

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE
CAMPUS ARACAJU
DIRETORIA DE ENSINO
COORDENADORIA DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

THALISSON RIBEIRO ANDRADE

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS DE REFORÇO À
FLEXÃO APLICADAS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO**

MONOGRAFIA

**ARACAJU
2021**

THALISSON RIBEIRO ANDRADE

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS DE REFORÇO À
FLEXÃO APLICADAS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO**

Monografia apresentada como requisito parcial
à obtenção do título de Bacharel, da
Coordenação do Curso de Engenharia Civil, do
Instituto Federal de Sergipe – Campus Aracaju.

Orientador: Prof. Msc. Euler Wagner Freitas
Santos.

**ARACAJU
2021**

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária Geocelly Oliveira Gambardella / CRB-5 1815,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Andrade, Thalisson Ribeiro

A553e Estudo comparativo entre técnicas de reforço à flexão aplicadas em vigas de concreto armado. / Thalisson Ribeiro Andrade. - Aracaju, 2021.

85 f. : il.

Orientador: Prof. Me. Euler Wagner Freitas Santos.

Monografia (Graduação - Bacharelado em Engenharia Civil.) - Instituto Federal de Sergipe, 2021.

1. Reforço estrutural. 2. Concreto Armado. 3. Flexão. 4. Polímero. 5. Fibra de carbono. 6. PRFC. 7. Encamisamento. I. Santos, Euler Wagner Freitas. II. Título.

CDU 691.328

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SERGIPE

CAMPUS ARACAJU

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia Nº 184

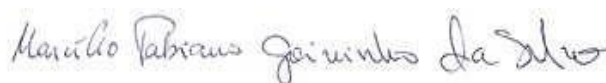
**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS DE REFORÇO À FLEXÃO
APLICADAS EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO**

THALISSON RIBEIRO ANDRADE

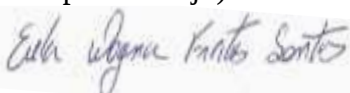
Esta monografia foi apresentada às 18 h do dia 06 de abril de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.



Prof. M.Sc. Rodolfo Santos da Conceição
(IFS – Campus Aracaju)



Prof. M.Sc. Marcílio Fabiano Goivinho
(IFS – Campus Aracaju)



Prof. M.Sc. Euler Wagner Freitas Santos
(IFS – Campus Aracaju)
Orientador Coordenador da COEC



Prof. Dr. Pablo Gleydson de Sousa
(IFS – Campus Aracaju)

Dedico este trabalho à Deus, minha família e amigos, que me deram todo apoio necessário para sua conclusão.

AGRADECIMENTOS

Gratidão é a palavra que melhor pode expressar meus sentimentos nesse momento. Primeiramente, agradeço a Deus, por todos os passos que foram escolhidos para mim, por todas as pessoas que foram colocadas em minha vida, e pela fé, perseverança e dedicação que me foi dada por ele no decorrer dessa caminhada.

Em segundo lugar à minha família que se doou desde o início dessa caminhada para me proporcionar a oportunidade de me desenvolver intelectualmente, e me deu o carinho e afeto necessários para prosseguir nesse caminho, em especial à minha namorada Natália, por toda paciência e por me ajudar a suportar cada momento em que os obstáculos pareciam insuperáveis.

Agradeço também ao meu orientador, Prof. Msc. Euler Wagner, por toda dedicação e atenção que teve em minhas orientações, mostrando-me sempre os melhores caminhos a serem seguidos, e por ter acreditado em mim durante todo o momento.

Sou grato também por toda equipe da COEC, por ter me ensinado desde sempre, cada um da sua forma, aquilo que para eles era importante e imprescindível para um engenheiro civil, tanto na esfera profissional como na esfera pessoal, principalmente pelo grande caráter apresentado por cada um dos docentes.

Por último e não menos importante, agradeço a todos os meus amigos presentes nessa caminhada, pessoas que conheci e que de certa forma me mudaram para melhor, e acrescentaram muito no meu desenvolvimento. Sem eles nada disso seria possível, dessa forma, agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente participaram dessa caminhada, sou muito grato por tudo.

“Construí amigos, enfrentei derrotas, venci
obstáculos, bati na porta da vida e disse-
lhe: Não tenho medo de vivê-la”

(Augusto Cury)

RESUMO

ANDRADE, Thalisson Ribeiro. **Estudo comparativo entre técnicas de reforço à flexão aplicadas em vigas de concreto armado**. 85f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2021.

A utilização de reforços estruturais para elementos de concreto armado é vista geralmente como a necessidade de aumentar a resistência de determinadas estruturas, a partir da sobrecarga decorrente de uma nova finalidade de ocupação para a edificação. É sabível que existem no mercado várias técnicas, com características diferentes, capazes de aumentar a capacidade portante à flexão de vigas de concreto armado, no entanto, a aplicação delas em uma determinada região do Brasil depende de fatores que envolvem conhecimento tecnológico, disponibilidade de material e de mão de obra, os quais impactam no custo do reforço. Diante disso, o intuito deste trabalho foi analisar a exequibilidade do emprego das principais técnicas de reforço à flexão no estado de Sergipe, sendo elas: materiais feitos de polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC), fixação de chapas de aço e o encamisamento parcial da estrutura. A análise foi feita através do dimensionamento de vigas pertencentes a um pórtico modelo de Menezes *et al.* (2016), assim foi aferida a viabilidade do emprego de cada um dos três tipos de reforço mencionados, bem como suas principais características e o custo para aplicação dessas técnicas na localidade em questão. Nas vigas analisadas foi perceptível que tanto a colagem de chapas de aço, quanto a utilização de PRFC, apesar de aplicáveis, possuem alto custo para execução no estado de Sergipe, foi notado também que o encamisamento parcial mostra-se mais viável para elementos de pequeno porte, especialmente pelo fato que o uso dos PRFCs ainda ser incipiente nessa localidade.

Palavras-chave: Reforço estrutural. Flexão. Concreto Armado.

ABSTRACT

ANDRADE, Thalisson Ribeiro. **Estudo comparativo entre técnicas de reforço à flexão aplicadas em vigas de concreto armado**. 85f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe – Campus Aracaju. 2021.

The use of Strengthening for reinforced concrete elements is generally seen as the need to increase the resistance of certain structures, based on the overload resulting from a new occupation purpose for the building. It is known that there are several techniques on the market, with different characteristics, capable of increase the bending load-bearing capacity of reinforced concrete beams, however, their application in a certain region of Brazil depends on factors involving technological knowledge, material availability and labor, which impact the cost of reinforcement. Therefore, the purpose of this work was to analyze the feasibility of using the main bending reinforcement techniques in the state of Sergipe, which are: materials made of carbon fiber reinforced polymers (PRFC), steel sheets fastening and partial jacketing of the structure. The analysis was carried out through the design of beams belonging to a model by Menezes *et al.* (2016), this form, the feasibility of using each of the three types of reinforcement already mentioned was assessed, as well as their main characteristics and the cost for applying these techniques in the locality in question. In the beams analyzed, it was noticeable that both the gluing of steel sheets and the use of PRFC, although applicable, have a high cost for execution in the state of Sergipe, it was also noted that the partial jacketing is more viable for small elements especially due to the fact that the use of PRFCs to be still incipient on this location.

Keywords: Structural reinforcement. Bending. Reinforced concrete.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo de aplicação de reforço com fibra de carbono em laje.....	22
Figura 2 - Representação de encamisamento com formato trapezoidal em viga de concreto armado.	24
Figura 3 - Representação de encamisamento como reforço de vigas com armaduras adicionadas.	25
Figura 4 - Utilização de chapas de aço como forma de reforço a flexão em lajes.	26
Figura 5 - Colocação de buchas expansivas no reforço em lajes.	27
Figura 6 - Modelo de parafuso Parabolt, fabricado pela Âncora, utilizado para chumbamento de chapas de aço.	27
Figura 7 - Procedimento de aplicação de reforço à flexão com chapas de aço na parte superior de uma viga.	28
Figura 8 - Representação das camadas de tinta na proteção do aço.	29
Figura 9 - Diagrama comparativo Tensão x Deformação entre fibras.	31
Figura 10 - PRFCs em Lâminas, barras e tecidos.	32
Figura 11 - Principais componentes do sistema laminado de PRFCs.	33
Figura 12 - Principais componentes do sistema curado in situ de PRFCs.	33
Figura 13 - Representação das camadas de aplicação do tecido em fibra de carbono na saturação via seca.	34
Figura 14 - Aplicação de lâminas de PRFC aplicadas no sistema pré curado.	35
Figura 15 - Planta baixa modelo do pórtico analisado.	37
Figura 16 - Representação das vigas menores em planta baixa.	38
Figura 17 - Representação do diagrama de momento Fletor da Viga V1 (biapoiada).	39
Figura 18 - Representação das vigas maiores em planta baixa.	39
Figura 19 - Representação do diagrama e momento Fletor da Viga V2 (continua).	40
Figura 20 - Diagrama retangular simplificado de tensões.	43
Figura 21 - Detalhamento esquemático de reforço com lâmina de fibra de carbono: a) seção transversal e b) vista lateral.	52

Figura 22 - Representação de reforço com chapas de aço sem a utilização de buchas expansivas (a) e com a utilização de buchas expansivas (b).	62
Figura 23 - Representação de reforço por encamisamento em viga.	68
Figura 24 - Representação de comprimento de ancoragem calculado e adotado para o pilar de extremidade da viga V5.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades das principais fibras utilizadas para reforço em estruturas de concreto armado.	31
Tabela 2 - Dimensões das vigas com base na altura da edificação.	38
Tabela 3 - Análise das vigas menores (V1, V4 e V7) previamente dimensionadas.	39
Tabela 4 - Análise das vigas V5 e V6 previamente dimensionada.	40
Tabela 5 - Análise da viga V2 previamente dimensionada.	41
Tabela 6 - Análise da viga V3 previamente dimensionada.	41
Tabela 7 - Comprimento de ancoragem das barras comerciais (aço CA-50) em relação à classe de resistência do concreto, segundo Bastos (2018).	50
Tabela 8 - Resultados do dimensionamento das vigas menores (V1, V4 e V7) para lâminas de fibras de carbono.	53
Tabela 9 - Resultados das verificações realizadas para aplicação do reforço nas vigas menores (V1, V4 e V7) para lâminas de fibras de carbono.	54
Tabela 10 - Resultados do dimensionamento das vigas V5 e V6 para Lâminas de fibras de carbono.	54
Tabela 11 - Quantidade de camadas e comprimento das lâminas utilizadas para reforço das vigas V5 e V6.	55
Tabela 12 - Resultados das verificações realizadas para aplicação do reforço nas vigas (V5 e V6) para lâminas de fibras de carbono.	55
Tabela 13 - Resultados do dimensionamento da viga V3 para Lâminas de fibras de carbono.	56
Tabela 14 - Quantidade de camadas e comprimento das lâminas utilizadas para reforço da viga V3.	57
Tabela 15 - Resultados das verificações realizadas para aplicação do reforço na viga V3 para lâminas de fibras de carbono.	57

Tabela 16 - Resultados do dimensionamento da viga V2 para Lâminas de fibras de carbono.	58
Tabela 17 - Quantidade de camadas e comprimento das lâminas utilizadas para reforço da viga V2.	58
Tabela 18 - Resultados das verificações realizadas para aplicação do reforço na viga V2 para lâminas de fibras de carbono.	59
Tabela 19 - Custos estimados para aplicação do reforço com a utilização de lâminas de PRFC.	60
Tabela 20 - Resultados do dimensionamento das vigas menores (V1, V4 e V7) para Tecidos de fibras de carbono.	61
Tabela 21 - Resultados do dimensionamento das vigas menores (V1, V4 e V7) para o reforço com chapas de aço.	63
Tabela 22 - Resultados do dimensionamento das vigas V5 e V6 para o reforço com chapas de aço.	64
Tabela 23: Quantidade de camadas e comprimento das chapas necessárias para execução do reforço das vigas V5 e V6.	64
Tabela 24 - Resultados do dimensionamento da via V3 para o reforço com chapas de aço.	65
Tabela 25: Quantidade de camadas e comprimento das chapas necessárias para execução do reforço da viga V3.	65
Tabela 26 - Resultados do dimensionamento da viga V2 para o reforço com chapas de aço.	66
Tabela 27: Quantidade de camadas e comprimento das chapas necessárias para execução do reforço da viga V2.	66
Tabela 28 - Custos estimados para aplicação do reforço com a utilização de chapas de aço.	67
Tabela 29 - Peso total acrescido a estrutura por viga.	67
Tabela 30 – Resultados do dimensionamento das vigas menores (V1, V4 e V7) para o reforço por encamisamento parcial.	69
Tabela 31 - Áreas requerida e adotada para interface nas vigas (V1, V4 e V7).	70

Tabela 32 - Resultados do dimensionamento das vigas V5 e V6 para o reforço por encamisamento parcial.	71
Tabela 33 - Disposição das barras de aço em camadas, diâmetros e comprimentos de reforço para as vigas V5 e V6 por encamisamento parcial.	71
Tabela 34 - Área requerida e adotada para interface das vigas V5 e V6.	73
Tabela 35 - Resultados do dimensionamento da viga V3 para o reforço por encamisamento parcial.	74
Tabela 36 - Disposição das barras de aço em camadas, diâmetros e comprimentos de reforço para a viga V3 por encamisamento parcial.	74
Tabela 37 - Área requerida e adotada para interface da viga V3.	75
Tabela 38 - Resultados do dimensionamento da viga V2 para o reforço por encamisamento parcial.	75
Tabela 39 - Disposição das barras de aço em camadas, diâmetros e comprimentos de reforço para a viga V2 por encamisamento parcial.	76
Tabela 40 - Área requerida e adotada para interface da viga V2.	76
Tabela 41 - Custos estimados para aplicação do reforço por encamisamento parcial da estrutura.	77
Tabela 42 - Comparativo entre custos estimados para execução dos três tipos de reforço.	77
Tabela 43 - Síntese comparativa entre as técnicas de reforço a flexão abordadas.	79

