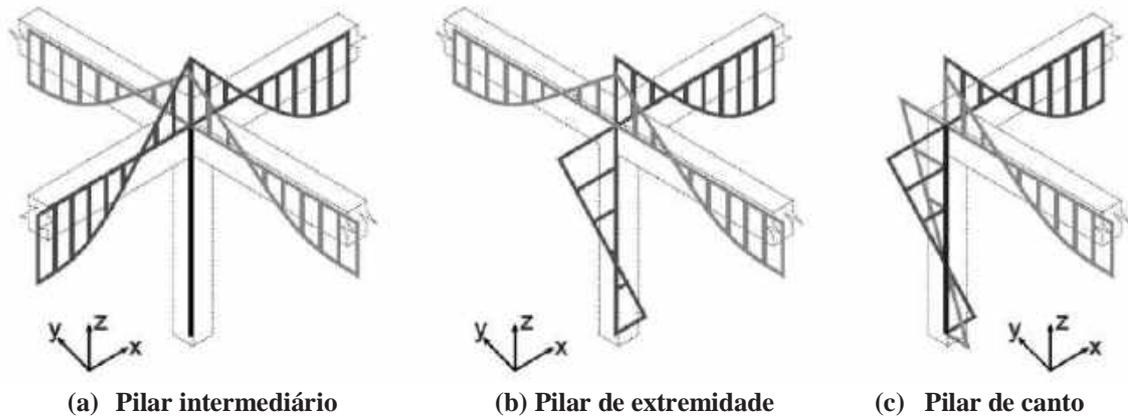


Fonte: Bastos (2015).

Ainda de acordo com Bastos (2015), os pilares podem estar submetidos à forças normais e momentos fletores, gerando os seguintes casos de solicitação:

- **Compressão simples:** também chamada compressão centrada ou compressão uniforme. A aplicação da força normal Nd é no centro geométrico da seção transversal do pilar, cujas tensões na seção transversal são uniformes;
- **Flexão composta:** ocorre a atuação conjunta de força normal e momento fletor sobre o pilar. Há dois casos:
 - Flexão Composta Normal: existe a força normal e um momento fletor em uma direção;
 - Flexão Composta Oblíqua: existe a força normal e dois momentos fletores, relativos às duas direções principais do pilar.
- **Flambagem:** pode ser definida como o “deslocamento lateral na direção de maior esbeltez, com força menor do que a de ruptura do material” ou como a “instabilidade de peças esbeltas comprimidas”. A ruína por efeito de flambagem é repentina e violenta, mesmo que não ocorram acréscimos bruscos nas ações aplicadas.

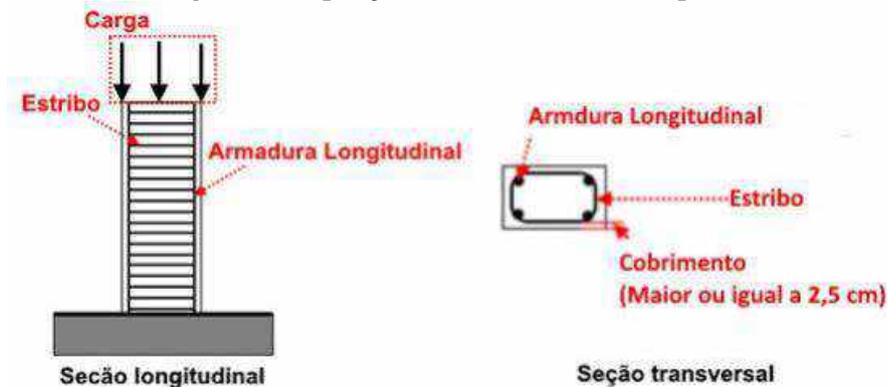
Figura 2 - Solicitações presentes nos pilares de acordo com sua localização.



Fonte: Silva (2018).

Para vencer essas solicitações, é necessário a inserção de armaduras ao longo da seção do pilar (Figura 3), a armadura longitudinal tem sempre função resistente, enquanto que, a transversal, quando espaçada corretamente, servirá apenas para evitar flambagem das barras longitudinais e mantê-las na distância prevista pelo projeto durante a execução.

Figura 3 - Disposição das armaduras em um pilar.



Fonte: Silva (2015).

No entanto, se a armadura transversal se apresentar pouco espaçada, ela terá função resistente, pois irá impedir a deformação transversal do concreto e, com isso, confinar o concreto do núcleo do pilar. No capítulo seguinte, abordaremos o conceito de manifestações patológicas, suas classificações e origens.

3 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

A palavra patologia vem do grego, onde *Pathos* significa doença e *Logos*, estudo, ou seja, estudo da doença. É o estudo sobre o surgimento de anomalias não previstas, oriundas de alguma falha involuntária ou não, que possuem origem, causa, mecanismos e sintomas, que quando não são diagnosticadas e tratadas corretamente geram prejuízos, podendo levar a estrutura a um colapso total da estrutura (SOUZA e RIPPER, 1998).

De acordo com Helene (1992), os problemas patológicos, salvo raras exceções, apresentam manifestação externa característica, a partir da qual se pode deduzir qual a natureza, a origem e os mecanismos dos fenômenos envolvidos, assim como pode-se estimar suas prováveis consequências, sendo a Patologia um campo da Engenharia que estuda as origens, as formas e as consequências das manifestações.

Essas manifestações patológicas podem ter origem na etapa de projeto, execução ou até mesmo durante a utilização da estrutura. Segundo Helene (1992), as manifestações patológicas, em geral, tendem a se agravar com o tempo, por isso, é de suma importância a detecção e correção o mais cedo possível de uma manifestação patológica, pois segundo Souza e Ripper (1998), quanto mais tarde o problema for diagnosticado, maiores serão os gastos e as dificuldades técnicas para elaboração e execução de reforços, reparos e reabilitações. Um erro corrigido na fase de projeto, apresenta uma solução muito mais simples do que uma manifestação recuperada na fase de final da obra, o que torna a solução complexa e onerosa.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

De modo geral, as causas de deterioração das estruturas são classificadas como intrínsecas e extrínsecas, sendo que todas possuem origem nas peças estruturais e materiais, ocorrendo durante as fases de execução e/ou utilização, decorrentes especificamente de falhas humanas, imperfeições ou falhas dos materiais que constituem o concreto, além de serem oriundas das ações externas (SOUZA e RIPPER, 1998).

3.1.1 Causas Intrínsecas

Souza e Ripper (1998) classificam as causas intrínsecas como aquelas em que os processos de deterioração das estruturas são inerentes a elas mesmas, ou seja, as que se originam

dos materiais e das peças estruturais, durante as fases de execução ou utilização, por falhas humanas, por questões próprias ao material concreto e por ações externas, inclusive acidentes.

3.1.2 Causas Extrínsecas

As causas extrínsecas de deterioração das estruturas são aquelas independentes do corpo estrutural em si e inerentes ao processo de execução. Essas causas são responsáveis por cerca de 60% da origem de todas as manifestações patológicas encontradas em uma estrutura. Podem ser definidas como fatores que agem nas estruturas de fora para dentro (SOUZA e RIPPER, 1998). As principais causas extrínsecas são:

- Falhas humanas durante o projeto;
- Falhas humanas durante a utilização;
- Ações mecânicas, químicas, físicas e biológicas.

3.2 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM PILARES DE CONCRETO ARMADO

As fissuras são as manifestações patológicas mais comumente encontradas em pilares de concreto armado. Segundo Cánovas (1988), as fissuras são geralmente os sintomas iniciais dos problemas patológicos e que além do próprio risco que trazem para a segurança da estrutura, também acabam por ser uma porta aberta para a ocorrência de outros problemas.

É interessante ressaltar que nem sempre a formação de fissuras pode ser sinônimo de deficiência estrutural, visto que o concreto, por ser um material com baixa resistência à tração, irá fissurar por natureza sempre que as tensões de tração superarem sua resistência. Os pilares, elementos estruturais estudados nesse trabalho, segundo Helene (1992), apresentam apenas cerca de 7% de ocorrência de fissuras em relação a estrutura como um todo.

A seguir estão descritos os tipos de fissuras que requerem mais atenção e que são mais recorrentes em pilares de concreto armado, detalhando suas respectivas origens e processo de degradação.

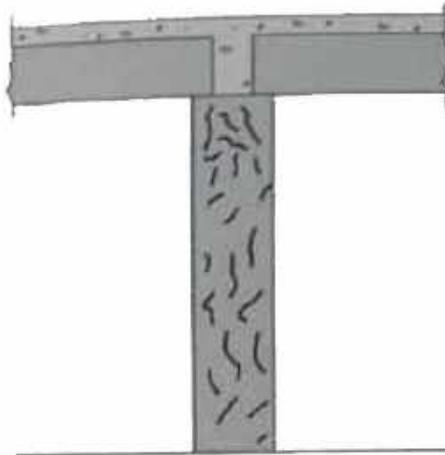
3.2.1 Fissuras Originadas por Fenômenos Físicos

Os fenômenos físicos podem ser entendidos como a variação da temperatura, insolação, vento e água e tem atuação principalmente durante o período da cura no endurecimento do concreto, variando seus efeitos conforme a composição interna da estrutura de concreto armado.

3.2.1.1 Fissuras de falsa pega

Segundo Helene (1992), as fissuras de pega ou falsa pega são causadas por cimento com excesso de anidrita (gesso anidro), por algum atraso no lançamento do concreto, calor excessivo ou umidade relativa baixa (Figura 4).

Figura 4 - Fissuras de falsa pega.



Fonte: Helene (1992).

O procedimento durante a cura do concreto pode ser realizado através de uma molhagem das formas dos pilares. Esse procedimento consiste em evitar a evaporação da água sem que as reações de hidratação do cimento tenham sido realizadas, controlando a umidade do local concretado. Se não for realizada de maneira adequada, a estrutura de concreto armado poderá sofrer danos.

Uma perda de água por evaporação trará como consequência que esta reação não ocorra de maneira completa, levando assim a uma redução da resistência mecânica do concreto,

o que pode acarretar a ocorrência de manifestações patológicas na estrutura (MARCELLI, 2007).

Caso um pilar esteja degradado pela manifestação citada é recomendado reforçar a estrutura com chapas metálicas aderidas com epóxi.

3.2.1.2 Fissuras de assentamento plástico

Segundo Helene (1992), as fissuras de assentamento plástico são causadas pelo mau adensamento do concreto, concreto muito fluido ou concretagem simultânea de pilares, vigas e lajes, ocasionando fissuras na transversal no topo do pilar, como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 - Fissuras de assentamento plástico.



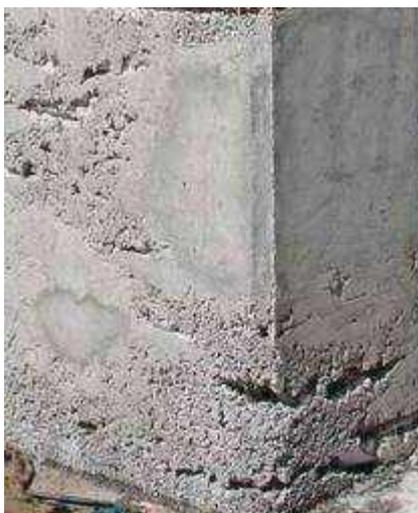
Fonte: Helene (1992).

Em caso de necessidade de reforço, é recomendado que a estrutura degradada por essa manifestação patológica seja reforçada no topo com chapas metálicas aderidas com epóxi ou por meio de encamisamento com concreto armado.

3.2.1.3 Fissuras causadas pela segregação do concreto

Para evitar fissuras relacionadas a segregação (Figura 6), é recomendado que o lançamento do concreto deve ser executado de maneira não brusca para evitar o deslocamento das armaduras de aço e deve ser lançado o mais próximo de sua destinação final para evitar a segregação do mesmo, e que a altura de queda livre não deve ultrapassar dois metros (ISAIA, 1988).

Figura 6 - Fissuras causadas pela segregação do concreto em pilar.



Fonte: Sfikas (2017).

Outra forma possível de aparecer fissuras em pilares é que durante a concretagem a pasta irá se movimentar e se acomodar naturalmente devido ao efeito da gravidade. A fissuração poderá vir ocorrer quando o concreto for impedido pelas barras de aço e o espaço entre elas for mínimo, por isso a importância de se respeitar os espaçamentos entre as barras longitudinais. A formação das fissuras será tão maior quanto mais espessa for a camada de concreto.

Para sanar as deficiências estruturais causadas pela segregação do concreto, é recomendado o reforço da peça, caso as armaduras estejam comprometidas, por meio do encamisamento com concreto armado.

3.2.1.4 Fissuras causadas pela ausência de juntas de dilatação

Segundo Thomaz (1989), os elementos estruturais que compõem uma construção estão expostos à variação de temperatura tanto sazonais como diárias, o que leva a uma variação dimensional dos mesmos (dilatação ou contração), sendo muitas vezes restringidos por vínculos que os envolvem e por consequência geram tensões que podem provocar fissuração, como pode ser observado na Figura 7.

Diante deste problema, devem ser executadas juntas de dilatação, que são elementos que consistem em uma separação entre as partes de uma estrutura para que estas possam movimentar-se sem haver transmissão de esforços de uma para outra, agindo como corpos isolados.

Figura 7 - Fissura causada pela ausência de junta de dilatação em pilar.



Fonte: Trindade (2015).

A variação de temperatura atua como fator gerador de manifestações patológicas quando não se dá atenção aos danos que ela pode levar a um elemento estrutural. Nesse caso, é recomendado reforçar o pilar com chapas metálicas aderidas com epóxi como medida de correção para a manifestação citada.

3.2.2 Fissuras Originadas Por Agentes Químicos

Essas fissuras são causadas pelas condições do meio ambiente que provocam efeitos expansivos ou retrativos dentro da massa de concreto. Segundo Mehta e Monteiro (1994), na prática, vários processos químicos deterioração atuam ao mesmo tempo, podendo até reforçarem-se mutuamente.

A corrosão da armadura é um dos mecanismos mais frequentes de degradação do concreto armado, causando efeitos negativos tanto estéticos quanto relacionados à resistência da estrutura, como a diminuição da seção da armadura, fissuração e destacamento do concreto. Uma porta de entrada para os agentes químicos que ocasionam a corrosão das armaduras é a carbonatação do concreto, processo que retira a camada passivadora da barra de aço.

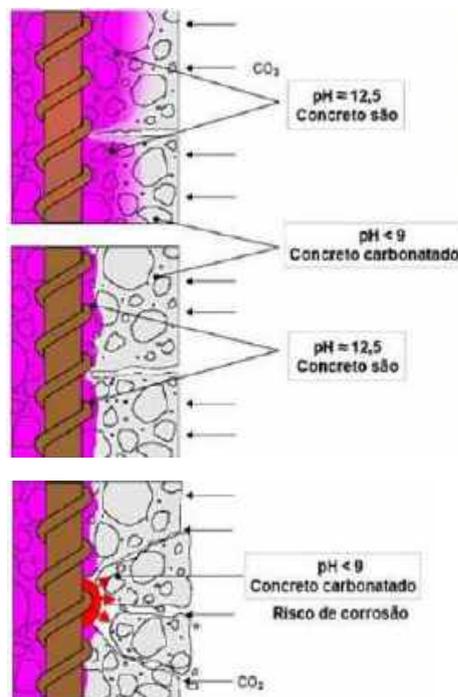
3.2.2.1 Carbonatação do concreto

O processo de carbonatação ocorre quando o hidróxido de cálcio do concreto reage com gases presentes na atmosfera, como o monóxido (CO) e dióxido de carbono (CO₂), transformando o hidróxido de cálcio, que possui um pH elevado, em carbonato de cálcio que

tem um pH mais neutro, avançando para o interior do material e, ao atingir a armadura, desestabiliza o filme óxido passivante, promovendo a despassivação, o que propicia o início de um processo de corrosão generalizada, como pode ser observado na Figura 8. Assim, a natureza alcalina da pasta de cimento hidratada é comprometida, o que prejudica a proteção do aço.

