



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

ANA PAULA ROMEIRA SILVA
BENILCIA GOMES DE ABREU

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE PILARES DE CONCRETO ARMADO
REFORÇADOS EMPREGANDO DIFERENTES TÉCNICAS DE
CONFINAMENTO**

Tucuruí – PA

2016

ANA PAULA ROMEIRA SILVA
BENILCIA GOMES DE ABREU

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE PILARES DE CONCRETO ARMADO
REFORÇADOS EMPREGANDO DIFERENTES TÉCNICAS DE
CONFINAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará Campus Universitário de Tucuruí.

Orientador: Prof. Drº. Aarão Ferreira Lima Neto.

Tucuruí – PA

2016

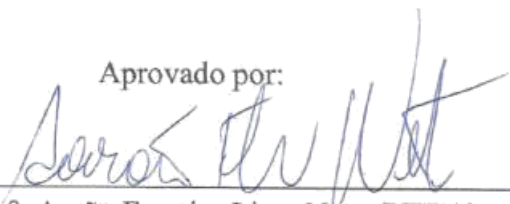
ANA PAULA ROMEIRA SILVA
BENILCIA GOMES DE ABREU

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE PILARES DE CONCRETO ARMADO
REFORÇADOS EMPREGANDO DIFERENTES TÉCNICAS DE
CONFINAMENTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
Civil, na Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Federal do Pará Campus
Universitário de Tucuruí.

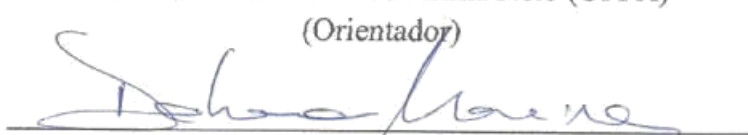
Orientador: Prof. Drº. Aarão Ferreira Lima
Neto.

Aprovado por:



Prof. Drº. Aarão Ferreira Lima Neto (UFPA)

(Orientador)



Prof. Mª. Débora Dias Costa Moreira (UFPA)

(Examinador Interno)



Engº. Civil Edemilton de Souza Garcia

(Examinador Externo)

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho a Deus, que nos iluminou durante esta caminhada e aos nossos familiares pelo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar sempre ao nosso lado nos dando força para que superássemos todas as dificuldades. Aos nossos familiares pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

À Universidade e todos os professores pelo conhecimento compartilhado que contribuíram para nossa formação não só acadêmica, como a construção do nosso caráter e ética que levaremos para nossa vida profissional.

Ao professor Aarão Ferreira Lima Neto, pela orientação, apoio e confiança.

À professora Fernanda Gouveia pela colaboração neste trabalho.

Ao professor Wassin e à equipe do laboratório de Engenharia Mecânica pelo apoio para realização dos ensaios dos materiais, em especial o Jurandi e o Romário.

As empresas VIAPOL pelas doações da fibra de carbono e os componentes de aplicação, e a FIBERTEX pela tela de fibra de vidro.

A equipe EEMI, à Coordenadoria de Educação da SEMOB Parauapebas, à técnica de laboratório Francirene e toda equipe do laboratório de Engenharia Civil.

Aos colegas de turma que fizeram parte da nossa formação e estiveram presentes durante esses cinco anos. Em especial ao Shaymon, Marília, Aurélio, Wallace, Romário e todos que de alguma forma contribuíram na realização deste trabalho.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da nossa formação, o nosso muito obrigado.

O temor do Senhor é o princípio da sabedoria, todos os que cumprem os seus preceitos revelam bom senso. Ele será louvado para sempre (SALMO 111).

RESUMO

A cada ano surgem novas técnicas empregadas para o reforço e recuperação de estruturas em concreto armado, especialmente as aplicadas para reforço de pilares, objetivando o confinamento e consequentemente o aumento da capacidade portante do mesmo. Em função deste contexto, esta pesquisa realizou uma análise experimental sobre as diferentes técnicas de reforços aplicadas em pilares de concreto armado. Com o objetivo de avaliar a eficiência do confinamento, efeito este que consiste na restrição da expansão lateral através do encamisamento de pilares, o comportamento da variação da seção transversal, a capacidade resistente, os modos de rupturas e as deformações. A série ensaiada consistiu em 10 pilares submetidos à compressão axial centrada. Foram moldados pilares com comprimento de 500 mm, empregando seções circulares e quadradas para cada uma das situações, respectivamente. Sendo assim, foram moldados dois pilares de referência com diâmetro de 150 mm e base (140 x 140) mm, dois reforçados com concreto armado tendo diâmetro de 220 mm e base de (220 x 220) mm, dois empregando argamassa armada com tela soldada e diâmetro de 200 mm e base de (190 x 190) mm, dois utilizando argamassa armada com tela de fibra de vidro, dimensões iguais ao de tela soldada e dois empregando um sistema composto por fibra de carbono com diâmetro de 150 mm e base (140 x 140) mm. Os resultados indicaram que os pilares de seção circular apresentaram um desempenho superior quando comparados aos de seção quadrada. Ao se analisar a eficiência dos reforços, os pilares de concreto armado, fibra de carbono e tela soldada, mostraram-se com aumento significativo da capacidade resistente. Os pilares com seção circular atingiram valores superiores a 170%, em relação aos pilares de referência, provavelmente pelo fato da reação de confinamento ser distribuída uniformemente, ao contrário dos pilares de seção quadrada, onde ocorre concentrações de tensões pelo efeito do arqueamento. Dentre os pilares com seção quadrada, o pilar reforçado com fibra de carbono mostrou-se mais eficiente, apresentando um ganho de resistência superior a 80% em relação ao pilar de referência.

Palavras-chaves: Pilares, reforço, concreto armado, confinamento.

ABSTRACT

Every year there are new techniques used for the fortification and restoration of structures in reinforced concrete, especially the ones applied for reinforcing columns, aiming confinement and raise of the bearing capacity of the same. Given this context, this research conducted an experimental analysis about the different reinforcement techniques used in reinforced concrete columns. Purposing to evaluate the confinement efficiency, an event which consists in restricting the lateral expansion through the jacketing of columns, the behavior of the variation of the cross section, the bearing capacity, ways of breaks and deformations. The tested series consisted of 10 columns subjected to centered axial compression. 500 mm long with columns were cast, using circular and square sections for each of the situations, respectively. As such, two columns were cast as reference with diameter of 150 mm and base (140 x 140) mm, two strengthened columns with reinforced concrete with diameter of 220 mm and base (220 x 220) mm, two using reinforced mortar with welded screen and diameter of 200 mm and base (190 x 190) mm, two using reinforced mortar with fiberglass screen, dimensions equal to the welded screen and two using a system composed of carbon fiber with diameter of 150 mm and the base (140 x 140) mm. The results indicated that the circular section columns showed a superior performance when compared to the ones of the square section. When analyzing the efficiency of the reinforcements, the columns of reinforced concrete, carbon fiber and welded screen, showed up with a significant increase in bearing capacity. The columns with circular cross section achieved values greater than 170% in relation to the reference ones, probably because the confinement reaction is uniformly distributed, unlike the square section columns, where stress concentration occurs by the effect of bending. Among the sections of square columns, the column reinforced with carbon fiber is more efficient, showing up strength gain exceeding 80% compared to the reference column.

Keywords: Columns, reinforcement, reinforced concrete, confinement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Catedral de Belo Horizonte.....	4
Figura 2 – Hipóteses para reconversão de estruturas com desempenho insatisfatório.....	5
Figura 3 – Representação dos pilares em uma estrutura.	7
Figura 4 – Disposições das barras longitudinais mínimas para diversas seções.	8
Figura 5 – Reforços em pilares por encamisamento total.	14
Figura 6 – Reforços em pilares por encamisamento parcial.....	15
Figura 7 – Reforço com concreto projetado.	15
Figura 8 – Configurações de reforço.	15
Figura 9 – Tensões e deformações de sistemas não confinados (a) e confinados (b).	16
Figura 10 – Representação esquemática de um sistema composto com fibras de carbono.....	17
Figura 11 – Métodos de aplicação do reforço com PRFC em pilares.	19
Figura 12 – Reforço de pilares com encamisamento total de PRFC.....	19
Figura 13 – Distribuição da pressão de confinamento antes e depois do reforço com PRFC e arredondamento dos cantos.	20
Figura 14 – Exemplos de seções de pilares reforçadas através de elementos metálicos.....	20
Figura 15 – Reforço em chapas metálicas com colagem (a) e com chumbamento (b).	21
Figura 16 – Reforço por chumbamento de perfis metálicos.....	21
Figura 17 – Reforço com chapas de aço.....	22
Figura 18 – Seção transversal do PQR e PCR.....	32
Figura 19 – Seção transversal do PQCA e PCCA.	32
Figura 20 – Seção transversal do PQFC e PCFC.	32
Figura 21 – Seção transversal do PQTS e PCTS.....	32
Figura 22 – Seção transversal do PQFV e PCFV.....	32

Figura 23 – Representação das armadura dos pilares de referência.	33
Figura 24 – Representação das armadura do reforço com concreto armado.	33
Figura 25 – Representação da instrumentação dos pilares reforçados com concreto armado (a), tela de fibra de vidro e tela soldada (b), fibra de carbono (c) e pilar de referência (d).	34
Figura 26 – Representação da instrumentação dos pilares.	34
Figura 27 – Esquema de ensaio na prensa hidráulica.	35
Figura 28 – Formas dos pilares de referência da seção circular (a) e quadrada (b), com armadura instrumentada e espaçadores.	36
Figura 29 – Ensaio de abatimento do tronco de cone (a) e lançamento e adensamento do concreto (b). 37	
Figura 30 – Cura úmida dos corpos de prova.	37
Figura 31 – Determinação do índice de consistência da argamassa.	38
Figura 32 – Máquina de ensaio para argamassa.	38
Figura 33 – Ensaio à tração na flexão (a) e à compressão (b).	39
Figura 34 – Primer e resina epóxi (a) e a manta de fibra de carbono (b).	41
Figura 35 – Máquina universal para ensaios mecânicos.	41
Figura 36 – Corpos de prova (a) e modo de ruptura do mesmo (b).	42
Figura 37 – Tela de fibra de vidro.	43
Figura 38 – Corpo de prova de tela de fibra de vidro (a) e posionado na garra (b).	43
Figura 39 – Tela soldada galvanizada.	45
Figura 40 – Corpo de prova de tela soldada (a) e posicionamento do mesmo na garra (b).	45
Figura 41 – Aplicação do primer (a) e da resina epoxi (b).	46
Figura 42 – Utilização do rolo metálico e detalhe da sobreposição (a), aspecto da aplicação da segunda camada de resina (b) e aspecto final do sistema composto (c).	46
Figura 43 – Aspecto da superfície apicoada do modelo de seção quadrada (a) e o de seção circular (b). 47	
Figura 44 – Armadura do reforço instrumentada.	47
Figura 45 – Modelos preparados para o reforço com tela soldada e de fibra de vidro.	48

Figura 46 – PQR posicionado na prensa (a), formação das fissuras (b) e ruptura (c).....	52
Figura 47 – PCR posicionado na prensa (a) e ruptura (b e c).....	52
Figura 48 – PQCA posicionado na prensa (a), fissuração (b) e ruptura (c).	53
Figura 49 – PCCA posicionado na prensa (a), mapeamento da fissuração (b) e ruptura (c). ..	53
Figura 50 – PQFC posicionado na prensa (a) e ruptura (b e c).	54
Figura 51 – PCFC posicionado na prensa (a) e ruptura (b).	54
Figura 52 – PQTS posicionado na prensa (a), início da fissuração (b) e ruptura (c).	55
Figura 53 – PCTS posicionado na prensa, (a) início da fissuração (b) e ruptura (c).....	55
Figura 54 – PQFV posicionado na prensa (a) e ruptura do pilar (b e c).....	56
Figura 55 – PCFV posicionado na prensa (a), formação das fissuras (b) e ruptura (c).....	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva Tensão x Deformação do aço utilizado para armadura transversal.	39
Gráfico 2 – Curva Tensão x Deformação do aço utilizado para armadura longitudinal.	40
Gráfico 3 – Curva Tensão x Deformação do compósito.	42
Gráfico 4 – Curva Tensão x Deformação da fibra de vidro.	44
Gráfico 5 – Comparação entre o cálculo teórico e o resultado experimental.....	51
Gráfico 6 – Curva Carga x Deformação dos extensômetros posicionados no concreto e no reforço.	57
Gráfico 7 – Curva Carga x Deformação da armadura transversal.....	57
Gráfico 8 – Curva Carga x Deformação da armadura longitudinal.....	58
Gráfico 9 – Curva Carga x Deformação do PRQ (a), PCR (b), PQCA (c), PCCA (d), PQFC (e) e PCFC (f).	59
Gráfico 10 – Curva Carga x Deformação do PQTS (a), PCTS (b), PQFV (c) e PCFV (d).	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Indicação de cobrimento nominal de acordo com a CAA.....	9
Tabela 2 – Propriedades da fibra de Carbono.....	18
Tabela 3 – Traço unitário em massa do concreto.	36
Tabela 4 – Resistência à compressão e à tração diametral.	37
Tabela 5 – Propriedades mecânicas dos aços utilizados.....	39
Tabela 6 – Propriedades da fibra de carbono.	40
Tabela 7 – Propriedades da resina epóxi e do primer.....	40
Tabela 8 – Resultados do ensaio de tração.	42
Tabela 9 – Resultados do ensaio à tração da tela de fibra de vidro.....	44
Tabela 10 – Cargas de ruptura e ganho de resistência dos pilares.	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classe de agressividade ambiental (CAA).	9
Quadro 2 – Detalhes dos pilares ensaiados.	31
Quadro 3 – Nomenclatura adotada para os extensômetros dos pilares.	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAA	Classe de agressividade ambiental
CAF	Concreto com adição de fibras
FIB	Fédération Internationale du Béton
FRP	Fiber reinforced polymer
GFRP	Glass fiber reinforced polymer
GPa	Giga Pascal
ISO	International Organization for Standardization
MPa	Mega Pascal
NBR	Norma Brasileira
PCCA	Pilar circular reforçado com concreto armado
PCFC	Pilar circular reforçado com fibra de carbono
PCFV	Pilar circular reforçado com argamassa armada de tela de fibra de vidro
PCR	Pilar circular de referência
PCTS	Pilar circular reforçado com argamassa armada de tela soldada
PQCA	Pilar quadrado reforçado com concreto armado
PQFC	Pilar quadrado reforçado com fibra de carbono
PQFV	Pilar quadrado com argamassa armada de tela de fibra de vidro
PQR	Pilar quadrado de referência
PQTS	Pilar quadrado reforçado com argamassa armada de tela soldada
PRF	Polímero reforçado com fibras
PRFC	Polímero reforçado com fibras de carbono
PRFV	Polímero reforçado com fibras de vidro

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{st}	Área total da armadura longitudinal
E_f	Módulo de elasticidade do FRP
f'_c	Resistência especificada de compressão do concreto
f'_{cc}	Resistência à compressão do concreto confinado
f_{fe}	Tensão de tração na fibra de carbono
f_l	Pressão máxima de confinamento devido à jaqueta de FRP
f_y	Resistência ao escoamento do aço da armadura longitudinal
$t_{f'}$	Espessura de uma camada de fibra de carbono
t_f	Espessura do laminado FRP
ε'_c	Deformação máxima do concreto desconfiando correspondente a f'_c , pode ser considerado como 0,002
ε_{ccu}	Deformação axial de compressão última do concreto confinado
ε_{fe}	Nível efetivo de deformação no reforço de FRP relacionado a ruptura
ε_{fe}	Nível efetivo de deformação no reforço do FRP relacionado a ruptura
ψ_f	Fator de redução de resistência e corresponde a 0,95 para seções com envolvimento completo ao corte
$\emptyset$	Fator de redução da resistência
A_c	Área da seção transversal do concreto
A_c	Área de seção transversal de concreto
A_e	Área da seção transversal efetivamente confinada do concreto
A_g	Área bruta de concreto
A_g	Área da seção bruta do concreto
$A_{s, \text{máx.}}$	Armadura longitudinal máxima
$A_{s, \text{mín.}}$	Armadura longitudinal mínima
b	Largura da face comprimida
C_s	Comparativo do acréscimo de carga com relação a seção transversal
D	Diâmetro da seção circular de um membro comprimido
E_f	Módulo de elasticidade do FRP
ε_f	Deformação do reforço FRP
ε_{ys}	Deformação de tração correspondente à tensão de escoamento

F	Força normal
f_c	Resistência à compressão
f_{cd}	Resistência de cálculo do concreto
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
f_{tu}	Tensão última de tração
$f_{t,D}$	Resistência à tração por compressão diametral
f_u	Tensão última do aço
f_{yd}	Resistência de cálculo de escoamento do aço
f_{ys}	Tensão de escoamento do aço
h	Espessura ou altura de um membro
i	Raio de giração do pilar
k_a	Fator de eficiência para o reforço de FRP na determinação de f'_{cc}
K_b	Fator de eficiência para o reforço de FRP na determinação de ϵ_{ccu}
L_e	Comprimento de flambagem do pilar
n	Número de camadas de fibras de carbono
N_d	Força normal de cálculo
P_r	carga última do pilar de referência
P_u	carga última dos pilares com e sem reforço
r_c	Raio dos cantos (quinas) de uma seção transversal prismática confinada com FRP
λ	Índice de esbeltez
ρ_g	Relação entre a área da armadura de aço longitudinal e a área da seção transversal de um membro em compressão
ϕ	Diâmetro das barras da armadura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVA	2
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 Objetivo Geral	2
1.2.2 Objetivos Específicos	3
2 REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO.....	4
2.2 REFORÇO, RECUPERAÇÃO E REABILITAÇÃO DAS ESTRUTURAS.....	5
2.3 PILARES DE CONCRETO ARMADO	6
2.3.1 NBR 6118 (2014)	7
2.3.2 ACI 318 (2014).....	10
2.3.3 ACI 440.2R (2008).....	10
2.4 TIPOS DE REFORÇOS DE PILARES	13
2.4.1 Reforço com concreto armado.....	14
2.4.2 Reforço com fibras de carbono.....	17
2.4.3 Reforço com chapas e perfis de aço	20
2.4.4 Reforço com fibra de vidro.....	22
2.5 ESTUDOS REALIZADO SOBRE REFORÇO DE PILARES	23
2.5.1 Takeuti (1999 e 2003).....	23
2.5.2 Rigazzo (2003)	25
2.5.3 Sudano (2005 e 2010).....	26
2.5.4 Carrazedo (2002 e 2005)	27
2.5.5 Nascimento (2009)	29
2.5.6 Damasceno (2013).....	30
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	31
3.1 ARMADURA LONGITUDINAL E TRANSVERSAL	32
3.2 INSTRUMENTAÇÃO	34
3.3 MÉTODO DE ENSAIO	35
3.4 FORMAS.....	35
3.5 CONCRETO.....	36
3.6 ARGAMASSA	37
3.7 AÇO.....	39

3.8 MANTA DE FIBRA DE CARBONO	40
3.9 TELA DE FIBRA DE VIDRO	42
3.10 TELA SOLDADA GALVANIZADA.....	44
3.11 APLICAÇÃO DO REFORÇO COM FIBRAS DE CARBONO	45
3.12 PREPARO DA SUPERFÍCIE E EXECUÇÃO DO REFORÇO COM CONCRETO ARMADO E ARGAMASSA ARMADA	46
4 RESULTADOS E ANÁLISES	49
4.1 CARGAS DE RUPTURA	49
4.2 MODOS DE FISSURAÇÃO	51
4.3 DEFORMAÇÕES NO CONCRETO, ARGAMASSA E FIBRA DE CARBONO	56
4.4 DEFORMAÇÕES NA ARMADURA TRANSVERSAL.....	57
4.5 DEFORMAÇÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL	58
4.6 DEFORMAÇÕES NOS PILARES	58
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
5.1 CONCLUSÕES	61
5.1.1 Cargas de ruptura.....	61
5.1.2 Modos de fissuração	62
5.1.3 Deformações.....	62
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil, proporciona boa resistência à compressão e quando combinado ao aço apresenta um bom comportamento à tração. Devido a disponibilidade dos seus constituintes e da facilidade de moldagem, mostra-se como uma das técnicas mais indicadas, propiciando desempenho satisfatório das edificações, desde que sejam respeitadas as etapas de planejamento, projeto, execução, utilização e manutenção.

Quando as estruturas de concreto armado são executadas incorretamente, podem apresentar alguns problemas seja pelas ações de intempéries, abalos sísmicos, desgaste natural, falhas e ainda a utilização de materiais de baixa qualidade. Ao surgirem essas patologias, são necessárias intervenções para reconstruir sua capacidade resistente. Por esse motivo, o reforço e recuperação das estruturas de concreto armado é uma temática de grande relevância na Engenharia Civil, necessitando de estudos para criação e melhoramento das técnicas de reforço já existentes.

Atualmente existem inúmeras técnicas de reforços dos elementos estruturais de uma edificação, porém o presente trabalho dá uma atenção especial aos métodos de reforços voltados para os pilares. Elemento este que caracteriza-se como um dos mais importantes, resistindo aos esforços predominantemente normais de compressão, normalmente, eles recebem as cargas provenientes das vigas e tem importante função na estabilidade global da estrutura.

As principais técnicas de reforços aplicadas em pilares de concreto são com o uso de chapas e perfis metálicos, encamisamento com concreto armado e com polímero reforçados com fibras de carbono (PRFC). Os reforços com materiais metálicos, consistem em um método muito eficiente e de rápida execução para aumentar a capacidade resistente das estruturas, esta técnica é recomendada principalmente para situações que exijam emergência ou não permitam grandes alterações na geometria original das peças. Apresentam como desvantagem a corrosividade do aço, dificuldade de manipulação das chapas pesadas de aço e a necessidade de suportes provisórios durante a cura dos adesivos.