LISTA DE SÍMBOLOS

f_f	Resistência à tração da fibra.
E	Módulo de elasticidade.
E_c	Módulo de elasticidade do concreto.
E_s	Módulo de elasticidade do aço
ϵ_{fu}	Deformação última da fibra.
A_s	Área da seção transversal da armadura longitudinal de tração.
A_s'	Área da seção transversal da armadura longitudinal de compressão.
M_{s0}	Momento Solicitante inicial (antes do aumento do carregamento).
M_{s1}	Momento Solicitante final (depois do aumento do carregamento).
A_f	Área do reforço a ser dimensionado.
σ_f	Tensão Normal para o reforço.
σ_s'	Tensão Normal para armadura comprimida.
d	Altura efetiva da viga.
d'	Distância do centroide da seção da armadura longitudinal de compressão à face superior da viga.
ρ	Taxa geométrica da armadura longitudinal de tração.
ρ'	Taxa geométrica da armadura longitudinal de compressão.
n	Fator de transformação de materiais.
M_{ppser}	Momento devido ao peso próprio de serviço.
M_u	Momento fletor último da viga.
M_{uf}	Momento fletor último da viga com reforço.
X_p	Posição da linha neutra com adição do reforço.
ϵ_{max}	Deformação máxima das fibras.
e_f	Espessura da Fibra.
ϵ_f	Deformação específica da fibra.
ϵ_c	Deformação do concreto.
ϵ_s'	Deformação específica do aço da armadura longitudinal de compressão.
ϵ_y	Deformação específica de escoamento do aço.
τ	Tensão cisalhante na junta.
σ_{fi}	Tensão Normal específica da Fibra.
L_f	Comprimento da Lâmina a ser utilizado no reforço.
$\tau_{máx}$	Tensão cisalhante máxima na junta.
f_{ctd}	Resistência a tração do concreto de cálculo.
f_y	Módulo da tensão de escoamento do aço.
A_{ch}	Área da chapa de aço.
e_{ch}	Espessura específica da chapa de aço necessária.
B_f	Largura do reforço utilizado.
A_i	Área da interface viga-reforço.
A_{sf}	Área de aço do reforço.
τ_R	Tensão resistente de aderência entre dois concretos distintos.
ϕ	Diâmetro das barras utilizadas.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS.....	20
2.1	OBJETIVO GERAL.....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	20
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
3.1	REFORÇO ESTRUTURAL	21
3.2	ENCAMISAMENTO	22
3.3	CHAPAS DE AÇO	26
3.4	POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO.....	29
4	METODOLOGIA	36
4.1	ANÁLISE DE SOFTWARE	36
4.2	CÁLCULO DOS REFORÇO	42
4.2.1	Cálculo do reforço com a utilização de PRFC	46
4.2.2	Cálculo do reforço com a utilização de chaps de aço SAE1020.....	48
4.2.3	Cálculo do reforço por encamisamento parcial da estrutura.....	49
4.3	ANÁLISE COMPARATIVA.....	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1	REFORÇO COM A UTILIZAÇÃO DE PRFC.....	52
5.2	REFORÇO COM A UTILIZAÇÃO DE CHAPAS DE AÇO	62
5.3	REFORÇO POR ENCAMISAMENTO PARCIAL DA ESTRUTURA.....	68
6	CONCLUSÕES	80
7	REFERÊNCIAS.....	81

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de moradia é vista como uma das demandas básicas do ser humano desde os tempos antigos, dessa forma, a execução de moradias duráveis e seguras é encarada como um aspecto fundamental da construção civil. As atividades da Engenharia Civil são extremamente necessárias para o desenvolvimento da humanidade, pois é a partir delas que podem ser mensuradas e garantidas as melhores condições para concepção, projeto, execução e uso das edificações.

Em países como o Brasil as necessidades das atividades de construção civil são ainda mais observadas, entretanto, o mal planejamento desde o início de várias construções põe em “xeque” a qualidade esperada no processo construtivo. O “construir por construir” é talvez um dos grandes problemas da sociedade cada vez mais pautada no capitalismo, em que muitas vezes a pressa se sobrepõe ao planejamento. Assim, a preocupação na maioria das vezes não se dá a qualidade de serviço propriamente dita, mas a agilidade e economia que possam ser possibilitadas na construção, e esse “corte de gastos” faz com que a conta a ser paga venha bem maior no futuro.

Nesse aspecto uma grande vertente sobre esse tema refere-se ao uso e estudo de estruturas de concreto armado. As estruturas de concreto armado são projetadas para atender determinadas características referentes a resistência, rigidez e durabilidade, entretanto podem apresentar falhas em qualquer um desses aspectos em determinado tempo, sendo, dessa forma, insuficientes na função para a qual foi designada como citou Pivatto (2014).

Esse tipo de estrutura, muito utilizado na construção civil, possui bastante destaque com relação aos mais variados estudos, que visam principalmente a melhoria e evolução da tecnologia de construir em concreto armado. E, nesse ponto, medidas que ajudem a melhorar a durabilidade e a capacidade de carregamento desse tipo de estruturas são cada vez mais observadas e pesquisadas.

É possível dizer ainda que grande parte das estruturas de concreto armado foram construídas e projetadas para durarem no mínimo 50 anos, com base nas

prescrições normativas anteriores ao surgimento da norma de desempenho (NBR 15575:2013- Desempenho de edificações habitacionais), entretanto, cabe citar que a responsabilidade do engenheiro civil vai muito além desse período. A vida útil de projeto (VUP) pode ir até mais de 75 anos. Contudo, esse tempo nem sempre é atingido, por inúmeros fatores, como: Erros no procedimento construtivo, erros de projeto, falta de manutenção nas estruturas e falta de qualidade dos materiais empregados.

De acordo com Pivatto (2014), o estudo dos reforços estruturais surgiu então como uma forma de efetuar correções temporárias e/ou permanentes em estruturas que de alguma forma deixaram de atender as especificações para as quais foram criadas, sendo importante nesse ponto o estudo de dois temas principais: o reforço e o reparo.

Reforço e o reparo são vistos como uma maneira de reabilitar as estruturas danificadas, sendo o reforço uma intervenção realizada em edificações que precisam aumentar sua capacidade de carga e/ou resistência, enquanto o reparo visa principalmente devolver a estrutura as condições para as quais ela foi projetada. Vale citar que não existem normas específicas no que se refere ao estudo dos reforços no Brasil. Além de que geralmente esse tipo de serviço tem um custo elevado, e nem sempre é viável.

Dentre os métodos de reforço que podem ser utilizados em estruturas de concreto armado tem-se: O encamisamento das estruturas de concreto armado, muito utilizada de forma geral, principalmente pelo emprego de materiais convencionais e já utilizados na estrutura; a colagem de chapas de aço a partir de resina epóxi e/ou parafusamento; e a utilização de compósitos de fibras de carbono (em lâminas ou tecidos), método que vem ganhando destaque, pela leveza em relação a estrutura e rapidez na aplicação. Sobre essa técnica, Souza e Ripper (2009) destacam ainda a questão da maleabilidade para sua utilização em locais complexos e registram que o início do uso dos compósitos de fibra de carbono se deu em 1995 no Japão.

O presente trabalho aborda, especificamente, o uso das técnicas de reforço supracitadas e possui como objetivo o estudo da viabilidade do emprego das mesmas, do custo para esses reforços, e um aspecto comparativo entre os pontos positivos e

negativos de cada uma delas, a partir de um estudo realizado numa estrutura modelo verificada nos trabalhos de Menezes *et al* (2016) e Campos *et al* (2018). Nessa estrutura foram dimensionados os reforços em questão nas vigas do pavimento 1, após a nova consideração de carga hipoteticamente estabelecida. Convém salientar que esse aspecto corresponde a aumentos de cargas, devido a situações tais como mudanças de finalidades de construções, que demandam o emprego das intervenções de reforço estrutural.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Estudar a viabilidade do emprego das técnicas de reforço à flexão por polímeros reforçados com fibra de carbono, por colagem de chapas de aço, e por encamisamento parcial com concreto amado, em vigas de concreto armado.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Verificar as dimensões mínimas exigidas por cada uma das técnicas nos elementos estruturais analisados.
- Analisar o custo das referidas técnicas e o impacto da aplicação delas em estruturas de pequeno e médio porte localizadas no estado de Sergipe.
- Verificar a interferência do emprego de cada técnica estudada na variação de peso próprio e das dimensões da estrutura.
- Analisar fatores que interferem na aderência entre o concreto e o reforço, e entre as camadas do reforço, para as estruturas reforçadas.
- Avaliar a estimativa de variação de custos entre as diferentes técnicas estudadas nesse trabalho e seu impacto para estrutura em questão.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 REFORÇO ESTRUTURAL

Reforço estrutural refere-se ao conjunto de técnicas que podem ser utilizadas para que determinada peça estrutural tenha sua capacidade portante aumentada, sejam elas vigas, pilares ou quaisquer outros elementos estruturais. Comumente o termo reforço é confundido com reparo estrutural, entretanto existem algumas diferenças que devem ser observadas. De acordo com Ferrari *et al* (2002), a principal diferença entre reparo e reforço refere-se ao fato de que o primeiro termo representa a correção localizada de determinado problema, enquanto o segundo termo traduz principalmente a necessidade de um incremento de carregamento em um elemento estrutural.

De acordo com o que é exemplificado por Machado (2002), dentre os principais motivos observados para a aplicação de um reforço estrutural estão a utilização incorreta da edificação, a utilização de métodos construtivos inadequados, além do aumento das exigências de segurança, e aumentos de carregamentos destinados a estrutura. Aliado a todos os pontos já citados, Zucchi (2015) atribui a grande abordagem e estudo desses temas à preocupação recente em relação à durabilidade das edificações.

Sabendo-se qual a causa que motiva a execução do reforço cabe ao engenheiro estrutural prosseguir para seu dimensionamento, sendo nesse ponto necessário que seja analisado o comportamento da estrutura antiga, quanto ao estudo de sua deformação, no Estado limite último - ELU e no Estado limite de serviço - ELS (PIVATTO, 2014). Vale citar que antes mesmo de iniciar o dimensionamento deve ser escolhida a técnica que será executada, de acordo com Zucchi (2015) apresenta-se como um grande desafio para essa escolha a questão da compatibilização de materiais, controle do excesso de peso, qualificação da mão de obra existente na região em questão, além da dificuldade em se vencer grandes vãos. A figura 1 exemplifica uma aplicação de reforço utilizando-se polímeros reforçados com fibra de carbono.

Figura 1 - Exemplo de aplicação de reforço com fibra de carbono em laje.



Fonte: Zucchi (2015).

Algumas situações devem ser exploradas ao se dimensionar os reforços, principalmente a partir de um estudo prévio que identifique qual técnica é mais indicada para cada situação. De acordo com Romero (2007) e Ripper e Souza (2009), o reforço estrutural pode ser feito pela associação de materiais metálicos, sejam barras de aço ou chapas coladas ou parafusadas, pela adição de Polímeros de fibras, pela adição de concreto, além da utilização de tensões adicionais oriundas de protensão.

Dessa forma, serão apresentados no texto seguinte alguns dos principais métodos de reforço utilizados no Brasil, sendo eles: O encamisamento parcial das estruturas com concreto armado, a colagem de chapas de aço e a utilização de polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC).

3.2 ENCAMISAMENTO

A técnica de encamisamento é uma das técnicas de reforço à flexão mais utilizadas, e consiste na utilização de uma nova camada de concreto e de armaduras envolvendo a estrutura previamente existente. O encamisamento possui como

vantagens principais o fato de o custo ser geralmente menor do que as outras opções de reforço, por possuir uma execução mais fácil, o que demanda uma mão de obra menos especializada. Entretanto, de acordo com Simões (2007) e Giovanaz (2018), possui como principal desvantagem o aumento de seção do elemento estrutural, visto que a estrutura é envolvida por essa camada extra de concreto armado. Além da utilização de formas de madeira para concretagem da estrutura e o fato de que a peça reforçada, somente pode ser solicitada após o concreto ter a sua resistência de projeto atingida.

Para que o reforço em questão seja eficaz é necessário que a aderência seja atingida, conforme exemplifica Zucchi (2015), a incompatibilidade entre o concreto velho e o novo, além da corrosão que possa existir nos elementos estruturais já existentes, podem atrapalhar essa aderência. Recomenda-se então, que tanto o concreto utilizado no reforço quanto o previamente existente possuam resistência mecânica, módulo de elasticidade, e dilatação compatíveis.

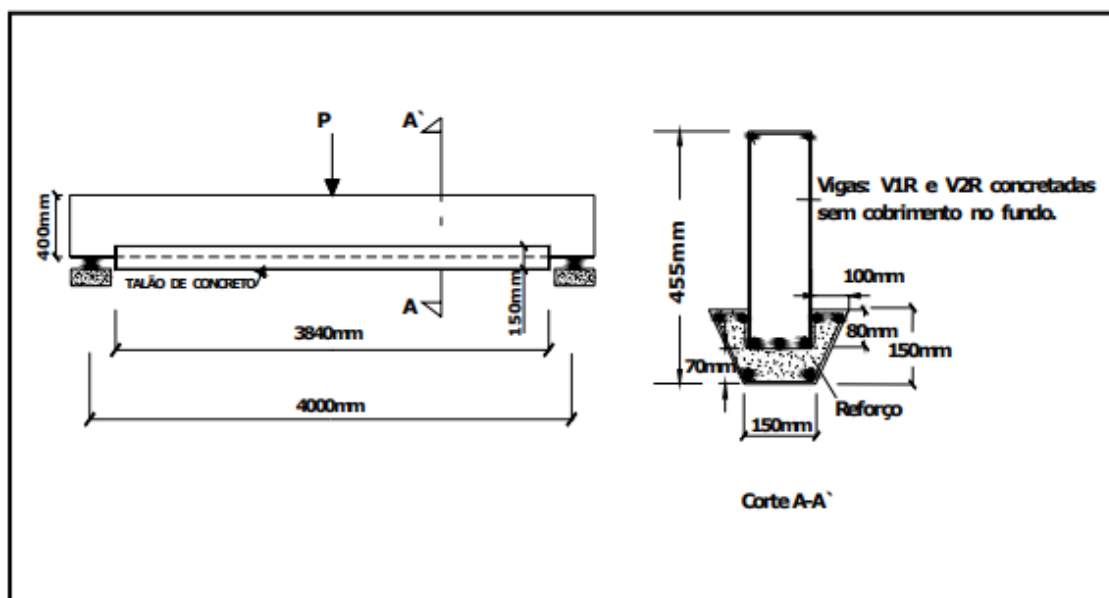
Sousa (2008) exemplifica ainda que o material utilizado no concreto deve ser de boa qualidade, e recomenda também a utilização de concreto compacto, com baixa porosidade e com agregados pequenos. O autor ainda destaca que para que todos esses contratempos sejam evitados existem algumas precauções que devem ser tomadas durante a execução do reforço, como a remoção do concreto deteriorado ou desintegrado da estrutura, a remoção da ferrugem das armaduras existentes, remoção de póis que também possam existir na estrutura, além de cuidados no momento da concretagem como um adequado adensamento e cura, algo comum da execução de todas as estruturas de concreto armado.

Alguns autores divergem, no entanto, com relação à execução do reforço. De acordo com Clímaco (1991) é possível obter uma aderência significativa sem a utilização de adesivos, bastando que a superfície esteja seca, e escarificada. Por outro lado, Sousa (2008) defende o fato de que essa aderência deve ser melhorada com a aplicação de um adesivo à base de epóxi a ser aplicado na superfície do concreto antigo, visto que o mesmo apresenta excelente adesão entre as camadas de concreto.

Além do uso ou não de adesivos para aderência do reforço estrutural outros aspectos interferem na qualidade da execução do encamisamento, entre eles o seu

formato. Santos (2006) utilizou em seu trabalho o formato trapezoidal. O autor argumentou que o formato possui um menor consumo de concreto, além de uma maior área de contato entre a viga original e o reforço, o que possibilitou a situação uma aderência ainda melhor. Outro aspecto referente a esse trabalho é que o autor não utilizou adesivo na interface concreto-reforço, apenas usando os procedimentos de apicoamento, limpeza superficial e umedecimento do concreto antigo antes do reforço. A figura 2 mostra um exemplo de reforço utilizando-se desse formato trapezoidal.

Figura 2 - Representação de encamisamento com formato trapezoidal em viga de concreto armado.