É importante salientar a existência de uma camada passivadora do concreto que protege o aço contra agentes externos, a alcalinidade do concreto é o que permite a existência de tal camada. Segundo Souza e Ripper (1998) quanto maior for a concentração de CO_2 presente mais espessa será a camada de concreto carbonatado. Na zona que possui pH mais baixo haverá ocorrência de carbonatação.

Figura 8 - Evolução da carbonatação no concreto.



Fonte: Oliveira e Santos (2018).

Em edifícios residenciais, pela presença de CO_2 resultante da combustão dos automóveis, os lances de pilares localizados na garagem tendem a sofrer carbonatação mais rápido que os demais.

A comprovação da existência dessas duas frentes pode ser facilmente visualizada com a utilização de indicadores ácido-base como é o caso da fenolftaleína e da timolftaleína. A utilização da fenolftaleína em regiões mais alcalinas (pH entre 8,3 a 10) resulta em uma cor violeta, como pode ser visto na Figura 9, enquanto as menos alcalinas ficam incolores.

Enquanto isso, a timolftaleína resulta em cores azul para regiões mais alcalinas (pH entre 9,3 a 10,5), enquanto as menos alcalinas ficam incolores (SILVA, 1995).

Figura 9 - Pilar com camada externa carbonatada.



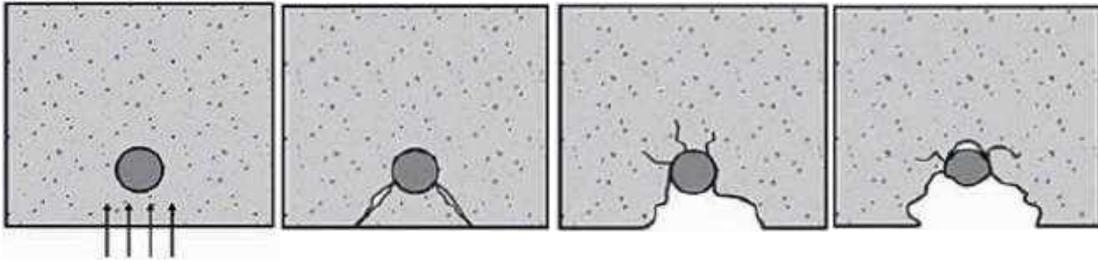
Fonte: Raisdorfer, J.W.; Souza, D.J.; Kruchelski, N.; Nikkel, S.; Torre, E.M.; Lenczuk, B.T.; Medeiros, M.T.F (2015).

3.2.2.2 Fissuras causadas pela corrosão das armaduras

A alcalinidade do concreto permite a interação e a proteção das armaduras em estruturas de concreto armado. A explicação se dá devido ao surgimento de uma camada passivadora de Fe_2O_3 aderente sobre a superfície do concreto conforme dito por Souza e Ripper (1998), a camada passivadora (película passivante) é permitida pelo pH alcalino resultado da reação entre os compostos do cimento e água. Desde que o concreto não sofra alterações devido à ataques de agente externos, a camada passivadora será responsável pela proteção as armaduras da corrosão.

Os agentes agressivos ao entrarem em contato com as amaduras podem gerar despassivação, com a conseqüente quebra da camada passivadora do concreto, o processo de corrosão inicia-se efetivamente (Figura 10) e o ferro presente nas armaduras sofrem oxidação e os produtos da corrosão são gerados, como o hidróxido ferroso, que possui cor amarelada e o hidróxido férrico, que possui cor avermelhada, dois produtos que representam a ferrugem, a evidência mais clara da corrosão do aço. (ANDRADE, 1992).

Figura 10 - Evolução do processo de corrosão.



1 – Penetração dos agentes agressivos / 2 – Fissuração provocada pela expansão dos elementos de corrosão / 3 – Lascamento do concreto e aceleração no processo de corrosão / 4 – Lascamento acentuado e redução da seção da armadura.

Fonte: Marcelli (2007).

Além do aparecimento desses produtos, pode ocorrer o surgimento de ferro expansivo e de óxido de ferro hidratado. Estes produtos são expansivos com volumes até 10 vezes maiores que o volume da armadura, para ocupar o seu espaço, exerce uma pressão sobre o material que o confina da ordem de 15 MPa, suficiente para fraturar o concreto devido ao aumento das tensões internas no concreto e ocasiona, também, fissuras ao longo da estrutura no sentido das armaduras longitudinais e posterior lascamento dos cobrimentos, como pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 - Pilar com fissuras causadas por expansão devido corrosão das armaduras.



Fonte: The Constructor¹.

¹ Disponível em <<https://theconstructor.org/structural-engg/methods-of-concrete-column-repair/5833/>>. Acesso em 22 de out. de 2020.

Em caso de necessidade de reforço da peça degradada pela corrosão das armaduras, é de extrema importância, antes de qualquer intervenção, um tratamento anticorrosão nas armaduras. Os métodos de reforço para sanar as deficiências estruturais causadas por esta manifestação patológica são o aumento da seção transversal por meio de encamisamento com concreto armado e a colagem de manta de fibra de carbono.

3.2.2.3 Fissuras causadas por ataques de cloretos

A corrosão por cloretos estará mais propensa a ocorrer em estruturas localizadas em ambientes agressivos, como as estruturas próximas ao mar ou áreas industriais. Quando há uma grande quantidade de cloretos presente, o concreto tende a conservar mais umidade, aumentando o risco de corrosão pela diminuição da resistividade elétrica do concreto (REIS, 2001).

Segundo Neville e Brooks (2010, *apud*. SANTOS, 2017), os cloretos causam grandes danos quando penetram no concreto em presença de água e oxigênio, formando ácido clorídrico e causando a despassivação da armadura.

De acordo com Andrade (2001), a corrosão das armaduras provocada pela ação dos íons cloreto é um dos problemas mais sérios que pode ocorrer em uma estrutura. Isso pode ser explicado pelo fato de ele agir tanto no concreto quanto no aço.

Uma característica dessa manifestação patológica é a coloração avermelhada nas regiões próximas as armaduras, que pode ser observada na Figura 12, essa coloração vem do produto da corrosão em presença dos íons cloreto, resultando em produtos de corrosão mais solúveis.

Figura 12 - Pilar degradado por ataque de cloretos.



Fonte: Blog Reparo em Concreto.²

Neville (1997) afirma que o maior dano causado pelo ataque de cloretos é a corrosão do aço, que consequentemente afetará o concreto à sua volta. Os produtos que são gerados pela corrosão ocupam um espaço cerca de seis a sete vezes maior do que o aço originalmente ocupava. Isso se dá pela ocorrência da expansão do processo, que acaba gerando uma fissuração na estrutura.

Uma alternativa para correção dessa manifestação patológica é o reforço do pilar degradado através do encamisamento com concreto armado, com um concreto que tenha pequena porosidade como recomenda a NBR 6118 (2014), além de respeitar valores mínimos de cobertura das armaduras e um rigoroso controle da fissuração. O uso de cimento composto com adição de escória (CP III) ou material pozolânico (CP IV) também é recomendável. A norma proíbe o uso de aditivos à base de cloreto em estruturas de concreto.

3.2.2.4 Fissuras causadas por ataques por sulfatos

Os sulfatos estão presentes em águas que contêm resíduos industriais, nas águas subterrâneas em geral e na água do mar, e em locais das edificações onde há ocorrência de

² Disponível em <<http://reparoemconcreto.blogspot.com/2010/04/reparo-e-concreto.html>>. Acesso em 20 de out. de 2020.

chuva ácida. Os sulfatos estão presentes no solo e penetram na estrutura por difusão ou por absorção.

Segundo Neville (2013, *apud*. TRINDADE, 2015), o concreto atacado por sulfatos tem uma aparência característica, cor esbranquiçada, com a deterioração começando pelas bordas e cantos, seguida por fissuração e lascamento do concreto, como pode visto na Figura 13. Tendo como causadora desta aparência a formação do sulfato de cálcio (gesso) e sulfoaluminato de cálcio que acabam por ocupar um volume maior do que os compostos anteriores os quais eles substituíram, levando a uma expansão da estrutura do concreto e conseqüentemente a lascamentos, fissurações, descamação, desintegração e até mesmo redução da resistência mecânica da mesma.

Figura 13 - Pilar degradado pela ação de sulfatos.



Fonte: Mazer (2014).

Para sanar as deficiências estruturais causadas pela manifestação citada é recomendado o reforço do pilar através do encamisamento com concreto armado, com um concreto que tenha boa resistência ao ataque de sulfatos, para isso, é essencial garantir que o concreto tenha uma baixa relação água/cimento, tornando o material denso, e baixa permeabilidade. Além disso, o uso de cimento com baixo teor de aluminato tricálcico e a adição de cinzas volantes e sílica ativa também auxiliam na resistência do concreto.

3.3.3 Fissuras Originadas Por Ações Mecânicas

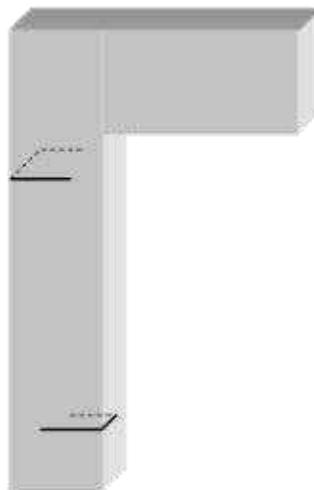
As ações mecânicas podem ser entendidas como as causas que incidem diretamente na resistência da estrutura. São as ocorrências mais comuns em estruturas de concreto armado, sendo grande parte originadas pelo aumento das solicitações, como esforços de momento, tração, compressão e cortante. A seção transversal da peça ou armadura insuficiente também são precedentes frequentes para o aparecimento de fissuras.

3.2.3.1 Fissuras causadas por flexão

Segundo Araújo e Lopes (2003), as fissuras por flexão são identificadas por fissuras horizontais no topo e na base do pilar (Figura 14), e podem ser causadas por armadura insuficiente, aumento do momento solicitante, erro de projeto em não considerar solicitações horizontais ou falta de amarração do pilar do último pavimento.

Em caso de necessidade de reforço, são recomendados três métodos para reforçar a peça: encamisamento com concreto armado, colagem de manta de fibra de carbono ou através de chapas metálicas aderidas com epóxi.

Figura 14 - Fissuras causadas por flexão.

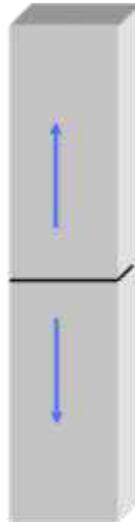


Fonte: Araújo e Lopes (2003).

3.2.3.2 Fissuras causadas por tração

De acordo com Araújo e Lopes (2003), são identificadas por fissuras na horizontal no meio do pilar (Figura 15), e podem ser causadas por recalques do solo, omissão ou insuficiência de viga centralizadora de cargas ou encurtamento das cabeças dos pilares inferiores, por fluência ou comprimento deficiente de amarração das armaduras. O reforço através do encamisamento com concreto armado, de chapas metálicas aderidas com epóxi e da colagem de manta de fibra de carbono seriam as alternativas mais interessantes para sanar essa manifestação patológica.

Figura 15 - Fissuras causadas por tração.

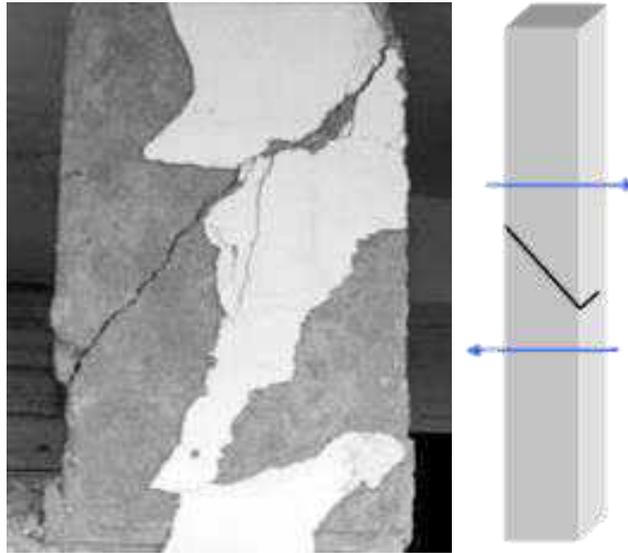


Fonte: Araújo e Lopes (2003).

3.2.3.3 Fissuras causadas por esforço cortante

Segundo Araújo e Lopes (2003), as fissuras causadas por esforço cortante tendem a se manifestar de forma diagonal a 60° em duas faces e de forma horizontal nas outras duas (Figura 16), e podem ser causadas por armadura transversal insuficiente, grandes solicitações de momentos em pilares muito rígidos ou recalque da fundação. É um tipo de fissura muito perigoso, a estrutura que apresentar esse tipo de fissura tem que ser escorada e reforçada com urgência.

Figura 16 - Fissura causada por esforço cortante.



Fonte: Al-Mhaidib (1998) e Araújo e Lopes (2003).

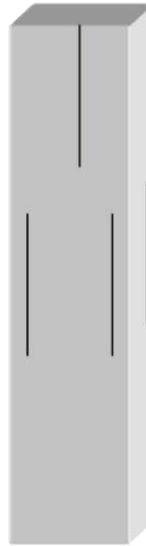
A peça estrutural que sofrer fissuras por esforço cortante pode ser reforçada através de encamisamento com concreto armado, colagem de manta de fibra de carbono ou através de chapas metálicas aderidas com epóxi.

3.2.3.4 Fissuras causadas por esmagamento do concreto

Araújo e Lopes (2003) afirmam que as fissuras provocadas por esmagamento do concreto são observadas em faces opostas do pilar no mesmo sentido das armaduras longitudinais (Figura 17), são ocasionadas devido seção ou armaduras insuficientes para resistir as solicitações, excesso de carga de compressão ou erro de cálculo, concreto de má qualidade ou estribos muito afastados ou incorretos.

Em pilares, as fissuras causadas por esmagamento do concreto são sintomas de um grave defeito, indicando colapso imediato da região acometida, devendo escorar imediatamente o elemento e reforçá-lo através de encamisamento com concreto armado ou colagem de manta de fibra de carbono.

Figura 17 - Fissuras causadas pelo esmagamento do concreto.