O reforço com concreto armado é um dos métodos mais utilizados, em virtude da facilidade de execução, não necessitando de mão de obra especializada, além da disponibilidade dos materiais em todas as regiões do país. O inconveniente desta técnica é o aumento da seção transversal, conseqüentemente do peso próprio da estrutura e o longo tempo de cura do concreto, ocasionando maior tempo para a liberação da obra.

Os sistemas compostos estruturados com fibras de carbono é uma das mais recentes técnicas de reforço, que vem sendo amplamente utilizada. Apresentam-se sob diversas formas, como por exemplo os tecidos, laminados, barras e placas. Como principais vantagens a imunidade à corrosão, baixo peso próprio, facilidade de aplicação, redução dos custos de mão de obra, elevada resistência à tração, rigidez adaptável as necessidades de projeto e grande disponibilidade em tamanhos e geometrias. Como desvantagem, destaca-se o comportamento elástico-linear até a ruptura caracterizada pela baixa ductilidade do material e o elevado custo em relação aos demais tipos de reforços.

Nos últimos métodos citados, o encamisamento com concreto armado e fibra de carbono, a capacidade resistente do elemento estrutural é potencializada pela ação do confinamento, que consiste na restrição da expansão lateral do concreto do pilar original, promovida pela ação da armadura transversal ou pela camisa de PRFC. Sendo que esta última, reforço com manta de fibra de carbono, apresenta o efeito de confinamento imposto tanto pela camisa, como também como pela armadura transversal pré-existente no pilar (SUDANO, 2010).

1.1 JUSTIFICATIVA

Nos últimos anos, tem-se observado muitas patologias nas estruturas de concreto armado, decorrente principalmente, de erros de projeto, utilização de materiais de baixa qualidade, falta de conhecimento técnico, redução de custo e prazos de execução, etc. Então, torna-se necessário conhecer as várias técnicas de reforços existentes, para que o profissional possa atuar com mais confiabilidade no momento que deverá optar por algum tipo de reforço, por isso é importante conhecer as características, comportamento e a viabilidade para aplicação em reforços dos diversos materiais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Devido ao grande leque de opções para reforços aplicados em pilares de concreto armado, o presente trabalho propõe-se avaliar experimentalmente alguns dos métodos aplicados nestes elementos, contribuindo assim para a tomada de decisão quanto a técnica mais indicada e eficiente para este fim.

1.2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho propõe-se analisar experimentalmente alguns tipos de reforços aplicados em pilares de concreto armado, dentre eles, encontram-se concreto armado, fibra de carbono, tela de aço soldada e tela de fibra de vidro, avaliando o comportamento da variação da seção transversal, capacidade resistente, modos de rupturas e as deformações.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho apresenta 5 capítulos em sua estrutura. No capítulo 2 é feita uma breve revisão bibliográfica sobre os tipos de reforços normalmente empregados em pilares de concreto armado, os trabalhos já realizados nesta área e as referências normativas.

No capítulo 3 estão descritas as configurações de projeto adotados para os pilares, os ensaios de caracterização dos materiais, a instrumentação das armaduras e a execução do ensaio. No capítulo 4 é feita a análise dos resultados obtidos durante o programa experimental. E no Capítulo 5 é apresentado as conclusões finais do trabalho e as sugestões para os trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

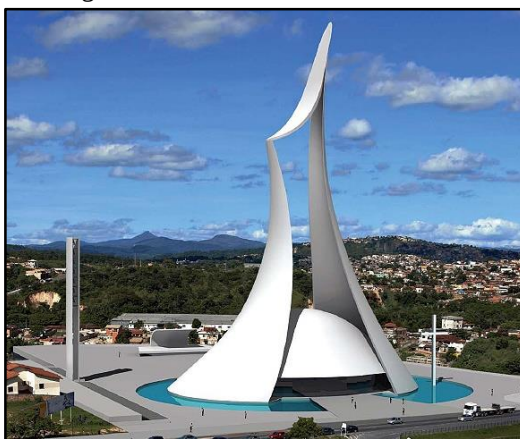
Neste capítulo são abordados conceitos e recomendações estabelecidos pela literatura, referenciados em estudos realizados sobre reforços de pilares, normas nacionais e internacionais, com a finalidade de apresentar as principais técnicas de reforço de estruturas utilizadas na construção civil.

2.1 ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Desde a antiguidade, o concreto vem sendo amplamente utilizado na construção civil apresentando bom resultado na resistência à compressão, entretanto, esse material deixa a desejar na resistência à tração. Para suprir tal necessidade ele passou a ser combinado com o aço, apresentando um resultado satisfatório na resistência à tração, a combinação dos dois fez surgir o concreto armado.

Atualmente o concreto armado é um dos materiais mais utilizados no mundo, perdendo apenas para água. Isso ocorre devido ao fato da disponibilidade dos seus constituintes e da facilidade de aplicação do material nas estruturas, podendo ser facilmente moldado (Figura 1) além do seu custo benefício, tornando-o mais atrativo (ANDRADE, 2006).

Figura 1 – Catedral de Belo Horizonte.



Fonte: Cimento Itambé (2016).

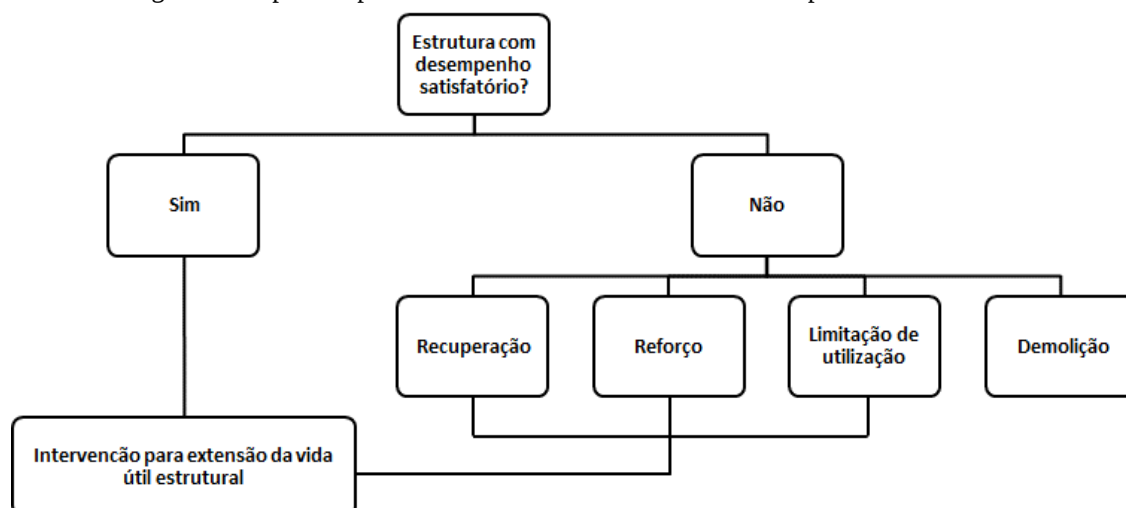
Entretanto como todo material que com o passar do tempo sofre desgaste, o concreto armado também necessita de manutenção periódica para prolongar sua vida útil, quando não realizadas, podem vir a provocar danos às estruturas que com o passar do tempo acarretam em uma intervenção corretiva maior e de custo mais elevado, como a recuperação e a reabilitação.

2.2 REFORÇO, RECUPERAÇÃO E REABILITAÇÃO DAS ESTRUTURAS

Define-se reforço como o aumento do desempenho de uma determinada estrutura, ou seja, aumentar a capacidade portante. Recuperação caracteriza-se pela devolução de alguma capacidade portante perdida (PIANCASTELLI, 1997).

Takeuti (1999) define reabilitação como situações gerais que envolvem tanto o reparo simples como a recuperação e o reforço, ou seja, pode ser definida como sendo as ações necessárias para possibilitar a estrutura a cumprir novamente suas funções originais ou capacitá-la a desenvolver as novas condições de uso. A escolha da melhor intervenção pode ser feita com base no esquema da figura 2.

Figura 2 – Hipóteses para reconversão de estruturas com desempenho insatisfatório.



Fonte: Modificado de SOUZA e RIPPER (1998).

De acordo com Sousa e Ripper (1998), os motivos que levam as estruturas de concreto necessitarem de reforço são:

- Correção de falhas de projeto ou de execução;
- Aumento da capacidade portante da estrutura, para permitir modificações em seu uso; regeneração da capacidade portante, diminuída em virtude de acidentes (choques, incêndios, etc.) ou de desgaste ou deterioração;
- E modificação da concepção estrutural seja por necessidade arquitetônica ou de utilização.

Para a execução do projeto de reforço, deve-se levar em consideração a concepção original da estrutura, seu histórico, os defeitos ou as novas exigências, a disponibilidade de mão de obra e de materiais, e do profissional habilitado.

2.3 PILARES DE CONCRETO ARMADO

Conforme a NBR 6118 (2014) que trata dos projetos de estruturas de concreto simples, armado e protendido, pilares são elementos lineares de eixo reto, usualmente dispostos na vertical, em que as forças normais de compressão são preponderantes. Carvalho (2009) também define pilares como elementos estruturais usualmente na vertical (em alguns casos inclinados) que recebe ações predominantemente de compressão, podendo variar de compressão normal ou oblíqua.

Os pilares são elementos de elevada importância estrutural, recebendo cargas provenientes de vigas ou lajes e conduzindo-as para a fundação, têm forma prismática ou cilíndrica, com seções transversais quadrada, retangular e circular. Apresentam uma dimensão bem maior que as outras duas, comprimento em relação a base, respectivamente, exceto os casos de pilares paredes.

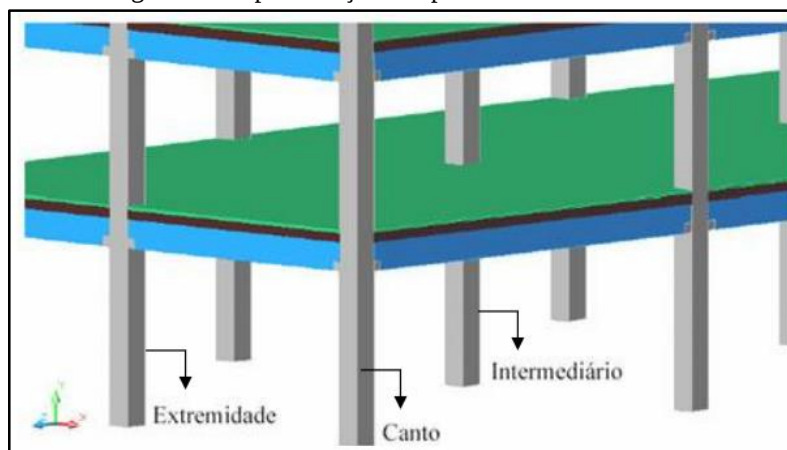
São consideradas como solicitações normais, as ações provenientes da força normal e do momento fletor, que induz ao elemento estrutural as tensões normais à seção transversal. Quando apenas as forças normais solicitam o pilar, tem-se à compressão centrada ou simples, na qual podem ser desprezados os momentos fletores. Se atuarem em conjunto a força normal e o momento fletor, ocorrerá a flexão composta, podendo ser flexão composta reta, quando os momentos fletores atuarem apenas em um dos eixos principais ou flexão oblíqua, quando atuarem nos dois eixos (CLÍMACO, 2013).

Nos pilares as armaduras são dispostas nas direções longitudinais e transversais em relação ao seu eixo. As armaduras longitudinais têm a função de resistir as tensões de compressão em conjunto com o concreto, permitindo assim a redução da seção transversal do elemento. Dependendo das solicitações, pode trabalhar toda comprimida ou uma parte comprimida e outra tracionada. Já a armadura transversal tem a função de evitar a flambagem das barras longitudinais e mantê-las na posição prevista durante a execução de concretagem. No entanto, quando o espaçamento entre os estribos for reduzido, contribuirá para o aumento da capacidade resistente do elemento, pela ação do confinamento, que consiste basicamente na restrição da expansão do concreto do núcleo (CLÍMACO, 2013).

Usualmente em uma edificação, os mesmos podem ser classificados de acordo com a posição na estrutura, sendo considerados pilares intermediários, de extremidade ou de canto (Figura 3). Para cada uma dessas classificações são adotados um método de dimensionamento. Para os pilares intermediários, podem ser desprezados os momentos fletores transmitidos por vigas. Nos pilares extremos, torna-se obrigatório a consideração do momento transmitido pelo

extremo da viga nele apoiada, o cálculo à flexão composta plana pode ser substituído pelo da compressão centrada. Já nos pilares de canto, o dimensionamento é feito à compressão composta oblíqua (CLÍMACO, 2013).

Figura 3 – Representação dos pilares em uma estrutura.



Fonte: Oliveira (2004 apud NASCIMENTO, 2009).

2.3.1 NBR 6118 (2014)

As instruções apresentadas na NBR 6118 (2014), aplicam-se a pilares cuja maior dimensão na seção não exceda cinco vezes a menor dimensão e não são válidas para região especiais, definidas como regiões dos elementos estruturais na qual a análise do seu comportamento estrutural não seja aplicável a hipótese de seções planas, apresentando na seção uma distribuição não linear de deformações específicas, caracterizadas quando apresentam na estrutura descontinuidades bruscas de geometrias ou de carregamentos aplicados.

O diâmetro das barras longitudinais não pode ser menor que 10 mm e nem maior que 1/8 da menor dimensão transversal. Recomenda-se que a taxa de armadura longitudinal não exceda o intervalo dos valores máximos e mínimos com base nas equações 1 e 2, respectivamente.

$$A_{s, \text{máx.}} = 0,08. A_c \quad (\text{Equação 1})$$

$$A_{s, \text{mín.}} = (0,15. N_d / f_{yd}) \geq 0,004. A_c \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$A_{s, \text{máx.}}$ é a armadura longitudinal máxima;

$A_{s, \text{mín.}}$ é a armadura longitudinal mínima;

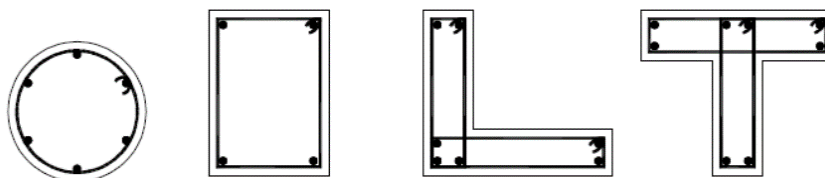
N_d é a força normal de cálculo;

F_{yd} é a resistência de cálculo de escoamento do aço;

A_c é a área da seção transversal de concreto.

A distribuição das armaduras longitudinais tem como objetivo garantir a resistência do elemento estrutural e em seções poligonais devem ser colocadas pelo menos uma armadura em cada vértice, para seções circulares devem conter um mínimo de seis barras distribuídas o mais uniforme possível no perímetro da seção (Figura 4). O espaçamento mínimo entre as barras longitudinais deve ser de 1,2 vez a dimensão máxima característica do agregado graúdo. O espaçamento máximo entre os eixos das barras deve ser menor ou igual a duas vezes a menor dimensão da seção no trecho considerado, não excedendo 400 mm.

Figura 4 – Disposições das barras longitudinais mínimas para diversas seções.



Fonte: Damasceno (2013).

A armadura transversal de pilares constituídos por estribos deve ser colocada em toda a altura do pilar, sendo que o diâmetro dos mesmos deve ter a dimensão mínima de 5 mm e não deve ser menor que $\frac{1}{4}$ do diâmetro da barra isolado. O espaçamento longitudinal dos estribos, na direção do eixo do pilar, com finalidade de garantir o posicionamento e impedir a flambagem das barras longitudinais deve ser igual ou o menor valor entre 200 mm, menor dimensão da seção ou 24ϕ para CA-25, 12ϕ para CA-50.

Um importante parâmetro adotado para considerar os efeitos da flambagem é o índice de esbeltez (λ), que caracteriza-se pela instabilidade que pode provocar a ruptura do pilar antes que a resistência a compressão seja alcançada (DAMASCENO, 2013). Conforme a NBR 6118 (2014), os pilares devem apresentar índice de esbeltez menor ou igual a 200 ($\lambda \leq 200$). Apenas no caso de elementos pouco comprimidos com força normal menor que a equação 3, o índice de esbeltez pode ser maior que 200. Para avaliar os efeitos da flambagem é necessária a determinação do índice de esbeltez λ , e se o pilar deve ser calculado levando-se em consideração os efeitos de segunda ordem conforme a equação 4.

$$F < 0,10 \cdot F_{cd} \cdot A_c \quad (\text{Equação 3})$$

$$\lambda = \frac{L_e}{i} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

F é a força normal;

λ é o índice de esbeltez;

F_{cd} é a resistência de cálculo do concreto;

A_c é a área da seção transversal de concreto;

L_e é a comprimento de flambagem do pilar;

i é o raio de giração do pilar.

A classificação quanto a agressividade ambiental é definida com referência ao ambiente no qual a edificação ficará exposta e interfere diretamente na espessura do cobrimento dos pilares, são classificados conforme o quadro 1. A espessura do cobrimento é apresentada de acordo com a classe de agressividade ambiental (Tabela 1).

Quadro 1 – Classe de agressividade ambiental (CAA).

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural/ Submersa	Insignificante
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha/Industrial	Grande
IV	Muito Forte	Respingos de maré	Elevado

Fonte: modificado da NBR 6118 (2014).

Tabela 1 – Indicação de cobrimento nominal de acordo com a CAA.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental			
		I	II	III	IV
Concreto armado	Pilar	Cobrimento nominal (mm)			
		20	25	35	45

Fonte: modificado da NBR 6118 (2014).

Quando ocorrer um controle adequado de qualidade e limites rígidos de tolerância da variabilidade das medidas durante a execução, permite-se a redução dos cobrimentos nominais em 5 mm.

2.3.2 ACI 318 (2014)

Pilares são estruturas predominantemente dispostas na vertical, com a finalidade principal de suporte das cargas axiais de compressão, porém também podem vir a resistir momento, cisalhamento ou torção.

Para armaduras longitudinais, considerando colunas protendidas ou não com tensão de compressão devido as forças de protensão média $<1,55$ MPa, o número mínimo de barras longitudinais deve ser de três para seções triangulares, quatro para seções retangulares e seis barras para seções de pilares circular. A área de aço deve estar entre os limites de mínimo $0,01$ da área bruta de concreto (A_g) e máximo $0,08.A_g$.

A armadura transversal dos pilares, deve ser colocada em toda a altura do pilar, sendo que o diâmetro não deve ser inferior a 5 mm e nem a $\frac{1}{4}$ do diâmetro da barra isolada ou do diâmetro equivalente do feixe que constitui a armadura longitudinal. O espaçamento deve ser o menor valor entre 1,5 vez o diâmetro da barra longitudinal ou 40 mm e o máximo deve ser o maior valor entre 16 vezes o diâmetro da barra longitudinal, 48 vezes o diâmetro do estribo ou a menor dimensão do pilar.

2.3.3 ACI 440.2R (2008)

A resistência nominal à compressão axial de uma peça de concreto armado confinada com FRP deve ser calculada conforme a equação 5, para os casos de pilares com armadura transversal composta por estribos convencionais.

$$\phi P_n = 0,8 \cdot \phi [0,85 \cdot f'_{cc} (A_g - A_{st}) + f_y \cdot A_{st}] \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

ϕ é o fator de redução da resistência;

f'_{cc} é a resistência à compressão do concreto confinado;

A_g é a área da seção bruta do concreto;

A_{st} é a área total da armadura longitudinal;

f_y é a resistência ao escoamento do aço da armadura longitudinal;

P_n é a resistência nominal à compressão axial de uma seção de concreto.

A máxima resistência à compressão no concreto confinado (f'_{cc}) e a máxima pressão de confinamento (f_l) são calculadas utilizando as equações 6 e 7.

$$f'_{cc} = \psi_f \cdot 3,3 \cdot k_a \cdot f_l \quad (\text{Equação 6})$$

$$f_l = \frac{2 \cdot E_f \cdot n \cdot t_{f'} \cdot \varepsilon_{fe}}{D} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

ψ_f é o fator de redução de resistência e corresponde a 0,95 para seções com envolvimento completo ao corte;

k_a é o fator de eficiência para o reforço de FRP na determinação de f'_{cc} ;

f_l é a pressão máxima de confinamento devido à jaqueta de FRP.

E_f é o módulo de elasticidade do FRP;

n é o número de camadas do FRP;

$t_{f'}$ é a espessura do laminado FRP;

D é o diâmetro da seção circular de um membro comprimido;

ε_{fe} é o nível efetivo de deformação no reforço do FRP relacionado a ruptura.

Para o dimensionamento de pilares de seções circulares os fatores de forma (k_a) e (k_b) são considerados unitários.

$$k_a = k_b = 1$$

A contribuição do sistema FRP como contribuição lateral de confinamento (f_l) é expressa conforme a equação 8.

$$f_l = 2 \cdot f_{fe} \cdot n \cdot t_{f'} \cdot k_a \quad (\text{Equação 8})$$

Onde

f_{fe} é a tensão de tração na fibra de carbono;

n é o número de camadas de fibras de carbono;

$t_{f'}$ é a espessura de uma camada de fibra de carbono.

Nas seções circulares ($k_a = 1$), substituindo (h) da equação 9 por (D) resulta na equação 10.

$$f_l = \frac{2 \cdot f_{fe} \cdot n \cdot t_{f'} \cdot k_a}{h} \quad (\text{Equação 9})$$

$$f_l = \frac{2 \cdot n \cdot t_{f'} \cdot f_{fe}}{D} \quad (\text{Equação 10})$$

Substituindo o f_{fe} da equação 11 resulta na equação 12.