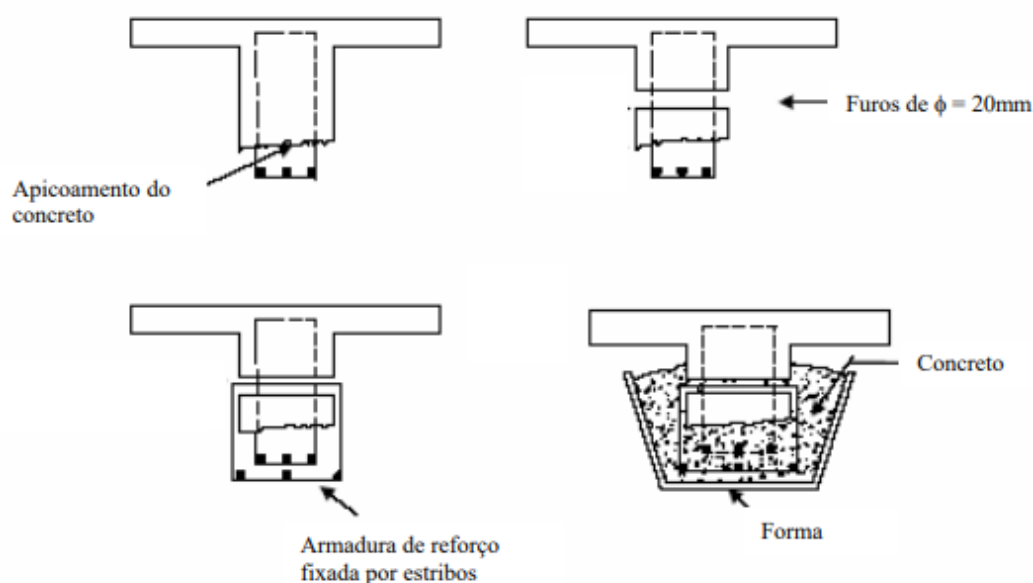
Fonte: Santos (2006).

Outra técnica bastante utilizada refere-se à utilização do concreto com agregado pré-colocado. Simões (2007) discorre que é referente à aplicação de agregado graúdo compactado, esse tipo de concreto praticamente não sofre retração, visto que as partículas do agregado graúdo estão ligadas entre si, e dessa forma não existe espaço para que a pasta de cimento retraia. Nesse tipo de concreto são utilizadas formas estanques, para que não ocorra a fuga de argamassa.

Existem situações em que os elementos estruturais dificultam a execução do reforço. Em alguns casos, é necessário que o fundo e as laterais da viga sejam

apicoados, até que se encontrem os estribos existentes, conforme pode ser observado na figura 3; e a partir disso é feita a ligação entre o reforço e o elemento estrutural, para que seja feita posteriormente a concretagem. Já Cânovas (1988) defende que sejam feitos furos no concreto existente para que sejam passadas novas barras de aço, entretanto, nesses casos se faz necessário que os vazios sejam preenchidos com argamassa epóxi.

Figura 3 - Representação de encamisamento com reforço de viga com armaduras adicionadas.



Fonte: Cânovas (1988) apud Simões (2007).

Deve-se salientar, no entanto, que apesar de ser possível realizar o reforço por encamisamento de várias formas diferentes, em alguns casos, como o da figura acima, não é possível realizar todo o encamisamento do elemento estrutural. A esse tipo de situação denomina-se encamisamento parcial, principalmente em casos onde um elemento estrutural dificulta a aplicação do referido reforço. A ocorrência desse tipo de caso se dá principalmente em vigas, visto que a maioria delas, por já estarem construídas, possuem impedimento por lajes ou até mesmo pilares, que dificultam a execução do reforço. Esse tipo de reforço também é possível que seja utilizado em pilares.

3.3 CHAPAS DE AÇO

Uma das técnicas mais utilizadas para reforço estrutural é o uso de chapas de aço. Utilizada desde os anos 60, teve seu estudo iniciado por L'Hermite e Jacques Bresson na França, iniciando, dessa forma, o emprego como reforço em vigas de concreto armado como relata Juvandes (2002). A técnica apresenta como principais vantagens a facilidade para execução, limpeza na aplicação, além de rápida reutilização na estrutura (VIANA, 2004).

De acordo com o CEB (1983), para que a eficiência do reforço seja garantida é necessário que haja uma boa aderência entre o concreto, resina e chapa utilizada, sendo que a espessura máxima da camada de resina epóxi a ser utilizada não pode ultrapassar 1,5 mm, e a espessura da chapa de aço deve ser menor que 3 mm. Em casos em que a espessura da chapa é maior que 3 mm, devem ser utilizados dispositivos de ancoragem nas chapas, como chumbadores. A figura 4 apresenta um exemplo da aplicação da chapa de aço como forma de reforço à flexão em uma laje.

Figura 4 - Utilização de chapa de aço como forma de reforço à flexão em lajes.



Fonte: Higashi (2016)

A utilização desses chumbadores deve ocorrer em zonas onde as tensões tangenciais entre os dois materiais são maiores. De acordo Higashi (2016) a utilização desses parafusos chumbadores deve evitar o deslocamento, a rotação por arrancamento do cobrimento, além do deslizamento da chapa. A figura 5 mostra um

caso de emprego com chumbadores com chapas de aço. Já a figura 6 apresenta um modelo de parafuso chumbador.

Figura 5- Colocação de buchas expansivas no reforço em lajes.



Fonte: Higashi (2016).

Figura 6 - Modelo de parafuso Parabolt, fabricado pela Âncora, utilizado para chumbamento de chapas de aço.



Fonte: Âncora (2020)

De maneira parecida com o que acontece no encamisamento, é necessário que o elemento estrutural seja limpo. Entretanto, de acordo com Viana (2004), é necessário ainda que seja removida a camada de cobrimento do elemento a ser reforçado, e haja uma limpeza no substrato. Além disso, a chapa também deve ser limpa, para que sejam removidos óleos e gorduras e lixada; para finalizar, deve ser aplicada uma pressão entre a chapa e o concreto, para que a resina tenha o efeito necessário. Segundo Pimenta (2012) a resina deve promover uma união monolítica entre a chapa de aço e a estrutura de concreto. Com relação ao procedimento de

aplicação do reforço, Higashi (2016) dispôs um esquema demonstrando a aplicação das chapas de aço mostrado na figura 7.

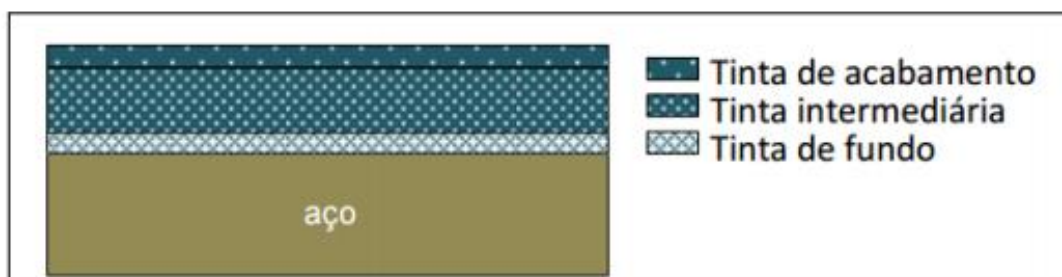
Figura 7 - Procedimento de aplicação de reforço à flexão com chapas de aço na parte superior de uma viga.



Fonte: Higashi (2016)

Uma desvantagem observada para esse tipo de reforço refere-se à corrosão, que de acordo com Cardoso (2013) representa um processo de deterioração dos materiais que produzem alterações indesejadas na estrutura fazendo com que os elementos estruturais tenham sua resistência reduzida. Fragata (2009) defende que a pintura da chapa, incluindo produto anticorrosivo, além de propiciar um tratamento adequado para superfície, fator que favorece a manutenção e tem bom custo/benefício, possui fácil aplicabilidade. A figura 8 apresenta uma forma como essa pintura deve ser executada, considerando-se a utilização de 3 camadas.

Figura 8 - Representação das camadas de tinta na proteção do aço



Fonte: Cardoso (2013).

Outra desvantagem que pode ser observada com relação à aplicação do reforço com chapas de aço refere-se ao alto peso das chapas, uma vez que traz à estrutura um acréscimo de carga relativamente alto em comparação com o uso dos PRFCs, apesar da pequena interferência arquitetônica da técnica. Simões (2007) explica que esse aumento de carga, ao se considerar uma espessura de chapa maior, pode causar o deslocamento da chapa, devido as tensões de ruptura e cisalhamento que interferem o funcionamento da mesma.

As chapas de aço devem também receber proteção em face a ação do fogo. De acordo com Higashi (2016), os materiais mais adequados para lidar com esse tipo de proteção são os materiais projetados, pois são produtos econômicos que apresentam bom isolamento térmico quando expostos a altas temperaturas, podendo ter sua aplicação por jateamento e fazendo com que após sua secagem trabalhem monoliticamente com a estrutura. Além de todos esses benefícios, a proteção com materiais projetados não promove nenhum tipo de ataque corrosivo ao aço.

De modo geral, com a utilização do reforço com chapas de aço de maneira correta, e a aplicação de métodos de proteção eficazes, esse tipo de reforço é bem eficiente para qualquer tipo de estrutura.

3.4 POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO

Um método de reforço que vem ganhando bastante destaque refere-se ao uso de Polímeros reforçados com fibras (PRF), visto que seu uso pode se dar tanto em estruturas novas, quanto em estruturas antigas. Possui inúmeras vantagens quando

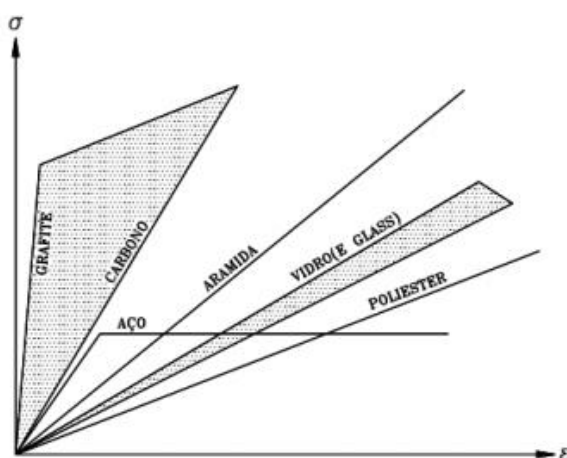
relacionado com outros tipos de reforços, entre elas estão: A rápida execução, a neutralidade eletromagnética e a facilidade de aplicação (SOUTO FILHO, 2002), além disso, é um reforço que apresenta boa resistência à corrosão, aspecto favorável desse reforço frente ao reforço por chapas metálicas.

De acordo com Romero (2007), sua aplicação possui, entretanto, algumas desvantagens, relacionadas principalmente a dificuldade para visualização de fissuras pelo tecido, coeficiente de dilatação diferente do aço, e o alto custo. Esse último observado como principal impedimento para que a utilização desse tipo de reforço seja ainda maior.

Para Perelles (2013), os compósitos são definidos como uma união macroscópica entre dois elementos principais, sendo eles uma matriz polimérica e o material de reforço propriamente dito composto pelas fibras. O mesmo autor afirma ainda que a matriz tem que conectar as fibras para que as mesmas consigam tornar a ligação entre o concreto e o compósito reforçado com fibra de carbono eficaz, fazendo com que haja transferência de tensões, e que o reforço proteja o concreto quanto a danos e agentes agressivos. Desse modo, pode-se afirmar que são as fibras os componentes que de fato apresentam as propriedades mecânicas relevantes para o reforço, aumentando a rigidez, a resistência e a elasticidade dos elementos estruturais.

Dentre as fibras mais utilizadas como material de reforço encontram-se as fibras de carbono, que se destacam principalmente por possuir um alto módulo de elasticidade, sendo entre as fibras a mais apropriada para reforço de vigas de concreto armado pelo seu alto desempenho mecânico; alta resistência à tração e à corrosão; além do baixo peso específico, o que leva à estrutura um baixo acréscimo de peso, como descreve Pivatto (2014). A figura 9 apresenta um gráfico comparativo dos diagramas tensão-deformação das principais fibras possíveis de serem utilizadas na composição de compósitos. De acordo com Zucchi (2015) a combinação entre polímeros e fibras de carbono é o principal fator que permite todas essas vantagens citadas, além disso, ele acrescenta que um ponto importante se refere à orientação das fibras, visto que é a partir delas que se tem indicada a direção em que se deseja aumentar a rigidez e a resistência.

Figura 9 - Diagrama comparativo Tensão x Deformação entre fibras



Fonte: Borges (2016)

Ripper *et al* (2009) defende que as fibras de carbono, na consideração entre as fibras utilizadas na construção civil, são as que apresentam melhor resistência aos ataques químicos, além de uma boa rigidez e um bom comportamento à fadiga. A tabela 1 apresenta um comparativo entre os principais tipos de fibra utilizados.

Tabela 1 - Propriedades das principais fibras utilizadas para reforço em estruturas de concreto armado.

Tipo de Fibra	Resistencia à tração (f_f)	Módulo de elasticidade (E_f)	Deformação Última (E_{fu}) (%)
Carbono			(mínimo)
Alta f_f	3790 - 4820	220 - 240	1.4
Ultra-Alta f_f	4820 - 6200	220 - 240	1.5
Alto E_f	1720 - 3100	340 - 520	0.5
Ultra-Alto E_f	1380 - 2400	520 - 690	0.2
Vidro			
Tipo E	1860 - 2680	69 - 72	4.5
Tipo S	3440 - 4140	86 - 90	5.4
Aramida			
Baixo E_f	3440 - 4140	69 - 83	2.5
Alto E_f	3440 - 4140	110 - 124	1.6

Fonte: (ACI, 440.2R, 2008)

No presente trabalho o tipo de reforço a ser analisado trata-se de um reforço com polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC). A aplicação desse material ocorre por duas formas distintas, podendo ser feita a partir de lâminas ou tecidos. Entretanto, o modo de aplicação pouco varia de uma situação para outra.

A utilização dos PRFCs, de acordo com Araújo (2002), apresenta-se na forma de compósitos prontos para aplicação, podendo ser subdivididos em duas categorias: os laminados (lâminas ou barras), que possuem um maior controle de qualidade para sua aplicação, além de espessura, forma e rigidez bem definidas; e os curados em situ (tecidos ou mantas) que possuem espessura menor e difícil de ser mensurada. A figura 10 mostra os diferentes tipos de PRFCs encontrado em mercado.

Figura 10 - PRFCs em Lâminas, barras e tecidos



Fonte: Borges (2016)

No caso dos PRFCs laminados, a aplicação consiste basicamente em: Inicialmente a superfície do concreto deve ser limpa, assim como ocorre nos outros métodos abordados até então, em seguida, é aplicado um adesivo epóxi sobre a estrutura do concreto já preparada, com a função principal de transferir os esforços da estrutura para o compósito de acordo com Zucchi (2015). Juvandes (2002) defende ainda que a condição ideal para utilização dos PRFC é com a superfície lisa, em que é usada um primer, para melhorar a propriedade adesiva da superfície, e também podem ser utilizados outros produtos para eliminar irregularidades que possam existir, impedindo dessa forma que o ar fique preso entre a camada da fibra e o elemento estrutural. A figura 11 apresenta os principais componentes do sistema de fibras laminado.

Figura 11 - Principais componentes do sistema laminado de PRFCs.