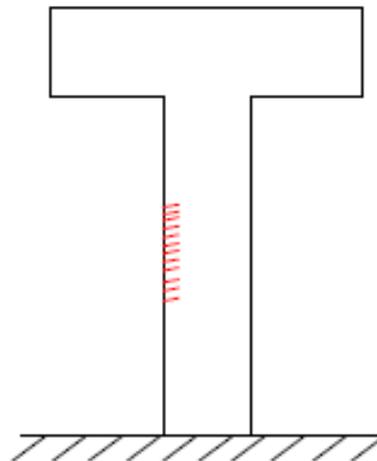
Fonte: Araújo e Lopes (2003).

3.2.3.5 Fissuras causadas por flambagem

De acordo com Araújo e Lopes (2003), as fissuras em face única na parte central de peças muito esbeltas, finas e juntas, são sinais fortes de início de flambagem (Figura 18). A flambagem é um fenômeno que ocorre em pilares esbeltos quando submetidos a um esforço de compressão axial; ou seja, um esforço de compressão na extremidade do pilar.

Reforçar a peça por meio de encamisamento com concreto armado ou colagem de manda de fibra de carbono são algumas das alternativas para sanar as deficiências estruturais da manifestação citada.

Figura 18 - Fissuras devido à flambagem das barras.



Fonte: Helene (1992).

Após esse capítulo introdutório sobre os mais recorrentes tipos de fissuras encontradas em pilares de concreto armado, o próximo capítulo abordará os métodos de reforço estudados neste trabalho, bem como suas respectivas execuções e modelos de dimensionamento.

4 REFORÇO ESTRUTURAL

Alguns termos utilizados na área de Patologia e Terapia das Estruturas podem causar confusão aos mais leigos, portanto, se faz necessário a definição de alguns destes: o reparo pode ser entendido com uma correção localizada dos problemas encontrados, enquanto que a recuperação é definida como uma correção dos problemas patológicos de forma a restituir total ou parcialmente o desempenho original da peça.

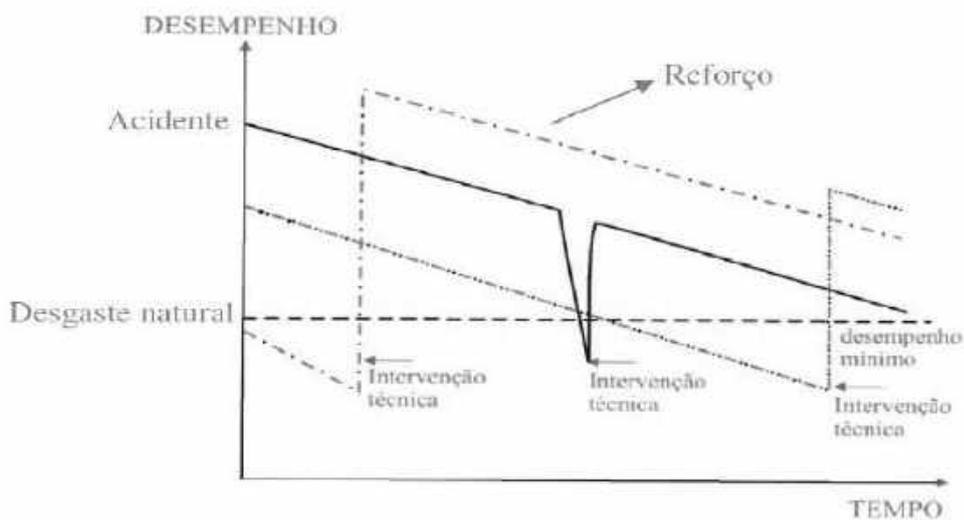
O reforço pode ser definido como uma intervenção com a função de aumentar a capacidade resistente dos elementos estruturais previstos inicialmente no projeto original de uma estrutura, como consequência da modificação de sua utilização ou de alguma deterioração.

A Figura 19 representa três diferentes tipos de desempenho estrutural ao longo da vida útil da estrutura, em função da ocorrência de fenômenos patológicos diversos. A curva representada pelo traço-duplo ponto ilustra o fenômeno natural de desgaste da estrutura. Quando há intervenção, a estrutura se recupera, voltando a seguir a linha de desempenho acima do mínimo exigido para sua utilização.

A linha cheia representa uma estrutura sujeita, em algum momento de sua vida, a um problema súbito, como um acidente, necessitando então de imediata intervenção para que volte a comportar-se satisfatoriamente.

A linha traço-monoponto representa uma estrutura com erros originais, de projeto ou execução, ou ainda uma estrutura que tenha necessitado alterar seus propósitos funcionais, situações em que se caracteriza a necessidade de reforço.

Figura 19 - Diferentes desempenhos de uma estrutura de acordo com diferentes fenômenos patológicos.



Fonte: Souza e Ripper (1998).

A deterioração de uma estrutura pode ocorrer por diversos motivos como, por exemplo, falhas no projeto e/ou de execução, carência de manutenções periódicas, eventos acidentais, como explosões ou terremotos, e degradação dos materiais que constituem o elemento estrutural devido a agentes ambientais agressivos.

Por esses motivos, elementos estruturais eventualmente podem necessitar de intervenções de reparo e/ou reforço (CHASTRE, 2014).

Erros humanos como projetos inadequados, má execução e manutenção precária, aliados a condições ambientais desfavoráveis como altas temperaturas, umidade e atmosferas agressivas, contribuem para o surgimento de diversas patologias nas estruturas de concreto. Dentre essas patologias pode-se citar a corrosão de armaduras, a fissuração e a deformação excessiva dos elementos de concreto, que são as principais causas da necessidade de reparo em peças estruturais (RIGAZZO, 2003).

Além do reparo devido ao surgimento de patologias, existem casos em que se deseja aumentar a capacidade portante de uma estrutura para que a mesma possa ser utilizada para outra finalidade, sendo necessário, portanto, recorrer a técnicas de reforço.

O reforço de elementos estruturais pode ser realizado por diversos métodos. Dentre os métodos mais tradicionais estão os de aumento da seção transversal com concreto armado, uso de perfis metálicos e de colagem de manta de fibra de carbono.

Segundo Takeuti (1999), os métodos e técnicas de reabilitação das estruturas de concreto, apesar do rápido desenvolvimento, ainda se baseiam na experiência empírica acumulada, devido ao caráter artesanal e incomum dos processos de reabilitação, uma vez que cada problema enfrentado tem suas próprias características. Além disto, em muitos casos não existe uma metodologia específica de análise do comportamento estrutural da peça reabilitada, nem diretrizes que orientem o projetista durante o processo de redimensionamento e reprojeto.

De acordo com a NBR 6120 - Ações para o cálculo de estruturas de edificações, toda construção possui um tipo de utilização e para cada um dos tipos possui valores de carga diferentes para seu dimensionamento. Caso uma construção necessite mudar seu tipo de utilização, faz-se necessário uma análise minuciosa de sua estrutura mediante os novos carregamentos que serão inseridos nela, seja através de reformas ou ampliações ou até mesmo inserção de equipamentos que possuem peso elevado, para avaliar a necessidade ou não de reforço estrutural, de modo a garantir a estabilidade e segurança da estrutura (ABNT, 2019).

4.1 ESCOLHA DA TÉCNICA

A escolha da técnica de recuperação mais adequada deve ser realizada após uma avaliação criteriosa, analisando os problemas patológicos apresentados pela estrutura, além de fatores como disponibilidade tecnológica e relação custo/benefício. Além disso, Helene (1988) ressalta que a escolha da técnica de correção a ser empregada depende não só do diagnóstico do problema, mas também das características da região a ser corrigida e das exigências de funcionamento do elemento que será objeto da correção.

Segundo Valle (1983, *apud*. FERREIRA, 2014), deve-se fazer uma análise preliminar das variáveis que condicionam a mobilização de esforços resistentes no reforço, como:

- **Deformabilidade da estrutura:** deve ser levada em consideração com a aplicação das ações instantâneas, assim como com os respectivos valores dos incrementos de deformação devidos às ações de longa duração. Deve-se ressaltar a sua importância para os procedimentos de reabilitação que trabalham com a hipótese de compatibilidade de deformações;
- **Características mecânicas dos materiais do elemento a ser reforçado:** é de fundamental importância conhecer as capacidades últimas de cada material (original e o de reforço), bem como suas características de deformabilidade imediata e lenta (retração, fluência e módulo de elasticidade). É fundamental salientar a importância do conhecimento da retração dos concretos envolvidos para impedir qualquer fissuração indesejável entre as partes da estrutura original e o reforço;
- **Aderência entre os materiais originais e de reforço:** para garantir uma solidariedade entre as partes da estrutura reforçada, é importante que a aderência entre esses seja elevada, isto é, em geral é interessante aumentar o limite de sollicitação tangencial. Para isto pode-se utilizar pontes de aderência como resinas do tipo epóxi e eventualmente conectores mecânicos;
- **Outros fatores:** em determinadas situações é preciso analisar outras variáveis relativas aos materiais da estrutura bem como suas condições de estabilidade dimensional, aspectos ligados ao comportamento perante à umidade e à temperatura, e especificamente todos os fatores que tendem a criar estados de tensão que afetem as condições de deformabilidade dos elementos.

Para o tratamento de uma construção defeituosa ou que sofreu alterações por seu uso, primeiramente deve ser feito o correto diagnóstico das manifestações patológicas existentes. Para cada caso, haverá pelo menos um método para realizar o conserto (NAKAMURA, 2009).

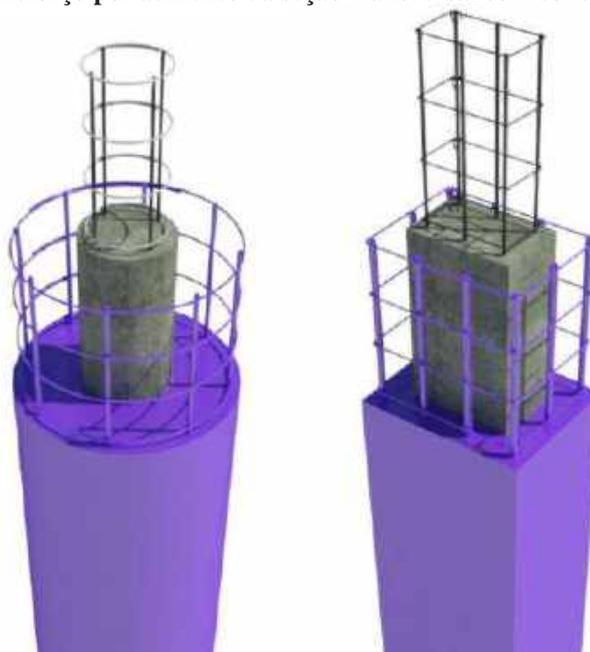
Após a identificação das causas e dos possíveis efeitos e anomalias que podem vir a surgir ou se agravar na estrutura, é escolhido o método mais adequado de reforço estrutural.

4.2 REFORÇO PELO AUMENTO DA SEÇÃO TRANSVERSAL COM CONCRETO ARMADO

Segundo Helene (1992), essa técnica consiste na preparação da superfície do concreto antigo para recebimento da ponte de aderência com o concreto novo, realizado através da escarificação manual ou mecânica. Após este procedimento, furos devem ser executados nos substratos para ancoragem das barras longitudinais do reforço, com o posicionamento posterior dos estribos. A Figura 20 representa a aparência modelada de um pilar reforçado através dessa técnica.

Segundo Chastre (2014), a necessidade de execução dessa técnica se torna válida quando as dimensões da seção de concreto ou a qualidade do concreto são insuficientes para a resistir aos esforços aplicados em pilares sujeitos a flexão composta ou compressão simples, ou quando há rompimento dos estribos ou a inexistência destes.

Figura 20 - Reforço por aumento da seção transversal com concreto armado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O reforço pelo aumento da seção transversal com concreto, argamassa ou graute é mais indicado em situações onde o concreto está fortemente danificado (Figura 21), também pode ser utilizado para o reforço de regiões comprimidas ou tracionadas, sendo muito eficiente no incremento de capacidade de carga, rigidez e ductilidade (CHASTRE, 2014).

Em situações de difícil acesso ou com pequenas espessuras de reforço, é recomendado substituir o reforço por graute, um material fluido e que dispensa o adensamento com vibrador, que alcança alta resistência inicial e final em curto período, além de assegurar uma maior proteção contra os efeitos de corrosão devido sua baixa permeabilidade, podendo receber aditivos para aumentar seu desempenho.

Figura 21 - Modelagem de um pilar com seção transversal danificada.



Fonte: 3D Molier International³.

Takeuti (1999) afirma que a execução desse tipo de reforço requer a análise de alguns aspectos como a posição do pilar, as condições de acesso à peça, a carga a ser suportada pelo elemento reforçado e a manifestação patológica que motivou o reforço.

Ainda segundo Takeuti (1999), o reforço de pilares pode ser feito com utilização de concreto com resistência adequada e utilização de armaduras longitudinais e transversais

³ Disponível em <<https://www.turbosquid.com/3d-models/concrete-pillar-damaged-max/1033064>>. Acesso em 20 de out. de 2020.

complementares, aumentando as dimensões laterais do pilar. O reforço não precisa ter necessariamente o aumento de seção para todos os lados, podendo ser executado em apenas uma ou mais faces (Figura 22), conforme projeto estrutural de reforço.



Fonte: Takeuti (1999).

O aumento da seção transversal é uma técnica muito utilizada principalmente em pilares devido as suas vantagens econômicas e facilidade na execução (NASCIMENTO, 2009).

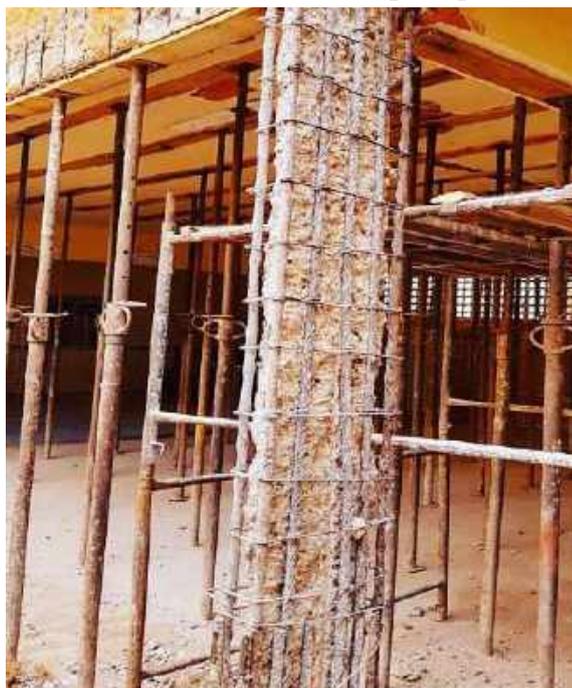
O grande desafio no ramo de reforço de estruturas é garantir a monoliticidade das peças reforçadas, no caso de reforço por aumento da seção transversal, a aderência entre os materiais de diferentes idades se torna o alvo de estudos.

Segundo Chastre (2014), como principais desvantagens pode-se citar possíveis limitações arquitetônicas (devido ao aumento nas dimensões da seção transversal do elemento reforçado), aumentos das solicitações no restante da estrutura (por exemplo, as fundações, devido ao aumento do peso próprio dos elementos reforçados) e o tempo de cura do concreto.