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} \cdot E_f \quad (\text{Equação 11})$$

$$f_l = \frac{2 \cdot E_f \cdot n \cdot t_{f'} \cdot \varepsilon_{fe}}{D} \quad (\text{Equação 12})$$

Para as seções não circulares, como as quadradas e retangulares, a utilização do sistema composto com FRP apenas são recomendados quando satisfeita a condição expressa na equação 13.

$$\left(\frac{b}{h}\right) > 2 \quad (\text{Equação 13})$$

Para a determinação da área confinada da seção não circular é empregado a equação 14. Os fatores de forma são determinados por meio das equações 15 e 16.

$$D = \sqrt{h^2 + b^2} \quad (\text{Equação 14})$$

$$k_a = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h}\right)^2 \quad (\text{Equação 15})$$

$$k_b = \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{h}{b}\right)^2 \quad (\text{Equação 16})$$

A forma das parábolas e a área resultante efetivamente confinada depende das dimensões do pilar, do raio de curvatura e da relação geométrica da armadura longitudinal da peça, conforme a equação 17.

$$\frac{A_e}{A_c} = \frac{1 - \frac{\left[\left(\frac{b}{h}\right)(h - 2.r_c)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)(b - 2.r_c)^2\right]}{3.A_g} - \rho_g}{1 - \rho_g} \quad (\text{Equação 17})$$

Onde:

A_c é a área da seção transversal do concreto;

A_e é a área da seção transversal efetivamente confinada do concreto;

b é a largura da face comprimida;

h é a espessura ou altura de um membro;

K_b é o fator de eficiência para o reforço de FRP na determinação de ε_{ccu} ;

r_c é o raio dos cantos (quinas) de uma seção transversal prismática confinada com FRP;

ρ_g é a relação entre a área da armadura de aço longitudinal e a área da seção transversal de um membro em compressão.

A deformação axial de compressão última de um elemento do concreto confinado é dado pela equação 17.

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon'_c \left(1,50 + 12 \cdot \frac{f_l}{f'_c} \left(\frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon'_c} \right)^{0,45} \right) \quad (\text{Equação 17})$$

Onde:

ε_{ccu} é a deformação axial de compressão última do concreto confinado;

f'_c é a resistência especificada de compressão do concreto;

ε_{fe} é o nível efetivo de deformação no reforço de FRP relacionado a ruptura;

ε'_c é a deformação máxima do concreto desconfiando correspondente a f'_c , pode ser considerado como 0,002.

2.4 TIPOS DE REFORÇOS DE PILARES

Atualmente dispõe-se de uma infinidade de reforços que podem ser empregados em pilares, como o encamisamento com concreto armado, as chapas e perfis metálicos, os sistemas compostos com fibras e a protensão. Um dos mais usuais são os reforços com concreto, isso por que ele apresenta algumas vantagens econômicas e facilidades na execução. Os materiais

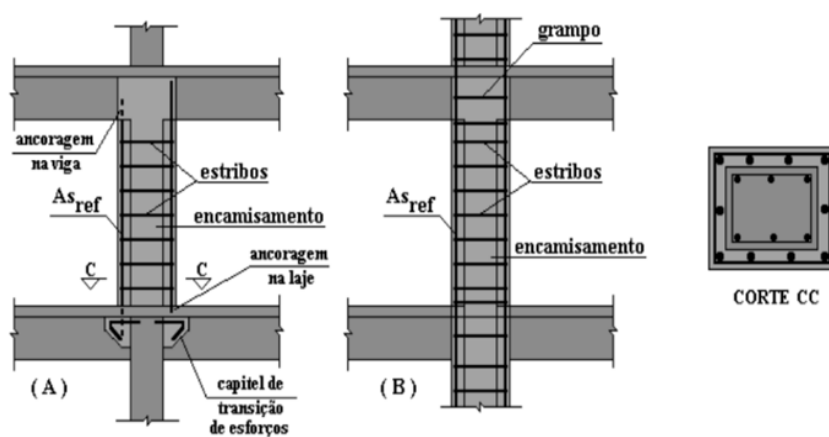
metálicos são outra forma muito eficiente e de rápida execução para aumentar a capacidade resistente dos elementos, que pode ser feita através do reforço exterior por colagem ou fixação mecânica de chapas ou perfis metálicos (SILVA, 2002).

As fibras constituem-se também como outra técnica usual de reforços em pilares, são utilizados diferentes materiais, tais como o aço, o carbono, o vidro, os asbestos, a aramida, o polipropileno, o sisal, o coco e o bambu, agregando a estas diferentes características. O concreto reforçado com fibras resiste a cargas consideráveis, com deformações maiores à deformação de fratura do concreto convencional (GARCEZ, 2005).

2.4.1 Reforço com concreto armado

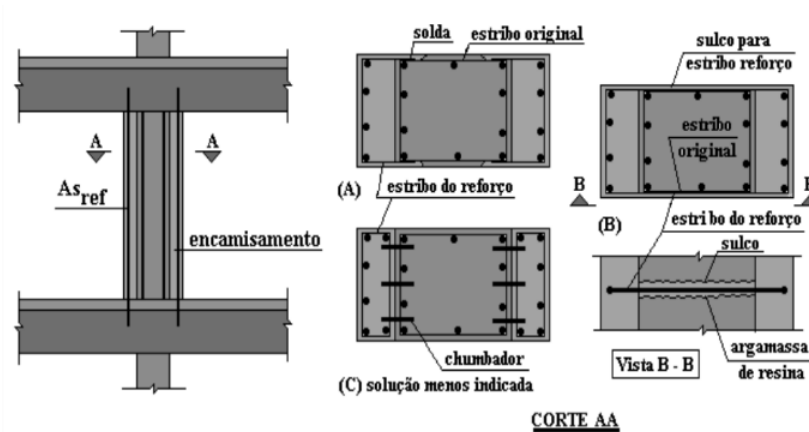
O reforço de pilares por meio do encamisamento com concreto armado é um dos métodos mais utilizados devido à facilidade de execução não necessitando de mão de obra especializada, possui grande disponibilidade dos materiais constituintes em quase todas as regiões do país, facilidade de adaptação a diferentes geometrias, além do baixo custo dos materiais de reposição. Como desvantagens pode-se citar a produção de elementos finais de dimensões maiores que as iniciais, além do tempo de espera necessário para que o reforço atinja a idade e a resistência esperada, retardando a utilização da edificação reforçada, dificuldades para o lançamento e adensamento (TAKEUTI, 1999). Os reforços podem ser de concreto armado com encamisamento total (confinamento) ou parcial (Figuras 5 e 6), concreto projetado (Figura 7), graute, concreto auto-adensável e concreto de alta resistência.

Figura 5 – Reforços em pilares por encamisamento total.



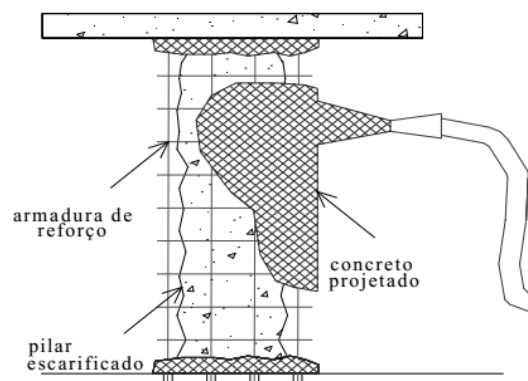
Fonte: modificado de PIANCASTELLI (1997).

Figura 6 – Reforços em pilares por encamisamento parcial.



Fonte: modificado de PIANCASTELLI (1997).

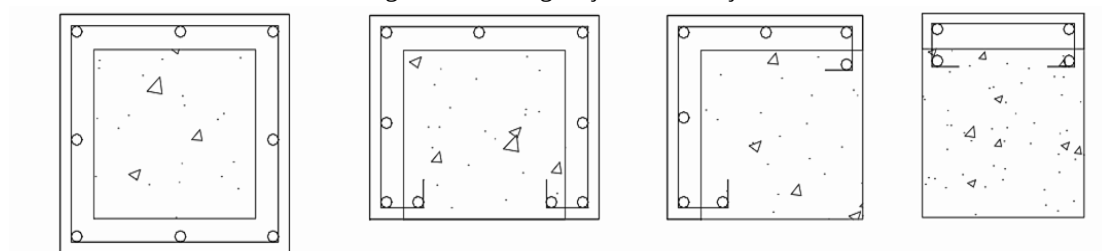
Figura 7 – Reforço com concreto projetado.



Fonte: Helene (1992 apud TAKEUTI,1999).

Conforme Takeuti (1999), o reforço de pilares pode ser feito aumentando a seção transversal, com concreto de boa resistência e utilização de armaduras longitudinais e transversais, o aumento da seção não precisa ser feito necessariamente em todo perímetro, podendo ser realizado em apenas algumas faces (Figura 8). De acordo com a posicionamento do pilar, das condições de acessibilidade e da carga a ser sustentada.

Figura 8 – Configurações de reforço.



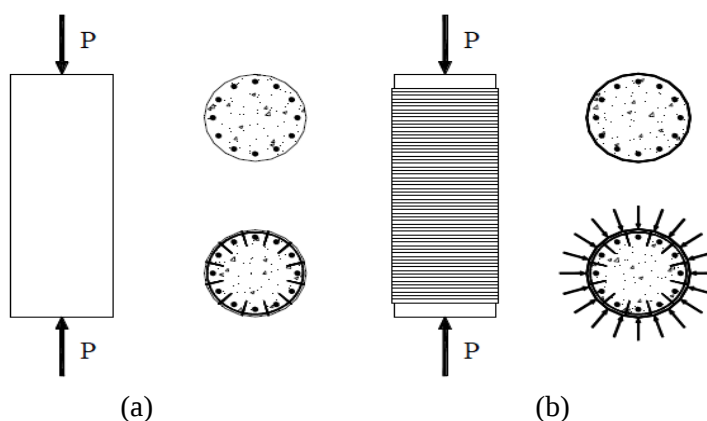
Fonte: modificado de VALLE (1983 apud TAKEUTI, 1999).

Neste tipo de reforço ocorre o efeito do confinamento, que consiste basicamente na restrição da expansão lateral do pilar original, induzido essencialmente pelo acréscimo da taxa de armadura transversal. Normalmente quando o elemento é solicitado axialmente, a tendência é que o mesmo sofra o encurtamento longitudinal e a expansão lateral, e é esta última que será contida pela armadura transversal, produzindo assim uma pressão de confinamento no concreto, no caso dos sistemas compósitos essa ação é provocada pela camisa. Conforme Baccin (1998 apud Takeuti, 1999), os fatores que mais influenciam no comportamento do concreto confinado são a taxa de armadura transversal, a resistência da armadura, o espaçamento da armadura e a geometria da seção.

Segundo Sudano (2010), o reforço de pilares de concreto, tanto para armadura transversal de aço quanto para PRF (Polímero Reforçado com Fibras), geralmente é realizado pelo efeito do confinamento através do encamisamento do pilar, consistindo na restrição da expansão lateral do pilar original. Portanto, o efeito de confinamento é extremamente dependente da expansão lateral do pilar original, pois é a expansão que mobiliza a camisa de reforço e possibilita o aumento na resistência do pilar. Sendo a expansão lateral a responsável pelo efeito de confinamento, uma maneira de prever o comportamento do concreto confinado é acompanhar a expansão lateral do pilar reforçado (Figura 9).

Como a expansão lateral do material é o fator que limita a potencialidade do confinamento, o objetivo do reforço com esta técnica passa a ser a restrição desta expansão. Então, quanto mais rígida for a camisa, mais eficiente é o reforço, e como a rigidez está diretamente ligada à espessura, quanto mais espessa for a camisa de reforço, menor será o valor da taxa de dilatação lateral (SUDANO, 2010).

Figura 9 – Tensões e deformações de sistemas não confinados (a) e confinados (b).



Fonte: Machado (2010).

2.4.2 Reforço com fibras de carbono

A utilização de compósitos com fibras de carbono (PRFC) como reforço de estrutura, iniciou a partir da década de 80, como iniciativa do governo japonês em desenvolver novas tecnologias para o reforço de estruturas, motivada principalmente pela presença de sismos. Esse material já era consagrado em soluções de reforço de alto desempenho, particularmente nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, naval e automobilística, por ser um produto muito resistente, de simples aplicação e que não traz às estruturas de concreto os problemas de durabilidade como os que hoje são associados à corrosão das armaduras (SOUSA e RIPPER, 1998).

Os PRFC são os mais empregados para o reforço de estruturas. Atualmente no mercado, apresentam-se sob diversas formas, tais como tecidos, laminados, barras e placas. Os compósitos com fibra de carbono são constituídos basicamente por dois elementos: a matriz polimérica, que tem a função de manter as fibras coesas, propiciando a transferência das tensões de cisalhamento entre os elementos estruturais, concreto e fibra de carbono; e as fibras de carbono, que absorvem as tensões de tração decorrentes dos esforços solicitantes atuantes, conforme ilustra a figura 10 (MACHADO, 2015).

Figura 10 – Representação esquemática de um sistema composto com fibras de carbono.



Fonte: Machado (2010).

Existem dois tipos de fibra de carbono: a fibra com alto módulo de elasticidade (tipo 1) e a fibra com elevada resistência (tipo 2). As diferenças entre as propriedades dos dois tipos de fibras decorrem da microestrutura de cada uma delas, que se apresenta pelo arranjo hexagonal da molécula hexagonal nas camadas entrelaçadas do grafite. Os arranjos podem se apresentar de duas formas: com arranjos tridimensionais predominantes dos materiais grafites e com arranjos bidimensionais característicos dos materiais carbono (MACHADO, 2015).

Segundo a FIB (2001), citado por Carrazedo (2005) os sistemas compostos com fibras apresentam como principais vantagens a imunidade à corrosão, baixo peso próprio, facilidade

de aplicação em lugares de difícil acesso, redução dos custos de mão de obra, elevada resistência à tração, rigidez adaptável às necessidades de projeto, grande capacidade de deformação e grande disponibilidade em tamanhos e geometrias.

No entanto, tem como desvantagem o comportamento elástico-linear até a ruptura, caracterizada pela reduzida ductilidade, o elevado custo em relação aos demais tipos de reforço, apresenta o coeficiente de dilatação térmica incompatível com o concreto, e quando exposto a altas temperaturas, sofre degradação prematura e colapso (CARRAZEDO, 2005).

As propriedades da fibra de carbono variam de acordo com o controle de temperatura no processo de obtenção, podendo variar significativamente o módulo de elasticidade e a resistência, como pode ser verificado na tabela 2.

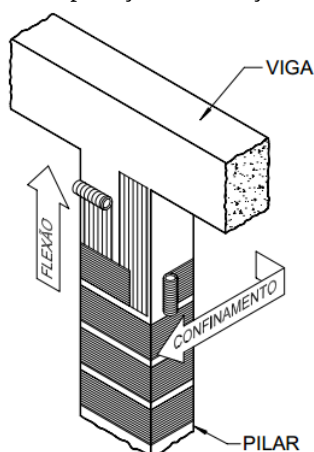
Tabela 2 – Propriedades da fibra de Carbono.

Tipo da Fibra de Carbono	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência Máxima de Tração (Mpa)	Deformação de Ruptura (%)
De uso geral	220 – 235	< 3.790	>1,2
Alta resistência	220 – 235	3.790 – 4.825	>1,4
Ultra alta resistência	220 – 235	4.825 – 6.200	>1,5
Alto módulo	345 – 515	>3.100	>0,5
Ultra alto módulo	515 – 690	>2.410	>0,2

Fonte: modificado de MACHADO (2010).

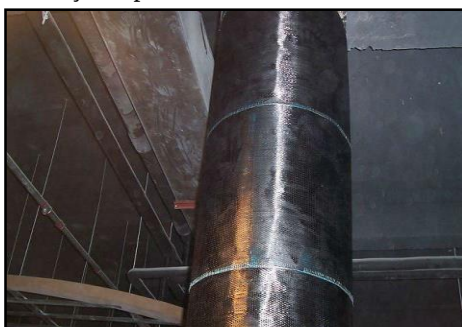
O reforço em pilares por meio deste sistema, pode ser realizado pelo aumento da resistência à flexão e pelo confinamento (Figura 11). O confinamento de pilares é possível com o envolvimento total ou parcial (Figura 12), a fim de aumentar a resistência à compressão axial e também a ductilidade. Nesta configuração de reforço as fibras são orientadas transversalmente ao eixo longitudinal do elemento, passando a atuar como estribos em espiral utilizados para o confinamento de concreto armado, produzindo assim um confinamento passivo para a seção comprimida (MACHADO, 2015).

Figura 11 – Métodos de aplicação do reforço com PRFC em pilares.



Fonte: Silva (2002).

Figura 12 – Reforço de pilares com encamisamento total de PRFC.

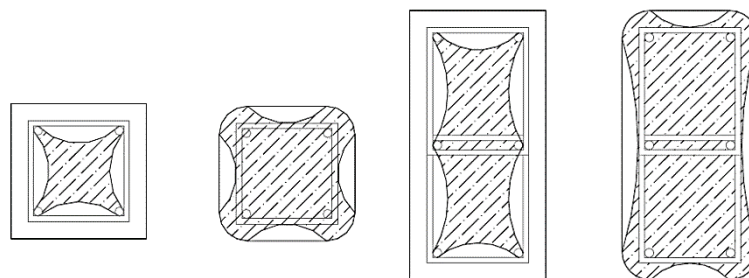


Fonte: Pereira (2012).

De acordo com Sudano (2010), este segundo método de reforço baseia-se no aumento da resistência do concreto do substrato (pilar original), pelo efeito de confinamento, praticamente sem acréscimo da seção transversal. A eficiência do encamisamento depende fundamentalmente da forma da seção transversal do pilar, sendo mais efetivo para pilares de seção circular, do que para seções quadradas ou retangulares, em função distribuição da pressão de confinamento.

Em pilares de seção transversal circular, a distribuição da pressão de confinamento é uniforme, sendo assim, quanto mais próxima desta for a seção do pilar a ser reforçado, mais uniforme será a distribuição das pressões de confinamento e, conseqüentemente, maior será a eficiência do reforço (Figura 13). No caso de reforço de pilares de seção transversal quadrada ou retangular existe o efeito de arqueamento de tensões, que provoca uma distribuição de pressões de confinamento não uniforme, com concentração nos cantos da seção transversal, que causa a ruptura prematura do compósito (SUDANO, 2010).

Figura 13 – Distribuição da pressão de confinamento antes e depois do reforço com PRFC e arredondamento dos cantos.

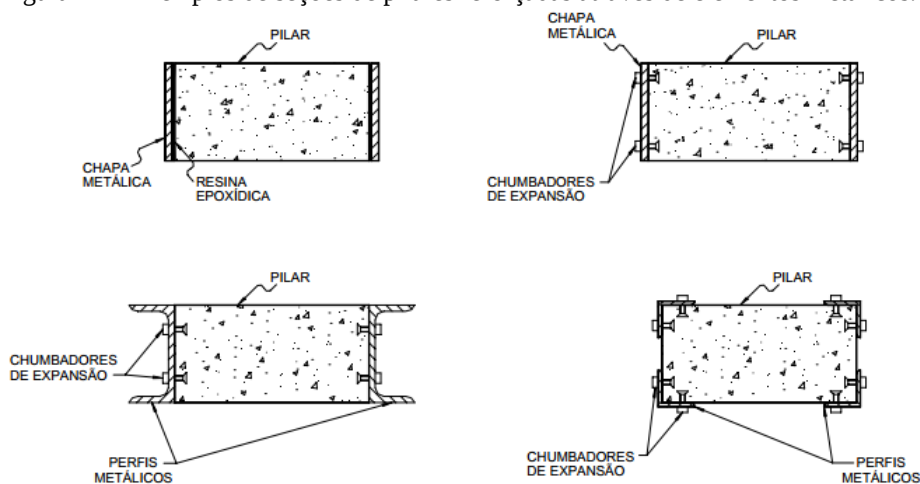


Fonte: Sudano (2005).

2.4.3 Reforço com chapas e perfis de aço

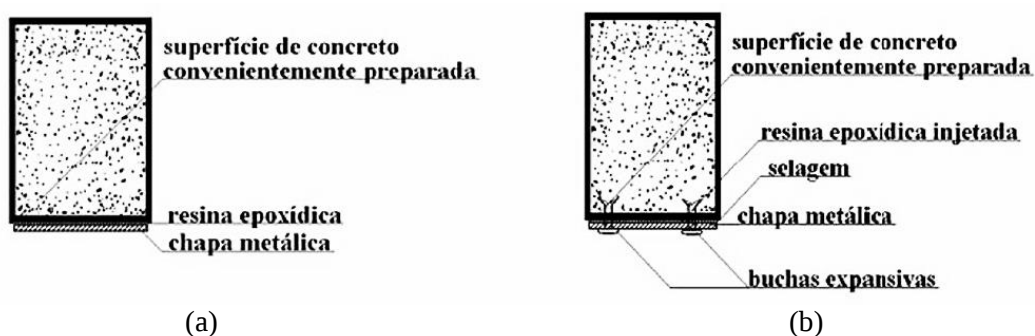
De acordo com Sousa e Ripper (1998), os reforços utilizando materiais metálicos, por colagem exterior ou chumbamento, seja com o uso de chapas ou perfis metálicos, com auxílio de resinas injetadas, consiste em um método muito eficiente e de rápida execução para aumentar a capacidade resistente das estruturas. Estas técnicas são recomendadas principalmente para situações que requerem emergência ou não permitem grandes alterações na geometria original das peças (Figuras 14 a 16).

Figura 14 – Exemplos de seções de pilares reforçadas através de elementos metálicos.