Fonte: Juvandes (1999)

Uma diferença quanto a aplicação das fibras em tecido ou lâminas refere-se principalmente ao fato de que nos tecidos de PRFC, é necessária a impregnação com a resina epóxi, o que não é exigido para os laminados. Sobre isso, Juvandes (2002) defende que após a colagem das fibras seja aplicada mais uma camada de adesivo para o recobrimento das mesmas, dessa forma entre uma camada e outra de tecido existem duas camadas de adesivo, e após a última camada também é aplicado o adesivo mais uma vez para auxiliar na saturação das fibras. Com a mudança do processo a ser realizado o número de componentes a serem utilizados também aumenta, isso pode ser visto na figura 12.

Figura 12 - Principais componentes do sistema curado in situ de PRFCs.



Fonte: Juvandes (1999)

Quanto a aplicação propriamente dita, Borges (2016) indica que existem três métodos principais, sendo eles: A saturação via úmida, em que após o corte das laminas ou tecidos as fibras são impregnadas com resinas em bancadas próprias,

antes do transporte para a aplicação na qual é necessária, sendo um método simples e de fácil execução, complicado apenas para casos em que a lamina possua mais de 3,5m de comprimento; A saturação via seca, em que a aplicação da resina se dá *in loco*, nesse tipo de situação não existem grandes impedimentos no que se diz respeito ao transporte de materiais, entretanto, deve-se ter cuidado no que se refere a aplicação de várias camadas, visto que é necessário que seja aplicada uma camada de impregnante sob a fibra e outra camada sobre a fibra, e em casos de mais de uma camada de reforço, são necessárias 2 camadas de impregnantes entre as fibras. Na figura 13 está mostrado esse tipo de aplicação. E, por fim, o sistema pré curado, apresentado na figura 14. Este último é utilizado principalmente para laminados, em que é empregada apenas uma resina epóxi a ser utilizada na base da superfície para a aplicação das fibras propriamente ditas, sendo nesse caso utilizados alguns aparatos para facilitar o processo de aplicação.

Figura 13 - Representação das camadas de aplicação do tecido em fibra de carbono na saturação via seca.



Fonte: Borges (2016).

Figura 14 - Aplicação de lâminas de PRFC aplicadas no sistema pré curado.



Fonte: Borges (2016).

A temperatura também é um fator determinante para a boa execução do reforço, de acordo com Machado (2011), quando a temperatura é muito elevada pode apressar a cura da resina, enquanto a temperatura mais fria atrelada a dias chuvosos pode fazer com que a resina fique mais viscosa desacelerando o processo de cura da mesma.

De acordo com Araújo (2002), o comportamento da ligação entre a resina, manta e superfície é fundamental para a prevenção de ruínas prematuras. Na maioria dos casos o concreto é o fator determinante para o desempenho dessa ligação, visto que este é condicionado pelo menor valor de resistência à tração envolvendo os três materiais.

De modo geral, o reforço utilizando PRFC vem se tornando uma alternativa bastante válida no que diz respeito a utilização de reforços em elementos estruturais de concreto armado, e com a popularização da técnica, a partir da profissionalização de mais mão de obra, e redução nos custos dos materiais, a tendência é que essa técnica se torne ainda mais viável no âmbito da construção civil.

4. METODOLOGIA

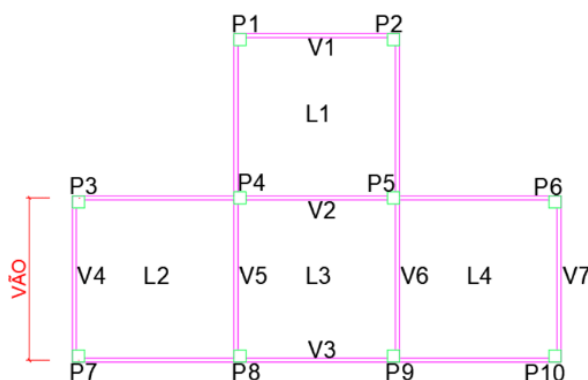
A metodologia utilizada neste trabalho consiste em realizar o estudo das principais características dos reforços à flexão de vigas de concreto armado por meio do encamisamento parcial da estrutura, colagem de chapas de aço e utilização de polímeros reforçados com fibra de carbono. Através do dimensionamento desses três tipos de reforços a serem utilizados em vigas constituintes de uma estrutura modelo adotada para este fim.

4.1 ANÁLISE DO SOFTWARE

No estudo foi utilizado o *software* AltoQi Eberick V10 disponibilizado pela Coordenação de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Sergipe - campus Aracaju. Essa ferramenta computacional é muito utilizada para fins de elaboração de projetos estruturais em concreto armado. Esse programa de cálculo estrutural foi empregado no dimensionamento das vigas com valores de carregamentos referentes a finalidades da edificação, a luz da NBR 6120:2019 (Cargas para o cálculo de estruturas de edificação), as quais foram posteriormente admitidas sobrecarregadas, visando a aplicação de cada um dos três tipos de reforços à flexão de vigas utilizados nesse trabalho.

Para iniciar o estudo do emprego das técnicas de reforço em estruturas de concreto armado foi adotado um modelo de pórtico espacial inicialmente utilizado em um projeto de pesquisa do Instituto Federal de Sergipe / campus Aracaju, sob autoria de Menezes *et al* (2016) e utilizado também em outros trabalhos desenvolvidos no âmbito de pesquisa e trabalhos de conclusão de curso relacionados ao curso de Engenharia Civil do IFS - Campus Aracaju, como, por exemplo, os de Campos *et al*. (2018), Souza (2020) e Aguiar (2020). A figura 15 apresenta a planta baixa do pavimento que foi objeto de estudo.

Figura 15 - Planta baixa modelo do pórtico analisado



Fonte: Souza et al (2020)

Considerando os carregamentos utilizados no trabalho de Campos *et al* (2018), foi previsto um carregamento que ultrapassasse o delimitado pelo autor, de forma a exigir que as vigas estudadas necessitassem da utilização de reforço estrutural para atender as exigências mínimas de utilização. Considerando-se as vigas com o carregamento para o qual foi dimensionada, tem-se uma carga de 4,76 kN/m referente às paredes, considerando-se o uso de bloco cerâmico vazado de 11,5 cm e espessura de revestimento por face de 2 cm, com peso de 1,7kN/m², o que corresponde a uma espessura da parede de 15,5 cm e altura de 2,8 m. A fim de representar as condições de projeto normalmente utilizadas na cidade de Aracaju/SE, foi adotado o uso de concreto da classe de resistência C30 e classe de agressividade ambiental III, conforme a ABNT NBR 6118:2014 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento). Para o cálculo das forças devido à ação do vento foi considerada a velocidade básica de 30 m/s de acordo com o que fica exposto no mapa de isopletras para a cidade de Aracaju, na norma ABNT NBR 6123:1988 (Forças devido ao vento em edificações).

A partir do dimensionamento utilizado no trabalho de Souza *et al* (2020), pode-se constatar que o tipo de ocupação utilizado para a estrutura é a ocupação residencial, e dessa forma no que se diz respeito as dimensões das vigas encontraram-se as seguintes dimensões, apresentadas na tabela 2, de acordo com a variação da altura total da edificação. Para este trabalho foi considerada a altura de 5,6 m para edificação, sendo ela referente a utilização de dois pavimentos.

Tabela 2 - Dimensões das vigas com base na altura da edificação.

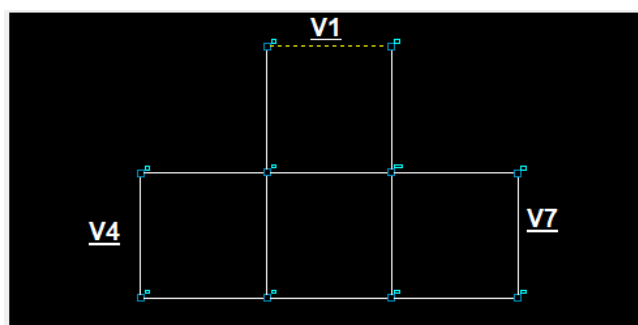
Altura da edificação (m)	Vigas (Dimensões de Seção Transversal)	
	Largura (cm)	Altura (cm)
5,6 m	20	40
16,8 m	20	50
25,2 m	20	40 e 50
33,6m	20	50 e 60

Fonte: SOUZA *et al* (2020)

Nesse estudo inicial, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 6120:2019, foi considerada uma carga acidental de $2,0 \text{ KN/m}^2$, juntamente com uma carga de revestimento igual a $1,105 \text{ KN/m}^2$. Já para a atribuição dos reforços estruturais estabelecidos nesse estudo foi considerada uma mudança na finalidade da edificação correspondente a estrutura inicialmente dimensionada, para tanto considerando que a nova ocupação corresponde a um depósito de supermercado, gerando com isso uma carga variável de valor de 20 KN/m^2 .

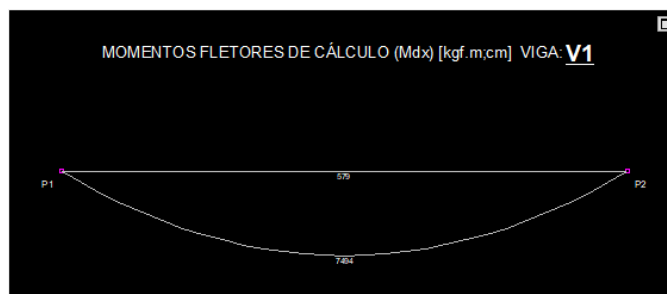
Para o lançamento do carregamento sobre a estrutura, as vigas do pavimento térreo foram subdivididas em dois grupos: as vigas menores (V1, V4 e V7), destacadas na figura 16, e as vigas maiores (V2, V3, V5 e V6). As vigas menores, além de possuírem menor vão, também possuem apenas apoios nas extremidades, e dessa forma a favor da segurança foi considerado que para elas suas extremidades deveriam ser consideradas biapoiadas e rotuladas, o que resulta para elas um maior momento fletor positivo localizado no meio do vão, como pode ser visto na figura 17, com isso o reforço utilizado seria para a situação mais crítica.

Figura 16 - Representação das vigas menores em planta baixa.



Fonte: O autor (2021)

Figura 17 - Representação do diagrama de momento Fletor da Viga V1 (biapoiada)



Fonte: O autor (2021)

A partir da análise observada no software foi possível obter os dados mostrados na tabela 3.

Tabela 3 - Análise das vigas menores (V1, V4 e V7) previamente dimensionadas.

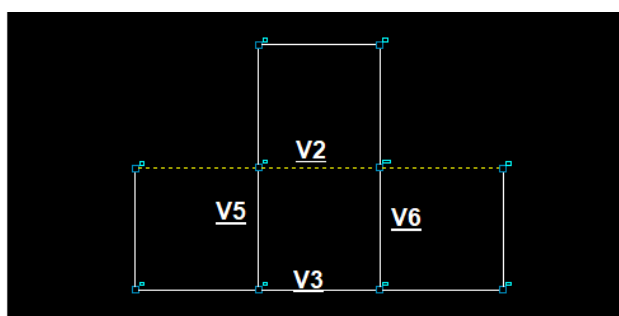
VIGA	As (mm ²)	As' (mm ²)	Ms0 (N.mm) - 10 ⁶	Ms1 (N.mm) - 10 ⁶
V1	613,59	39,27	78,46	222,54
V4	613,59	39,27	77,28	222,27
V7	613,59	39,27	78,66	223,42

Onde:
 As= Área de Aço da viga;
 As'= Área de Aço comprimida da viga;
 Ms0= Momento Solicitante inicial (antes do novo carregamento);
 Ms1= Momento Solicitante Final (após o carregamento).

Fonte: O autor (2021)

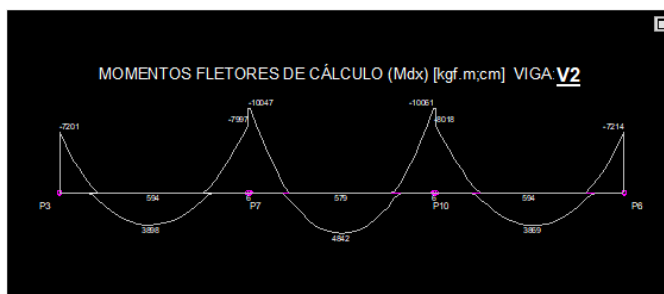
Para o grupo formado por vigas maiores (V2, V3, V5 e V6), mostradas na figura 18, como são vigas contínuas, o diagrama de momento fletor delas difere da situação anterior, e com isso, o cálculo para dimensionamento levou em conta tanto os momentos positivos como negativos das vigas, como pode ser visto na figura 19.

Figura 18 - Representação das vigas maiores em planta baixa.



Fonte: O autor (2021)

Figura 19 - Representação do diagrama e momento Fletor da Viga V2 (continua)



Fonte: O autor (2021)

No caso das vigas contínuas, os diferentes momentos encontrados levam a necessidade de se verificar os momentos resistentes equivalentes a cada uma das partes representadas pelo diagrama, dessa forma, para sua análise foi necessário subdividir a viga em regiões/ trechos a partir da variação desses momentos, como pode ser descrito nas tabelas abaixo.

Para as vigas V5 e V6 a análise é bastante semelhante, visto que o pórtico é simétrico, e dessa forma o carregamento em cada uma delas leva a dados bastante similares, como pode ser visto na tabela 4.

Tabela 4 - Análise das vigas V5 e V6 previamente dimensionada.

VIGA	As (mm ²)	As' (mm ²)	Ms0 (N.mm) - 10 ⁶	Ms1 (N.mm) - 10 ⁶
V5 – P8	804,25	368,16	-94,12	-278,37
V5 - P8-P4	368,16	39,27	51,57	175,99
V5 – P4	804,25	368,16	-104,84	-329,33
V5 – P4-P1	314,16	39,27	39,53	117,39
V5 – P1	603,19	235,62	-73,89	-190,06
V6 – P9	804,25	368,16	-94,18	-279,13
V6 – P9-P5	368,16	39,27	51,43	175,87
V6 – P5	804,25	368,16	-104,76	-329,10
V6 – P5-P2	314,16	39,27	39,71	116,77
V6 – P2	603,19	235,62	-73,45	-187,22

Onde:
As= Área de Aço da viga;
As'= Área de Aço comprimida da viga;
Ms0= Momento Solicitante inicial (antes do novo carregamento);
Ms1= Momento Solicitante Final (após o carregamento).

Fonte: O autor (2021)

Para a viga V2, a análise é um pouco diferente, visto que ela apresenta uma quantidade maior de vãos e de apoios, e dessa forma possui uma variedade maior de pontos de cálculo, como pode ser visto na tabela 5.

Tabela 5 - Analise da viga V2 previamente dimensionada.

VIGA	As (mm ²)	As' (mm ²)	Ms0 (N.mm) - 10 ⁶	Ms1 (N.mm) - 10 ⁶
V2 – P3	603,19	235,62	-74,94	-194,88
V2 – P3-P4	314,16	39,27	38,98	121,79
V2 – P4	804,25	39,27	-100,47	-333,50
V2 – P4-P5	368,16	39,27	48,42	172,65
V2 – P5	804,25	39,27	-100,61	-333,71
V2 – P5-P6	314,16	39,27	38,69	120,06
V2 – P6	603,19	235,62	-72,14	-194,70

Onde:
As= Área de Aço da viga;
As'= Área de Aço comprimida da viga;
Ms0= Momento Solicitante inicial (antes do novo carregamento);
Ms1= Momento Solicitante Final (após o carregamento).