4.2.1 Execução do Reforço

Primeiramente, antes de qualquer intervenção de reforço em um pilar, é de extrema importância escorar toda a estrutura em suas proximidades de forma igual, como mostra a Figura 23, evitando maiores tragédias, pois de acordo com Souza e Ripper (1998), as escoras têm por objetivo descarregar as tensões impostas aos pilares fazendo com que, após o reforço, o concreto existente trabalhe conjuntamente com o concreto novo como uma única estrutura, garantindo que as tensões adicionadas sejam distribuídas nos pilares como uma única peça.

Figura 23 - Escoramento em volta de um pilar que será reforçado.



Fonte: RPF Engenharia⁴.

É importante salientar que todas as etapas de execução devem ser feitas por profissionais capacitados e com seus respectivos equipamentos de proteção.

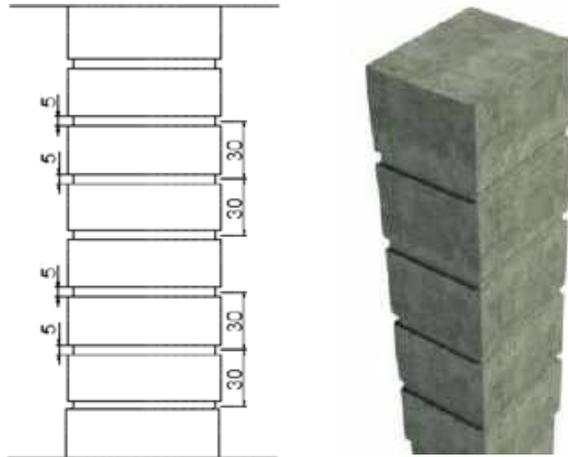
Juntamente com a inserção das escoras, é necessário retirar o revestimento do pilar que será reforçado, removendo-o através da escarificação para facilitar a aderência entre os concretos de diferentes idades, pois a melhoria da aderência entre os materiais originais do pilar e o de reforço proporciona um melhor trabalho conjunto dos dois concretos, para isso, o que Cánovas (1988) recomenda é que após a escarificação, é necessário o uso de pontes de aderência, como por exemplo uma camada de resina epóxi para garantir a união dos concretos.

Ainda segundo Cánovas (1988), outra forma de melhorar a aderência consiste na criação de dentes em toda a altura do pilar, pela eliminação de alguns trechos de concreto, numa profundidade de cerca de 3 cm, em espaços de 30 cm a 40 cm de altura, deixando entre eles, trechos de igual altura sem descobrir, como pode ser observado na Figura 24. Assim, tem-se reentrâncias e saliências, que contribuem na absorção dos esforços cortantes existentes entre o pilar e o reforço. Os últimos 20 cm ou 30 cm do pilar também são descobertos, colocando-se

⁴ Disponível em <<https://www.picuki.com/media/2252737318049100914>>. Acesso em 21 de out. de 2020.

uma braçadeira nesta parte superior do reforço, cuja finalidade é absorver as cargas transmitidas pelos andares superiores ao reforço.

Figura 24 - Reentrâncias e saliências em toda altura do pilar que será reforçado.



Fonte: Cánovas (1988) e Elaborado pelo Autor.

Caso exista presença de oxidação nas armaduras existentes, é necessário a realização de um tratamento superficial com escova de aço e aplicação de um neutralizador de ferrugem (Figura 25), respeitando sempre os prazos de ação, secagem e cura dos produtos utilizados, que podem durar 48 horas.

Figura 25 - Aplicação de produto neutralizador de corrosão.



Fonte: Guide Engenharia⁵.

⁵ Disponível em <<https://guideengenharia.com.br/category/reforma/page/4/>>. Acesso em 21 de out. de 2020.

Após o tratamento das armaduras já existentes, são inseridas as armaduras transversais e horizontais, de acordo com o projeto de reforço, como pode ser observado na Figura 26.

Figura 26 - Inserção das novas armaduras transversais e longitudinais.



Fonte: Techniques Soluções em Engenharia⁶.

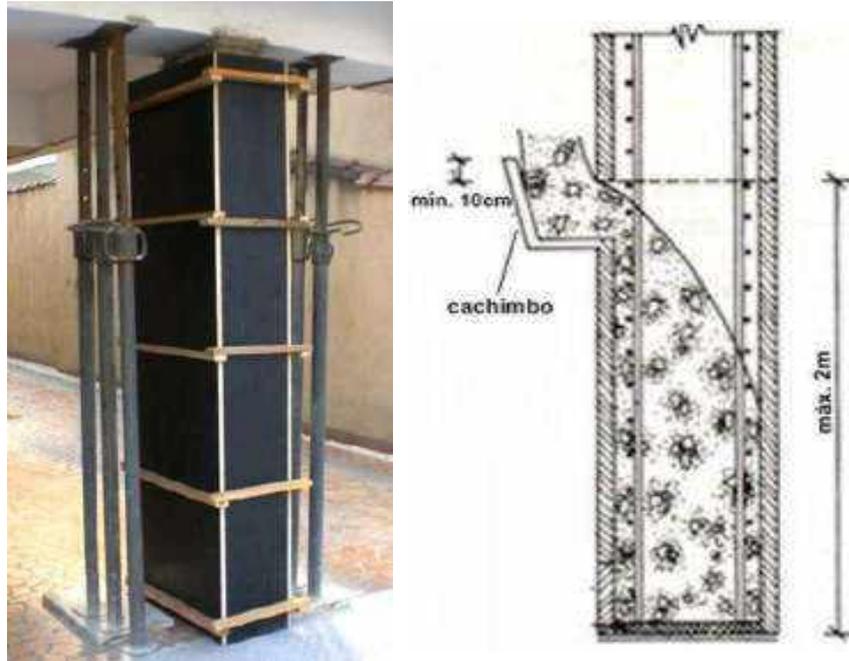
Após isso, serão montadas as formas (Figura 27), de preferência de madeirite, para uma maior facilidade de remoção, com as gravatas de madeira maciça, com o seu espaçamento variando de acordo com a espessura da madeira utilizada, com espaçamento máximo entre 50 a 60 centímetros.

Para um ótimo adensamento, é recomendado aplicar o novo concreto em duas etapas, a primeira e mais importante, na base do pilar, através de aberturas localizadas nos lados da forma, chamadas de cachimbos, e a segunda, no restante do pilar, sempre respeitando a altura máxima de lançamento de 2 metros.

É recomendado que, após sete dias após o lançamento, as formas sejam retiradas, pois o novo concreto já adquiriu uma resistência suficiente para não apresentar trincas ou fissuras e descolamento do concreto da estrutura antiga. O escoramento é recomendado ser retirado quatorze dias depois da execução do reforço. Após isso, o revestimento pode ser refeito.

⁶ Disponível em <<https://techniques.com.br/reforco-estrutural-em-concreto/>>. Acesso em 21 de out. de 2020.

Figura 27 - Montagem das formas executada (esquerda) e Representação do cachimbo (direita).



Fonte: Metrópole Soluções Técnicas⁷ e EngenhariaMelhor⁸.

4.2.2 Cálculo da capacidade resistente de um pilar reforçado por encamisamento

De acordo com Takeuti (1999), a problemática envolvendo a determinação da capacidade resistente de pilares reforçados, está na consideração da distribuição dos esforços para os pilares, visto que são elementos estruturais que absorvem ações advindas de diversos pavimentos sendo na maioria das vezes não ser possível aliviar o pilar dessas ações.

Para Souza e Ripper (1998), desprezar a capacidade resistente já existente é um desperdício que pode ser evitado, consistindo o projeto de reforço em calcular um novo pilar cintado, capaz de absorver a carga introduzida no elemento somada ao carregamento existente, considerando as armaduras longitudinais contribuindo para a resistência total do pilar.

Ainda de acordo com Souza e Ripper (1998), supondo um pilar com determinada carga original e reforçado absorvendo uma capacidade de carga maior que a inicial e que ao ser carregado parte do esforço será absorvido pelo pilar original e a outra pelo reforço. Caso a carga adicional seja retirada, resultaria em duas possibilidades:

⁷ Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=hPqYvMTy02o>>. Acesso em 21 de out. de 2020.

⁸ Disponível em <<https://www.facebook.com/engenhariamelhor/posts/670723433117227/>>. Acesso em 21 de out. de 2020.

- I. A seção do reforço fica descarregada e a carga será resistida pelo pilar original;
- II. Quando solicitado pelo acréscimo de carga, haverá um rearranjo interno das tensões na seção do pilar, de modo que, mesmo após a retirada, o reforço continua contribuindo, tornando a peça homogênea.

Segundo Cánovas (1997, *apud*. TAKEUTI, 1999), não é recomendável utilizar espessuras menores que 10 cm, a menos que se empreguem concretos com superplastificantes ou concretos projetados, e agregados com diâmetro máximo inferior a 20 mm. Tal espessura é, sobretudo, imposta pela seção necessária para resistir ao esforço a que se submeterá o pilar, pois dependendo do tamanho dos agregados, falhas de concretagem podem ocorrer.

Em geral, deve-se utilizar um concreto com $f_{ck} \geq 20$ MPa, recomendando-se ainda que ele tenha 5 MPa a mais do que a resistência do concreto velho. Esta indicação visa prevenir a aparição de fissuras por retração e diferenças muito grandes na deformabilidade das partes.

Segundo Takeuti (1999), para determinar a capacidade resistente dos modelos reforçados analisados em sua dissertação, utilizou-se a equação de equilíbrio para as forças verticais, supondo-se a perfeita solidariedade entre o concreto e a armadura:

$$F_u = A_{cr} * 0,9 * f_{cmr} + A_c * 0,9 * f_{cm} + A_s * f_y \quad (1)$$

Onde:

F_u é a capacidade resistente do modelo (N);

A_{cr} é a área da seção transversal do concreto de reforço (m²);

f_{cmr} é a resistência média do concreto da camisa de reforço (Pa);

A_c é a área da seção transversal do pilar original (m²);

f_{cm} é a resistência média do concreto do pilar original (Pa);

A_s é a área das armaduras longitudinais do pilar original e da camisa de reforço, considerando também as telas soldadas (m²);

f_y é a resistência do aço (Pa).

4.3 REFORÇO ATRAVÉS DE CHAPAS METÁLICAS ADERIDAS COM EPÓXI

A técnica de reforço utilizando chapas de aço coladas ao concreto com resinas epóxi ou com o uso de parafusos auto-fixantes tem como objetivo criar uma armadura secundária que se solidariza ao elemento estrutural (Figura 28) e aumenta em até 50% a resistência aos esforços cortantes, de flexão e de torção (SANTOS, 2017).

As chapas devem ser executadas de forma a promover uma perfeita ligação com o concreto, a fim de que elas possam receber as cargas que estão atuando sob o concreto (OLIVEIRA, 2015).

De acordo com Figueira (2016), a aplicação de chapas metálicas por colagem é usada quando há deficiência de armaduras e inconveniência no aumento das seções transversais dos elementos. Algumas das vantagens associadas à sua utilização estão relacionadas com a rapidez de execução e interferência mínima na utilização da estrutura.

Segundo Santos (2017), o uso deste método é interessante em situações de emergência, pela sua rápida execução e baixo custo, e também em casos onde não são permitidas grandes alterações geométricas ou arquitetônicas. Além disso, esta técnica é recomendada para reforçar estruturas que apresentam degradação apenas em suas armaduras, sem possuir deficiência nas dimensões ou na qualidade do concreto.

Figura 28 - Pilares reforçados através de chapas metálicas.



Fonte: Hasan Kaplan (2011).

Segundo Chastre (2014), a técnica de reforço por colagem de chapas ou perfis metálicos colados na superfície de concreto do elemento reforçado tem como principal vantagem, em relação à técnica de reforço por encamisamento com concreto armado, alterações mais discretas nas dimensões da seção transversal do elemento reforçado. Também pode ser aplicado para o reforço de regiões comprimidas ou tracionadas.

Ferreira (2014) afirma que no caso de pilares, o emprego de chapas metálicas aumenta sobretudo a resistência e ductilidade do elemento, devido ao efeito de confinamento propiciado pelo arranjo com os perfis metálicos.

Contudo, as tensões solicitantes são transferidas do elemento reforçado para o reforço pela interface concreto/reforço em aço. Assim, o concreto não pode estar deteriorado (CHASTRE, 2014). Outras desvantagens deste sistema são: a corrosão dos materiais metálicos, o alto peso próprio do aço (o que pode dificultar sua manipulação), limitação dos tamanhos encontrados comercialmente (o que pode causar a necessidade de ligações), a necessidade de escoramento e à necessidade de proteção contra a corrosão e a ação do fogo.

Cánovas (1988) admite que esse tipo de reforço tem o inconveniente de só entrar em carga quando o concreto atinge a ruptura (se não existir solidariedade entre os perfis de aço e o concreto), e sugere que para garantir o trabalho do conjunto deve-se, durante a montagem, procurar obter uma perfeita e rígida união de todos os elementos de estrutura (vigas, lajes, fundações, etc) ao reforço. Esta união pode ser conseguida pela utilização de um material de alta resistência à compressão, na união do aço com o concreto, criando-se uma camada rígida capaz de transmitir as cargas e eliminando contatos pontuais.

4.3.1 Execução do Reforço

Primeiramente, é de suma importância que a área próxima da estrutura reforçada seja escorada, distribuindo e aliviando as tensões do pilar reforçado, como ilustra a Figura 29. Araldi (2013) chama a atenção de que os reforços em pilares sejam executados ao longo de todos os pavimentos, afim de evitar acúmulo de tensões nas lajes e o surgimento de efeitos de segunda ordem que ocasionem um esforço de puncionamento.

É importante salientar que todas as etapas de execução devem ser feitas por profissionais capacitados e com seus respectivos equipamentos de proteção.

Figura 29 - Escoramento próximo de pilar que será reforçado.



Fonte: Aceromaq⁹.

Posteriormente, é necessário retirar o revestimento do pilar que será reforçado, para depois escarificar o reboco, pois o preparo adequado, tanto do substrato quanto da superfície da chapa metálica, é essencial para uma ligação perfeita entre a chapa e o concreto.

De acordo com Cánovas (1998), os problemas mais comuns na aplicação de chapas metálicas para reforço se referem a falhas de aderência por efeito de esforço cortante superficial na ligação do aço com o adesivo e por tensão de tração na ligação do adesivo com o concreto.

Ainda segundo Cánovas (1998), a aderência também pode ser comprometida devido à corrosão que as chapas metálicas sofrem após serem expostas. Assim, fica evidente a importância da preparação das chapas no que se trata da sua proteção contra agentes agressivos. A passivação, que consiste em aplicar um produto à base de resina epóxi para proteger da corrosão, é uma alternativa para garantir a camada de proteção e a aderência, como pode ser visto na Figura 30.

⁹ Disponível em <www.aceromaq.com.mx>. Acesso em 11 de dez. de 2020.

Figura 30 - Aplicação da resina epóxi para maior aderência das chapas.