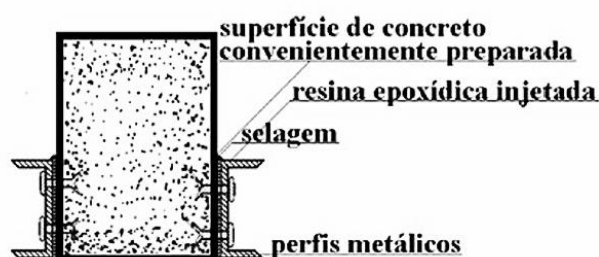
Fonte: Silva (2002).

Figura 15 – Reforço em chapas metálicas com colagem (a) e com chumbamento (b).



Fonte: Sousa e Ripper (1998).

Figura 16 – Reforço por chumbamento de perfis metálicos.



Fonte: Sousa e Ripper (1988).

Apesar da técnica ser simples em termos de concepção, é necessário um rigoroso controle na execução do reforço. No caso das chapas metálicas, para que seja aproveitado o máximo de sua eficiência, deve-se atentar para a qualidade da resina empregada, a preparação da superfície do concreto, do aço e a execução do reforço em si.

As chapas podem ser coladas, por meio de adesivo e parafusos auto-fixantes. Apresenta-se como solução de baixo custo e com pequenas alterações na seção do elemento reforçado. Segundo Reis (2001), torna-se uma técnica interessante quando a deficiência é das armaduras, sem entretanto haver deficiências nas dimensões e qualidade do concreto. No entanto, tem como restrição o peso próprio da chapa, que dificulta seu manuseio, além da durabilidade da aderência na interface adesivo concreto e adesivo-chapa (Figura 17).

Figura 17 – Reforço com chapas de aço.



Fonte: Pereira (2012).

2.4.4 Reforço com fibra de vidro

A fibra de vidro é considerada um produto muito versátil e a cada dia são descobertas novas aplicações, é o caso da utilização das telas de fibra de vidro estruturais na área da construção civil, se mostrando como um produto muito interessante principalmente pelo seu custo-benefício.

A resistência da fibra de vidro está diretamente influenciada pelo grau de proteção contra agressões ambientais, abrasão e contaminação por contato. Quando as fibras de vidro são mantidas sob carregamento constante, com tensões inferiores a resistência instantânea estática, elas irão falhar em algum ponto após um tempo proporcional a manutenção das tensões, com um valor mínimo, produzindo a ruptura por fluência, que é influenciada além das tensões pelas condições ambientais e efeitos deletérios do vapor d'água. Estes problemas foram descobertos já nos primeiros anos de fabricação das fibras de vidro e proporcionaram um desenvolvimento continuado de tratamentos protetores. Atualmente esses tratamentos são universalmente aplicados ainda no estágio de fabricação das fibras (MACHADO, 2015).

Elas são produzidas a partir de composições variadas de diversos elementos químicos, e pelo fato de o vidro ser um material fluido, ele permite uma melhor adaptação às cargas dinâmicas, possuindo deformações últimas maiores que as fibras de carbono. Os compósitos formados com fibras de vidro recebem a terminologia GFRP (*Glass fiber reinforced polymer*).

São classificadas basicamente em três grupos. A E-Glass, caracteriza-se por sua composição química à base de cálcio, alumina e silicatos, com bastante utilização no campo das aplicações elétricas, respondendo por 80 a 90% da produção comercial de fibras de vidro. Sua formulação química resulta em uma grande resistência à corrosão pela maioria dos ácidos.

O tipo S-Glass, apresenta composição química à base de magnésio e alumino-silicato, conferindo elevada resistência à tração e boas performances a altas temperaturas. É a mais cara

das fibras de vidro, e sua produção resulta de um específico controle de qualidade, atendendo a determinados procedimentos e especificações da área militar. A fibra de vidro C-Glass: possuindo composição química à base de boro-silicato, é usualmente utilizada em indústrias químicas onde é exigido um contato com ácidos altamente corrosivos.

Sua comercialização é feita de diferentes formas, algumas são produzidas em fitas sendo fornecida em rolos, esta aplicação é comumente utilizada para fibras contínuas. Outro tipo de fornecimento das fibras de vidro é em tramas, consiste no entrelaçamento das fitas com direções pré-determinadas. Assim pode-se ter malhas ortogonais $0/90^\circ$ e $45/45^\circ$. A comercialização por esteira é caracterizada num arranjo aleatório em formato de folhas de vários retalhos de fibras, moldados em uma matriz à base de vinil ou poliéster (ACI 440, 1996 apud SILVA, 2002).

Atualmente as fibras de vidro tem aplicação em substituição da tela de aço nos seguintes casos, como o emprego em ambientes agressivos, controle de juntas e fissuras de concreto, nas placas cimentícias, argamassa armada, no gesso acartonado, na construção de pré-moldados, nas fundações tipo radier, substituição da tela de aço em reforço de vigas, pilares e lajes, além de conferir vantagem como leveza às estruturas de concreto, ganhos na obra e agilidade operacional (FIBERTEX, 2015).

2.5 ESTUDOS REALIZADO SOBRE REFORÇO DE PILARES

2.5.1 Takeuti (1999 e 2003)

Takeuti (1999) em sua dissertação de mestrado realizou uma pesquisa experimental sobre o reforço de pilares através do encamisamento com concreto de alto desempenho. Nesse estudo ele realizou uma investigação experimental com três séries de ensaios, cada uma envolvendo dois modelos, um com concreto armado convencional e o outro encamisado por concreto de alto desempenho.

Os parâmetros que foram variados nas camisas de reforço foram valores de espessura, valores de taxa de armadura transversal utilizando telas soldadas ou armadura de estribos e adição de fibras curtas de aço. A resistência nominal à compressão do concreto utilizado em todas as camisas foi de 65 MPa, caracterizado como um concreto de alta resistência.

Os pilares foram submetidos à compressão axial por meio de uma máquina hidráulica servo-controlada. Os ensaios foram realizados com controle de deslocamento, adotando-se uma velocidade de 0,005mm/s para o deslocamento do pistão. A força aplicada e as deformações

continuaram sendo medidas após o alcance da força de ruína para que fosse avaliado o comportamento pós-pico, até que atingisse uma força residual de cerca de 50% da força de pico. Modelos de cálculo da resistência última dos pilares reforçados foram analisados. Também foram testados modelos de confinamento e ductilidade para os elementos reforçados.

A utilização de camisas de reforço de pequena espessura, com emprego de concretos de alto desempenho, apresentou-se interessante e merecedora de maior atenção, uma vez que com um acréscimo relativamente pequeno das dimensões dos pilares, elevou-se consideravelmente a sua capacidade resistente. No entanto, observou-se também que alguns cuidados devem ser tomados para que se consiga, nos pilares reforçados, adequados níveis de resistência e de ductilidade. Nos modelos ensaiados, observou-se um aumento da capacidade resistente dos pilares reforçados em torno de 3 a 5 vezes o valor obtido para os pilares de referência.

A adição de fibras de aço ao concreto da camisa de reforço apresentou resultados que ainda não se mostram satisfatoriamente esclarecedores, sugerindo a realização de outros ensaios, verificou-se também que a capacidade resistente calculada pelos modelos teóricos, no caso de camisas de concreto com adição de fibras (CAF), mostrou-se sempre menor que a observada experimentalmente, por outro lado, não se verificou um melhor desempenho quanto à ductilidade, talvez pela utilização de uma taxa pequena de fibras, ou por um direcionamento das fibras, decorrente da pequena espessura de camisa.

Takeuti (2003) em continuidade a sua pesquisa publicou sua tese de doutorado, onde estudou o comportamento resistente imediato e ao longo do tempo de pilares reforçados por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho, no qual fez uma investigação experimental do comportamento de pilares por meio de encamisamento com concreto de alta resistência. Teve como objetivo nessa pesquisa estudar o comportamento ao longo do tempo e o efeito de pré-carregamento nos pilares reforçados.

Nesse estudo foram ensaiados vinte modelos experimentais, onde variava-se a forma da seção transversal entre circular e quadrada, a taxa de armadura transversal da camisa de reforço e a existência ou não de pré-carregamento, além da realização de ensaios complementares sobre pilares curtos de seção circular para observação dos efeitos de confinamento e ensaios de caracterização dos concretos utilizados sob ações de longa duração.

Para o estudo da influência da deformação lenta, o autor simulou pilares de concreto armado submetidos a pré-carregamento, os quais foram mantidos durante um certo período de tempo numa câmara climatizada, os pilares foram reforçados sem que fosse retirado à força de pré-carregamento. Todos os pilares foram submetidos a ensaios de compressão axial de curta

duração. Na análise dos resultados foram aplicados modelos de cálculo do efeito de confinamento, análise numérica pelo Método dos Elementos Finitos e outras formulações teóricas, para efeito de confrontação de resultados teóricos e experimentais.

As principais conclusões foram que, no reforço por encamisamento de pilares, uma vez garantidas as condições de confinamento, a capacidade resistente do pilar original pode ser considerada na avaliação da resistência do elemento reforçado, o efeito de pré-carregamento de um pilar reforçado não afeta a resistência última do elemento reforçado, porém pode afetar a sua deformabilidade. Além disso, na análise do comportamento dos pilares ao longo do tempo, pôde-se perceber que houve transferência de esforços entre o pilar original e a camisa de reforço, mas seu efeito foi pouco significativo em termos de alteração da capacidade resistente.

2.5.2 Rigazzo (2003)

Rigazzo (2003) em sua dissertação de mestrado fez um estudo sobre o reforço em pilares de concreto armado por cintamento externo com mantas flexíveis de fibras de carbono, o qual teve por objetivo a identificação de aspectos ainda pouco esclarecidos sobre a técnica de reforço através da adição de polímeros reforçados com fibras (PRF) a elementos de concreto, identificação dos procedimentos atuais de dimensionamento, aplicação do reforço e comprovar, ou não, tais procedimentos, através da análise experimental de pilares cintados com PRFC. Avaliou também a eficiência do cintamento em função de seção transversal do pilar (quadrada ou circular), da taxa de PRFC e do espaçamento entre laços de cintamento.

A metodologia adotada consistiu na análise experimental de oito pilares de concreto armado com diferentes arranjos de reforço, com o objetivo de estudar a taxa de reforço, o espaçamento entre laços e a seção transversal do pilar, a avaliação foi realizada com referência nos resultados experimentais. Os incrementos de resistência foram analisados em função da deformação longitudinal dos pilares. Foram observados aumentos significativos de resistência para deformações longitudinais aceitáveis.

Os resultados experimentais mostraram, em especial para os elementos circulares, aumentos significativos de capacidade portante. No entanto, a limitação das deformações longitudinais mostrou que os incrementos de resistência são muito menores que os obtidos para o carregamento de colapso do pilar.

Todos os pilares reforçados com PRFC tiveram sua capacidade de deformação antes do colapso aumentada substancialmente. Esse dado é interessante quando se deve considerar, por exemplo, a possibilidade de abalos sísmicos. Isso justifica a grande difusão desta técnica de

reforço em países com estruturas sujeitas a esse tipo de ação. No que se refere à geometria da seção transversal, os resultados experimentais mostraram que a eficiência do confinamento é menor nos pilares quadrados quando comparados a pilares circulares equivalentes.

Com relação ao reforço em laços, os resultados experimentais evidenciaram a necessidade de mais estudos com o objetivo de determinar os limites máximos de espaçamento. Vale destacar, que dependendo do espaçamento entre laços a eficiência do confinamento pode ser muito comprometida.

2.5.3 Sudano (2005 e 2010)

Sudano (2005) em sua dissertação estudou os vários tipos de seção transversal com o intuito de avaliar a influência na eficiência do reforço por encamisamento de polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC) e da ductilidade do elemento estrutural.

Foram realizadas simulações experimentais preliminares e definitivas com pilares de seção transversal circular, quadrada e retangular com os cantos arredondados, elíptica e uma seção composta por semicírculos, foram realizadas 4 amostras de cada tipo de seção. Os resultados demonstram que uma forma de seção transversal adequada é essencial para um bom desempenho do pilar reforçado, sendo assim, as seções transversais que apresentaram os melhores resultados foram a circular, a elíptica e a composta por semicírculos.

Nos ensaios preliminares conclui-se que a utilização do tecido de fibra de vidro mostraram-se eficaz, tendo-se em vista os objetivos de tais ensaios, que era constatar a tendência de mudança na forma da seção transversal, quanto à relação de reforço promovido pela camisa de PRFV, esta mostrou-se muito baixa se comparado com o reforço obtido com o tecido de fibra de carbono, o que já era de se esperar, já que as características mecânicas da fibra de carbono são bem melhores que as da fibra de vidro.

Observou-se que em todos os casos as deformações laterais dos modelos de seção transversal quadrada são maiores que as da seção circular. Outra análise realizada foi que nos modelos de seção transversal quadrada, a grande diferença existente entre a deformação lateral da face e do canto no modelo sem reforço foi praticamente eliminada com a presença da camisa de PRF. Os modelos de seção transversal circular apresentaram maior eficiência no reforço que os de seção transversal quadrada. Verificou-se que o reforço promovido pela camisa é diretamente proporcional ao número de camadas de PRF que foram utilizadas.

Sudano (2010) em sua tese de doutorado desenvolveu um estudo sobre a aplicação de estratégias híbridas de reforço de pilares de concreto armado por encamisamento com

compósitos de alto desempenho, neste trabalho, o autor desenvolveu estratégias e técnicas de reforço que poderiam potencializar o aproveitamento de todos os atributos oferecidos pelos materiais comumente empregados e desenvolver um concreto reforçado com fibras de aço com diferentes comprimentos que possibilite sua aplicação no reforço de pilares.

Como metodologia o autor adotou análise experimental de 6 pilares preliminares com seção de 15 cm de diâmetro e 60 cm de altura, também foram moldados 6 corpos-de-prova de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura para serem posteriormente encamisados com PRF, e 6 corpos de prova de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura para a determinação da resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração na compressão diametral. Na ocasião da concretagem da camisa de reforço sem ou com a adição de fibras de aço foram moldados 6 corpos de prova de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura para a mesma finalidade.

Foram realizados ensaios com 52 modelos definitivos com seções quadradas, circulares e retangulares, no qual foram ensaiados: confinamento puro; aumento da seção transversal sem mudança na forma e confinamento; aumento da seção transversal com mudança na forma e confinamento; aumento da seção transversal sem mudança na forma, confinamento interno e posterior confinamento externo; aumento da seção transversal com mudança na forma, confinamento interno e posterior confinamento externo.

Os resultados da análise experimental mostraram que a escolha do material, da estratégia e técnica de reforço são fatores decisivos para aliar o melhor aproveitamento dos materiais empregados e o atendimento às exigências de projeto. Concluiu-se ainda que a associação de fibras de aço de diferentes comprimentos possibilita a utilização do concreto reforçado com fibras no reforço de pilares de concreto, tendo como grande vantagem a facilidade de execução, se comparado com o concreto armado.

2.5.4 Carrazedo (2002 e 2005)

Carrazedo (2002) estudou o efeito do confinamento desenvolvido em pilares de concreto armado reforçados com compósitos de fibras de carbono (PRFC). A análise experimental foi realizada em pilares de seção transversal circular e quadrada com ensaios de compressão axial centrada. Nos pilares de seção circular, avaliou-se a influência da taxa volumétrica de armadura transversal e do número de camadas de reforço, e nos pilares de seção quadrada, verificou-se o efeito da forma da seção transversal.

O ensaio principal foi composto com doze corpos de prova, sendo nove de seção circular com dimensões de (19 x 57) cm e três de seção quadrada com dimensões (15 x 45) cm.

Para os modelos de seção circular, variou-se o número de camadas 1 a 2, e o espaçamento da armadura de 25 e 50 cm, com modelos com e sem armaduras internas. Os modelos de seção quadrada, utilizados pilares com 1 e 2 camadas de compósito, adotando um raio mínimo de curvatura de 3 cm nos cantos do pilar para evitar rupturas localizadas por concentrações de tensões.

Com o aumento do número de camadas de compósito ocorreram grandes acréscimos de capacidade resistente, mesmo com taxas de armadura transversal mais elevada. Em pilares com elevada taxa de armadura transversal não ocorreram ganhos significativos na deformação última. Observou-se que em seções quadradas a pressão lateral efetiva é menor se comparada com pilares de seção circular.

Quanto à deformabilidade dos pilares reforçados com PRFC, o aumento da deformação última foi maior para os pilares sem armadura. Nos pilares com armadura transversal ocorreram menores ganhos de deformação última, pelo fato dos próprios pilares de referência apresentarem deformações últimas elevadas devido ao confinamento das armaduras transversais. Notou-se que em pilares de seção transversal quadrada é possível obter ganhos significativos de capacidade resistente e ductilidade, desde que observado um raio mínimo de curvatura nos cantos do pilar.

Carrazedo (2005), investigou o efeito de confinamento em pilares de concreto armado encamisados com polímeros reforçados com fibras de carbono. Para avaliar, qualitativa e quantitativamente, a contribuição do reforço para pilares de diferentes seções transversais, submetidos as forças de compressão com excentricidade variável. Nesse estudo, também foi verificado a distribuição interna de pressões laterais, as tensões nas camisas, os acréscimos de resistência e a deformação última no concreto confinado. Para estas avaliações foi utilizada a análise experimental, por meio de ensaios de pilares sob flexo-compressão e a análise numérica, com o método dos elementos finitos.

Foram ensaiados trinta e nove modelos de pilares, encamisados ou de referência, com diferentes números de camadas de tecidos de PRFC e formas de seção transversal ensaiados à flexo-compressão com diferentes excentricidades. Para estes ensaios foi utilizado um sistema de rótulas de facas (unidirecional), para permitir ensaiar pilares com diferentes excentricidades. O comprimento dos pilares foi de 45 cm, com diâmetro 15 cm para a seção circular, a seção quadrada de 15 cm de base, e a seção retangular de (15 x 22,5) cm.

Como resultado, verificou-se que ocorreram reduções significativas dos efeitos de confinamento em pilares de seção quadrada e retangular quando a relação entre o raio de arredondamento dos cantos e o maior lado da seção transversal diminuiu. Verificou-se ganhos

de resistência em todos os pilares ensaiados, indicando que o encamisamento com PRFC pode ser utilizado mesmo em situações em que a força de compressão seja aplicada com pequenas excentricidades.

O efeito da excentricidade sobre o confinamento dependeu da forma da seção transversal considerada. Em pilares de seção circular a excentricidade reduziu levemente os efeitos de confinamento. Nos pilares de seção quadrada a excentricidade não reduziu significativamente os efeitos de confinamento, sendo que para os menores raios de arredondamento, o efeito de confinamento foi até maior na presença da excentricidade. Nos pilares de seção retangular observou-se que aplicando a excentricidade na direção da menor inércia o comportamento foi semelhante ao dos pilares de seção quadrada. Porém, aplicando a excentricidade na direção da maior inércia, observou-se um grande efeito de confinamento, maior inclusive que no pilar centrado.

2.5.5 Nascimento (2009)

Nascimento (2009) analisou o comportamento de pilares de concreto armado submetidos à flexo-compressão reta, reforçados com concreto auto-adensável na face comprimida com a utilização de conectores entre o substrato e o reforço. Segundo o mesmo autor, um dos inconvenientes do reforço com aumento da seção do pilar é a ruptura brusca por deslocamento do reforço, então para favorecer o trabalho monolítico do pilar foram utilizados conectores, para melhorar a zona de interface entre substrato e reforço.

Seu programa experimental baseou-se no ensaio de nove pilares de concreto armado à flexo-compressão reta, com excentricidade de 60 mm. O modelo P1 (pilar original de referência), com seção de (12 x 25) cm. O modelo P2 (pilar de referência monolítico) com seção de (15,5 x 25) cm. Os demais pilares foram reforçados com uma camada de concreto auto-adensável na região comprimida com espessura de 35 mm, com a mesma seção dos modelos monolíticos.

Todos os modelos reforçados apresentaram redução dos deslocamentos horizontais em relação aos pilares de referência. Os conectores contribuíram para uma maior aderência entre o substrato e o reforço, colaborando para que a peça apresentasse um comportamento monolítico. Nos modelos ensaiados, observou-se que não só a quantidade, mas também a localização dos conectores influencia na resistência e modo de ruptura. Entre os pilares reforçados apenas um pilar alcançou o resultado esperado, com ruptura dúctil. Assim, concluiu-se que o espaçamento a ser utilizado, deve ser de no máximo 250 mm.

2.5.6 Damasceno (2013)

Damasceno (2013) realizou uma análise experimental em 16 pilares reforçados com concreto armado submetidos a compressão axial e a flexo compressão encamisados total e parcialmente realizados com três séries de ensaios de seis, quatro e seis pilares. As principais variáveis analisadas foram: as extremidades dos pilares, o espaçamento da armadura transversal e a região a ser reforçada.

Como parâmetros constantes em cada série estavam a seção transversal, a taxa de armadura longitudinal, a resistência à compressão do concreto e o posicionamento dos extensômetros. O comportamento dos pilares ensaiados foi monitorado por medições com células de forças, extensômetros na armadura e no concreto, defletômetros em todas as séries e mapeamento das fissurações apenas na série 3. Os principais resultados encontrados na pesquisa tendo como referência o comportamento das extremidades na distribuição de tensões e o desempenho dos pilares reforçados em comparação aos monolíticos, demonstraram que os pilares não monolíticos apresentaram comportamento semelhante aos monolíticos confirmando a eficiência do reforço.

Com relação aos pilares submetidos a compressão axial foi observado que os pilares se comportam monoliticamente até próximo da ruptura. Quanto ao reforço sobre a camada de revestimento, concluiu-se que o comportamento é igual ao de pilares normalmente reforçados com destacamento da camada de reforço. O desempenho dos pilares foi considerado satisfatório com um aumento de resistência de 4% em comparação com a carga teórica.