Fonte: O autor (2021)

Para a viga V3 a separação se deu de maneira semelhante, visto que as vigas apresentam a mesma quantidade de vãos, porém como cada uma delas sofre uma influência vinda de uma laje diferente, os valores de Ms0 variam, de acordo com o mostrado na tabela 6.

Pode-se perceber que para alguns casos foi considerada As' como sendo 2 barras de 5.0 mm, popularmente chamada de porta estribo. Isso ocorreu pois com o As' original da viga resultou-se em impossibilidade de dimensionamento de reforços, contrariando o objetivo principal deste trabalho que é o de dimensionar os diferentes tipos de reforço.

Tabela 6 - Analise da viga V3 previamente dimensionada.

(continua)

VIGA	As (mm ²)	As' (mm ²)	Ms0 (N.mm) - 10 ⁶	Ms1 (N.mm) - 10 ⁶
V3 – P7	613,59	235,62	-75,23	-201,65
V3 – P7-P8	314,16	245,44	41,05	125,09
V3 – P8	613,59	157,08	-83,10	-237,71
V3 – P8-P9	235,62	39,27	35,40	104,42

Tabela 6 - Análise da viga V3 previamente dimensionada.

(continuação)

V3 – P9	613,59	39,27	-83,41	-238,52
V3 – P9-P10	314,16	245,44	40,72	123,53
V3 – P10	613,59	235,62	-75,33	-201,43
Onde: As= Área de Aço da viga; As'= Área de Aço comprimida da viga; Ms0= Momento Solicitante inicial (antes do novo carregamento); Ms1= Momento Solicitante Final (após o carregamento).				

Fonte: O autor (2021)

Após a mudança de finalidade da edificação verificou-se a partir do *software* citado que a estrutura em questão não mais atendia as normas de projeto, o que evidenciou que deveriam ser mudadas as características da estrutura, como: aumento de seção transversal, mudança nas armaduras e na classe do concreto a serem utilizadas. Como, entretanto, o foco deste trabalho consiste no estudo das técnicas de reforço foi considerada a estrutura subdimensionada, como objeto que necessitou da utilização de reforços.

A partir disso foram retirados os principais dados dos elementos estruturais em questão, como o momento fletor atuante nas vigas após a alteração da ocupação, para o posterior cálculo do reforço. É importante salientar que se considerou também que não houve aumento dos esforços cisalhantes ao ponto de demandar para as vigas também reforço ao cisalhamento.

4.2 CÁLCULO DOS REFORÇOS

Diante dos dados necessários para o dimensionamento dos reforços, foram realizados os cálculos acerca da área do reforço à flexão a ser utilizado para os três tipos de reforço presentes neste estudo.

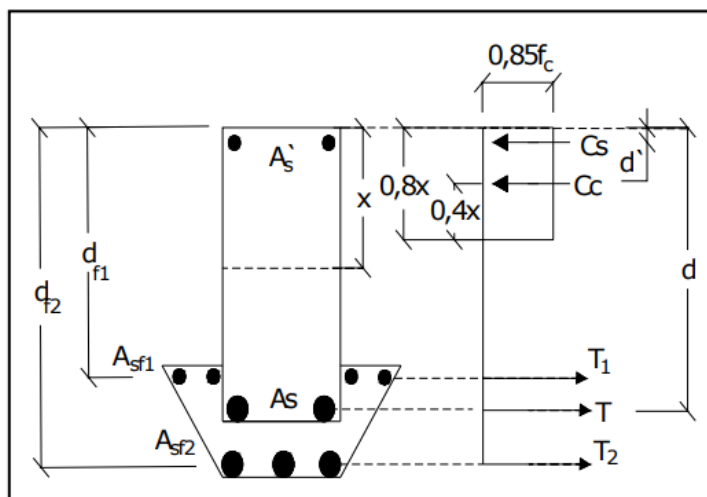
O cálculo do reforço ocorreu no estado limite último, admitindo-se que as seções transversais sejam planas até a ruptura, e que haja uma aderência perfeita entre os elementos do reforço e a estrutura original, além de que a resistência à tração do concreto seja nula.

O cálculo consiste basicamente em sete etapas, sendo elas:

- O cálculo da posição da linha neutra no estado limite último;
- O cálculo do momento fletor resistente da seção analisada;
- O cálculo da posição da linha neutra no ELS;
- O momento fletor devido ao peso próprio de serviço;
- O cálculo do momento fletor a ser resistido após a execução do reforço;
- A área de reforço a ser utilizada;
- A posição da linha neutra com a presença do reforço.

Todas essas etapas podem ser baseadas no diagrama retangular simplificado de tensões, exibido na NBR 6118 (2014), e apresentado por Santos (2006) na figura 20. Nesse caso, o autor utilizou, para exemplificar, o reforço por encamisamento parcial, visto que esse era o foco do trabalho dele, entretanto, os procedimentos podem ser aplicados a outros tipos de reforço.

Figura 20 - Diagrama retangular simplificado de tensões.



Fonte: Santos (2006).

A partir disso, as equações necessárias para o dimensionamento dos reforços estão sistematizadas abaixo.

Nesse cálculo seguiu-se a seguinte ordem:

1. Cálculo da posição da linha neutra no estado limite último (x_p) expresso pela equação:

$$x_p = \frac{As \times f_y d - As' \times \sigma_s'}{0,85 f_c d \times 0,8 \times b} \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

- σ_s' = Tensão normal para armadura comprimida.

2. Cálculo do momento Fletor resistente da seção (M_u):

$$M_u = As \times f_y \times (d - 0,4x_p) + As' \times \sigma_s' \times (0,4x_p - d') \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde:

- d = Altura efetiva da viga
- d' = Distância do centróide da seção da armadura longitudinal de compressão à face superior da viga.

3. Cálculo da linha neutra ($\frac{x_e}{d}$) no estado limite de serviço (ELS):

$$\left(\frac{x_e}{d}\right) = \sqrt{n^2(\rho + \rho')^2 + 2n\left(\rho + \frac{\rho' d'}{d}\right)} - \eta(\rho + \rho') \quad \text{(Equação 3)}$$

$$\text{sendo } n = \frac{E_s}{E_c} \cong 10$$

Onde:

- ρ = Taxa geométrica da armadura longitudinal de tração;
- ρ' = Taxa geométrica da armadura longitudinal de compressão;
- n = Fator de transformação de materiais.

4. Cálculo do momento fletor devido ao peso próprio de serviço (M_{ppser})

$$M_{ppser} = \frac{1}{2} \times \frac{Mu}{2} \quad \text{(Equação 4)}$$

5. O cálculo do momento fletor a ser resistido após a execução do reforço

$$M_{uf} = \frac{MS}{Mu} \times Mu \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde:

- MS= Momento Solicitante da estrutura após aumento de carregamento.

Após esse procedimento foi realizado o dimensionamento do reforço a ser utilizado, a partir da área de reforço necessária para suportar o aumento do carregamento que é incidido sobre a estrutura. Sendo verificado o reforço para as lâminas de PRFC, para os tecidos de PRFC, para chapas de aço SAE 1020, e para o encamisamento da estrutura utilizando concreto armado.

Cabe citar que a área de reforço a ser utilizada foi calculada de maneira iterativa, em que no processo ela é testada de maneira que a diferença da altura da linha neutra entre duas medidas seguidas seja menor que 5mm, conforme o procedimento apresentado no trabalho de Santos (2006), dessa forma, admite-se a área de reforço a ser utilizada a partir da equação 6 e a altura da linha neutra com a presença do reforço dada pela equação 7.

6. Cálculo da área de reforço a ser utilizada:

$$M_{uf} = \sum Af \times \sigma_f \times (d_f - 0,4x_p) + As \times f_y d \times (d - 0,4x_p) + As' \times \sigma_s' \times (0,4x_p - d')$$

(Equação 6)

Onde:

- Af = Área do reforço a ser dimensionado;

- σ_f = Tensão normal para o reforço;

7. Cálculo da posição da linha neutra com a presença do reforço:

$$x_p (i = 1) = \frac{A_s \times f_{yd} - A_s' \times \sigma_s' + \sum A_f \times \sigma_f}{0,85 f_{cd} \times 0,8 \times b} \quad \text{(Equação 7)}$$

Após a execução dos 7 passos existem algumas peculiaridades pertinentes a cada um dos tipos de reforço, que serão descritas a seguir.

4.2.1 Cálculo do Reforço com a utilização de PRFC

Para o prosseguimento do trabalho e a aplicação das técnicas propriamente ditas, devem ser atendidas algumas peculiaridades que estão relacionadas principalmente com as características dos materiais a serem utilizados.

Para o caso das lâminas de fibras de carbono, o fabricante responsável pela produção das lâminas, a BASF (2016), traz em seu manual as especificações técnicas do material, sendo elas:

- Largura Nominal = 50 mm;
- Espessura Nominal = 1,4 mm;
- Módulo de Elasticidade (E) = 165 GPa;
- Tensão Normal (σ_f) = 3000 MPa;
- Deformação máxima da Fibra ($\varepsilon_{\max}$) = 0,017.

Nesse ponto, torna-se necessário além do dimensionamento previsto nos passos de 1 a 7 do tópico 4.2, realizar as verificações necessárias quanto à deformação das fibras (equação 8), quanto à deformação do aço comprimido (equação 9), e quanto ao destacamento (equação 10).

8. Verificação quanto à deformação das fibras:

$$\varepsilon_f = \frac{d_f - x_p}{x_p} \times \varepsilon_c \quad \text{(Equação 8)}$$

Em que, $\varepsilon_f < \varepsilon_{\text{máx}} = 0,017$.

Onde:

- ε_f = Deformação específica da fibra.

9. Verificação quanto a deformação do aço comprimido:

$$\frac{\varepsilon_s'}{x_p - d'} = \frac{3,5}{x_p} \text{ (Equação 9)}$$

Em que, $\varepsilon_s' > \varepsilon_y = 2,5 \text{ ‰}$.

Onde:

- ε_s' = Deformação específica do aço da armadura longitudinal de compressão;
- ε_y = Deformação específica de escoamento do aço.

10. Verificação quanto ao destacamento:

$$\tau = \frac{e_f (\sigma_{fi})}{Lf} \text{ (Equação 10)}$$

Onde:

- e_f = Espessura da lâmina de fibra de carbono utilizada.
- σ_{fi} = Tensão normal específica da fibra;
- Lf = Comprimento da lâmina a ser utilizado no reforço.

Para a verificação do destacamento utiliza-se um valor para a tensão de cisalhamento (τ) menor que $\tau_{\text{máx}} = 0,5 \times f_{ctd}$ (CERQUEIRA, 2000), a partir de onde é possível se encontrar o comprimento de lâmina a ser utilizado pelo reforço.

Para o cálculo do reforço com tecido de fibra de carbono a análise é praticamente a mesma, a modificação ocorre apenas nas propriedades do material a ser utilizado, novamente, de acordo com o manual da BASF (2016), tem-se as seguintes especificações técnicas:

- Largura Nominal = 500 mm;
- Espessura Nominal = 0,165 mm;
- Módulo de Elasticidade (E) = 227 GPa;

- Tensão Normal (σ_f) = 3800 MPa;
- Deformação máxima da Fibra ($\varepsilon_{\max}$) = 0,006.

4.2.2 Cálculo do Reforço com a utilização de chapas de aço SAE 1020

Para o estudo do reforço à flexão em vigas de concreto armado, Higashi (2016) indica a utilização de chapas de aço SAE 1020, assim, neste trabalho optou-se por utilizar o mesmo material. Com relação as chapas de aço, de acordo com o manual do fabricante Arcelormittal (2020) chegou-se as seguintes especificações técnicas:

- Espessura Nominal = 3mm ou 6,35mm;
- Tensão de escoamento do aço (f_y) = 350 MPa;
- Módulo de Elasticidade do aço (E_s)= 200 GPa.

Para o reforço com a utilização da chapa de aço, após a execução dos 7 passos informados no tópico 4.2 deste trabalho, é necessária apenas uma verificação da espessura de chapa necessária para atender a demanda solicitada, mostrada na equação 11, e uma posterior verificação quanto ao destacamento do aço, que ocorre de maneira análoga ao apresentado para as técnicas que envolvem a utilização de compósitos de fibra de carbono.

11. Verificação da espessura de chapa necessária.

$$Ach = b_f \times ech \text{ (Equação 11)}$$

Onde:

- Ach = Área da chapa de aço;
- ech = Espessura específica de Chapa de aço necessária;
- Bf = Largura da chapa de aço.

Como descrito no tópico 3.3 deste trabalho, é indicado que em situações nas quais sejam necessárias uma espessura maior que 3 mm para a chapa de aço, utilize-se parafusos chumbadores. De acordo com Higashi (2016) a utilização delas deve obedecer às especificações do fabricante, as quais determinam que a distância mínima entre um chumbador e outro deve ser de 105 mm e a distância entre o chumbador e a borda deve ser de 53 mm. Dessa forma não necessitou se realizar a verificação quanto a ancoragem, mediante a utilização de buchas expansivas.

4.2.3 Cálculo do Reforço por encamisamento parcial da estrutura

Com relação ao encamisamento, algumas outras relações devem ser analisadas. Após a execução dos 7 passos iniciais abordados no tópico 4.2 deste trabalho, é possível obter a quantidade e o diâmetro das barras de aço necessários para execução do reforço. Em seguida foi analisado o cobrimento nominal referente a classe de agressividade atuante na localidade do reforço (no caso deste trabalho, para a cidade de Aracaju, foi considerada classe de agressividade III), e calculados ainda o espaçamento vertical e horizontal entre as barras de reforço de acordo com NBR 6118:2014 (Item 18.3.2.2) que devem ser levados em consideração no momento de escolher as melhores disposições para as barras. De posse disso foi possível obter as medidas para o talão de concreto, a partir do qual foi definida a área necessária para a interface de ligação entre a viga e o reforço, que pode ser encontrada pela equação 12.

12. Definição da área necessária para interface entre viga e reforço.

$$A_i \geq \frac{A_{sf} \times f_y \times 2}{\tau_R} \text{ (Equação 12)}$$

Onde:

- A_i = Área necessária para interface entre viga e reforço;
- A_{sf} = Área de aço do reforço;
- τ_R = Tensão resistente de aderência entre dois concretos distintos.

O comprimento do reforço por encamisamento é outra etapa que deve ser analisada antes da execução propriamente dita do reforço. Nesse ponto, considerou-se que para as vigas biapoiadas, o talão de concreto dimensionado deve se estender por todo o vão da viga. Já nas vigas contínuas, nas seções em que os momentos são negativos, foi calculado o comprimento de ancoragem das barras de aço, para que assim fosse determinado o comprimento do reforço, como é descrito por Bastos (2018) na tabela 7, onde são mostrados os comprimentos de ancoragem das barras comerciais de aço CA-50 com diâmetros variando de 8 à 16 mm, para classes de resistência de concreto de C-20 à C-30.

Tabela 7 - Comprimento de ancoragem das barras comerciais (aço CA-50) em relação à classe de resistência do concreto, segundo Bastos (2018).