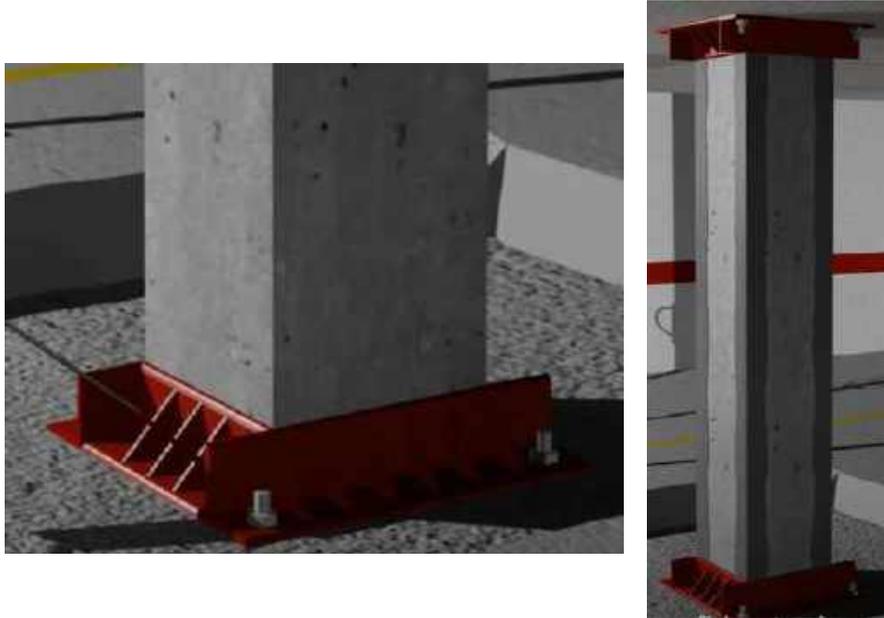
Fonte: Horse Construction¹⁰.

Posteriormente, para facilitar o encaixe das cantoneiras às quinas, deve-se eliminar os cantos vivos dos pilares. As chapas de aço devem ter furos de 3 mm de diâmetro a cada 15 cm para deixar escapar o ar e devem ter espessura máxima de 4 mm.

Para o reforço de pilares, são utilizados perfis metálicos tipo cantoneira e tipo “U”, sendo o uso do último menos frequente por exigir um maior peso de aço. Os perfis do tipo cantoneira devem ser colocados nos quatro cantos do pilar, sendo ligados lateralmente entre si por presilhas soldadas. No trecho superior do pilar deve-se colocar um capitel metálico e no trecho inferior uma base metálica (Figura 31), que tem a função de transferir as tensões nessa região entre o pilar (OLIVEIRA, 2015).

¹⁰ Disponível em <<https://www.horseen.com/solution/problems-of-steel-jacketing-in-concrete-reinforcement>>. Acesso em 21 de out. de 2020.

Figura 31 - Base metálica no trecho inferior do pilar (esquerda) e Pilar com capitel metálico no topo e base metálica no trecho inferior (direita).



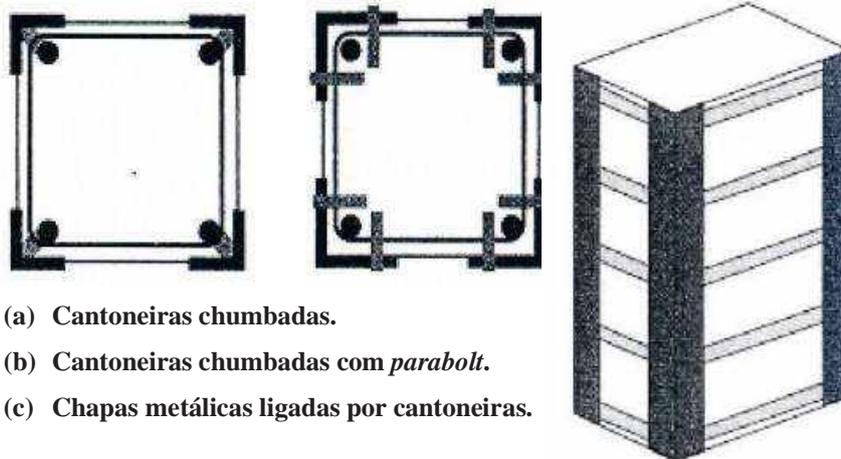
Fonte: Aceromaq¹¹.

Devido a problemas de descolamento das chapas de aço em caso de temperaturas elevadas, como em situações de incêndio, é comum que as chapas, além de coladas, sejam também aparafusadas ao concreto (RIGAZZO, 2003). Em conjunto com a colagem, costuma-se utilizar chumbadores para contribuir com a transferência de esforços de maneira mecânica, já que as superfícies apenas contribuem com a aderência química.

Zucchi (2015) ressalta que a adoção de *parabolt* só é viável quando este não coincidir com as armaduras longitudinais existentes. A Figura 32 ilustra os tipos citados de fixação das chapas metálicas.

¹¹ Disponível em <www.aceromaq.com.mx>. Acesso em 11 de dez. de 2020.

Figura 32 - Exemplos de fixação das chapas metálicas.



- (a) Cantoneiras chumbadas.
 (b) Cantoneiras chumbadas com *parabolt*.
 (c) Chapas metálicas ligadas por cantoneiras.

Fonte: Appleton e Gomes (1997, *apud*. ZUCCHI, 2015).

4.3.2 Verificação da área da seção transversal das chapas metálicas utilizadas como reforço

Para o dimensionamento de um pilar reforçado com chapas metálicas aderidas com epóxi, Cánovas (1988) salienta que devemos considerar que o pilar já está submetido a uma força F , então o reforço será solicitado pela força $F + \Delta F$. Aconselha ainda que seja desprezada a resistência do núcleo de concreto existente e seja adotada como toda a carga atuando somente nos perfis metálicos. Porém se no cálculo for considerada a resistência do conjunto pilar antigo e reforço, a medida é recomendada como a seguir:

$$\sum A's \leq 0,06 * A_c \quad (2)$$

Onde:

$A's$ é a soma das áreas das seções transversais das barras de aço existentes no pilar original com as dos perfis estruturais;

A_c é a área da seção de concreto existente somada à que for acrescentada, se for o caso.

4.3.3 Dimensionamento do reforço através de chapas metálicas aderidas com epóxi

Uma forma de dimensionar um reforço através de chapas metálicas aderidas com epóxi é conhecendo a soma das áreas de seção transversal das cantoneiras metálicas que serão utilizadas, essa soma das áreas de seção transversal pode ser calculada através da manipulação de equações já conhecidas. Esse método de dimensionamento só pode ser aplicado em pilares intermediários, ou seja, aqueles que apenas recebem esforços de compressão centrada, com momentos fletores desprezíveis. Para outros casos, esse método não é representativo.

Um pilar de concreto armado que está sujeito a uma força F de compressão tende-se a deformar, essa deformação pode ser definida como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

Essa mesma força F está sendo aplicada na área da seção transversal do pilar, gerando uma tensão, Equação 4, e através do módulo de elasticidade ou de Young, Equação 5, podemos manipular e relacionar essas equações.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4)$$

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (5)$$

Substituindo a Equação 3 e a Equação 4 na Equação 5, temos a seguinte equação:

$$\frac{F}{A} = E * \frac{\Delta L}{L} \quad (6)$$

Isolando a variação de comprimento longitudinal do pilar que queremos encontrar, temos:

$$\Delta L = \frac{F * L}{E * A} \quad (7)$$

Quando o pilar receber o reforço e este for bem executado, é esperado que o conjunto pilar-cantoneiras metálicas se deforme igualmente, portanto, podemos igualar a equação de variação do comprimento longitudinal do pilar com a equação de variação do comprimento longitudinal das cantoneiras metálicas.

$$\Delta L_{\text{reforço}} = \Delta L_{\text{concreto}}$$

$$\frac{Fr * Lr}{Ar * Er} = \frac{Fp * Lp}{Ac * Ec} \quad (8)$$

Onde:

Fr é a força resistida pelas cantoneiras de reforço (N);

Fp é a força resistida pelo maciço do pilar (N);

Lr é o comprimento longitudinal das cantoneiras (m);

Lp é o comprimento longitudinal do pilar que será reforçado (m);

Ar é a área total da seção transversal das cantoneiras (m²);

Ac é a área da seção transversal do pilar reforçado (m²);

Er é o módulo de elasticidade do material das cantoneiras (Pa);

Ec é o módulo de elasticidade do concreto (Pa).

Como o comprimento longitudinal das cantoneiras de reforço será o mesmo do pilar, logo, ambos podem ser desconsiderados do cálculo, e isolando, na Equação 8, a área total da seção transversal das cantoneiras utilizadas no reforço, temos a seguinte equação final:

$$Ar = \frac{Fr * Ac * Ec}{Fp * Er} \quad (9)$$

4.4 REFORÇO POR COLAGEM DE MANTA DE FIBRA DE CARBONO

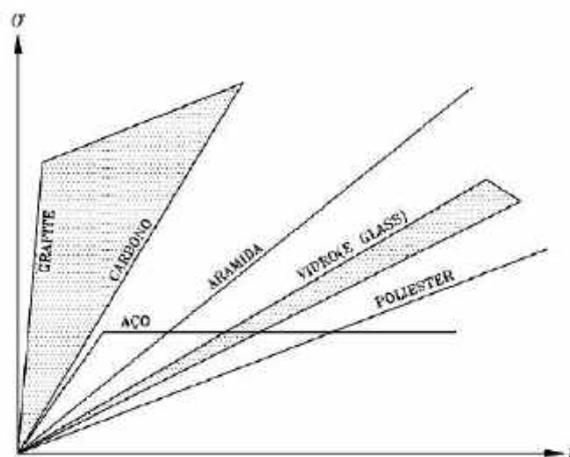
Em adição aos métodos tradicionais de reforço de elementos em concreto armado, o reforço com Polímeros Reforçados com Fibras (PRF ou FRP – *Fiber Reinforced Polymer*, em língua inglesa) tem ganhado espaço na construção civil.

A utilização dos PRF em sistemas de reforço de estruturas se justifica, principalmente, devido às suas características físicas, químicas e mecânicas. São materiais com elevada resistência à tração, com módulos de elasticidade adaptáveis aos critérios de projeto, possuem neutralidade eletromagnética, resistência à corrosão e baixo peso próprio. Beber (2000) afirma que para um mesmo incremento de resistência, 2 kg desse material compósito poderiam substituir 47 kg de aço.

O funcionamento mecânico das fibras é semelhante ao das barras de aço numa estrutura de concreto armado. Quando a carga é aplicada numa estrutura, o primeiro elemento a ser solicitado é o concreto, posteriormente a armadura interna (barras de aço) e finalmente as fibras do compósito (PÉREZ, 2014).

Nota-se no diagrama da Figura 33 que o módulo de elasticidade da fibra de carbono é bastante similar ao do aço no regime elástico, porém, com o aumento da tensão, possui uma deformação elástica levemente inferior ao do aço. Segundo Callister (2011), a fibra de carbono possui o maior módulo específico e a maior resistência específica dentre todas as fibras de reforço.

Figura 33 - Diagrama de tensão normal x deformação específica.



Fonte: Machado (2011).

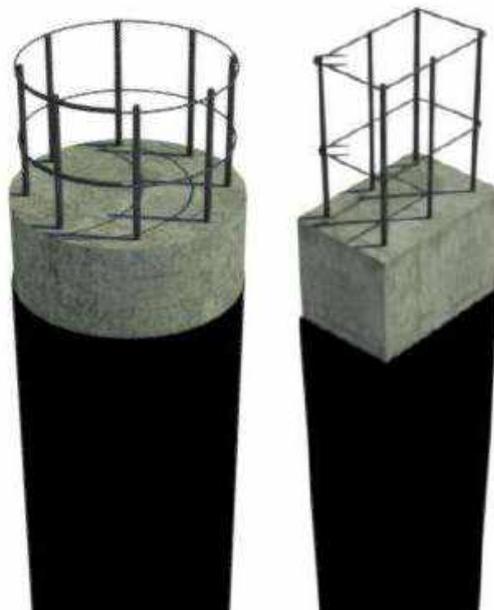
A facilidade de aplicação do sistema de reforço, a não necessidade de escoramentos, poucas alterações na geometria da seção transversal do elemento reforçado e aumento ínfimo no peso próprio da estrutura são outros fatores que tornam o PRF uma alternativa cada vez mais presente no reforço e recuperação de estruturas de concreto armado na construção civil.

Segundo Santos (2014, *apud.* NETA, 2017), apesar da utilização dos polímeros reforçados com fibras ter se mostrada prática e eficiente, as seguintes desvantagens ainda podem ser citadas: são sistemas desprotegidos de cargas de impacto (colados externamente), apresentam perda de desempenho a elevadas temperaturas, apresentam ruptura precoce pelo descolamento do reforço ou pelo destacamento do concreto de cobertura em estruturas reforçadas à flexão, além da exigência de mão de obra especializada.

4.4.1 Externally Bonded Reinforcement (EBR)

A principal técnica de aplicação de materiais compósitos como reforço de elementos estruturais em concreto armado é a de colagem externa (Figura 34), conhecida na literatura internacional como *Externally Bonded Reinforcement* (EBR), em língua inglesa.

Figura 34 - Pilares reforçados através da colagem externa de manta de fibra de carbono.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

A técnica EBR é comumente empregada quando se deseja reforçar pilares de concreto armado com materiais compósitos. O reforço do pilar é garantido por confinamento passivo, onde o pilar é envolvido externamente com PRF, normalmente, de vidro ou carbono. Essa técnica de reforço tem se mostrado muito eficaz, com consideráveis aumentos de ductilidade e resistência à compressão (FIGUEIRA, 2016).

Essa técnica tem como princípio a colagem dos PRF no substrato de concreto dos elementos que se deseja reforçar: na face tracionada, no caso de reforço à flexão; nas faces laterais e inferiores, no caso de reforço ao cisalhamento; e no encamisamento da seção, no caso de pilares sobre tensões axiais de compressão (DALFRÉ, 2013).

A técnica de colagem externa (EBR) apresenta como desvantagem o fato de o reforço estar fixado na superfície externa, estando dessa maneira vulnerável à sua degradação, principalmente, por causa das condições ambientais, como incêndios, temperaturas elevadas, radiação ultravioleta, umidade ou até mesmo a atos de vandalismo. Neste sistema de reforço frequentemente são identificadas rupturas prematuras.

A Figura 35 ilustra as camadas de um pilar reforçado através da técnica EBR.

Figura 35 - Camadas de um pilar reforçado com FRP.



Fonte: Oliveira (2019).

O reforço de pilares de concreto armado com FRP pode ser aplicado de forma contínua ou discreta, que pode ser observado na Figura 36. No reforço contínuo o pilar é completamente envolvido com mantas de FRP ao longo de seu comprimento, garantindo que todo o concreto

do pilar esteja sob efeito de confinamento. No reforço por encamisamento contínuo observa-se grandes aumentos na capacidade de carga e ductilidade em relação ao pilar não reforçado. Além disso, também garante uma maior proteção aos agentes externos agressivos à armadura.

No encamisamento discreto, faixas de FRP são coladas ao redor da seção transversal do pilar em intervalos espaçados ao longo de seu comprimento, promovendo considerável economia no consumo de material.

Figura 36 - Pilar reforçado com encamisamento contínuo (esquerda) e discreto (direita).