Os resultados dos pilares reforçados em diferentes regiões, face tracionada e face comprimida, submetidos a cargas excêntricas de flexo-compressão apresentaram que os pilares de referência e reforçados a compressão demonstraram melhores desempenhos entre os ensaiados, confirmada através de análises da envoltória de ruptura. O reforço de pilares submetidos a flexo compressão se mostrou mais indicado quando é executado na zona comprimida dos pilares. Quanto à retirada ou não do revestimento para a execução do reforço, os ensaios realizados indicaram pequena perda na capacidade de carga dos pilares e um comportamento semelhante aos pilares reforçados sem revestimento, com destacamento do reforço apenas próxima à carga última dos pilares.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Buscando avaliar experimentalmente o comportamento de pilares de concreto armado encamisados com diferentes técnicas de confinamento, foram ensaiados 10 pilares à compressão axial centrada, com modelos de seção transversal circular e quadrada. Os pilares do núcleo foram confeccionados com diâmetro de 15 cm, lado da base de 14 cm, comprimento de 50 cm e cobrimento de 2 cm. Destes, dois foram usados como pilares de referência, com a nomenclatura PQR e PCR, e os demais foram encamisados com fibra de carbono (PQFC e PCFC), concreto armado (PQCA e PCCA), argamassa armada com tela soldada (PQTS e PCTS) e fibra de vidro (PQFV e PCFV). As informações detalhadas dos pilares estão apresentadas no quadro 2.

Os pilares reforçados com tela soldada e tela de fibra de vidro foram revestidos com uma camada de argamassa de 2,5 cm e os reforçados com concreto armado receberam uma camada deste material de 3,75 cm (seção quadrada) e 3,50 cm (seção circular). Todos os pilares do núcleo receberam a mesma taxa de armadura longitudinal e transversal. As seções dos pilares estão representadas nas figuras 18 a 22.

Quadro 2 – Detalhes dos pilares ensaiados.

SEÇÃO	PILAR	C (cm)	h (cm)	REFORÇO	e (cm)	f_{ck} (MPa)	ρ %
QUADRADO	PQR	14	50	Referência	-	20	1,03
	PQFC			Fibra de carbono	-		
	PQTS	19		Tela soldada	2,5		
	PQFV			Fibra de vidro			
	PQCA	22		Concreto armado	3,25		0,83
CIRCULAR	PCR	15		Referência	-		1,71
	PCFC			Fibra de carbono	-		
	PCTS	20		Tela soldada	2,5		
	PCFV			Fibra de vidro			
	PCCA	22		Concreto armado	3,5		1,59

PQR – pilar quadrado de referência.

PCR – pilar circular de referência.

PQFC – pilar quadrado reforçado com fibra de carbono.

PCFC – pilar circular reforçado com fibra de carbono.

PQTS – pilar quadrado de argamassa armada com tela soldada.

PCTS – pilar circular de argamassa armada com tela soldada.

PQFV – pilar quadrado de argamassa armada com tela de fibra de vidro.

PCFV – pilar circular de argamassa armada com tela de fibra de vidro.

PQCA – pilar quadrado reforçado com concreto armado.

PCCA – pilar circular reforçado com concreto armado.

C – diâmetro ou lado (s) da seção do pilar.

h – altura do pilar.

e – espessura da camada de reforço.

ρ – taxa de armadura.

Figura 18 – Seção transversal do PQR e PCR.

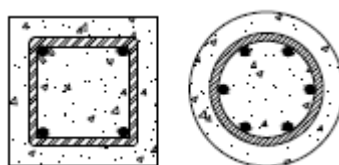


Figura 19 – Seção transversal do PQCA e PCCA.



Figura 20 – Seção transversal do PQFC e PCFC.

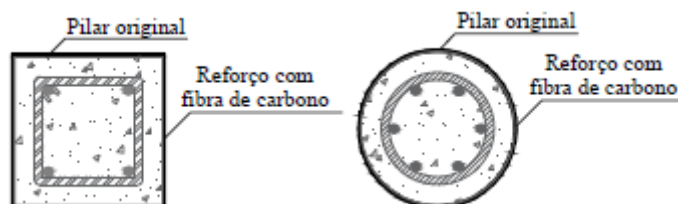


Figura 21 – Seção transversal do PQTS e PCTS.

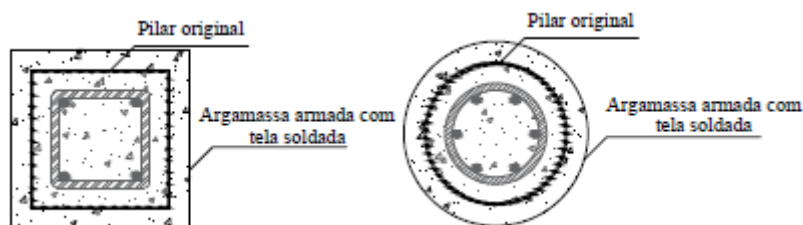
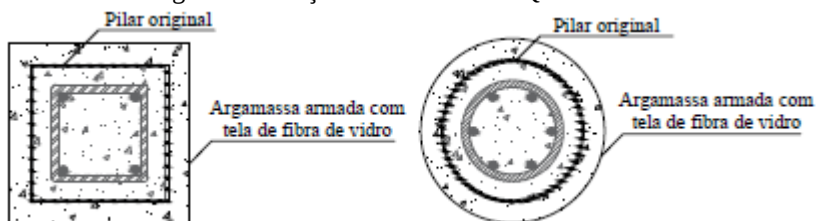


Figura 22 – Seção transversal do PQFV e PCFV.



3.1 ARMADURA LONGITUDINAL E TRANSVERSAL

Foram utilizadas armaduras de aço CA-50 para armaduras longitudinais com diâmetro de 8 mm. Ressalta-se que foi adotado um diâmetro menor que as recomendações normativas que seria de 10 mm, em razão da seção transversal dos pilares serem pequenas, e o mínimo

estipulado pela NBR 6118 (2014) provocaria dificuldades na execução da concretagem, com espaço insuficiente para o adensamento do concreto. Para armadura transversal foi utilizado aço CA-60 com diâmetro de 5 mm.

Na seção circular foram utilizadas 6 armaduras longitudinais com 46 cm de comprimento espaçadas uniformemente. Para seção quadrada foram adotadas 4 armaduras longitudinal com 46 cm, dispostas uma em cada vértice da seção quadrada. Para ambas as seções foram adotados como armaduras transversais 6 estribos espaçados longitudinalmente e uniformemente. Nas extremidades foi utilizado armadura de fretagem, para evitar rupturas localizadas. Os projetos adotados para as armaduras são apresentados nas figuras 23 e 24.

Figura 23 – Representação das armadura dos pilares de referência.

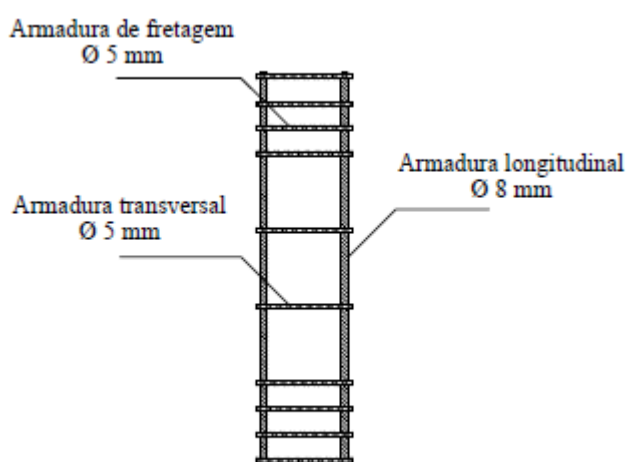
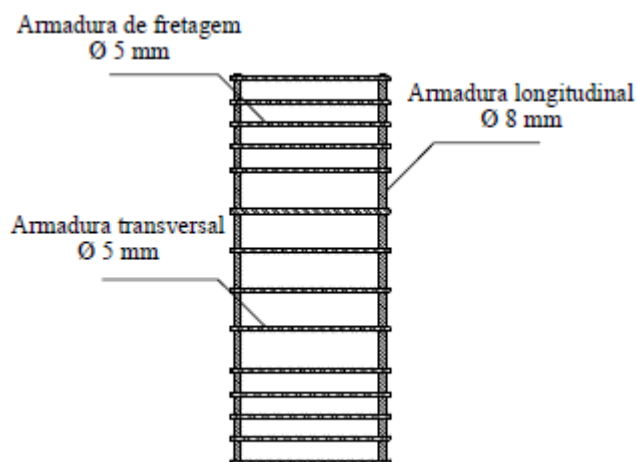


Figura 24 – Representação das armadura do reforço com concreto armado.



3.2 INSTRUMENTAÇÃO

Para medir as deformações nas armaduras longitudinais e transversais foram utilizados extensômetros elétricos de resistência (EER) da marca *Excel*, modelo PA-06-125AA-120-L, enquanto as deformações no concreto, argamassa e fibra de carbono foram empregados extensômetros tanto da marca *Kiowa*, modelo KC-70-120-A1-11, como da marca *Excel*, modelo PA-06-125AA-120-L. Foram monitoradas uma barra longitudinal e uma transversal de cada pilar de referência e também uma armadura transversal do reforço com concreto armado, sendo instrumentado o estribo médio e a parte central da armadura longitudinal. Para as deformações externas dos materiais, utilizou-se um extensômetros disposto na altura de 1/3 em todos os pilares. A representação do posicionamento e da quantidade de extensômetros empregados estão ilustrados nas figuras 25 e 26.

Figura 25 – Representação da instrumentação dos pilares reforçados com concreto armado (a), tela de fibra de vidro e tela soldada (b), fibra de carbono (c) e pilar de referência (d).

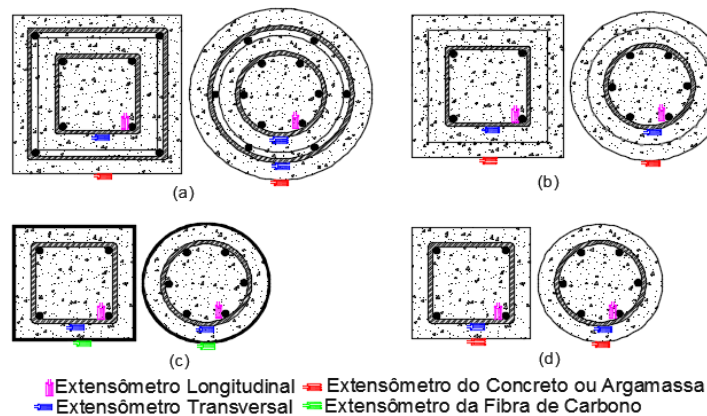
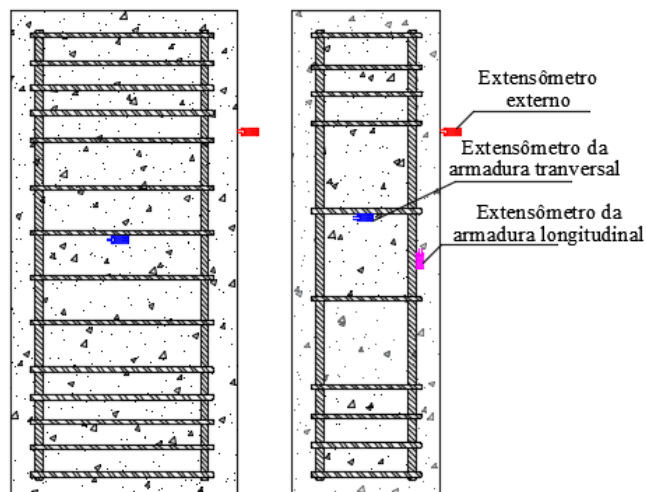


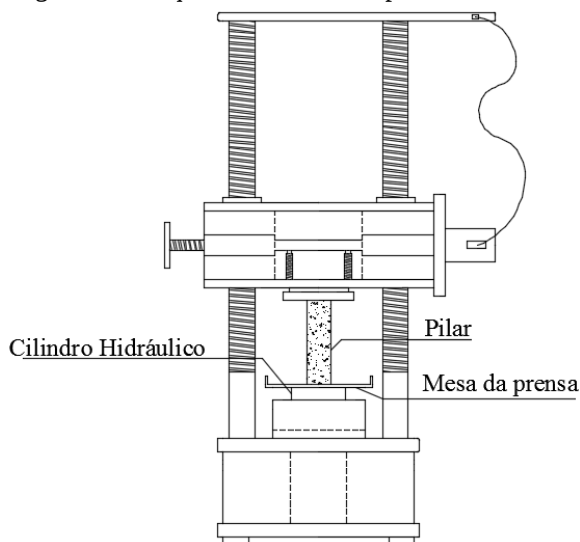
Figura 26 – Representação da instrumentação dos pilares.



3.3 MÉTODO DE ENSAIO

Os ensaios foram realizados no laboratório de Engenharia Civil do Campus Universitário de Tucuruí (CAMTUC), utilizando uma prensa hidráulica da marca WOLPERT, modelo 300-D-74 com capacidade de carga de 300 toneladas (Figura 27). A leitura dos extensômetros foi realizada por meio de um sistema de aquisição de dados da marca LYNX, modelo ADS2000 conectados a um computador, os carregamentos foram em passos de carga de 10 kN, ensaiados à compressão axial centrada.

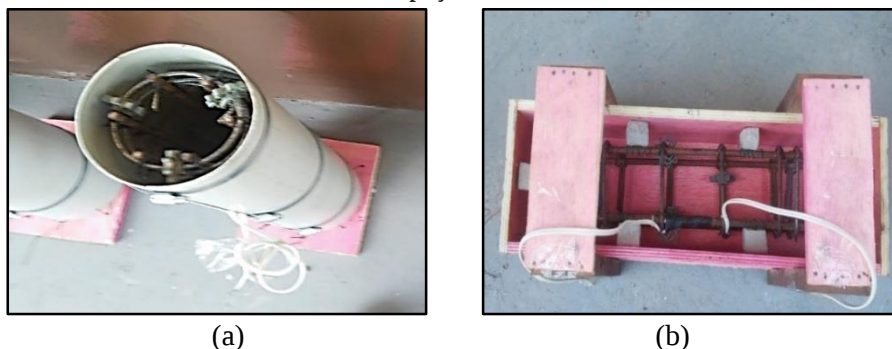
Figura 27 – Esquema de ensaio na prensa hidráulica.



3.4 FORMAS

Foram adotadas formas de tubos PVC de 150 mm e 200 mm de diâmetro para os pilares de seção circular e para o reforço com as telas (soldada e fibra de vidro), respectivamente. Nos pilaretes de seção quadrada foram usadas formas de chapa de compensado de 11 mm, com lados de 140 mm, 190 mm e 220 mm, sendo o primeiro para os pilares referência e os demais para os reforços (Figura 28). No reforço com concreto armado para a seção circular, utilizou-se uma forma confeccionada com a chapa lisa de 0,90 mm de 220 mm de diâmetro.

Figura 28 – Formas dos pilares de referência da seção circular (a) e quadrada (b), com armadura instrumentada e espaçadores.



3.5 CONCRETO

Como aglomerante utilizou-se o cimento Portland do tipo CP IV RS, da marca Nassau. O agregado graúdo foi a brita 1, com diâmetro máximo de 19 cm e como agregado miúdo, a areia média natural. O traço unitário em massa do concreto utilizado está indicado na tabela 3.

Tabela 3 – Traço unitário em massa do concreto.

Material	Traço unitário
Cimento CP IV RS	1,00
Areia média Natural	1,30
Pedra britada nº 1	2,20
Água	0,50

A mistura foi realizada em uma betoneira com capacidade de 600 litros. Todos os materiais foram dosados em massa, inclusive a água. Foram moldados 9 corpos de prova cilíndricos conforme procedimento da NBR 5738 (2015), sendo 6 corpos de provas (10 x 20) cm e 3 corpos de provas (15 x 30) cm, para a determinação das propriedades mecânicas do concreto. A determinação da consistência do concreto foi realizada através do *slump test*, seguindo as recomendações NBR NM 67 (1998) que auxilia na determinação da consistência pelo abatimento do troco de cone. O valor obtido foi de aproximadamente 9,8 cm (Figura 29a).

O lançamento do concreto nas formas dos pilares de seção circular coincidiu com o eixo dos mesmos, enquanto os de seção quadrada, o lançamento e adensamento foi perpendicular ao eixo. Para o adensamento mecânico, empregou-se o vibrador de imersão (Figura 29b). A cura úmida teve duração de seis dias, realizadas com sacos de cimentos (Figura 30) e a desforma após dez dias. O rompimento dos corpos de prova ocorreu na data do ensaio. O ensaio de compressão foi realizado conforme a NBR 5739 (2007) e o de tração por compressão de acordo com a NBR 7222 (2011). Os resultados estão apresentados na tabela 4.

Figura 29 – Ensaio de abatimento do tronco de cone (a) e lançamento e adensamento do concreto (b).



Figura 30 – Cura úmida dos corpos de prova.



Tabela 4 – Resistência à compressão e à tração diametral.

Amostra	f_c (MPa)	$f_{t,D}$ (MPa)
1	18,44	3,69
2	21,35	4,04
3	-	3,85
Média	19,89	3,86

A resistência à compressão obtida nos ensaios dos corpos de prova ficou próximo ao f_{ck} estimado para o projeto de 20 MPa. Não foi possível determinar o módulo de elasticidade à compressão conforme a metodologia de ensaio apresentada na NBR 8522 (2008), pois os extensômetros estavam descalibrados.

3.6 ARGAMASSA

Os pilares reforçados com tela (soldada e fibra de vidro), foram preenchidos com uma camada de argamassa de espessura de 2,5 cm. O traço utilizado foi de 1:3 e fator água cimento de 0,7. O preparo da mistura e a determinação do índice de consistência foi realizado conforme o procedimento a NBR 13276 (2005), obtendo como valor médio 270 mm (Figura 31).

Figura 31 – Determinação do índice de consistência da argamassa.



Para verificar as propriedades da argamassa, foram moldados três corpos de prova nas dimensões (40 x 40 x 160) mm, para ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, seguindo as recomendações NBR 13279 (2005). Os ensaios foram realizados na máquina universal de ensaios, da marca PLEXIGLAS, modelo E183PN121, com capacidade de 250 kN (Figura 32).

Inicialmente, os corpos de prova foram rompidos à tração na flexão (Figura 33a), que consistiu na colocação do mesmo sobre dois apoios cilíndricos, aplicando-lhe um aumento de carga gradual na parte central até a ruptura. Para o ensaio à compressão (Figura 33b) foi utilizado metade do corpo de prova rompido à tração por flexão. O valor médio para a resistência à tração na flexão foi de 1,67 MPa e à compressão de 13,25 MPa.

Figura 32 – Máquina de ensaio para argamassa.



Figura 33 – Ensaio à tração na flexão (a) e à compressão (b).



3.7 AÇO

Foram ensaiadas 3 amostras de cada diâmetro da armadura utilizada nos pilares, do tipo CA-50 e CA-60, conforme a NBR ISO 6892 (2015), que descreve o método de ensaio dos materiais metálicos à tração. Os gráficos 1 e 2 apresentam a curva Tensão x Deformação obtida para as barras de 5 mm e de 8 mm de diâmetro, respectivamente. A tabela 5 mostra as propriedades mecânicas das mesmas. O módulo de elasticidade obtido no ensaio não foi considerado, pelo fato de ter distanciando-se muito do valor característico do material de aproximadamente 210 GPa, isso ocorreu provavelmente pela não utilização do *strain gauge*.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas dos aços utilizados.

Diâmetro (mm)	f_{ys} (MPa)	f_u (MPa)	ϵ_{ys} (‰)
5.0	652,15	703,64	3,5
8.0	540,78	643,88	2,51

Gráfico 1 – Curva Tensão x Deformação do aço utilizado para armadura transversal.

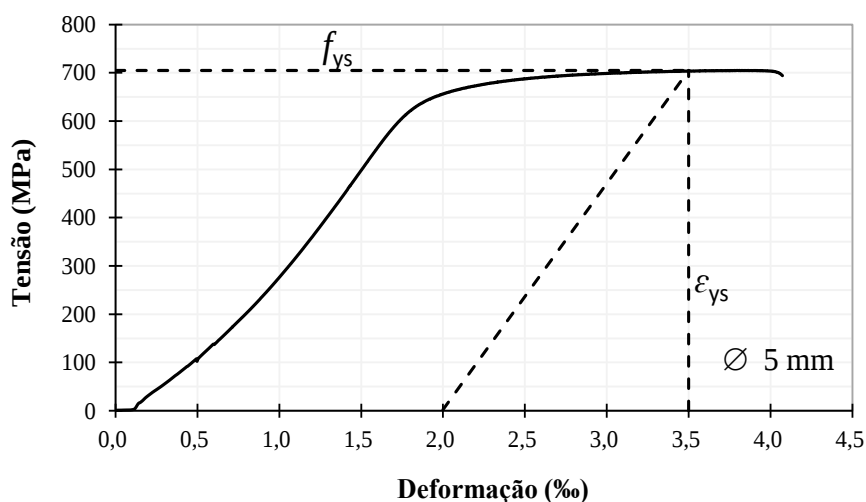
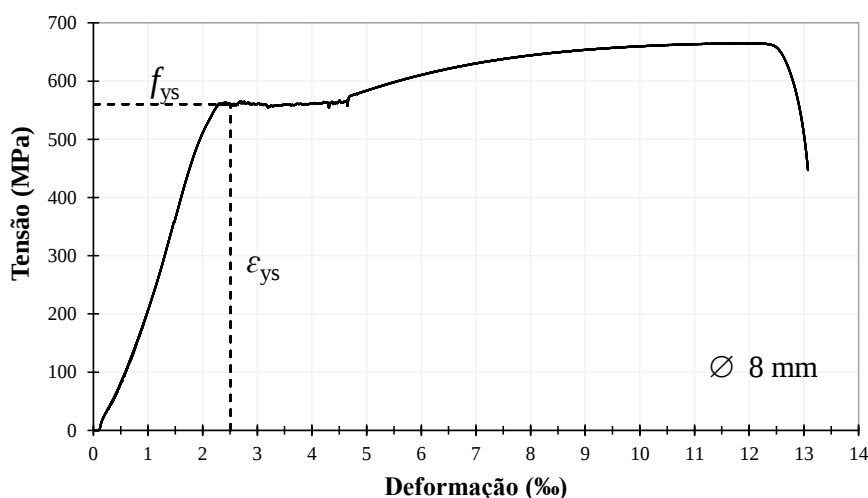


Gráfico 2 – Curva Tensão x Deformação do aço utilizado para armadura longitudinal.