ϕ (mm)	CONCRETO					
	C-20		C-25		C-30	
	SEM	COM	SEM	COM	SEM	COM
8	50	35	43	30	38	27
	35	24	30	21	27	19
10	62	44	54	38	48	33
	44	31	38	26	33	23
12,5	78	55	67	47	60	42
	55	38	47	33	42	29
16	100	70	86	60	76	53
	70	49	60	42	53	37
Valores de acordo com a NBR 6118. Nº Superior: Má Aderência; Nº Inferior: Boa Aderência. Sem e com indicam sem ou com gancho na extremidade da barra.						

Fonte: Adaptado de Bastos (2018)

É importante salientar que na tabela 7 os diâmetros e classes de resistência considerados foram escolhidos pelo fato de serem os preferencialmente aplicáveis para o dimensionamento do reforço deste trabalho.

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA

Seguiu-se, então, para o segundo ponto do estudo, que é referente a análise comparativa entre cada uma das técnicas de reforço abordadas. Durante esse processo foi realizado uma análise de custos, que se iniciou a partir cotação com

alguns fornecedores acerca dos materiais a serem utilizados no reforço. Vale citar que alguns materiais foram cotados fora do estado, como é o caso dos materiais reforçados com fibra de carbono, principalmente em virtude da falta de fornecedores locais para cotação.

Durante a etapa de análise de custo dos materiais foi perceptível a grande dificuldade em abordar esse tema no estado de Sergipe, visto que o número de empresas que trabalham com serviços de reforço estrutural é muito baixo, além do que nenhuma dentre as empresas procuradas utiliza-se das técnicas do reforço com PRFC e com chapas de aço coladas. Outro ponto que vale citar com relação a etapa de análise de custos é que poucos fornecedores responderam as pesquisas de preço, o que de certo modo dificultou a realização da cotação.

Em conjunto com a análise de custo foi realizado ainda um estudo das principais características inerentes a cada um dos tipos de reforço abordados, observando-se nesse ponto as vantagens e desvantagens de cada um deles, para que de fato fosse possível o melhor entendimento das limitações e potencialidades de cada uma das técnicas.

Posteriormente, com todos esses dados em mãos, foi possível estabelecer uma relação entre os gastos relacionados as técnicas abordadas por este trabalho, devido ao dimensionamento necessário para as vigas em questão e as principais características que favorecem ou não a aplicação das técnicas.

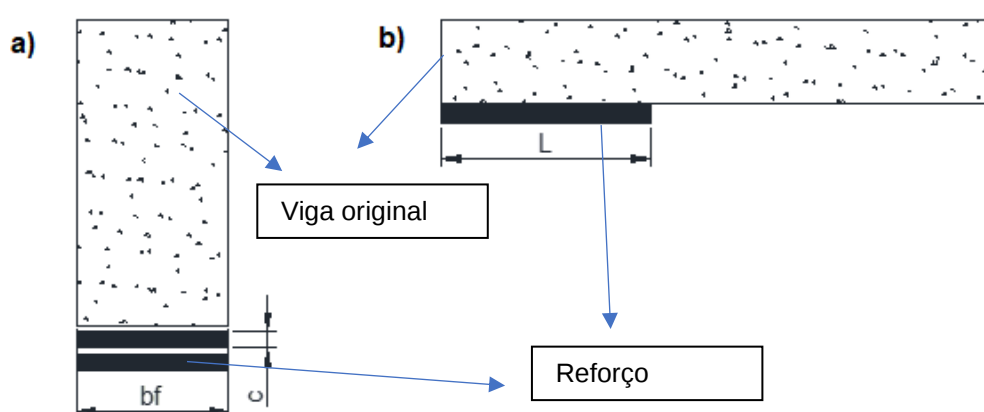
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da análise do pórtico modelo, abordado na metodologia deste trabalho, foi possível prosseguir para a análise dos reforços propriamente ditos, bem como a análise do custo dos mesmos e das principais características inerentes a aplicação de cada um deles, com isso, optou-se por subdividir os resultados de acordo com cada tipo de reforço abordado neste trabalho.

5.1 REFORÇO COM A UTILIZAÇÃO DE PRFC

Inicialmente, a análise estabelecida se deu a partir do reforço com lâmina de fibra de carbono, conforme descrito no item 4.2.1 para esse estudo foi considerada a lâmina com espessura $e = 1,4$ mm, com fibras cuja tensão normal de ruptura $\sigma_f = 3000$ MPa, e módulo de elasticidade $E = 165000$ MPa, vale citar também que a deformação máxima admitida para as fibras em questão foi de $\varepsilon_{max} = 0,017$. O reforço utilizado pode ser exemplificado pelo esquema mostrado na figura 21.

Figura 21 - Detalhamento esquemático de reforço com lâmina de fibra de carbono: a) seção transversal e b) vista lateral.



Fonte: O autor (2021)

No esquema apresentado é considerado um reforço hipotético utilizando 2 camadas de lâmina com um dado comprimento (L) e uma largura (bf).

Diante desses dados chegou-se a áreas de reforço específicas, que podem ser visualizadas a partir da tabela 8. Vale citar que para a análise em questão foi mantida a subdivisão entre vigas maiores e menores abordada na metodologia.

Tabela 8 - Resultados do dimensionamento das vigas menores (V1, V4 e V7) para lâminas de fibras de carbono.

VIGA	Mu (N.mm) - 10 ⁶	Ms1 (N.mm) - 10 ⁶	Af (mm²)	x _p (mm)	bf (mm)
V1	86,41	222,54	159,38	170,78	113,84
V4	86,41	222,27	159,38	170,78	113,84
V7	86,41	223,42	159,38	170,78	113,84
Quantidade de camadas e comprimento das lâminas					
	Número de camadas		Comprimento da lâmina (L)		
V1	1 camadas de 200 mm		2.500 mm		
V4	1 camadas de 200 mm		2.500 mm		
V7	1 camadas de 200 mm		2.500 mm		

Onde:

Mu= Momento Resistente da Seção original, antes do reforço;

Ms1= Momento Solicitante Final (após o carregamento);

Af= Área de reforço obtida;

Xp= Posição da linha neutra;

Bf= Largura da Fibra de carbono.

Fonte: O autor (2021)

Pode-se perceber que como os momentos solicitantes das vigas são praticamente iguais entre si, o reforço obtido foi igual para todas as vigas. Vale citar ainda que para o reforço foi verificado que a deformação da fibra era menor que a deformação máxima admissível (1,7%), e que para todas as vigas foi feita a verificação quanto ao destacamento observando que a tensão cisalhante atuante deve ser inferior à tensão cisalhante limite, os resultados destas verificações são apresentados na tabela 9.

Para as vigas contínuas a análise muda um pouco, e optou-se por subdividi-las em seções determinadas a partir da variação de sinal do momento fletor sofrida por elas. Inicialmente serão apresentados os resultados obtidos para as vigas V5 e V6, que por serem simétricas, e possuírem carregamentos semelhantes levam a um dimensionamento bastante similar quando comparadas entre si, como pode ser visto na tabela 10. A tabela 11 mostra as informações com relação ao número de camadas

da execução do reforço e seu comprimento, e a tabela 12 apresenta os resultados das verificações necessárias.

Tabela 9 - Resultados das verificações realizadas para aplicação do reforço nas vigas menores (V1, V4 e V7) para lâminas de fibras de carbono.

VIGA	$\varepsilon_{\max}$	ε_f	$\tau_{\lim}$ (MPa)	τ_f (MPa)
V1	0,017	0,00433	0,9	0,45
V4	0,017	0,00433	0,9	0,45
V7	0,017	0,00433	0,9	0,45
Onde: $\varepsilon_{\max}$ = Deformação máxima da fibra (dado do fabricante); ε_f = Deformação da fibra (após aplicação do reforço); $\tau_{\lim}$ = Tensão Cisalhante limite; τ_f = Tensão Cisalhante de destacamento da fibra.				

Fonte: O autor (2021)

Tabela 10 - Resultados do dimensionamento das vigas V5 e V6 para lâminas de fibras de carbono.

VIGA	M_u (N.mm) - 10^6	M_{s1} (N.mm) - 10^6	A_f (mm ²)	x_p (mm)	b_f (mm)
V5 – P8	110,86	-278,37	220,04	197,75	157,17
V5 – P8-P4	53,17	175,99	174,75	155,19	124,82
V5 – P4	110,86	-329,33	273,46	234,70	195,33
V5 – P4-P1	45,55	117,39	201,04	167,51	143,60
V5 – P1	84,16	-190,06	188,24	168,58	134,46
V6 – P9	110,86	-279,13	220,04	197,75	157,17
V6 – P9-P5	53,17	175,87	174,75	155,19	124,82
V6 – P5	110,86	-329,10	273,46	234,70	195,33
V6 – P5-P2	45,55	116,77	201,04	167,51	143,60
V6 – P2	84,16	-187,22	188,24	168,58	134,46
Onde: M_u = Momento Resistente da Seção; M_{s1} = Momento Solicitante Final (após o carregamento); A_f = Área de reforço obtida; x_p = Posição da linha neutra; b_f = Largura da Fibra de carbono.					

Fonte: O autor (2021)

Tabela 11 - Quantidade de camadas e comprimento das lâminas utilizadas para reforço das vigas V5 e V6.

VIGA	Número de camadas	Comprimento da lâmina
V5 – P8	1 camada de 200 mm	2.000 mm
V5 – P8-P4	1 camada de 200 mm	2.500 mm
V5 – P4	1 camada de 200 mm	1.500 mm
V5 – P4-P1	1 camada de 200 mm	2.500 mm
V5 – P1	1 camada de 200 mm	2.500 mm
V6 – P9	1 camada de 200 mm	2.000 mm
V5 – P9-P5	1 camada de 200 mm	2.500 mm
V5 – P5	1 camada de 200 mm	1.500 mm
V5 – P5-P2	1 camada de 200 mm	2.500 mm
V5 – P2	1 camada de 200 mm	2.500 mm

Fonte: O autor (2021)

Tabela 12 - Resultados das verificações realizadas para aplicação do reforço nas vigas (V5 e V6) para lâminas de fibras de carbono.

(continua)

VIGA	$\varepsilon_{\max}$	ε_f	$\tau_{\lim}$ (MPa)	τ_f (MPa)
V5 – P8	0,017	0,00329	0,9	0,45
V5 – P8-P4	0,017	0,00512	0,9	0,45
V5 – P4	0,017	0,00234	0,9	0,45
V5 – P4-P1	0,017	0,00451	0,9	0,45
V5 – P1	0,017	0,00446	0,9	0,45
V6 – P9	0,017	0,00329	0,9	0,45
V5 – P9-P5	0,017	0,00512	0,9	0,45
V5 – P5	0,017	0,00234	0,9	0,45

Tabela 12 - Resultados das verificações realizadas para aplicação do reforço nas vigas (V5 e V6) para lâminas de fibras de carbono.

(continuação)

V5 – P5-P2	0,017	0,00451	0,9	0,45
V5 – P2	0,017	0,00446	0,9	0,45
Onde: $\varepsilon_{\max}$ = Deformação máxima da fibra (dado do fabricante) ε_f = Deformação da fibra (após aplicação do reforço) $\tau_{\lim}$ = Tensão Cisalhante limite τ_f = Tensão Cisalhante de destacamento da fibra.				

Fonte: O autor (2021)

Para a viga V3 o dimensionamento do reforço ocorre de maneira similar ao observado para as vigas V5 e V6, visto que também é uma viga contínua, a única diferença é que nesse caso ao invés de utilizar 5 seções, foram utilizadas 7 seções para o cálculo do reforço, como pode ser visto na tabela 13. Na tabela 14 é apresentada a quantidade de camadas e o comprimento das lâminas utilizadas para execução do reforço e na tabela 15 os resultados encontrados para as verificações realizadas.

Tabela 13 - Resultados do dimensionamento da viga V3 para lâminas de fibras de carbono.

VIGA	Mu (N.mm) - 10⁶	Ms1 (N.mm) - 10⁶	Af (mm²)	x_p (mm)	bf (mm)
V3 – P7	85,60	-201,65	194,61	174,07	139
V3 – P7-P8	42,38	125,09	226,53	163,06	161,81
V3 – P8	83,10	-237,71	198,69	185,25	141,92
V3 – P8-P9	34,29	104,42	227,10	177,05	162,21
V3 – P9	86,41	-238,52	209,32	205,11	147,96
V3 – P9-P10	42,38	125,09	226,53	163,06	161,81
V3 – P10	85,60	-201,65	194,61	174,07	139
Onde: Mu= Momento Resistente da Seção; Ms1= Momento Solicitante Final (após o carregamento); Af= Área de reforço obtida; Xp= Posição da linha neutra; Bf= Largura da Fibra de carbono.					

Fonte: O autor (2021)

Tabela 14 - Quantidade de camadas e comprimento das lâminas utilizadas para reforço da viga V3.

Viga	Número de camadas	Comprimento da lâmina
V3 – P7	1 camada de 200 mm	2.500 mm
V3 – P7-P8	1 camada de 200 mm	2.500 mm
V3 – P8	1 camada de 200 mm	2.000 mm
V3 – P8-P9	1 camada de 200 mm	2.500 mm
V3 – P9	1 camada de 200 mm	2.000 mm
V3 – P9-P10	1 camada de 200 mm	2.500 mm
V3 – P10	1 camada de 200 mm	2.500 mm

Fonte: O autor (2021)

Tabela 15 - Resultados das verificações realizadas para aplicação do reforço na viga V3 para lâminas de fibras de carbono.

Viga	ϵ_{max}	ϵ_f	τ_{lim} (MPa)	τ_f (MPa)
V3 – P7	0,017	0,00422	0,9	0,45
V3 – P7-P8	0,017	0,00485	0,9	0,45
V3 – P8	0,017	0,00376	0,9	0,45
V3 – P8-P9	0,017	0,00422	0,9	0,45
V3 – P9	0,017	0,00308	0,9	0,45
V3 – P9-P10	0,017	0,00485	0,9	0,45
V3 – P10	0,017	0,00422	0,9	0,45
Onde: ϵ_{max} = Deformação máxima da fibra (dado do fabricante); ϵ_f = Deformação da fibra (após aplicação do reforço); τ_{lim} = Tensão Cisalhante limite; τ_f = Tensão Cisalhante de destacamento da fibra.				

Fonte: O autor (2021)

Vale citar que para o caso em questão, levando-se em conta apenas os momentos positivos (localizados nos vãos), as áreas de reforço (A_f) poderiam ser

menores, entretanto, considerando a deformação das fibras, essa área inicial não seria suficiente, por essa razão a área de reforço resultante foi superior.

Para a viga V2, a tabela 16 apresenta os resultados encontrados pelo dimensionamento do reforço. Na tabela 17 é apresentada a quantidade de camadas e o comprimento das lâminas utilizadas, e, na tabela 18, os resultados encontrados para as verificações realizadas.

Tabela 16 - Resultados do dimensionamento da viga V2 para Lâminas de fibras de carbono.

VIGA	Mu (N.mm) - 10 ⁶	Ms1 (N.mm) - 10 ⁶	Af (mm ²)	x _p (mm)	bf (mm)
V2 – P3	84,16	-194,88	327,85	264,56	234,17
V2 – P3-P4	45,55	121,79	202,15	168,27	143,60
V2 – P4	136,95	-333,50	280,88	274,08	200,63
V2 – P4-P5	34,29	172,65	174,75	155,19	124,82
V2 – P5	53,17	-333,71	280,88	274,08	200,63
V2 – P5-P6	45,55	120,06	202,15	168,27	143,60
V2 – P6	84,16	-194,70	327,85	264,56	234,17
Onde: Mu= Momento Resistente da Seção; Ms1= Momento Solicitante Final (após o carregamento); Af= Área de reforço obtida; Xp= Posição da linha neutra; Bf= Largura da Fibra de carbono.					