Fonte: Oliveira (2019).

4.4.1.1 Execução do reforço

A execução do reforço por meio da colagem de fibra de carbono ao pilar é dividida em duas etapas: a preparação da superfície que irá receber o reforço e a aplicação do compósito.

Garcez (2007) explica que para a colagem externa de polímeros reforçados com fibras é necessário tomar alguns cuidados específicos em relação ao preparo da superfície que irá receber o reforço, devendo ela ser desgastada para que a nata de cimento superficial seja retirada e, além disso, deve estar limpa para garantir a aderência do compósito à superfície de concreto.

A aplicação do reforço estrutural através do compósito reforçado com fibra de carbono deve ser feita por profissionais devidamente qualificados para que seja obtido o resultado esperado. As ferramentas utilizadas para a aplicação são: tesoura ou estilete (corte da fibra), rolo de espuma (aplicação do primer e da resina) e rolo metálico (alinhamento das fibras e retirada de bolhas de ar) (MACHADO, 2011).

Caso haja imperfeições geométricas, é necessário corrigi-las com argamassa epoxídica alisada com espátula com o objetivo de melhorar a adesão do compósito com a superfície de concreto, como pode ser observado na Figura 37.

Figura 37 - Correção da superfície de concreto que receberá o reforço.



Fonte: Athena Engenharia¹².

Posteriormente é aplicado um imprimador epoxídico (*primer*), como pode ser observado na Figura 38, com elevado teor de sólidos que, ao penetrar nos poros do concreto e ao estabelecer uma película sobre a superfície do concreto, cria uma interface altamente eficiente para a transmissão de esforços entre o composto e a peça de concreto.

Figura 38 - Aplicação do imprimador epoxídico.



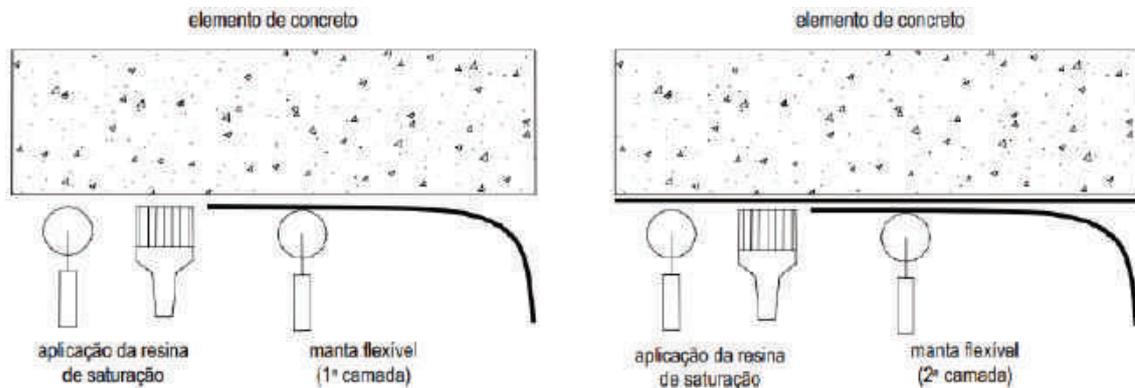
Fonte: Athena Engenharia¹³.

¹² Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=dswskwt8k8Y>>. Acesso em 22 de out. de 2020.

¹³ Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=dswskwt8k8Y>>. Acesso em 22 de out. de 2020.

Segundo Beber (2003), duas horas após a aplicação do *primer* já é possível aplicar a primeira camada de resina epóxi, e a aplicação segue como ilustrado na Figura 39.

Figura 39 - Aplicação das camadas de mantas de fibra de carbono.



Fonte: Beber (2003).

Em seguida, cortam-se as mantas de fibra de carbono, aplica-se uma demão da resina de colagem e faz-se a colagem da fibra de carbono previamente desenrolada e cortada, como ilustra a Figura 40, eliminando-se as bolhas e os desvios. A colocação da fibra deve ser feita imediatamente após a saturação, pois o tempo de aplicação da resina é muito curto, de no máximo 25 minutos, nesse intervalo ainda é possível fazer ajustes na posição das fibras (MACHADO, 2011).

Figura 40 - Aplicação da resina sobre a primeira camada (esquerda) e aplicação da segunda camada (direita).



Fonte: Athena Engenharia¹⁴.

¹⁴ Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=dswskwt8k8Y>>. Acesso em 22 de out. de 2020.

Após a colagem, outra camada de resina é aplicada para recobrir as fibras. Assim que o excesso de resina for removido, o acabamento é realizado. No final, é recomendado a aplicação de uma camada de revestimento (denominado de revestimento protetor) e/ou de proteção ao fogo, impactos, exposição a químicos, tais como a corrosão ou a radiação UV, e umidade e poderá ter um acabamento estético (SILVA, 2013). O tempo de cura do reforço estrutural de fibra de carbono deve ser verificado com o fabricante do mesmo, mas é em média de 7 dias.

É importante destacar que o reforço por flexão deverá sempre ser instalado antes dos reforços para o corte e para o confinamento, ou seja, os dois últimos reforços serão aplicados sobre o reforço por flexão, como ilustra a Figura 41. Essa sequência executiva tem por objetivo de garantir para o reforço à flexão e para o reforço ao corte a condição denominada “colagem crítica”, onde é exigida uma aderência íntima entre o concreto e o sistema composto, e para o reforço por confinamento a condição denominada de “contato íntimo”, onde as necessidades de aderência entre o sistema composto e o concreto não são mandatórias.

Figura 41 - Aplicação da manta para reforço para flexão e reforço para confinamento.



Fonte: Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono (Viapol)¹⁵.

¹⁵ Disponível em <<http://www.viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>>. Acesso em 22 de out. de 2020.

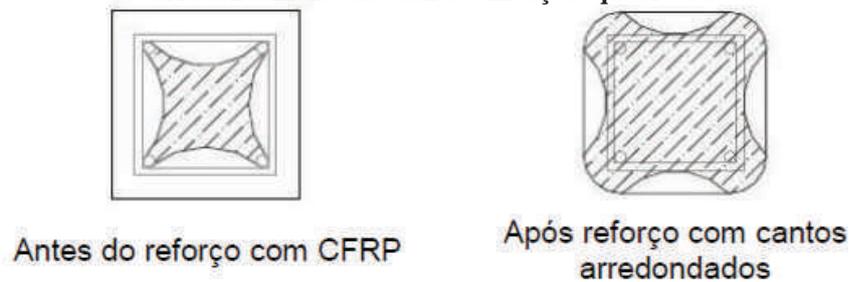
4.4.1.2 Comportamento do reforço em pilares de seção retangular e circular

Para a escolha da melhor técnica a ser utilizada para reforçar um pilar de concreto armado, também é interessante ser levado em consideração a geometria da seção transversal da peça que será reforçada, pois, de acordo com Figueira (2016), este é um importante fator que influencia no comportamento e efetividade de pilares reforçados. Para os pilares de seção transversal circular, a pressão de confinamento é uniforme em todo o perímetro da seção transversal.

No que concerne ao reforço de pilares de seção transversal quadrada ou retangular, existe o efeito de arqueamento de tensões, que causa uma distribuição de pressões de confinamento não uniforme, com concentração nos cantos da seção transversal (FIGUEIRA, 2016).

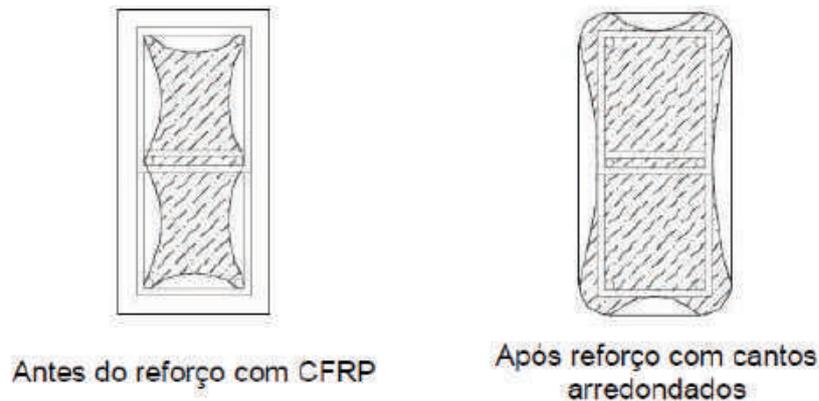
Em estudos realizados por Sudano e Hanai (2007, *apud.* FIGUEIRA, 2016), uma forma de potencializar o efeito de confinamento no reforço de pilares de seção quadrada ou retangular consiste no arredondamento dos cantos da seção transversal, diminuindo assim a concentração de tensões nestes pontos, conforme a Figura 42 e a Figura 43.

Figura 42 - Distribuição da pressão de confinamento antes e depois do reforço com CFRP e arredondamento dos cantos em seções quadradas.



Fonte: Sudano & Hanai (2007, *apud.* FIGUEIRA, 2016).

Figura 43 - Distribuição da pressão de confinamento antes e depois do reforço com CFRP e arredondamento dos cantos em seções retangulares.



Fonte: Sudano & Hanai (2007, *apud*. FIGUEIRA, 2016).

Com a aplicação de um adequado sistema de confinamento, observa-se um aumento significativo da resistência à compressão e da capacidade de deformação que se traduz numa maior ductilidade do elemento.

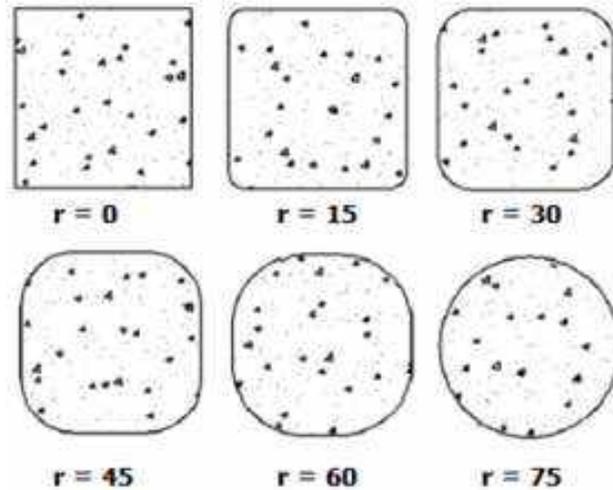
Para comprovar que o aumento da resistência e do módulo de elasticidade varia de acordo com o ângulo utilizado nos cantos dos pilares, Wang & Wu (2007, *apud*. SANTOS, ROSS e HABITZREUTER, 2015) ensaiaram pilares de 300 mm de altura e de seção quadrada (150 mm x 150 mm), sem arredondar as bordas, e com raios de 15 mm, 30 mm, 45 mm e 60 mm, ilustrados na Figura 44, além de pilares de seção circular ($r = 75$ mm). Os pilares foram ensaiados sem reforço, com uma e com duas camadas de fibra de carbono.

Nos pilares em que os cantos não foram arredondados, não houve acréscimo significativo de resistência com a aplicação do reforço de fibra de carbono. Nos modelos com $r = 15$ mm houve um aumento da resistência de 5,5% para uma camada de fibra e um aumento de 32,3% para duas camadas de fibra.

Nos pilares com $r = 30$ mm houve um acréscimo de 23,2% para uma camada e um aumento de 74,9% quando foram usadas duas camadas de reforço. Para o $r = 60$ mm ocorreu um crescimento de 57,2% para uma camada e de 248,1% para duas camadas.

Já no pilar de seção circular obteve-se o melhor resultado, houve um ganho de resistência de 80,2% para uma camada e de 274,4% para duas camadas do reforço de fibra de carbono. Nesse estudo comprovou-se que quanto maior o raio das bordas dos pilares, maior é o ganho de resistência à compressão.

Figura 44 - Seções transversais ensaiadas.

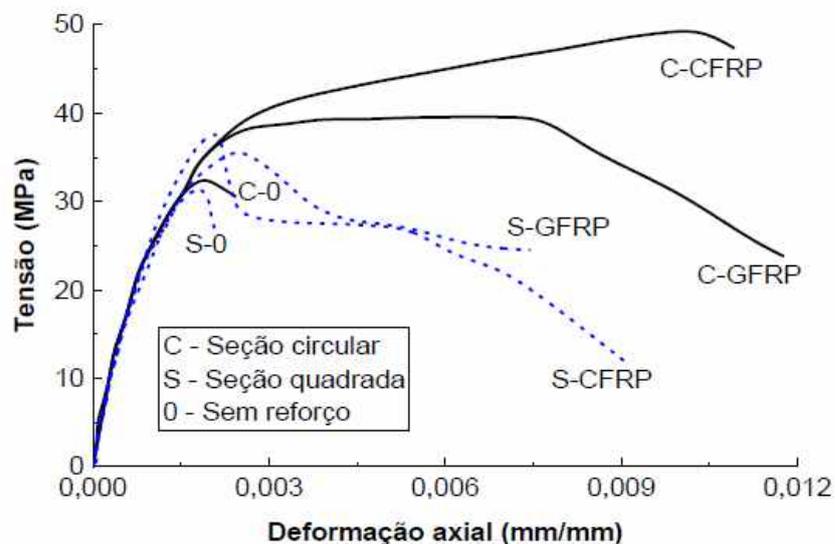


Fonte: Wang & Wu (2007, *apud.* SANTOS, ROSS E HABITZREUTER, 2015).

Em estudo realizado por Pessiki (2001, *apud.* OLIVEIRA, 2019) foram ensaiados pilares circulares com diâmetro de 152 mm e comprimento de 610 mm e pilares quadrados de lado de 152 mm e comprimento de 610 mm, que posteriormente foram reforçados com compósitos de fibras unidirecionais de vidro e de carbono e ensaiados à compressão axial monotônica.

Esse estudo mostrou que a eficiência do reforço com FRP dos pilares de seção transversal quadrada foi 30% menor do que nos pilares circulares, como pode ser observado na Figura 45.

Figura 45 - Tensão x deformação de pilares de seção transversal circular e quadrada reforçados com FRP.



Fonte: Pessiki *et al.* (2001, *apud.* OLIVEIRA, 2019).

Nota-se que nos pilares de seção transversal quadrada a deformação axial referente à tensão máxima não apresenta aumento expressivos nos pilares reforçados quando comparados com os de seção transversal circular.

4.4.1.3 Dimensionamento do reforço através da técnica EBR

Segundo o ACI 440.2R (2017), o reforço de pilares com materiais compósitos, como os FRP, não é recomendado para seções retangulares que apresentem uma proporção entre lados maior do que 2 ou que possuam lado com dimensão superior a 900 mm.

No estudo realizado por Carrazedo (2002), o reforço de compósitos de fibras de carbono demonstrou ganhos significativos de resistência com pequenas espessuras de reforço. Nos ensaios realizados com uma camada de reforço, obtiveram-se acréscimos na capacidade resistente entre 31% e 64%. Já com duas camadas de reforço, obtiveram-se acréscimos na capacidade resistente entre 62% e 105%.

Segundo Homam e Sheikh (2000, *apud*. OLIVEIRA, 2019), a durabilidade dos FRPs, geralmente, depende de vários fatores ambientais, como a umidade e exposição aos raios ultravioletas que podem causar amolecimento da matriz polimérica, provocando grandes reduções na resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação última.