3.8 MANTA DE FIBRA DE CARBONO

Para o encamisamento dos pilares foi utilizado a manta de fibra de carbono produzida pela empresa Viapol com a denominação *Carbon Fiber CFW 300*, que consiste num tecido unidirecional aplicado à base de resina de epóxi e moldado in loco. O sistema de reforço estrutural empregado é composto por três componentes, o primer epóxi (Viapoxi Injeção), a resina epóxi (Adesivo Gel) e a manta de fibra de carbono (Figura 34). Suas principais características estão mostradas nas tabelas 6 e 7.

Tabela 6 – Propriedades da fibra de carbono.

Característica	Especificação
Gramatura	300 g/m ²
Espessura da manta	0,166 mm
Resistência máxima de tração	4.900 Mpa
Módulo de elasticidade	230 GPa
Alongamento na ruptura	2,1 %

Fonte: Viapol, 2015.

Tabela 7 – Propriedades da resina epóxi e do primer.

Característica	Resina	Primer
Densidade	1,920 g/m ²	-
Tempo de Trabalhabilidade	60 a 90 min.	30 min.
Cura Inicial	24 h	24 h
Cura Final	7 dias	7 dias
Resistência à Compressão 24h	60 MPa	-
Resistência à Compressão 7 d	75 MPa	-
Temperatura de Aplicação	5 a 35 °C	5 a 35 °C

Fonte: Viapol, 2015.

Figura 34 – Primer e resina epóxi (a) e a manta de fibra de carbono (b).



Para verificar as propriedades do sistema composto com manta de fibra de carbono, realizou-se ensaio à tração conforme as especificações da norma ASTM D-3039 (2014). A moldagem das amostras foi realizada com o auxílio de uma chapa metálica com dimensões (330 x 170) mm, a fim de garantir que as mesmas estejam perfeitamente no plano e sem bolhas de ar, adotando uma camada de tecido unidirecional de fibra de carbono com dimensões de (250 x 15) mm e espessura de 1 mm e a orientação das fibras de 0° em relação à direção de aplicação de carga. No total foram ensaiadas 8 amostras.

O ensaio foi realizado no laboratório de Engenharia Mecânica (CAMTUC), assim como os ensaios das telas de fibra de vidro e soldada, empregando a máquina universal de ensaios modelo WDW 100 E, com capacidade de 10 toneladas (Figura 35). A aplicação do deslocamento ocorreu a uma velocidade constante de 2 mm/min até a ruptura dos corpos de prova (Figura 36). No gráfico 3 está apresentado a curva Tensão x Deformação do compósito e na tabela 8, os resultados dos ensaios.

Figura 35 – Máquina universal para ensaios mecânicos.



Figura 36 – Corpos de prova (a) e modo de ruptura do mesmo (b).

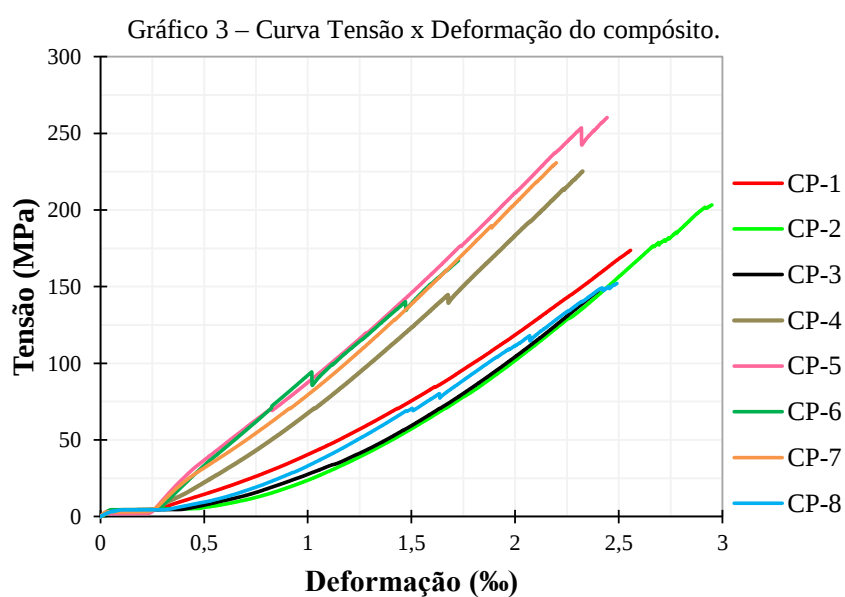
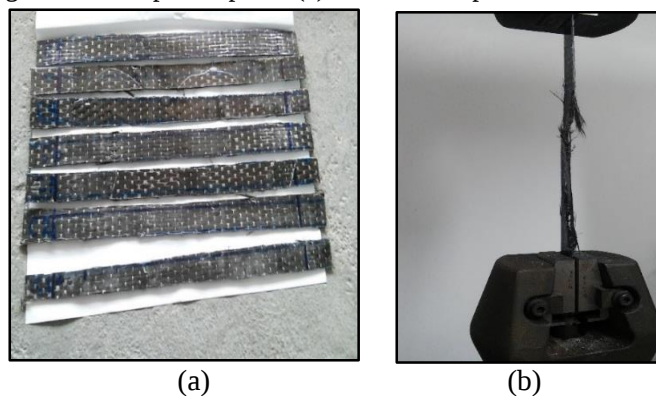


Tabela 8 – Resultados do ensaio de tração.

Amostra	f_{tu} (MPa)	E_f (GPa)	ϵ_f (‰)
1	173,69	6,92	2,56
2	203,29	7,21	2,95
3	147,37	6,09	2,40
4	225,25	10,15	2,33
5	260,31	11,43	2,44
6	167,18	10,35	1,73
7	230,82	10,97	2,20
8	152,08	6,48	2,49
Média	195,00	8,70	2,39

3.9 TELA DE FIBRA DE VIDRO

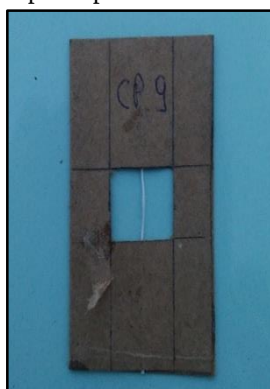
A tela de fibra de vidro empregada possui malha de (10 x 10) mm, com diâmetro do fio de aproximadamente 0,70 mm (Figura 37). O ensaio de caracterização da tela de fibra de

vidro foi realizado com base na norma da ASTM D-638 (2014). Como a fibra de vidro está disposta em uma tela foi ensaiada apenas o fio. Para a preparação dos corpos de prova utilizou-se o papel *kraft* nas dimensões de (55 x 65) mm e cola *super bonder*, seu uso justificou-se pela necessidade melhorar a fixação na garra da máquina de ensaio (Figura 38b). Foram ensaiadas 5 amostras com comprimento útil de 10 mm a uma taxa de deslocamento de 0,05 mm/min (Figura 38a). O gráfico 4 apresenta a curva Tensão x Deformação e a tabela 9, os resultados do ensaio.

Figura 37 – Tela de fibra de vidro.



Figura 38 – Corpo de prova de tela de fibra de vidro (a) e posicionado na garra (b).



(a)



(b)

Gráfico 4 – Curva Tensão x Deformação da fibra de vidro.

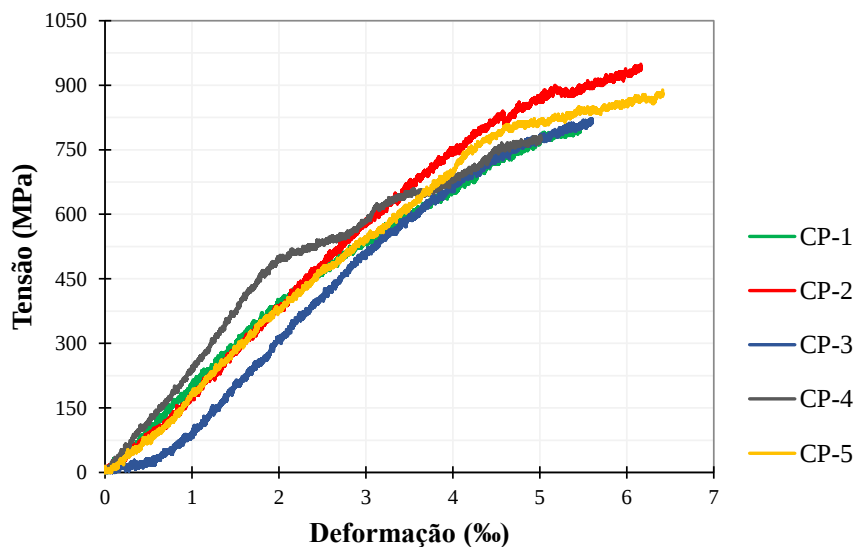


Tabela 9 – Resultados do ensaio à tração da tela de fibra de vidro.

Amostra	f_{tu} (MPa)	E_f (GPa)	ε_f (‰)
1	811,29	14,88	5,49
2	948,85	16,40	6,16
3	821,87	16,70	5,60
4	783,07	15,10	5,01
5	888,89	14,74	6,41
Média	850,79	15,56	5,73

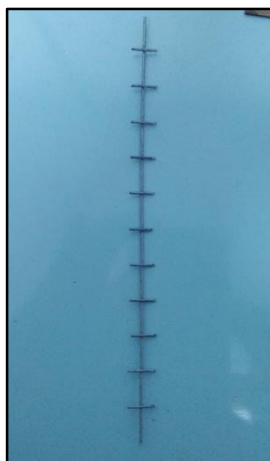
3.10 TELA SOLDADA GALVANIZADA

A tela soldada utilizada nesta pesquisa possui malha de (12,70 x 12,70) mm, com diâmetro do fio de aproximadamente 0,89 mm (Figura 39). O ensaio à tração foi realizado seguindo as recomendações da NBR 6207 (1982), que apresenta o método de ensaio para arames de aço à tração. Foram ensaiadas 5 com comprimento de 150 mm, do qual 50 mm foi destinado para a fixação na garra da máquina (Figura 40). Obteve-se valores médios para o limite de escoamento de 521,73 MPa, módulo de elasticidade de 3,80 GPa e deformação específica de 12,14 (‰). Esse valor módulo de elasticidade, provavelmente não representa o valor real em virtude de não ter sido utilizado extensômetro no ensaio.

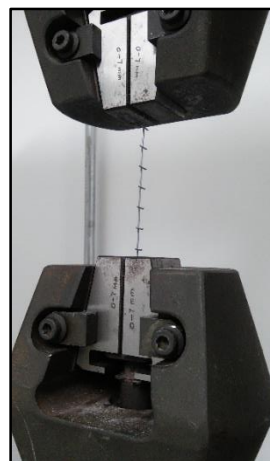
Figura 39 – Tela soldada galvanizada.



Figura 40 – Corpo de prova de tela soldada (a) e posicionamento do mesmo na garra (b).



(a)



(b)

3.11 APLICAÇÃO DO REFORÇO COM FIBRAS DE CARBONO

Para a aplicação do sistema de reforço, a superfície do substrato foi lixada e limpa, retirando vestígios da camada de nata de cimento ou mesmo dos agregados expostos, pois eventuais irregularidades podem influenciar na qualidade final do reforço. Em seguida, o primer epóxi foi misturado manualmente considerando a proporção 1:2 recomendada pela fabricante dos componentes A e B, até apresentar uma consistência homogênea. O emprego do primer se justifica pelo fato do mesmo promover aderência adequada no substrato com as próximas camadas. O material foi aplicado com o auxílio de um rolo de espuma (Figura 41a).

Após cura do primer, prosseguiu-se com a preparação da resina seguindo o mesmo procedimento adotado anteriormente. A 1ª camada foi aplicada com o auxílio de um rolo de espuma (Figura 41b), seguido pela colagem da fibra de carbono e usado um do rolo metálico com ranhuras para retirar as bolhas de ar (Figura 42a). Após 40 minutos foi aplicada a 2ª camada

de resina (Figura 42b e 42c). A sobreposição foi de 10 cm, e nos pontos em que foram passados os fios do extensômetros, aplicou-se uma camada adicional de fibra para evitar concentrações de tensões nos mesmos.

Figura 41 – Aplicação do primer (a) e da resina epoxi (b).

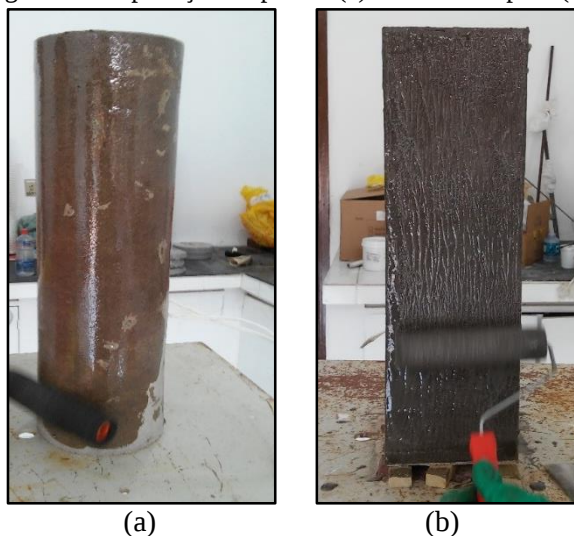
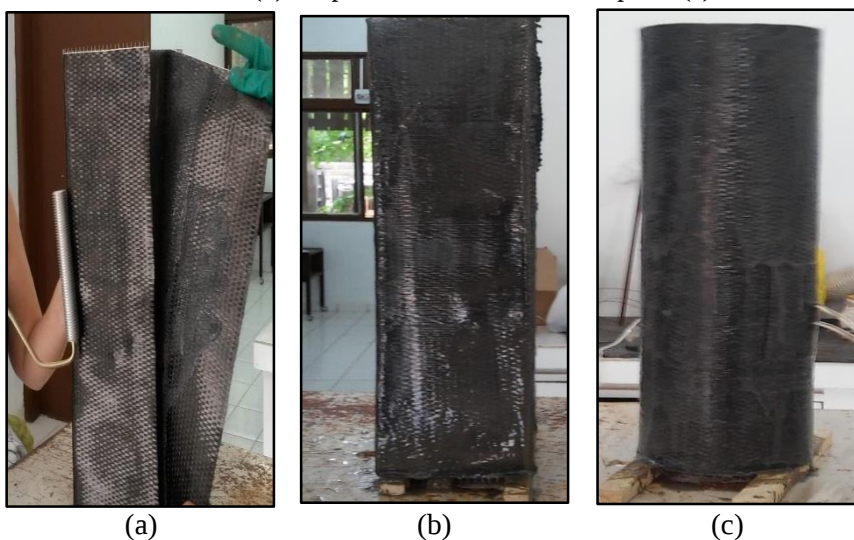


Figura 42 – Utilização do rolo metálico e detalhe da sobreposição (a), aspecto da aplicação da segunda camada de resina (b) e aspecto final do sistema composto (c).

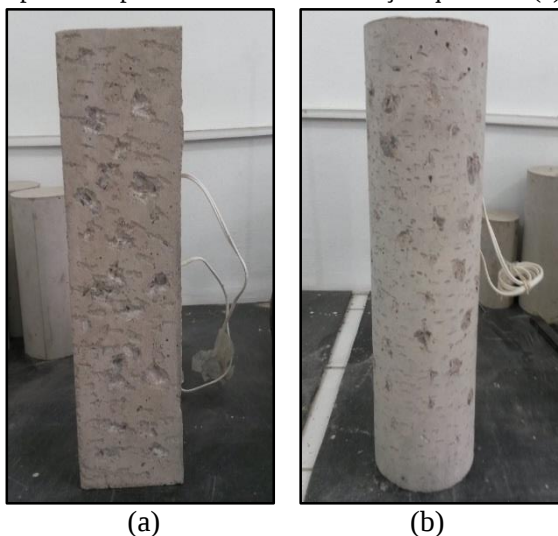


3.12 PREPARO DA SUPERFÍCIE E EXECUÇÃO DO REFORÇO COM CONCRETO ARMADO E ARGAMASSA ARMADA

Para os reforços executado com concreto armado e argamassa armada com as telas (fibra vidro e soldada), houve a necessidade do apicoamento da superfície de concreto. Este procedimento consiste na retirada, com o auxílio de equipamentos como ponteiros, talhadeiras

e marretas, da camada superficial do substrato. Este procedimento é realizado com o objetivo de melhorar a aderência entre o reforço e o concreto. Na figura 43 são mostrados os pilares com a superfície apicoada.

Figura 43 – Aspecto da superfície apicoada do modelo de seção quadrada (a) e o de seção circular (b).



A armadura do reforço com concreto armado teve a mesma configuração das armaduras longitudinais dos pilares de referência, entretanto a armadura transversal apresentou espaçamento a cada 5 cm e armadura de fretagem com espaçamento de 1,5 cm (Figura 44), com objetivo de aumentar o efeito do confinamento. Foi monitorado o estribo central do reforço.

Figura 44 – Armadura do reforço instrumentada.



Para o reforço com argamassa armada com telas (soldada e fibra de vidro) empregou-se uma camada da tela em todo modelo e uma adicional nas extremidades equivalente a armadura de fretagem. A tela soldada foi presa com arame recozido e a tela de fibra de vidro com abraçadeiras de plástico para fixação. Nos dois tipos de tela adotou-se, um transpasse de

10 cm. A figura 45 mostra os modelos com as telas fixadas. A espessura da camada de argamassa foi de 2,5 cm.

Figura 45 – Modelos preparados para o reforço com tela soldada e de fibra de vidro.



4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos dos pilares ensaiados à compressão axial centrada. Sendo assim, foram observados a capacidade resistente dos pilares, modos de fissurações e as deformações no concreto e nas armaduras transversais e longitudinais, assim como nos reforços empregados nos pilares, obtida através do monitoramento dos mesmos com o emprego de extensômetros elétricos.

4.1 CARGAS DE RUPTURA

As cargas de ruptura observadas nos ensaios são apresentadas na tabela 10. Observa-se que, para os pilares de referência, o pilar com seção quadrada (PQR) apresentou maior carga de ruptura que o pilar circular (PCR), com 370 kN e 260 kN, respectivamente. Sendo que eles foram dimensionados para terem a mesma capacidade resistente, este valor inferior do PCR pode ter ocorrido por problemas durante o ensaio. Já os pilares encamisados com concreto armado, de seção quadrada (PQCA) e circular (PCCA), romperam com carga 530 kN e 1034 kN, respectivamente. O ganho de resistência com relação ao tipo de seção foi de 94% para o modelo de seção circular, e com relação aos pilares de referência, o ganho foi de 44% para a seção quadrada e 298 % para a seção circular.

Os pilares reforçados com fibra de carbono apresentaram cargas de ruptura próximas, com 700 kN e 712 kN, quadrado (PQFC) e circular (PCFC), respectivamente. Porém quando comparados com o pilar de referência percebe-se que o PQFC apresentou uma capacidade de carga de aproximadamente de 89% a mais que o de referência e o PCFC um aumento na resistência de 174% em comparação ao pilar de referência. Nos pilares reforçados com tela soldada observou-se carga de ruptura de 530 kN para seção quadrada (PQTS) e 720 kN seção circular (PCTS). O ganho de resistência com relação ao tipo de seção foi de 36 % para seção circular. Com relação aos modelos de referência, para a seção quadrada o aumento foi de 43% e a circular de 177%.

Os pilares reforçados com a tela de fibra de vidro de seções transversais quadrada (PQFV) e circular (PCFV), apresentaram ruptura com cargas de 440 kN e 483 kN, respectivamente. O desempenho apresentado pelo confinamento teve ganho de 19% para os pilares de seção quadrada e 86% para os de seção circular.

Tabela 10 – Cargas de ruptura e ganho de resistência dos pilares.

Pilar	P_u (KN)	P_u/P_r	C_s
PQR	370	-	-
PQCA	530	44%	-
PQFC	700	89%	-
PQTS	530	43%	-
PQFV	440	19%	-
PCR	260	-	-
PCCA	1034	298%	94%
PCFC	712	174%	2%
PCTS	720	177%	36%
PCFV	483	86%	10%

P_u - carga última dos pilares com e sem reforço;

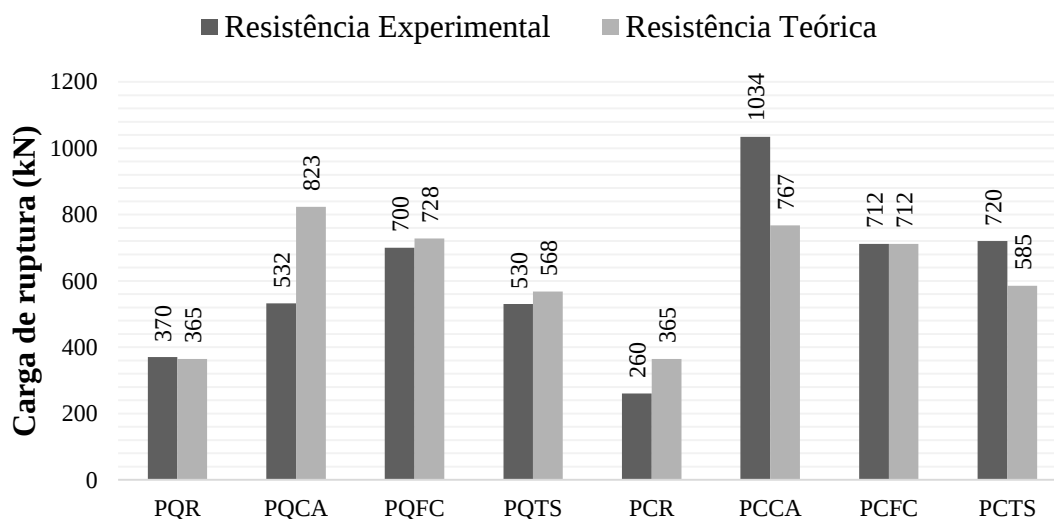
P_r - carga última do pilar de referência;

C_s - comparativo do acréscimo de carga com relação a seção transversal.