Fonte: O autor (2021)

Tabela 17 - Quantidade de camadas e comprimento das lâminas utilizadas para reforço da viga V2.

Viga	Número de camadas	Comprimento da lâmina
V2 – P3	2 camadas de 120 mm	1.000 mm
V2 – P3-P4	1 camada de 200 mm	2.500 mm
V2 – P4	2 camadas de 120 mm	1.000 mm
V2 – P4-P5	1 camada de 200 mm	3.000 mm
V2 – P5	2 camadas de 120 mm	1.000 mm
V2 – P5-P6	1 camada de 200 mm	2.500 mm
V2 – P6	2 camadas de 120 mm	1.000 mm

Fonte: O autor (2021)

Tabela 18 - Resultados das verificações realizadas para aplicação do reforço na viga V2 para lâminas de fibras de carbono.

Viga	$\varepsilon_{\max}$	ε_f	$\tau_{\lim}$ (MPa)	τ_f (MPa)
V2 – P3	0,017	0,00166	0,9	0,45
V2 – P3-P4	0,017	0,00457	0,9	0,45
V2 – P4	0,017	0,00145	0,9	0,45
V2 – P4-P5	0,017	0,00521	0,9	0,45
V2 – P5	0,017	0,00145	0,9	0,45
V2 – P5-P6	0,017	0,00457	0,9	0,45
V2 – P6	0,017	0,00166	0,9	0,45
Onde: $\varepsilon_{\max}$ = Deformação máxima da fibra (dado do fabricante) ε_f = Deformação da fibra (após aplicação do reforço) $\tau_{\lim}$ = Tensão Cisalhante limite. τ_f = Tensão Cisalhante de destacamento da fibra.				

Fonte: O autor (2021)

De posse dos dados provenientes do dimensionamento dos reforços partiu-se para estimativa de custo do reforço de cada uma das vigas em questão. Na definição da estimativa de custos foi levada em conta a utilização de duas lâminas diferentes, encontradas no mercado, tendo especificações bastante semelhantes, porém de marcas diferentes. Nessa estimativa foi mensurada também a mão de obra, para tanto, como não foram encontrados dados referentes a aplicação dessa técnica de reforço na cidade de Aracaju, foram utilizados os oriundos de uma empresa paulista que atua no mercado nordestino, com dados relativos à mão de obra para a aplicação desse reforço na cidade de Fortaleza. Na tabela 19 estão mostrados os custos estimados para aplicação do reforço em lâmina de fibra de carbono para a capital sergipana.

Tabela 19 - Custos estimados para aplicação do reforço com a utilização de lâminas de PRFC.

Viga	Custo do Material	Custo da Mão de Obra	Custo total
V1	R\$ 514,23	R\$ 3.075,00	R\$ 3.589,23
V2	R\$ 3.291,04	R\$ 9.840,00	R\$ 13.131,04
V3	R\$ 3.393,89	R\$10.147,50	R\$ 13.541,39
V4	R\$ 514,23	R\$ 3.075,00	R\$ 3.589,23
V5	R\$ 2.262,59	R\$ 6.765,00	R\$ 9.027,59
V6	R\$ 2.262,59	R\$ 6.765,00	R\$ 9.027,59
V7	R\$ 514,23	R\$ 3.075,00	R\$ 3.589,23

Fonte: O autor (2021).

Como pode ser percebido a partir da análise da tabela, a aplicação dessa técnica se torna inviável, principalmente pelo alto custo da mão de obra. Segundo a empresa consultada, o custo de aplicação para São Paulo (cidade sede da empresa) não ultrapassaria R\$ 100,00 por m de lâmina, entretanto, para aplicação na cidade de Fortaleza esse valor seria de R\$ 615,00, e considerando a posição geográfica entre Aracaju e Fortaleza foi considerado para o caso em questão o mesmo valor para mão de obra. Vale ressaltar que não foram encontradas empresas na região que trabalhassem com esse tipo de material, além do que empresas de metrópoles mais próximas como Salvador não deram retorno ao contato submetido.

Uma alternativa a aplicação das lâminas de polímeros reforçados com fibra de carbono, é a utilização de tecidos com o mesmo material, que possui uma aplicação parecida com o primeiro método. Inicialmente, o dimensionamento a ser realizado também funciona de maneira similar. Para o prosseguimento do cálculo de dimensionamento foram utilizados tecidos com espessura nominal (e) = 0,165 mm, módulo de elasticidade (E)= 227 GPa e $\epsilon_{\max}$ =0,006 como pode ser visto no tópico 4.2.1 deste trabalho. A partir disso, chegou-se aos dados mostrados na tabela 20 referentes ao reforço para as vigas biapoiadas (V1, V4 e V7).

Tabela 20 - Resultados do dimensionamento das vigas menores (V1, V4 e V7) para Tecidos de fibras de carbono.

VIGA	Mu (N.mm) - 10 ⁶	Ms1 (N.mm) - 10 ⁶	Af (mm ²)	Xp (mm)	Bf (mm)
V1	86,41	222,54	1.064,48	170,78	200
V4	86,41	222,27	1.064,48	170,78	200
V7	86,41	223,42	1.064,48	170,78	200
Quantidade de camadas e comprimento dos tecidos					
VIGA	Número de camadas		Comprimento do Tecido		
V1	16 camadas de 200 mm		3.600 mm		
V4	16 camadas de 200 mm		3.600 mm		
V7	16 camadas de 200 mm		3.600 mm		
Onde: Mu= Momento Resistente da Seção; Ms1= Momento Solicitante Final (após o carregamento); Af= Área de reforço obtida; Xp= Posição da linha neutra; Bf= Largura da Fibra de carbono.					

Fonte: O autor (2021)

A quantidade de camadas encontradas para aplicação em cada uma das vigas, entretanto, não é indicada, visto que a aderência desse tipo de material é prejudicada a partir da utilização de mais de 4 camadas, sendo que a utilização de um número maior que esse de camadas pode acarretar no desprendimento do substrato do elemento estrutural, conforme citado pelo funcionário da empresa Mc Bauchemie (NAOI, 2020), após consulta realizada em setembro de 2020. Esse fato pode ser comprovado pelo aumento da deformabilidade que a estrutura sofre a partir do número de camadas, conforme citado no trabalho de Goliath (2017), em que foi descrito que a aderência é prejudicada a partir da colagem de sucessivas camadas, e dessa forma causa uma maior deformação à estrutura.

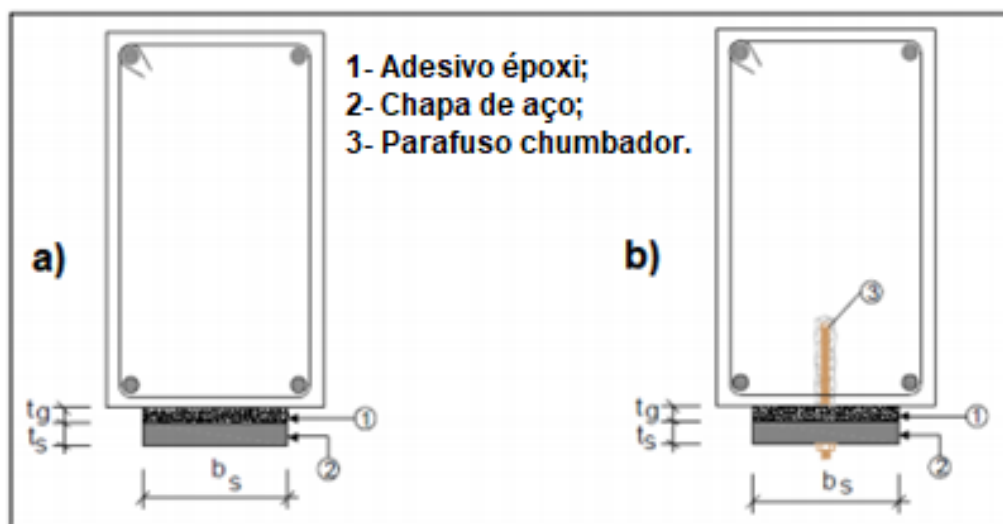
Para as demais vigas sabendo-se que os momentos solicitantes são ainda maiores que os das vigas biapoiadas, e que as várias seções de aplicação necessitariam de ainda mais camadas, optou-se por não utilizar esse tipo de reforço para o caso em questão. Contra essa técnica em questão surge ainda o fato de que os custos de mão de obra são ainda maiores, devido a maior dificuldade de sua aplicação em detrimento ao uso das lâminas de PRFC.

5.2 REFORÇO COM A UTILIZAÇÃO DE CHAPAS DE AÇO

Outro método utilizado refere-se ao uso de chapas de aço SAE 1020 coladas a estrutura a partir de uma resina de alta resistência. As principais vantagens desse método referem-se principalmente ao aumento insignificante da seção transversal do concreto, além dos baixos níveis de ruído durante a execução do reforço, e da rápida execução (fator comum também à utilização de PRFC, como já abordado).

Higashi (2016) exemplifica, na figura 22, como é representado o reforço aplicado numa viga. No primeiro caso, é demonstrado como seria o reforço apenas com a utilização de resina, já no segundo caso, o reforço é executado com a utilização de buchas expansivas, assim como é determinado no tópico 4.2.2 deste trabalho. Essa alteração visa melhorar a aderência entre a viga e o reforço. No caso exemplificado é utilizada apenas uma camada de chapa para execução do reforço hipotético.

Figura 22 - Representação de reforço com chapas de aço sem a utilização de buchas expansivas (a) e com a utilização de buchas expansivas (b).



Fonte: Higashi (2016)

Uma desvantagem, entretanto, refere-se ao peso acrescentado a estrutura a partir da colagem dessas chapas, no presente estudo foi realizado o reforço com chapas de 3mm e 6,35 mm de espessura, ambas com o tamanho de peça de 200x1500 mm, além de possuir $f_y = 350$ MPa, e um módulo de elasticidade $E_s =$

200000 MPa, como pode ser observado no tópico 4.2.2 deste trabalho. Diferentemente do apresentado na figura 22, a largura de reforço considerada neste trabalho corresponde a largura da viga.

Para o dimensionamento das chapas foi executado o procedimento determinado na metodologia deste trabalho, e obtiveram-se os resultados que podem ser vistos na tabela 21 com relação às vigas biapoiadas (V1, V4 e V7).

Tabela 21 - Resultados do dimensionamento das vigas menores (V1, V4 e V7) para o reforço com chapas de aço.

VIGA	Mu (N.mm) - 10^6	Ms1 (N.mm) - 10^6	Ach (mm ²)	x _p (mm)	ech (mm)
V1	86,41	222,54	1.468,98	170,78	7,34
V4	86,41	222,27	1.468,98	170,78	7,34
V7	86,41	223,42	1.468,98	170,78	7,34
Quantidade de camadas e comprimento das chapas					
VIGA	Número de camadas		Comprimento da chapa		
V1	3 camadas com chapa de 3 mm		3.000 mm		
V4	3 camadas com chapa de 3 mm		3.000 mm		
V7	3 camadas com chapa de 3 mm		3.000 mm		

Onde:

Mu= Momento Resistente da Seção;

Ms1= Momento Solicitante Final (após o carregamento);

Ach= Área de chapa obtida para reforço;

Xp= Posição da linha neutra;

ech= Espessura necessária para chapa de aço.

Fonte: O autor (2021)

De maneira análoga ao dimensionamento realizado para as lâminas, no caso das vigas contínuas também se viu necessário realizar o dimensionamento por seções, dessa forma, chegou-se aos resultados mostrados na tabela 22, para o dimensionamento do reforço a ser utilizado nas vigas V5 e V6, e, na tabela 23, são apresentadas a quantidade de camadas e o comprimento das chapas necessários para execução do reforço.

Tabela 22 - Resultados do dimensionamento das vigas V5 e V6 para o reforço com chapas de aço.

VIGA	Mu (N.mm) - 10 ⁶	Ms1 (N.mm) - 10 ⁶	Ach (mm ²)	x _p (mm)	ech (mm)
V5 – P8	110,86	-278,37	2.027,96	197,75	10,14
V5 – P8-P4	53,17	175,99	1.610,55	155,19	8,05
V5 – P4	110,86	-329,33	2.520,33	234,48	12,60
V5 – P4-P1	45,55	117,39	1.252,85	167,51	9,26
V5 – P1	84,16	-190,06	1.734,88	168,58	8,67
V6 – P9	110,86	-279,13	2.027,96	197,75	10,14
V6 – P9-P5	53,17	175,87	1.610,55	155,19	8,05
V6 – P5	110,86	-329,10	2.520,33	234,48	12,60
V6 – P5-P2	45,55	116,77	1.252,85	167,51	9,26
V6 – P2	84,16	-187,22	1.734,88	168,58	8,67

Onde:
 Mu= Momento Resistente da Seção;
 Ms1= Momento Solicitante Final (após o carregamento);
 Ach= Área de chapa obtida para reforço;
 Xp= Posição da linha neutra;
 ech= Espessura necessária para chapa de aço.

Fonte: O autor (2021)

Tabela 23: Quantidade de camadas e comprimento das chapas necessárias para execução do reforço das vigas V5 e V6

VIGA	Número de camadas	Comprimento da chapa
V5 – P8	2 camadas com chapa de 6,35mm	4.500 mm
V5 – P8-P4	3 camadas com chapa de 3 mm	3.000 mm
V5 – P4	2 camadas com chapa de 6,35mm	4.500 mm
V5 – P4-P1	1 camada com chapa de 6,35mm + 1 camada com chapa de 3 mm	3.000 mm
V5 – P1	3 camadas com chapa de 3 mm	3.000 mm
V6 – P9	2 camadas com chapa de 6,35mm	4.500 mm
V6 – P9-P5	3 camadas com chapa de 3 mm	3.000 mm
V6 – P5	2 camadas com chapa de 6,35mm	4.500 mm
V6 – P5-P2	1 camada com chapa de 6,35mm + 1 camada com chapa de 3 mm	3.000 mm
V6 – P2	3 camadas com chapa de 3 mm	3.000 mm

Fonte: O autor (2021)

Para análise da viga V3 de forma similar ao que foi observado para as lâminas de PRFC, sua extensão foi subdividida em 7 seções, afim de facilitar o dimensionamento como pode ser visto na tabela 24. Já a tabela 25 mostra a

quantidade de camadas e comprimento de chapas necessários para execução do reforço.

Tabela 24 - Resultados do dimensionamento da via V3 para o reforço com chapas de aço.