Sabendo disso, o ACI 440.2R (2017) impõe que as propriedades mecânicas dos compósitos de FRP de exposição devem ser minoradas pelo coeficiente de redução ambiental. O coeficiente de redução ambiental leva em consideração o tipo de fibra do FRP e condição de exposição.

Os valores de projeto de tensão e deformação axial últimas do FRP devem ser obtidas através das equações abaixo:

$$f_{fu} = C_E * f_{fu}^* \quad (10)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E * \varepsilon_{fu}^* \quad (11)$$

Onde:

f_{fu}^* é o valor de tensão máxima à tração do FRP;

ε_{fu}^* é o valor de deformação axial do FRP (ambos fornecidos pelo fabricante do FRP ou obtidos em laboratório);

C_E é o coeficiente de redução ambiental.

O ACI 440.2R (2017) classifica os ambientes em três níveis de agressividade: interior, exterior e agressivo. No ambiente interior, o FRP está sujeito a variações de temperatura e umidade. No ambiente exterior, o FRP fica exposto a variações de umidade e temperatura, além da radiação UV. O ambiente agressivo é aquele em que o FRP fica exposto por longos períodos em ambientes de alta umidade, águas salinas ou alta alcalinidade. Os valores do coeficiente de redução ambiental para cada condição estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores do coeficiente de redução ambiental para fibra de carbono.

Condição de exposição	Fator de redução ambiental C_E
Interior	0,95
Exterior	0,85
Ambiente agressivo	0,85

Fonte: ACI 440.2R (2017).

Segundo o modelo analítico de Lam e Teng (2003, *apud*. OLIVEIRA, 2019), a capacidade de carga de um pilar confinado com FRP é diretamente ligada as propriedades mecânicas do compósito utilizado, tais como a tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação última.

Diante disso, para o dimensionamento de pilares deve-se determinar uma deformação efetiva (ε_{fe}) a qual será considerada como a deformação limite do FRP no momento da ruptura. O valor da deformação efetiva é determinado tal como apresentado na Equação 5 onde k_s é o coeficiente de eficiência da deformação e ε_{fu} é a deformação específica última no FRP obtida em ensaio uniaxial de tração.

$$\varepsilon_{fe} = k_s * \varepsilon_{fu} \quad (12)$$

Para fins de projeto, o ACI 440.2R (2017) recomenda o valor de $k_s = 0,55$ para o coeficiente de eficiência.

A pressão de confinamento última (f_l) em pilares de seção circular é obtida pela formulação apresentada na Equação 6, onde E_f é o módulo de elasticidade do FRP (Pa), n é o número de camadas do compósito, t_f é a espessura do compósito (m) e D é o diâmetro do pilar (m).

$$f_l = \frac{2 * E_f * n * t_f * \varepsilon_{fe}}{D} \quad (13)$$

A tensão de compressão última do concreto confinado (f_{ccu}) é calculada segundo a Equação 7 abaixo, onde ψ_f é o coeficiente adicional de redução de resistência (igual à 0,95) e κ_a é o coeficiente de redução devido à forma da seção transversal (igual a 1 para seções circulares).

$$f_{ccu} = f_{co} + \psi_f * 3,3 * \kappa_a * f_l \quad (14)$$

A Equação 7 leva em consideração que a ruína da estrutura ocorre unicamente pela ruptura do compósito. Entretanto, grandes deformações podem causar danos que comprometam a integridade do concreto. Dessa forma, a deformação última do concreto confinado (ε_{ccu}) é limitada pela norma em 10‰ (0,01). Caso, ultrapasse esse valor, deve-se recalculá-la a tensão de compressão última do concreto confinado para esta deformação.

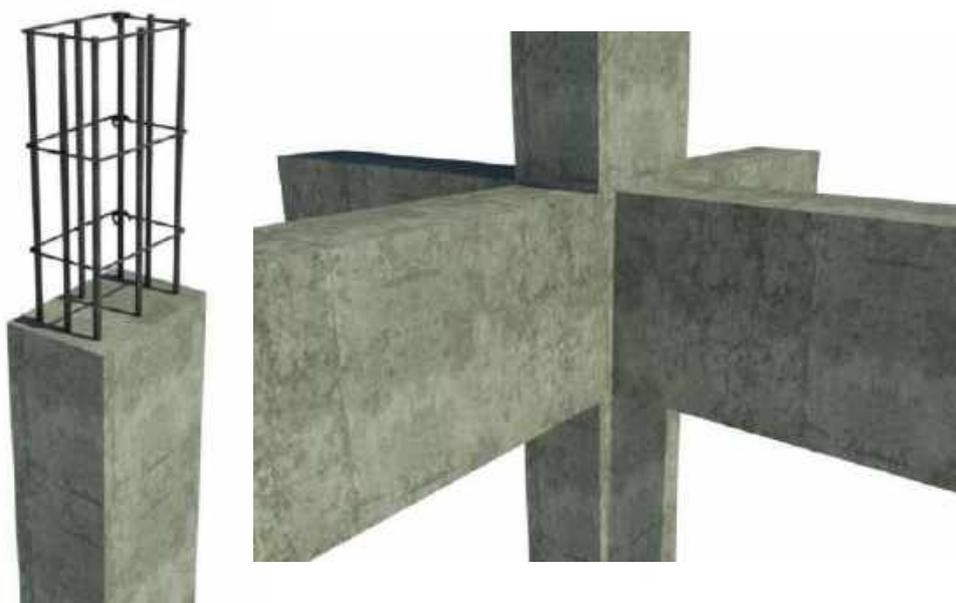
Por fim, a força resistente do pilar reforçado (ϕP_n) pode ser obtida segundo a formulação apresentada na Equação 8, onde ϕ é o coeficiente de redução de resistência (igual a 0,65 para estruturas que tem sua ruína determinada pelo esmagamento do concreto), A_g e A_s são as áreas bruta do concreto (em m²) e área total da armadura longitudinal (em m²), respectivamente, e f_y é a tensão na armadura longitudinal (em Pa).

$$\phi P_n = 0,80 * \phi * [0,85 * f_{cc} * (A_g - A_s) + f_y * A_s] \quad (15)$$

5 COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE REFORÇO ESTRUTURAL ESTUDADOS

Para a realização do comparativo, foi escolhido um pilar intermediário de concreto armado, representado na Figura 46, de seção retangular com 20 cm de largura e 30 cm de comprimento, com f_{ck} de 20 MPa e área das armaduras longitudinais de 10,00 cm² (8 barras de 12,5 mm de diâmetro) que, por mudança de utilização da estrutura, terá que ser reforçado.

Figura 46 - Representação do pilar estudado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

5.1 Reforço através da técnica EBR

Primeiramente, o pilar foi dimensionado para ser reforçado através da colagem de manta de fibra de carbono, seguindo todo o passo-a-passo e as recomendações citadas no item 4.4.1.3.

Como o ACI 440.2R (2017) recomenda, para reforço utilizando materiais compósitos, não é interessante aplicar a manta de fibra de carbono em pilares com seção quadrada ou retangular, a menos que possuem uma proporção entre os lados menor que 2. A proporção entre lados do pilar analisado é de $\frac{30 \text{ cm}}{20 \text{ cm}} = 1,5$, portanto, apesar de ter a seção transversal retangular, possui uma proporção entre lados menor que 2, permitindo que o pilar estudado seja reforçado através dessa técnica, desde que os cantos vivos sejam eliminados.

O pilar em questão está presente em ambiente exterior, onde fica exposto à variações de umidade e temperatura, além da radiação UV.

Foi obtido, através da Equação 11, presente no item 4.4.1.3, o valor da deformação última (ε_{fu}) da manta de fibra de carbono utilizada no reforço. Como o pilar está situado em ambiente exterior, o coeficiente de redução ambiental, de acordo com a Tabela 1, é de 0,85. Em testes realizados por Oliveira (2019), o valor da deformação média da fibra de carbono foi de 25,6‰.

$$\varepsilon_{fu} = 0,85 * 0,256 = 0,2176$$

A deformação excessiva (ε_{fe}) que será considerada como a deformação limite do FRP no momento de ruptura foi calculada de acordo com a Equação 12. Para fins de projeto, o ACI 440.2R (2017) recomenda o valor de $ks = 0,55$ para o coeficiente de eficiência.

$$\varepsilon_{fe} = 0,55 * 0,2176 = 0,1197$$

Para esse reforço, será utilizada apenas uma camada de manta de fibra de carbono, com módulo de elasticidade de 230 GPa e espessura de 0,17 mm. Como o cálculo da pressão de confinamento última (f_l), Equação 13, está em função do diâmetro, mas o pilar estudado possui seção retangular, foi adotada, apenas para esse cálculo, uma seção circular com 28 cm de diâmetro, pois há uma proximidade do valor das áreas, como pode ser observado abaixo.

$$A_{c, ret} = 20 \text{ cm} * 30 \text{ cm} = 600 \text{ cm}^2$$

$$A_{c, cir} = (14 \text{ cm})^2 * \pi = 615,75 \text{ cm}^2$$

$$f_l = \frac{2 * 2,30 \times 10^{11} \text{ Pa} * 1 * 0,00017 \text{ m} * 0,1197}{0,28 \text{ m}} = 3,34 \times 10^7 \text{ Pa}$$

A tensão de compressão última do concreto confinado (f_{ccu}) foi calculada de acordo com a Equação 14, seguindo as recomendações de valores dos coeficientes presentes na equação. O valor médio da resistência à compressão do concreto não confinado (f_{co}), que, obtido em experimentos laboratoriais realizados por Oliveira (2019), foi de 26,16 MPa.

$$f_{ccu} = 2,616 \times 10^7 \text{ Pa} + 0,95 * 3,3 * 1 * 3,34 \times 10^7 \text{ Pa} = 1,31 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Por fim, para o cálculo da força resistente do pilar reforçado com uma camada de manta de fibra de carbono, foi utilizada a Equação 15.

$$\begin{aligned}\phi P_n &= 0,52 * [0,85 * 1,31 \times 10^8 \text{ Pa} * (0,06 \text{ m}^2 - 0,001 \text{ m}^2) + 5,00 \times 10^8 \text{ Pa} * 0,001 \text{ m}^2] \\ &= 3,67 \times 10^6 \text{ N}\end{aligned}$$

Portanto, o pilar estudado, caso seja reforçado com uma camada de manta de fibra de carbono, poderá resistir à uma força limite de $3,67 \times 10^3 \text{ kN}$, comprovando a alta capacidade resistente que um pilar reforçado por fibra de carbono pode alcançar.

5.2. Reforço através de chapas metálicas aderidas com epóxi

O mesmo pilar será dimensionado com o objetivo de encontrar o valor da área total da seção transversal das cantoneiras metálicas utilizadas no reforço, utilizando a Equação 9 apresentada no item 4.3.3. Além disso, foi considerada a mesma força limite resistente do dimensionamento pela técnica EBR ($3,67 \times 10^6 \text{ N}$), dimensionada no item acima.

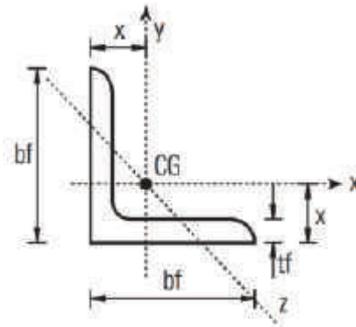
Foi considerado que o maciço do pilar receberá, nesse caso, uma força de $3,64 \times 10^6 \text{ N}$. O restante da força limite será resistida pelas cantoneiras de reforço, ou seja, $3,67 \times 10^4 \text{ N}$. O módulo de elasticidade do aço, material das chapas metálicas, é de 210 GPa, enquanto que o módulo de elasticidade do concreto foi considerado como 25,04 MPa.

$$A_r = \frac{3,64 \times 10^6 \text{ N} * 0,06 \text{ m}^2 * 2,50 \times 10^7 \text{ Pa}}{3,67 \times 10^4 \text{ N} * 2,10 \times 10^{11} \text{ Pa}} = 7,08 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Para ter a mesma capacidade resistente caso seja reforçado através do método de chapas metálicas aderidas com epóxi, o pilar estudado precisaria de uma área total da seção transversal das cantoneiras metálicas (Figura 47) de $7,08 \text{ cm}^2$.

Essa técnica necessita desses elementos nos quatro cantos do pilar, portanto, a área da seção transversal de cada cantoneira será de $1,77 \text{ cm}^2$.

Figura 47 - Representação em corte de uma cantoneira metálica.



Fonte: IME¹⁶.

Com essas informações, o perfil mais adequado para essa situação de reforço será a cantoneira com as propriedades apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades do perfil da cantoneira metálica escolhida para o reforço.

<i>bf</i> (cm)	<i>P</i> (kg/m)	<i>A</i> (cm ²)	<i>tf</i> (cm)	<i>x</i> (cm)
2,220	1,49	1,90	0,476	0,74

Fonte: IME¹⁶.

5.3 Reforço por encamisamento com concreto armado

Para finalizar a comparação, o mesmo pilar foi dimensionado para encontrar o valor da área total da seção transversal das barras de aço, considerando a capacidade resistente encontrada no dimensionamento do reforço pela técnica EBR, ou seja, $3,67 \times 10^6$ N.

Seguindo recomendação de Cánovas (1997), no item 4.2.2, que diz que a espessura mínima de reforço é de 10 cm, a nova seção após o reforço por encamisamento com concreto armado terá 30 cm de largura e 40 cm de comprimento. Outra recomendação de Cánovas (1997) que será seguida, o *fck* do concreto de reforço será 5 MPa maior que o *fck* do concreto do elemento original, ou seja, 25 MPa.

Para o cálculo da área total de aço, utilizaremos a Equação 1:

$$3,67 \times 10^6 \text{ N} = 0,06 \text{ m}^2 * 0,9 * 2,5 \times 10^7 \text{ Pa} + 0,06 \text{ m}^2 * 0,9 * 2,0 \times 10^7 \text{ Pa} + A_s * 5,0 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$A_s = 2,489 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

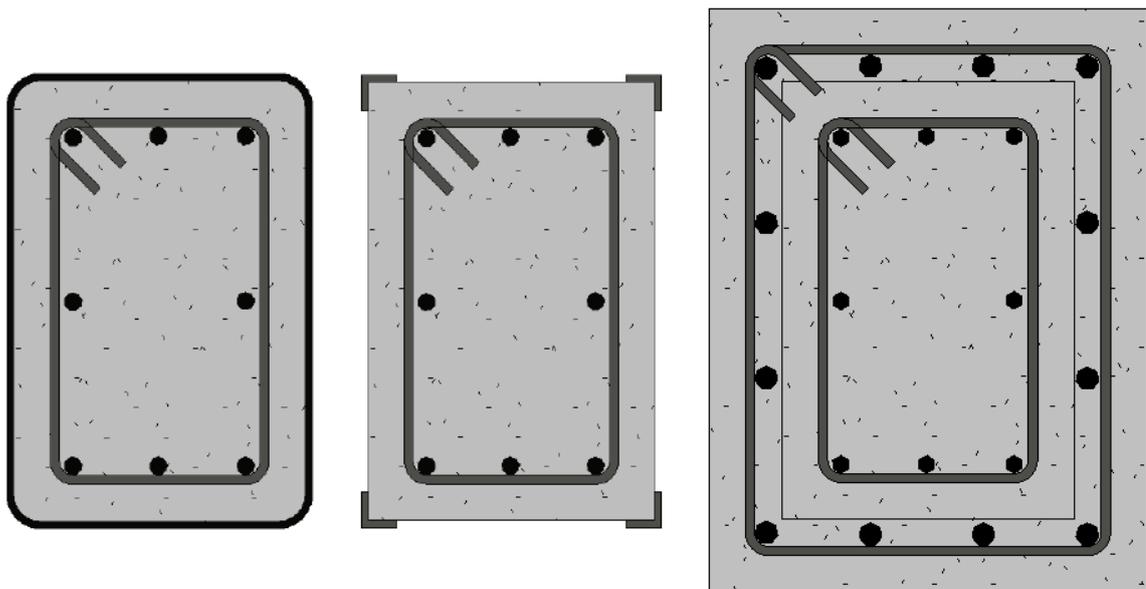
¹⁶ Disponível em <<http://www.ime.eb.br/~moniz/metallica/tabela-cantoneiras.pdf>>. Acesso em 10 de dez. de 2020.