As alternativas de reforços aplicadas nos pilares em geral apresentaram um desempenho satisfatório, exceto o PQFV, que apresentou um baixo acréscimo da capacidade resistente. A partir desses resultados, percebe-se que os pilares reforçados com seção circular apresentaram um desempenho superior, e isso pode ter sido influenciado pelo tipo de seção transversal, pois na mesma ocorre uma distribuição de tensões uniformes, diferentemente dos pilares de seção quadrada.

Para avaliar se os resultados experimentais estavam próximos dos cálculos teóricos, realizou-se a comparação entre a carga de ruptura experimental e teórica (Gráfico 5). O dimensionamento do reforço com PRFC foi realizado conforme a norma ACI 440.2R (2008). O cálculo dos pilares originais foi realizado conforme a NBR 6118 (2014), para elementos submetidos à compressão axial simples. O reforço com concreto armado adotou o método de cálculo fornecido pelo Takeuti (1999). Não foram apresentados os resultados da tela de fibra de vidro, pelo fato de ser um material que ainda está sendo testado a viabilidade de aplicação como reforço, não tendo referência na literatura de uma estimativa de cálculo sobre sua contribuição para o confinamento.

Gráfico 5 – Comparação entre o cálculo teórico e o resultado experimental.



A partir da análise do gráfico, nota-se a discrepância obtida dos valores teóricos e experimentais. Alguns deles mostraram-se contra a segurança, como o PQCA, PQFC, PQTS, PCR, no qual os valores teóricos estão superiores aos experimentais. Os pilares reforçados de seção circular resultaram em percentagem maior de carga, principalmente o PCFC, o PCCA e o PCTS, mas isso justifica-se pelo fato do pilar de referência não ter atingido a carga de ruptura teórica estimada. Os pilares PQR e PQFC estiveram bem próximos dos cálculos estimados, evidenciando assim a viabilidade do método de cálculo.

4.2 MODOS DE FISSURAÇÃO

O pilar PQR iniciou a fissuração com carga aproximada de 260 kN, localizadas principalmente nas extremidades devido a concentração de tensões, provavelmente a armadura de fretagem tenha sido insuficiente. O pilar PCR, apresentou fissuras com a aplicação de carga por volta dos 175 kN e assim como o PQR ficaram concentradas nas extremidades, ambos os pilares desta série romperam por esmagamento do concreto (Figuras 46 e 47).

Figura 46 – PQR posicionado na prensa (a), formação das fissuras (b) e ruptura (c).

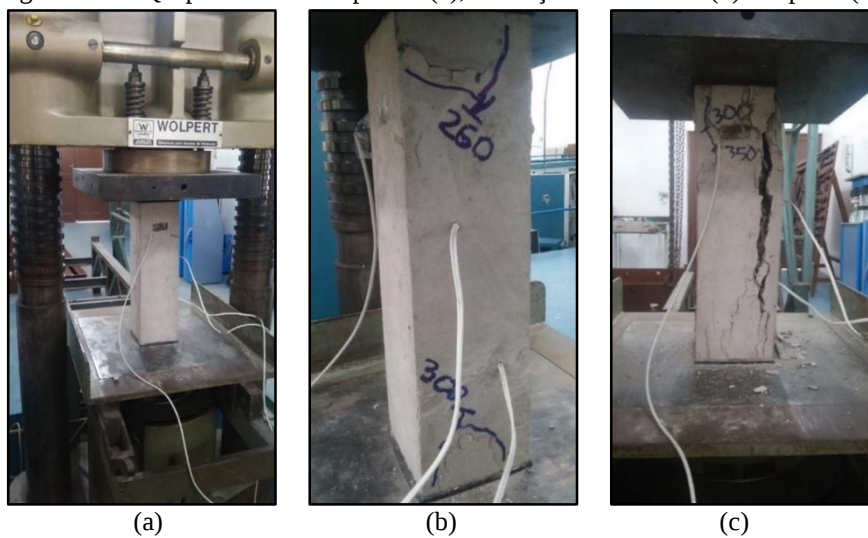
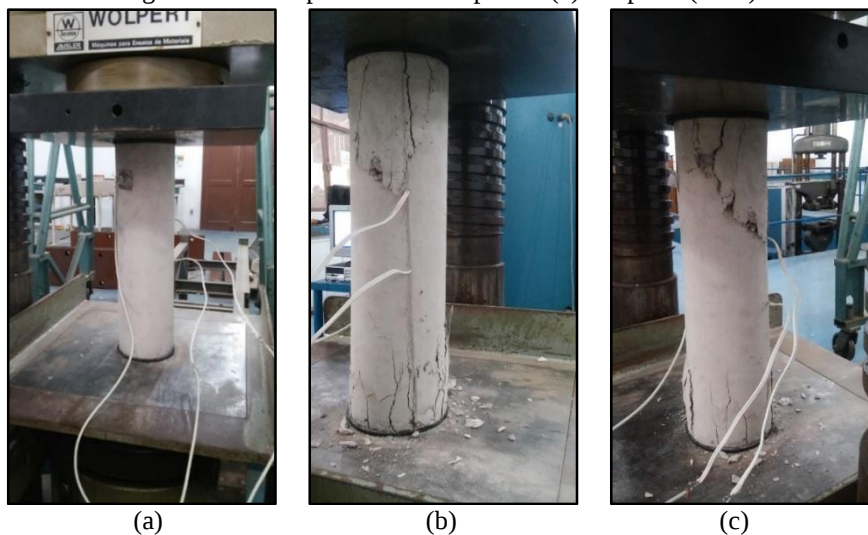


Figura 47 – PCR posicionado na prensa (a) e ruptura (b e c).



Nos pilares com reforço em concreto armado, observou-se o início da fissuração para carga de 320 kN no pilar PQCA e de 640 kN para o PCCA, ambos apresentaram um maior número de fissuras nas extremidades, e sua ruptura ocorreu provavelmente por esmagamento do concreto (Figuras 48 e 49).

Figura 48 – PQCA posicionado na prensa (a), fissuração (b) e ruptura (c).

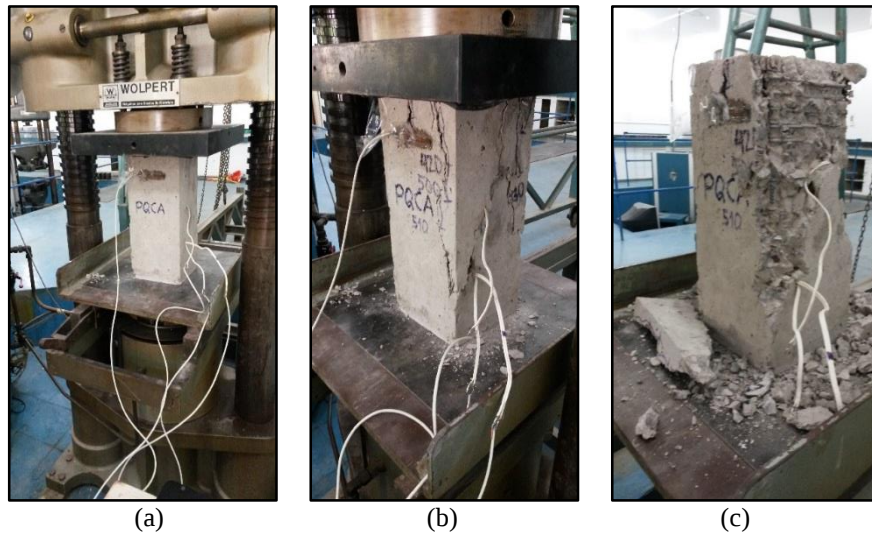
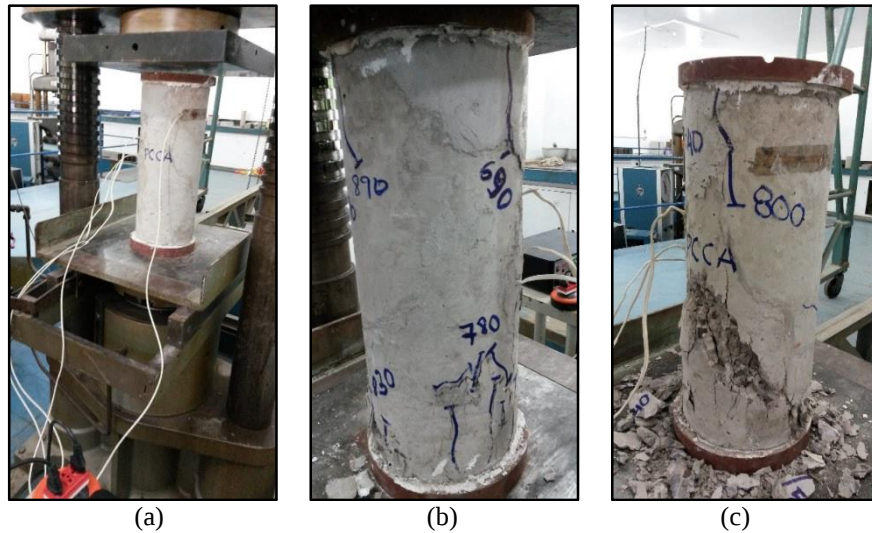


Figura 49 – PCCA posicionado na prensa (a), mapeamento da fissuração (b) e ruptura (c).



Os pilares encamisados com fibra de carbono não apresentaram fissurações aparentes. A ruptura provavelmente deu-se por perda de confinamento, sendo que no PQFC, o compósito rompeu na região central e no PCFC, na extremidade superior (Figuras 50 e 51).

Figura 50 – PQFC posicionado na prensa (a) e ruptura (b e c).

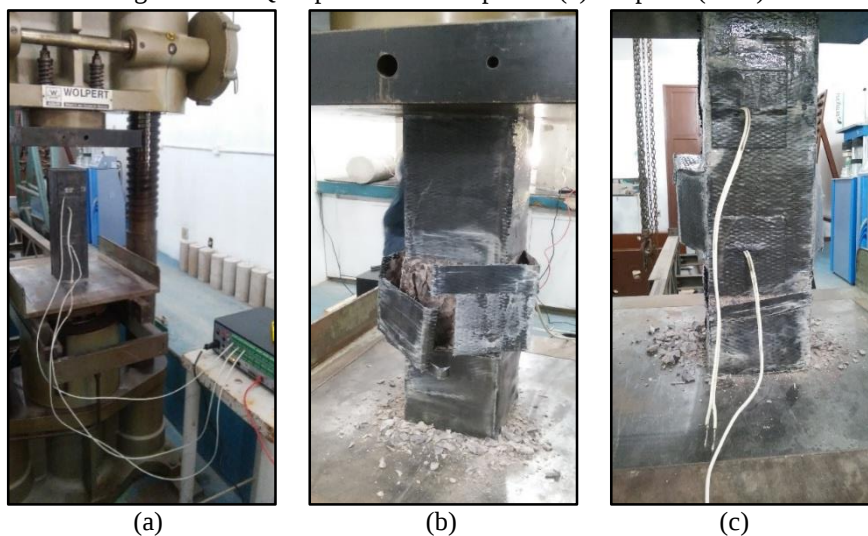
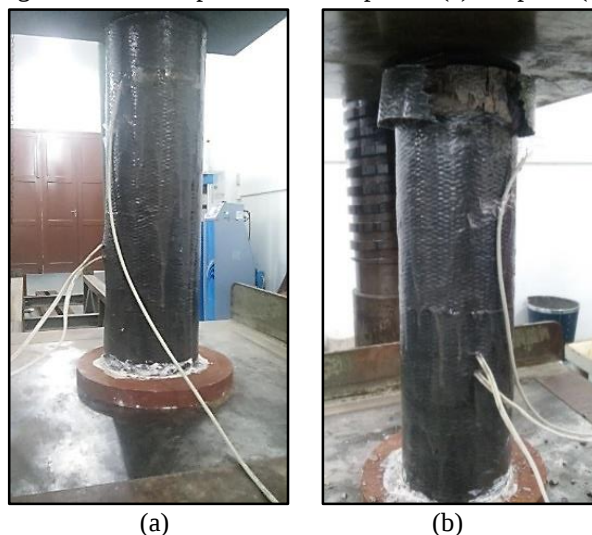


Figura 51 – PCFC posicionado na prensa (a) e ruptura (b).



Nos pilares reforçados com argamassa armada de tela soldada, ocorreram o deslocamento da argamassa e a flexão da tela soldada, com a fissuração predominante na extremidade superior do pilar de seção quadrada, e na parte central do modelo circular. O início da fissuração para o PQTS ocorreu por volta de 260 kN e o PCTS com carga de 530 kN. A ruptura dos pilares ocorreu provavelmente por falta de resistência ao confinamento, o que provocou o deslocamento da camada de argamassa (Figuras 52 e 53).

Figura 52 – PQTS posicionado na prensa (a), início da fissuração (b) e ruptura (c).

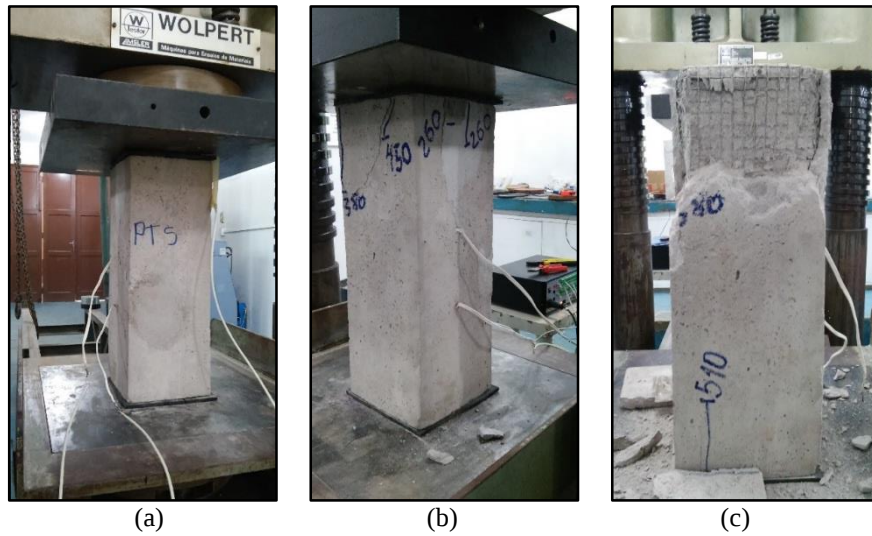
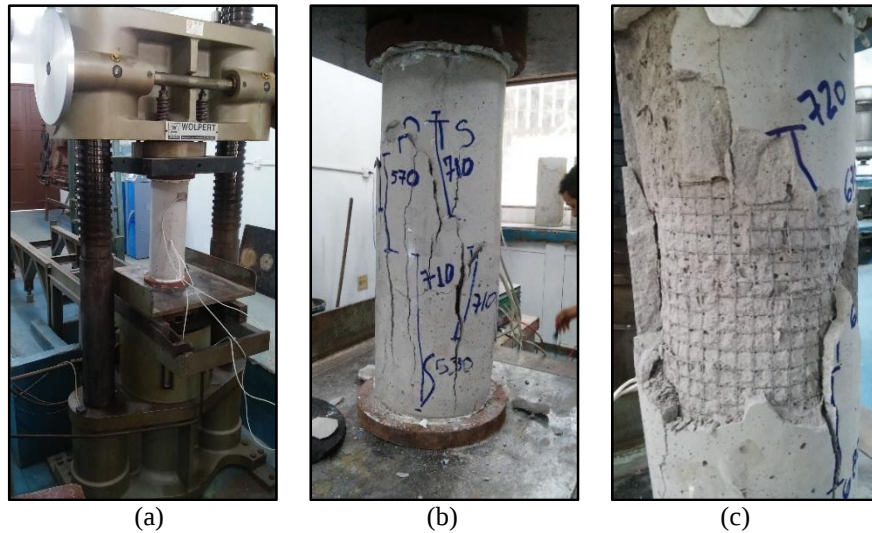


Figura 53 – PCTS posicionado na prensa, (a) início da fissuração (b) e ruptura (c).



Os modos de fissurações e ruptura dos pilares reforçados com argamassa armada com tela de fibra de vidro, ocorreu possivelmente por deslocamento da argamassa armada concomitantemente com o esmagamento do núcleo. Esta alternativa mostrou-se pouco eficiente quanto a pressão de confinamento desenvolvido no PQFV, no entanto no PCFV apresentou bom resultado (Figuras 54 e 55).

Figura 54 – PQFV posicionado na prensa (a) e ruptura do pilar (b e c).

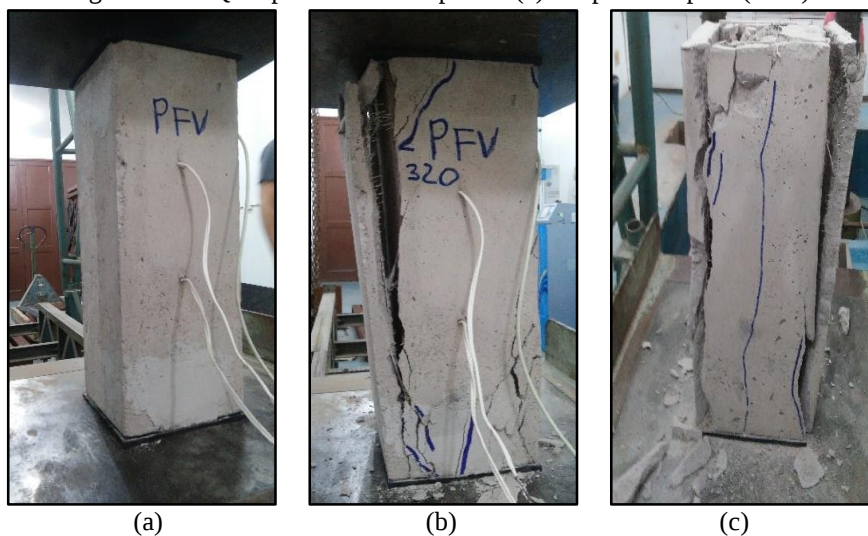


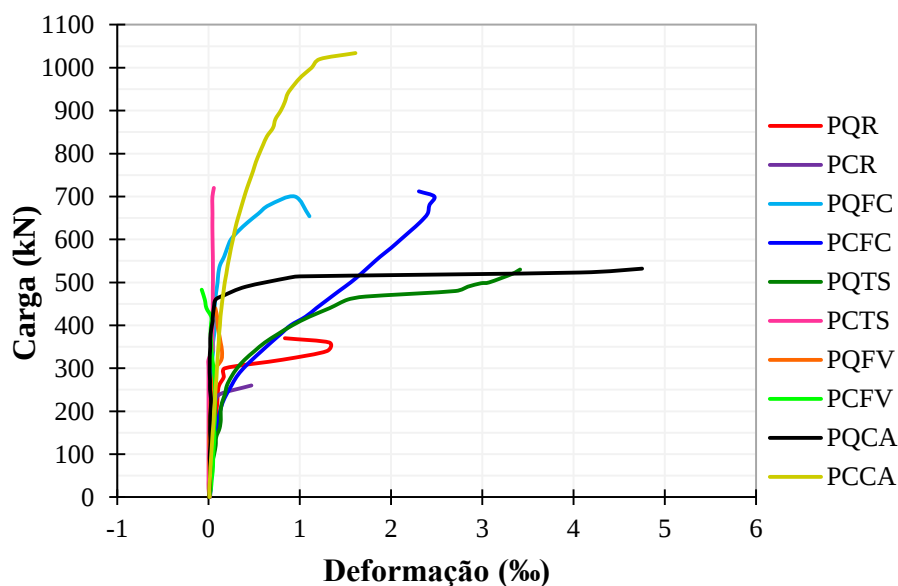
Figura 55 – PCFV posicionado na prensa (a), formação das fissuras (b) e ruptura (c).



4.3 DEFORMAÇÕES NO CONCRETO, ARGAMASSA E FIBRA DE CARBONO

Para a avaliação das deformações na superfície externa dos pilares foi utilizado um extensômetro posicionados a 1/3 do comprimento, localizado na região superior para a medição da deformação transversal. Observa-se no gráfico 6, que as deformações nas áreas de reforço, até a solicitação de 300 kN, apresentaram deformações próximas de zero, com exceção do pilar PCR. Para cargas posteriores, percebe-se que os pilares PCFC, PCCA e PQR apresentaram maiores deformações, para o mesmo nível de carregamento. Observa-se também que o pilares PCCA, PQFC e PCTS, apesar de terem apresentado maior capacidade resistente, mostraram-se mais rígidos, que os outros pilares reforçados, para os mesmos níveis de carga.