Para o reforço por meio do encamisamento com concreto armado conseguir uma capacidade resistente semelhante ao reforço através da colagem de manta de fibra de carbono, seria necessário cerca de $14,89 \text{ cm}^2$ de seção transversal de barras de aço, pois o pilar original já possui $10,00 \text{ cm}^2$ de armadura longitudinal.

5.4 Resumo dos dimensionamentos

Após a execução de cada dimensionamento, levando em consideração as respectivas recomendações, podemos ilustrar na Figura 48 e resumir na Tabela 3 como ficaram os pilares dimensionados pelos métodos estudados neste trabalho.

Figura 48 - Seção transversal do pilar estudado reforçado pela técnica EBR (esquerda), Seção transversal do pilar estudado reforçado por cantoneiras metálicas (meio) e Seção transversal do pilar estudado reforçado por encamisamento com concreto armado (direita).



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 3 – Comparativo entre os métodos de reforço considerando a mesma capacidade resistente.

	Método de reforço		
	Colagem de manta de fibra de carbono	Chapas metálicas aderidas com epóxi	Encamisamento com concreto armado
Capacidade resistente	$3,67 \times 10^6 \text{ N}$	$3,67 \times 10^6 \text{ N}$	$3,67 \times 10^6 \text{ N}$
Reforço	1 camada de manta	$7,08 \text{ cm}^2$ de aço	$14,89 \text{ cm}^2$ de aço

Fonte: Elaborado pelo Autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após o comparativo entre os métodos estudados, de acordo com os modelos de dimensionamentos apresentados, podemos perceber a grande capacidade resistente de um reforço com manta de fibra de carbono, tornando-o uma essencial escolha em casos onde há necessidade de resistir à grandes esforços.

Juntamente com a listagem das manifestações patológicas mais recorrentes em pilares de concreto armado e com uma abordagem sobre as características e propriedades dos métodos mais comumente utilizados para reforçar essas estruturas, podemos resumir e entender qual o método recomendado para cada tipo de manifestação encontrada, como podemos observar na Tabela 4, onde é possível perceber que o reforço por meio de encamisamento com concreto armado é indicado para a maioria das ocorrências, o que justifica, além da sua vantagem econômica e facilidade na execução, o seu amplo uso como método de reforço estrutural na construção civil.

Enquanto que o método de reforço estrutural por meio de chapas metálicas aderidas com epóxi não é recomendado para sanar deficiências originadas por agentes químicos, pois a interação desses agentes com as chapas pode levar a uma rápida corrosão dos perfis metálicos e uma conseqüente falha no reforço, além de não ser recomendado em casos de estruturas sujeitas a grandes esforços de tração e compressão. Essas particularidades faz o uso de chapas metálicas como o método menos utilizado para reforço de estruturas comparado com os outros abordados neste trabalho.

O reforço por meio de colagem de manta de fibra de carbono é bastante recomendado em casos de ocorrência de fissuras originadas por causas mecânicas, devido, principalmente, sua elevada resistência à tração.

Por também possuir uma boa resistência à corrosão, a fibra de carbono é indicada para reforço de estruturas que estejam situadas em ambientes corrosivos, como áreas próximas ao mar. Em contra partida, não é recomendada sua utilização em ambientes com presença de sulfatos ou de chuva ácida; tampouco para corrigir deficiências provenientes de fenômenos físicos, como assentamento plástico ou segregação do concreto.

Tabela 4 – Métodos de reforço recomendados para cada tipo de fissura encontrada.

Classificação do fenômeno	Manifestação patológica	Método de reforço		
		Encamisamento com concreto armado	Chapas metálicas aderidas com epóxi	Colagem de manta de fibra de carbono
Físico	Fissuras de falsa pega	NÃO ADEQUADO	ADEQUADO	NÃO ADEQUADO
	Fissuras de assentamento plástico	ADEQUADO	ADEQUADO	NÃO ADEQUADO
	Segregação do concreto	ADEQUADO	NÃO ADEQUADO	NÃO ADEQUADO
	Fissuras causadas por ausência de juntas de dilatação	NÃO ADEQUADO	ADEQUADO	NÃO ADEQUADO
Químico	Fissuras por corrosão das armaduras	ADEQUADO	NÃO ADEQUADO	ADEQUADO
	Fissuras originadas por ataques de cloretos	ADEQUADO	NÃO ADEQUADO	NÃO ADEQUADO
	Fissuras originadas por ataques de sulfatos	ADEQUADO	NÃO ADEQUADO	NÃO ADEQUADO
Mecânico	Fissuras por flexão	ADEQUADO	ADEQUADO	ADEQUADO
	Fissuras por tração	ADEQUADO	ADEQUADO	ADEQUADO
	Fissuras por esforço cortante	ADEQUADO	ADEQUADO	ADEQUADO
	Esmagamento do concreto	ADEQUADO	NÃO ADEQUADO	ADEQUADO

	Fissuras por flambagem	ADEQUADO	NÃO ADEQUADO	ADEQUADO
--	------------------------	----------	--------------	----------

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Este trabalho também apresentou que outro fator que deve ser levado em consideração na escolha do método de reforço é a geometria da seção transversal do pilar que será reforçado, pois como mostra a Tabela 5, outro ponto que justifica o amplo uso do reforço por encamisamento com concreto armado é sua característica de ser utilizado em todos os tipos de seção transversal mais comumente encontradas em pilares.

Por necessitar de cantoneiras para a fixação dos perfis metálicos distribuídos na transversal, o método de reforço por chapas metálicas aderidas com epóxi não pode ser executado em pilares de seção circular.

Tabela 5 – Métodos de reforço recomendado para cada tipo de seção transversal.

Geometria da seção transversal	Método de reforço		
	Encamisamento com concreto armado	Chapas metálicas aderidas com epóxi	Colagem de manta de fibra de carbono
Quadrada	ADEQUADO	ADEQUADO	ADEQUADO, MAS COM RESSALVAS
Retangular	ADEQUADO	ADEQUADO	ADEQUADO, MAS COM RESSALVAS
Circular	ADEQUADO	NÃO ADEQUADO	ADEQUADO

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Por necessitar de cantos arredondados para evitar alta concentração de tensões nas extremidades, o reforço por colagem de manta de fibra de carbono é recomendado apenas para pilares com seções transversais circulares, pois a tensão de confinamento é perfeitamente distribuída em toda a seção. Pilares com seções quadradas e retangulares que apresentem uma proporção entre os lados menor que dois também podem ser reforçados por este método, mas precisam, anteriormente, eliminar os cantos vivos, causando um arredondamento da seção transversal.

REFERÊNCIAS

ACI 440.2R 2017 AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.2R-17** – Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. 2017.

AL-MHAIDIB, Abdullah I. **Swelling Behaviour of Expansive Shales from the Middle Region of Saudi Arabia**. 1998. Civil Engineering Department, College of Engineering, King Saud University, 1998.

ANDRADE, Carmen. **Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras**. São Paulo: Pini, 1992. 104 p.

ANDRADE, Jairo José de Oliveira. **Danos em Edificações: concreto, alvenaria e revestimentos**. Porto Alegre, 2001.

ARALDI, E. **Reforço de pilares por encamisamento de concreto armado: Eficiência de métodos de cálculo da capacidade resistente comparativamente a resultados experimentais**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

ARAÚJO, A. de B., LOPES, J. R. **Quadros orientativos para o diagnóstico de patologias em estruturas**. Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Sul, Prior Velho, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6120**: Ações para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 2019.

BASTOS, P. S. dos S. **Pilares de concreto armado - Notas de aula**. 2015. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2015.

BEBER, Andriei J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. 317f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CALLISTER, William D.; **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. 1 Ed. Tradução de M. C. Marcondes; C. W. F. dos Santos; B. Cannabrava. São Paulo: Ed. Pini, 1988. 522 p.

CARRAZEDO, R. **Mecanismos de confinamento e suas implicações no reforço de pilares de concreto por encamisamento com compósito de fibras de carbono**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.

CARVALHO, Roberto C.; FILHO, Jasson R. de F. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado: segundo a NBR 6118: 2014**. 4. ed. São Paulo: EdUFScar, 2014.

CHASTRE, C. Materiais e tecnologias de reforço de estruturas de betão – potencialidade e limitações. **REHABEND 2014 – Congresso Latinoamericano “Patología de la construcción, tecnología de la rehabilitación y gestión del patrimonio”**. Santander, Espanha, 2014.

CLÍMACO, J. C. T. S. **Estruturas de concreto armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação**. 2ª Edição, revisada. Editora Universidade de Brasília: Finatec. Brasília, 2008.

DALFRÉ, G. M. **Flexural and shear strengthening of RC elements**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2013.

FERREIRA, D. B. **Análise experimental de pilares de concreto armado, reforçados com concreto auto adensável e conectores**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

FIGUEIRA, S. P. S. **Reforço de pilares por confinamento com mantas de fibras de carbono - Avaliação de modelos de comportamento**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade da Madeira, Funchal, 2016.

GARCEZ, M. R. **Alternativas para Melhoria no Desempenho de Estruturas de Concreto Armado Reforçadas pela Colagem de Polímeros Reforçados com Fibras**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul Escola de Engenharia. Porto Alegre, 2007.

GRAZIANO, Francisco Paulo. **Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Armado**. São Paulo: O Nome Da Rosa Editora, 2005.

HABITZREUTER, L.; ROSS, H. L. S.; SANTOS, G. M. S. **Análise da eficiência do reforço estrutural com fibra de carbono em pilares curtos**. 2013. TCC (Graduação). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

HELENE, Paulo R. L. **Manual Prático para Reparo e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Pini, 1988.

HELENE, Paulo R. L. **Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto**. Ed. PINI, São Paulo, 1992.

ISAIA, Geraldo C. **Controle de Qualidade das Estruturas de Concreto Armado**. Santa Maria: Edições UFSM, 1988. 119p.

KAPLAN, H.; YILMAZ, S. **Seismic Strengthening of Reinforced Concrete Buildings**. 2012. Pamukkale University, Department of Civil Engineering Turkey, 2012.

LIMA, D. J. N. **A manutenção na conservação do bom desempenho das edificações ao longo de sua vida útil**. 2016. TCC (Graduação) – Departamento de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MACHADO, Ari de Paula. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. São Paulo: Better, 2011.

MACHADO, Ari de Paula. **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. São Paulo. PINI, 2002.

MARCELLI, M. **Sinistros na construção civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras**. São Paulo: Pini, 2007.

MAZER, W.; MACIOSKI, G.; SOTO, N. T. A.; BAETTKER, E. C. Determinação do teor de íons sulfato em estruturas de concreto. **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, 2014, Florianópolis. Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. Tradução de Paulo Helene et al. 1. ed. São Paulo: Pini, 1994.

NAKAMURA, Juliana. **Reparo, reforço e recuperação de concreto**. Revista Técnica, ed. 146, mai. 2009.

NASCIMENTO, P. P. **Análise experimental de pilares de concreto armado submetidos à flexo-compressão, reforçados com concreto auto-adensável e conectores**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

NETA, I. C. de A. **Análise experimental de pilares de concreto armado reforçados com lâminas de CFRP utilizando a técnica NSM**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

OLIVEIRA, J. C. C. de. **Técnicas para intervenção em estruturas de concreto armado**. 2015. TCC (Graduação) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

OLIVEIRA, M. do C. **Análise do comportamento estrutural e durabilidade de pilares de concreto armado reforçados com manta de GFRP**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

OLIVEIRA, R. B. de.; SANTOS, M. F. dos. **Análise comparativa do efeito da carbonatação entre o concreto convencional e o concreto com adição de fibra vegetal de juta**. 2018. UNINORTE, Manaus, 2018.

PÉREZ, G. G. **Reforço de estruturas de betão armado com compósitos de fibra de carbono**. Relatório de Estágio para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Ramo Construções, Porto, setembro, 218, 2014.

PINHEIRO, Libânio M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia de Estruturas. São Carlos, 2007.

RAISDORFER, J.W.; SOUZA, D.J.; KRUCHELSKI, N.; NIKKEL, S.; TORRE, E.M.; LENCZUK, B.T.; MEDEIROS, M.T.F. Carbonatação – Previsão da vida útil das obras de artes especiais. 2015. **4ª ExpoPavimentação**. Foz do Iguaçu, 2015.

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.

RIGAZZO, A. O. **Reforço de pilares de concreto armado por cintamento externo com mantas flexíveis de fibras de carbono**. 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

SANTOS, F. P. S. L. dos. **Técnicas de recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. 2017. TCC (Graduação) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.

SANTOS, M. R. G. dos. **Deterioração das estruturas de concreto armado – Estudo de caso**. 2012. Monografia (Especialização) – Curso de Especialização em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SFIKAS, I. P. *Self-compacting concrete: history and current trends*. Concrete, no. June, London, p. 5, 2017.

SILVA, A. D. L. **Reforço de Estruturas de Betão Armado com CFRP**. 2013. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2013.

SILVA, I. O. da. **Considerações sobre a armadura transversal de pilares de concreto armado**. 2015. TCC (Graduação). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

SILVA, M. J. M. **Análise numérica de pilares de concreto armado submetidos à flexo compressão**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2018.

SILVA, P. F.; **A Durabilidade da Estruturas de Concreto Aparente em Atmosfera Urbana**. 1º ed. São Paulo: Pini, 1995.

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

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

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. São Paulo: Pini, 1989.

TRAZZI, L. C; GIANDON, A. C. Execução de pilares de concreto armado moldados in-loco e suas possíveis manifestações patológicas. **Revista UNINGÁ Review**, Atalaia, Paraná, v. 28, n. 3, p. 16-23, out./dez. 2016. Disponível em:
<http://revista.uninga.br/index.php/uningareviews/article/view/1898/1496>. Acesso em: 1 abr. 2020.

TRINDADE, D. dos S.; **Patologia em estruturas de concreto armado**. 2015. TCC (Graduação). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

ZUCCHI, F. L. **Técnicas para o reforço de elementos estruturais**. 2015. TCC (Graduação) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.