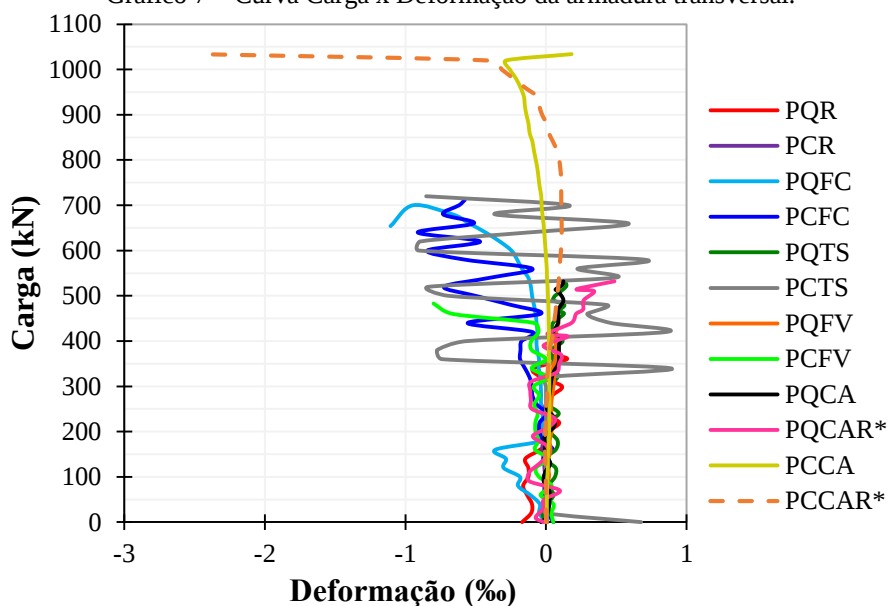
Gráfico 6 – Curva Carga x Deformação dos extensômetros posicionados no concreto e no reforço.



4.4 DEFORMAÇÕES NA ARMADURA TRANSVERSAL

Todos os pilares foram instrumentados com uma armadura transversal do núcleo e uma do reforço com concreto armado. Quanto a localização, optou-se por monitorar a deformação do estribo médio do pilar. As armaduras transversais não apresentaram deformações significativas, sendo que nenhuma das mesmas atingiram a tensão de escoamento. No gráfico 7 são apresentadas as deformações das mesmas.

Gráfico 7 – Curva Carga x Deformação da armadura transversal.

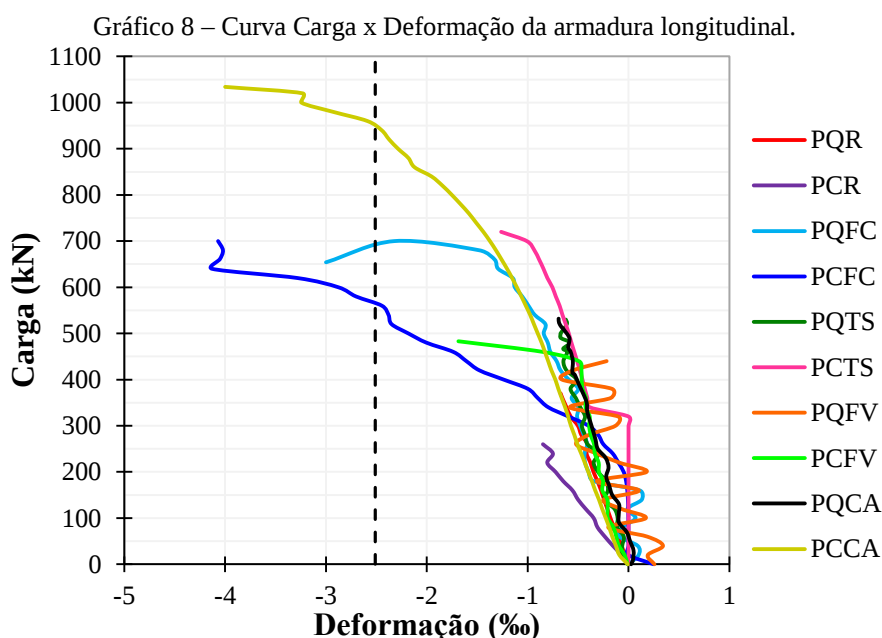


PQCAR* - Estribo do reforço com concreto armado.

PCCAR* - Estribo do reforço com concreto armado.

4.5 DEFORMAÇÕES NA ARMADURA LONGITUDINAL

No gráfico 8 da curva Carga x Deformação é mostrado as deformações das armaduras longitudinais dos pilares, observa-se que a maioria das barras apresentaram comportamento semelhantes com baixa deformação, exceto os pilares PCCA, PCFC e PQFC, com elevadas deformações, em relação aos outros pilares, para o mesmo nível de carregamento. Percebe-se que as barra longitudinais dos pilares PCCA, PCFC e PQFC atingiram maiores deformações que os demais, atingindo inclusive a tensão de escoamento do material, provavelmente por terem apresentado maior capacidade de carga.



4.6 DEFORMAÇÕES NOS PILARES

Nos gráficos abaixo serão apresentadas as deformações resultantes das leituras dos extensômetros por pilar, incluindo as armaduras longitudinais, as armaduras transversais, o concreto, argamassa armada e a fibra de carbono. Os mesmos mostram o comportamento dos extensômetros por elemento ensaiado. Observa-se deformações relativamente pequenas, em todos os pilares, para níveis iniciais de carregamento, porém com um aumento rápido destas deformações, principalmente da armadura longitudinal e do concreto, quando os pilares já se encontravam próximo da ruptura. Observa-se também que os estribos se mantiveram, na maioria dos casos, com pequenas deformações, até que os pilares atingissem suas devidas resistências.

Quadro 3 – Nomenclatura adotada para os extensômetros dos pilares.

Abreviatura	Definição dos extensômetros
Arg.	Argamassa
Conc.	Concreto
Fib.	Fibra de carbono
Long.	Longitudinal
Est.	Estrito
Est. R.	Estrito do reforço

Gráfico 9 – Curva Carga x Deformação do PRQ (a), PCR (b), PQCA (c) e PCCA (d).

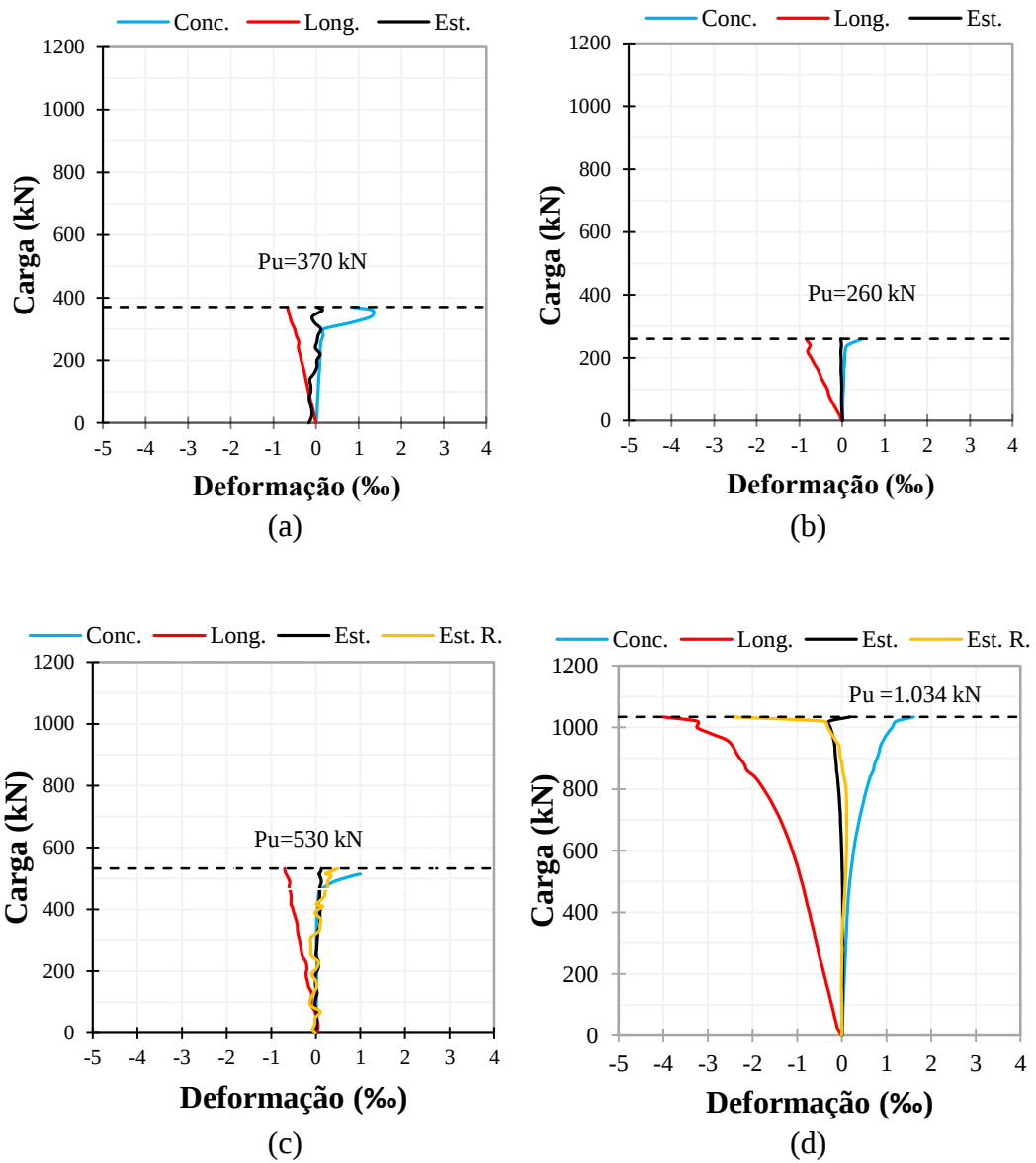
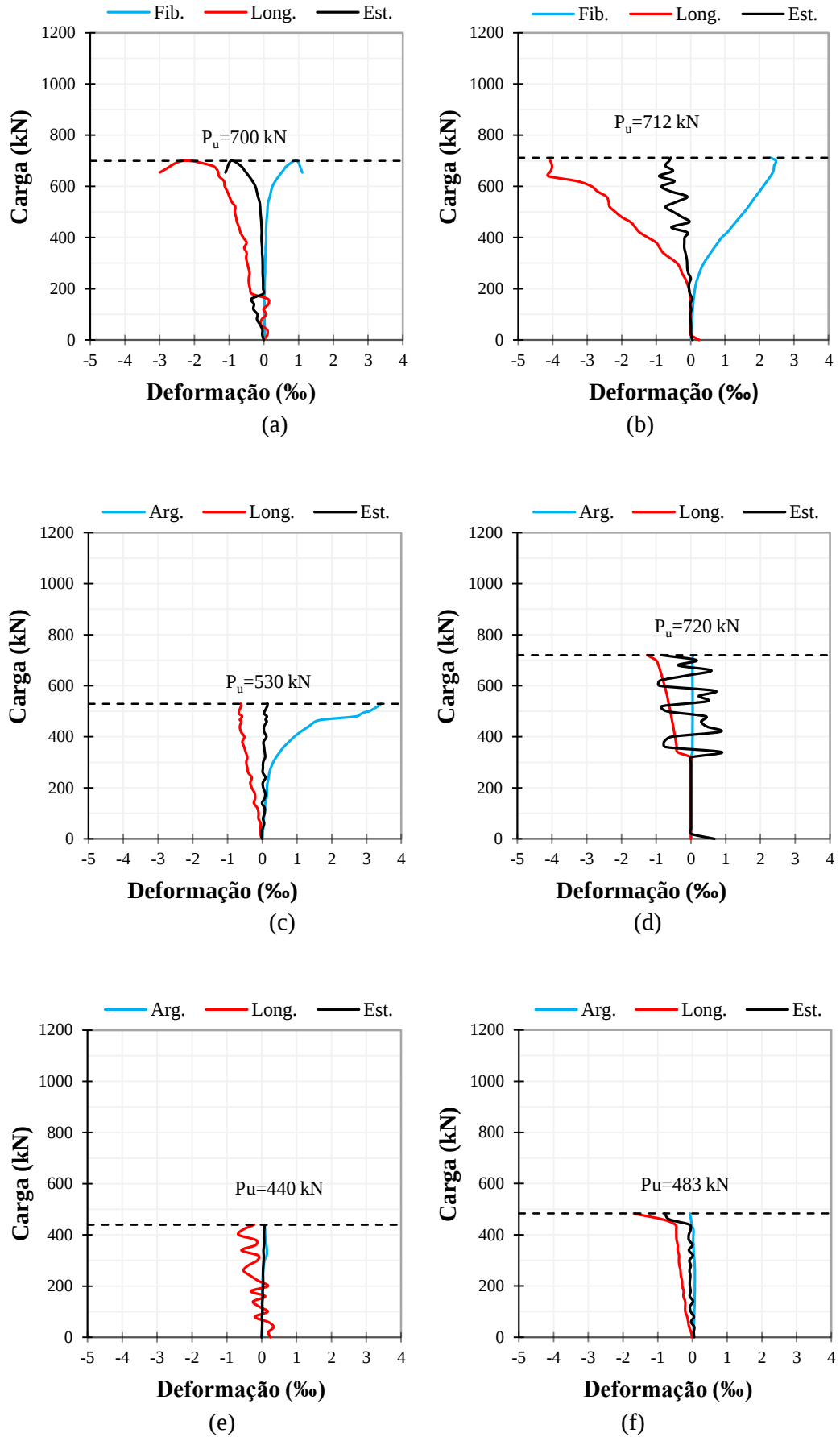


Gráfico 10 – Curva Carga x Deformação do PQFC (a), PCFC (b), PQTS (c), PCTS (d), PQFV (e) e PCFV (f).



5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

5.1.1 Cargas de ruptura

Os resultados indicaram que os pilares de seção circular apresentaram um desempenho superior quando comparados com os de seção quadrada. Ao se analisar a eficiência dos reforços, os de concreto armado, manta de fibra de carbono e tela soldada, mostraram-se com aumento significativo da capacidade resistente, os pilares com seção circular com estes reforços atingiram valores superiores a 170%, em relação aos pilares de referência, provavelmente pelo fato da reação de confinamento ser distribuída uniformemente, ao contrário dos pilares de seção quadrada, onde ocorre concentrações de tensões pelo efeito do arqueamento, entretanto, esse aumento representativo é justificado pelo fato do pilar de referência circular não ter alcançado carga de ruptura de projeto.

Dentre os pilares de seções quadradas o que apresentou o reforço mais eficiente foi o pilar reforçado com manta de fibra de carbono, o qual teve um aumento de mais de 80% quando comparado ao de referência, os de tela soldada e concreto armado também apresentaram bom resultado com acréscimo superior a 40% com relação ao de referência. Ao se analisar a eficiência do reforço em relação a seção transversal, o pilar que se mostrou com um melhor resultado foi o pilar circular reforçado com concreto armado, com o aumento na resistência de 94% em comparativo com o de seção quadrada, embora tenha se mostrado com um bom resultado não pode-se afirmar que esta relação representa de fato a realidade, pois mesmo sendo submetidos as mesma condições obteve-se um resultado muito distante entre si, neste caso, conclui-se que possa ter ocorrido algum problema na realização do ensaio.

Outro pilar que mostrou-se com um bom ganho na resistência, quando comparado as seções transversais, é o PCTS, que apresentou um ganho de 36% em relação ao quadrado, caracterizando este tipo de reforço com um bom efeito de confinamento. Os reforços com tela de fibra de vidro não se comportaram de maneira eficiente, sendo esmagados com pouca deformação.

5.1.2 Modos de fissuração

Em geral, os modos de rupturas observados foram por esmagamento do concreto, com concentração de fissuras predominantemente nas extremidades, podendo ser justificada pelo fato de que nas extremidades dos pilares há uma maior concentração de tensões ou ainda pela quantidade e/ou disposição insuficiente da armadura de fretagem. Os reforços executados com fibra de carbono, a ruptura deu-se provavelmente por perda de confinamento induzido pela camisa. Nos modelos reforçados com tela soldada e tela de fibra de vidro ocorreram o deslocamento da argamassa e esmagamento do núcleo provavelmente por falta de aderência entre os materiais.

5.1.3 Deformações

Entre os pilares que atingiram maior capacidade resistente, o PQCA, o PQFC e o PCTS, mostraram-se mais rígidos que os demais pilares reforçados, apresentando baixa deformações. Em todos os pilares, as armaduras transversais apresentaram pequenas deformações, não alcançando a tensão de escoamento, o que indica que essas armaduras foram pouco solicitadas e acabaram esmagadas. As armaduras longitudinais também não apresentaram deformações significativas, sendo que apenas três barras atingiram a tensão de escoamento, para os pilares que foi observado maior capacidades de carga.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta pesquisa avaliou experimentalmente diversas técnicas de reforços aplicados em pilares de concreto armado, no entanto esta temática é ampla e com inúmeras variáveis a serem estudadas, por isso, sugere-se as seguintes propostas para futuras pesquisas.

- Análise do custo-benefício da aplicação das técnicas de reforço, principalmente com o uso de argamassa armada ou com o uso de concreto mais resistentes e/ou maior fluidez;
- Analisar cada tipo de alternativa com um maior número de amostras, objetivando um resultado mais preciso sobre cada reforço;
- Analisar a possibilidade do emprego e o comportamento destes pilares com o uso de concreto auto-adensável, em substituição ao concreto convencional que foi utilizado no reforço de alguns pilares;

- Realizar mais ensaios com o emprego de argamassa armada, para verificar o comportamento como técnica de reforço;
- Analisar a contribuição para pilares reforçados com argamassa armada com tela soldada variando a quantidade de camadas e a malha da tela;
- Analisar computacionalmente os espécimes que foram testados nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI. **Building code requirements for structural concrete**. ACI Committee 318. Detroit, 2014.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI. **Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures**. ACI Committee 440.2R. Detroit, Jul. 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials**. ASTM D 3039/ D 3039 M. Philadelphia, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials**. ASTM D 638. Philadelphia, 2014.

ANDRADE, P. H. **Evolução do concreto armado**. 2008. 56 f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil) - Universidade Anhembí Morumbi. São Paulo, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de provas. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

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 6207**: Arame de Aço – Ensaio de tração. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR ISO 6892**: Materiais metálicos – Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

CARRAZEDO, R. **Mecanismos de confinamento e suas implicações no reforço de pilares de concreto por encamisamento com compósito de fibras de carbono**. 2002. 208 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

CARRAZEDO, R. **Mecanismos de confinamento em pilares de concreto encamisados com polímeros reforçados com fibras submetidos à flexo-compressão**. 2005. 267 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

CARVALHO, R. C. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 1. ed. Editora Pini. São Paulo, 2009. 589 p.

CIMENTO ITAMBÉ. **Concreto armado inspira as igrejas de Oscar Niemeyer**. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/concreto-armado-inspira-as-igrejas-de-oscar-niemeyer/>>. Acesso: 04 de Jan. de 2016.

CLÍMACO, J.C.T.S. **Estruturas de Concreto Armado: fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação**. 2. ed. Editora Universidade de Brasília. Brasília, 2013. p. 410.

DAMASCENO, I.I.R **Análise experimental de pilares reforçados com concreto armado**. 2013. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará. Belém, 2013.

FIBERTEX. **Tela de fibra de vidro estrutural – Construção Civil**. Disponível em: <<http://www.fibertex.com.br/produtos/construcao-civil/>>. Acesso: 20 de out de 2015.

GARCEZ, E. O. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto**. 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2005.

MACHADO, A. P. **Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. 120 p. Viapol. São Paulo, 2010.

MACHADO, A. P.; MACHADO, B.A. **Reforço de estruturas de concreto armado com sistemas compostos FRP: teoria e prática**. 1. ed. Editora Pini. São Paulo, 2015. p. 517.

NASCIMENTO, P. P. **Análise experimental de pilares de concreto Armado submetidos à flexo-compressão, Reforçados com concreto auto-adensável e Conectores**. 2009. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

PEREIRA, B. M. G. **Modelos Analíticos para a Previsão do Desempenho de Pilares Confinados com Fibras de Carbono**. 2012. 103 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2012.

PIANCASTELLI, E. M. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto Armado**. 1997. 160 f. Ed. Depto. Estruturas da Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 1997.

REIS, L.S.N. **Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. 2001. 114 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

RIGAZZO, A. O. **Reforço em pilares de concreto armado por cintamento externo com mantas flexíveis de fibras de carbono**. 2003. 143 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

SILVA, A. S. **Comportamento de pilares curtos confinados por compósitos de fibras de vidro e carbono**. 2002. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1. ed. Editora Pini. São Paulo, 1998. p. 262.

SUDANO, A. L. **Influência da forma da seção transversal no confinamento de pilares de concreto armado encamisados com PRFC (polímero reforçado com fibra de carbono)**. 2005. 147 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SUDANO, A. L. **Desenvolvimento de estratégias híbridas de reforço de pilares de concreto armado por encamisamento com compósitos de alto desempenho**. 2010. 263 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

TAKEUTI, A. R. **Reforço de pilares de concreto armado por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho**. 1999. 205 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

TAKEUTI, A. R. **Comportamento resistente imediato e ao longo do tempo de pilares reforçados por meio de encamisamento com concreto armado de alto desempenho**. 2003.

277 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

VIAPOL EUCLID GROUP. **Viapol carbon CFW 300**. Ficha Técnica - Versão 02/07/2015. Disponível em: <<http://www.viapol.com.br/produtos/recupera%C3%A7%C3%A3o-refor%C3%A7o/refor%C3%A7o-estrutural/viapol-carbon-cfw-300/>>. Acesso em: 28 de Nov. 2015.

VIAPOL EUCLID GROUP. **Viapoxi adesivo gel**. Ficha Técnica - Versão 01/06/2013. Disponível em: <<http://www.viapol.com.br/produtos/adesivos/viapoxi-adesivo-gel/>>. Acesso em: 28 de Nov. 2015.

VIAPOL EUCLID GROUP. **Viapoxi injeção**. Ficha Técnica - Versão 01/06/2013. Disponível em: <<http://www.viapol.com.br/produtos/recupera%C3%A7%C3%A3o-e-refor%C3%A7o/sistema-de-inje%C3%A7%C3%A3o/viapoxi-inje%C3%A7%C3%A3o/>>. Acesso em: 28 de Nov. 2015.

.