VIGA	Mu (N.mm) - 10 ⁶	Ms1 (N.mm) - 10 ⁶	Ach (mm ²)	x _p (mm)	ech (mm)
V3 – P7	84,16	-194,88	1.775,46	174,07	8,88
V3 – P7-P8	45,55	121,79	1.161,07	93,93	5,81
V3 – P8	136,95	-333,50	1.831,22	185,25	9,16
V3 – P8-P9	34,29	172,65	951,55	91,90	4,76
V3 – P9	53,17	-333,71	1.929,17	205,11	9,65
V3 – P9-P10	45,55	120,06	1.161,07	93,93	5,81
V3 – P10	84,16	-194,70	1.775,46	174,07	8,88

Onde:
 Mu= Momento Resistente da Seção;
 Ms1= Momento Solicitante Final (após o carregamento);
 Ach= Área de chapa obtida para reforço;
 Xp= Posição da linha neutra;
 ech= Espessura necessária para chapa de aço.

Fonte: O autor (2021)

Tabela 25: Quantidade de camadas e comprimento das chapas necessárias para execução do reforço da viga V3.

VIGA	Número de camadas	Comprimento da chapa
V3 – P7	3 camadas com chapa de 3 mm	3.000 mm
V3 – P7-P8	1 camada com chapa de 6,35 mm	3.000 mm
V3 – P8	1 camada com chapa de 6,35mm + 1 camada com chapa de 3 mm	3.000 mm
V3 – P8-P9	1 camada com chapa de 6,35 mm	3.000 mm
V3 – P9	2 camadas com chapa de 6,35 mm	4.500 mm
V3 – P9-P10	1 camada com chapa de 6,35 mm	3.000 mm
V3 – P10	3 camadas com chapa de 3 mm	3.000 mm

Fonte: O autor (2021)

Para a viga V2, o dimensionamento ocorreu de maneira análoga ao que aconteceu na viga V3, como pode ser apresentado na tabela 26, o número de camadas e o comprimento das chapas utilizadas do reforço estão apresentados na tabela 27.

Tabela 26 - Resultados do dimensionamento da viga V2 para o reforço com chapas de aço.

VIGA	Mu (N.mm) - 10 ⁶	Ms1 (N.mm) - 10 ⁶	Ach (mm ²)	Xp (mm)	ech (mm)
V2 – P3	84,16	-194,88	1.251,42	264,56	15,10
V2 – P3-P4	45,55	121,79	1.852,85	167,51	8,96
V2 – P4	136,95	-333,50	2.588,71	274,08	12,64
V2 – P4-P5	34,29	172,65	1.610,55	155,19	8,05
V2 – P5	53,17	-333,71	2.588,71	274,08	9,65
V2 – P5-P6	45,55	120,06	1.852,85	167,51	8,96
V2 – P6	84,16	-194,70	1.251,42	264,56	15,10
Onde: Mu= Momento Resistente da Seção; Ms1= Momento Solicitante Final (após o carregamento); Ach= Área de chapa obtida para reforço; Xp= Posição da linha neutra; ech= Espessura necessária para chapa de aço.					

Fonte: O autor (2021)

Tabela 27: Quantidade de camadas e comprimento das chapas necessárias para execução do reforço da viga V2.

VIGA	Número de camadas	Comprimento da chapa
V2 – P3	1 camadas com chapa de 6,35mm	3.000 mm
V2 – P3-P4	3 camadas de 3mm	3.000 mm
V2 – P4	2 camadas com chapa de 6,35 mm	4.500 mm
V2 – P4-P5	3 camadas de 3mm	3.000 mm
V2 – P5	2 camadas com chapa de 6,35 mm	4.500 mm
V2 – P5-P6	3 camadas de 3mm	3.000 mm
V2 – P6	1 camadas com chapa de 6,35mm	3.000 mm

Fonte: O autor (2021)

Para análise do custo dessas chapas, além das chapas propriamente ditas foi considerada a aplicação de um adesivo epóxi, que possui o rendimento de 0,7kg / m² de reforço (BAUTECH, 2017), de parafusos chumbadores do modelo Parabolt, conforme descrito no tópico 4.2.2 deste trabalho; e de um primer anticorrosivo do tipo zarcão, a ser aplicado sobre a última camada do reforço (em três demãos), e que possui o rendimento 0,18L/ m² do reforço, conforme obtido no catálogo da Vedacit (2021). A análise da estimativa de custo é apresentada na tabela 28.

Tabela 28 - Custos estimados para aplicação do reforço com a utilização de chapas de aço.

VIGA	Custo do Material	Custo da Mão de Obra	Custo total
V1	R\$ 718,80	R\$ 1.050,00	R\$ 1.768,80
V2	R\$4.533,45	R\$8.400,00	R\$12.933,45
V3	R\$ 5.031,76	R\$ 7.875,00	R\$12.906,76
V4	R\$ 718,80	R\$ 1.050,00	R\$ 1.768,80
V5	R\$ 4.515,76	R\$ 6.300,00	R\$ 10.815,76
V6	R\$ 4.515,76	R\$ 6.300,00	R\$ 10.815,76
V7	R\$ 718,80	R\$ 1.050,00	R\$ 1.768,80

Fonte: O autor (2021).

Como é perceptível, os custos são bem parecidos com os observados para as lâminas, entretanto a primeira técnica é mais barata, visto que a área de reforço exigida foi menor para as lâminas do que para as chapas de aço. Isso ocorre principalmente pelo fato da tensão de escoamento das chapas ser menor que a tensão admissível das lâminas, e com isso a área de reforço a ser utilizada é maior. Um aspecto desfavorável ao custo desta técnica é a questão de ser considerada por alguns especialistas uma técnica obsoleta, e com isso tanto materiais, como mão de obra especializada na aplicação dessas chapas são difíceis e caras de se encontrar. Além disso, outro ponto negativo da aplicação desta técnica refere-se ao acréscimo de peso à estrutura, que é bem superior ao que se tem com os PRFCs, como pode ser apresentado pela tabela 29.

Tabela 29 - Peso total acrescido a estrutura por viga

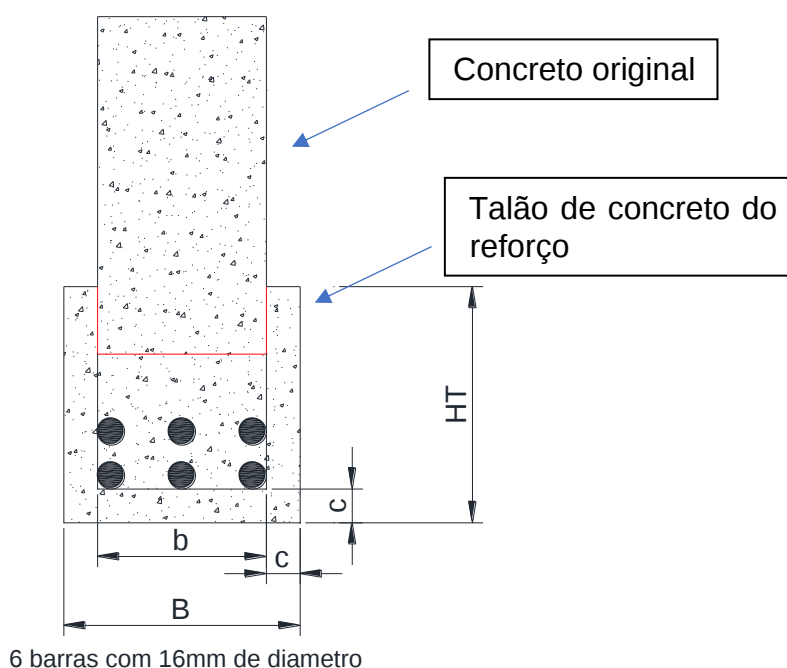
VIGA	PESO ACRESCIDO A ESTRUTURA (KG)
V1	43,92
V2	370,80
V3	326,58
V4	43,92
V5	311,64
V6	311,64
V7	43,92
TOTAL:	1.452,42

Fonte: O autor (2021)

5.3 REFORÇO POR ENCAMISAMENTO PARCIAL DA ESTRUTURA

Outra alternativa aos métodos de reforço já dimensionados é o encamisamento parcial da estrutura com concreto armado. As principais vantagens dessa técnica são a utilização de materiais constantemente utilizados na construção civil, o fato de não precisar de uma equipe especializada para esse tipo de atividade e o custo, que é considerado em muitos estudos (Santos, 2006; Simões, 2007; Zucchi, 2015) como o principal atrativo para sua utilização. Entretanto, a técnica possui alguns inconvenientes no que se refere a mudança geométrica da estrutura. A figura 23 exemplifica como é executado o reforço por encamisamento parcial de uma viga.

Figura 23 - Representação de reforço por encamisamento em viga.



Fonte: O autor (2021)

A figura 23 mostra como ocorre de maneira simplificada o reforço por encamisamento, em que a junção entre a viga e o reforço (talão de concreto) se dá apenas pela área de interface (A_i , representado pela linha vermelha na figura). Cabe citar que para a definição da área do talão deve ser levada em conta o cobrimento

nominal de concreto para o reforço, os espaçamentos verticais e horizontais, além dos diâmetros das barras das armaduras de reforço. Esta última a ser definida pela área de aço do reforço (A_{sf}) calculada pelo procedimento detalhado no tópico 4.2.3 deste trabalho.

Após o processo de dimensionamento, obtiveram-se os resultados mostrados na tabela 30 para as vigas menores (V1, V4 e V7).

Tabela 30 – Resultados do dimensionamento das vigas menores (V1, V4 e V7) para o reforço por encamisamento parcial.

VIGA	Mu (N.mm) - 10 ⁶	Ms1 (N.mm) - 10 ⁶	Asf (mm ²)	x _p (mm)	Seç T:
V1	86,41	222,54	1.028,29	170,78	280x260 mm
V4	86,41	222,27	1.028,29	170,78	280x260 mm
V7	86,41	223,42	1.028,29	170,78	280x260 mm
Disposição das barras de aço em camadas, diâmetros e comprimentos de reforço					
VIGA	N (und)	Disposição			Comprimento do reforço
V1	6 ϕ 16.0	2 camadas com 3 barras			5550 mm
V4	6 ϕ 16.0	2 camadas com 3 barras			5550 mm
V7	6 ϕ 16.0	2 camadas com 3 barras			5550 mm
Onde:					
Mu= Momento Resistente da Seção;					
Ms1= Momento Solicitante Final (após o carregamento);					
Asf= Área de aço obtida para o reforço;					
Xp= Posição da linha neutra;					
Sec T = Seção transversal adotada para o talão de concreto.					

Fonte: O autor (2021)

Tendo dimensionado o reforço foi necessário verificar a aderência com relação à área de interface entre viga e reforço. Assim como foi feito no trabalho de SANTOS (2006), se utilizou dos conceitos abordados por alguns autores no que se refere à tensão cisalhante resistente da interface entre concreto novo e concreto antigo, a partir disso chegou-se as áreas requeridas e adotadas para interface que estão descritas na tabela 31.

Tabela 31 - Áreas requerida e adotada para interface nas vigas (V1, V4 e V7)

VIGA	Asef (mm²)	f _y (MPa)	τ _R (MPa)	τ _{lim} (MPa)	Ai req. (mm²)	Ai adot. (mm²)
V1	1.200,00	500	¹ 2,59	1,29	926.640,92	1.110.000
			² 3,50	1,75	685.714,28	
			³ 2,53	1,26	948.616,60	
			⁴ 2,41	1,20	995.850,62	
V4	1.200,00	500	¹ 2,59	1,29	926.640,92	1.110.000
			² 3,50	1,75	685.714,28	
			³ 2,53	1,26	948.616,60	
			⁴ 2,41	1,20	995.850,62	
V7	1.200,00	500	¹ 2,59	1,29	926.640,92	1.110.000
			² 3,50	1,75	685.714,28	
			³ 2,53	1,26	948.616,60	
			⁴ 2,41	1,20	995.850,62	

Onde:
Asef = Área de aço efetiva;
f_y = Tensão de escoamento Nominal;
τ_R = Tensão resistente a aderência entre dois concretos distintos, calculadas a partir das teorias de 4 autores: ¹PIANCASTELLI (1997), ²CHEONG E MACALEVEY (2000), ³PIRES (2003) e ⁴CLÍMACO E REAGAN (2001).
τ_{lim} = Tensão cisalhante limite;
Ai req = Área de interface requerida;
Ai adot = Área de interface adotada.

Fonte: O autor (2021)

Com a verificação quanto a área de interface, realizada para as vigas biapoiadas, pode-se inferir que não é necessária a utilização de parafusos chumbadores para conferir a correta aderência para o reforço, dessa forma, para os demais reforços por encamisamento dimensionados nesse trabalho, foram consideradas as mesmas dimensões de seção transversal para o talão, como uma maneira de simplificar o procedimento de cálculo para o dimensionamento. É importante salientar, conforme destacado no trabalho de Santos (2006) que a não utilização de chumbadores requer um adequado tratamento da interface entre os dois concretos (original e reforço), muito embora esse autor tenha, por questões de segurança, utilizado chumbadores na ligação entre concreto e reforço.

Para o dimensionamento dos reforços nas vigas V5 e V6 (contínuas) a tabela 32 mostra os resultados de dimensionamento, enquanto a tabela 33 apresenta a

disposição das barras de aço em camadas, os diâmetros delas e os comprimentos de reforço.

Tabela 32 - Resultados do dimensionamento das vigas V5 e V6 para o reforço por encamisamento parcial.

VIGA	Mu (N.mm) - 10 ⁶	Ms1 (N.mm) - 10 ⁶	Asf (mm ²)	x _p (mm)	Seç T:
V5 – P8	110,86	-278,37	1.319,57	187,09	280x260 mm
V5 – P8-P4	53,17	175,99	915,63	132,62	280x260 mm
V5 – P4	110,86	-329,33	1.737,42	231,62	280x260 mm
V5 – P4-P1	45,55	117,39	596,18	92,27	280x260 mm
V5 – P1	84,16	-190,06	873,64	132,27	280x260 mm
V6 – P9	110,86	-279,13	1.319,57	187,09	280x260 mm
V6 – P9-P5	53,17	175,87	915,63	132,62	280x260 mm
V6 – P5	110,86	-329,10	1.737,42	231,62	280x260 mm
V6 – P5-P2	45,55	116,77	596,18	92,27	280x260 mm
V6 – P2	84,16	-187,22	873,64	132,27	280x260 mm

Onde:
 Mu= Momento Resistente da Seção;
 Ms1= Momento Solicitante Final (após o carregamento);
 Asf= Área de aço obtida para o reforço;
 Xp= Posição da linha neutra;
 Sec T = Seção transversal adotada para o talão de concreto.

Fonte: O autor (2021)

Tabela 33 - Disposição das barras de aço em camadas, diâmetros e comprimentos de reforço para as vigas V5 e V6 por encamisamento parcial.

(continua)

VIGA	N (und)	Disposição	Comprimento do reforço
V5 – P8	7 ϕ 16.0	1 camadas com 4 barras + 1 camada com 3 barras	1.500 mm
V5 – P8-P4	5 ϕ 16.0	1 camada com 3 barras + 1 camada com 2 barras	5.625 mm
V5 – P4	9 ϕ 16.0	3 camadas com 3 barras	2.000 mm
V5 – P4-P1	5 ϕ 16.0	1 camada com 3 barras + 1 camada com 2 barras	5.625 mm
V5 – P1	3 ϕ 16.0	1 camada com 3 barras	1.300 mm
V6 – P9	7 ϕ 16.0	1 camadas com 4 barras + 1 camada com 3 barras	1.500 mm

Tabela 33 - Disposição das barras de aço em camadas, diâmetros e comprimentos de reforço para as vigas V5 e V6 por encamisamento parcial.

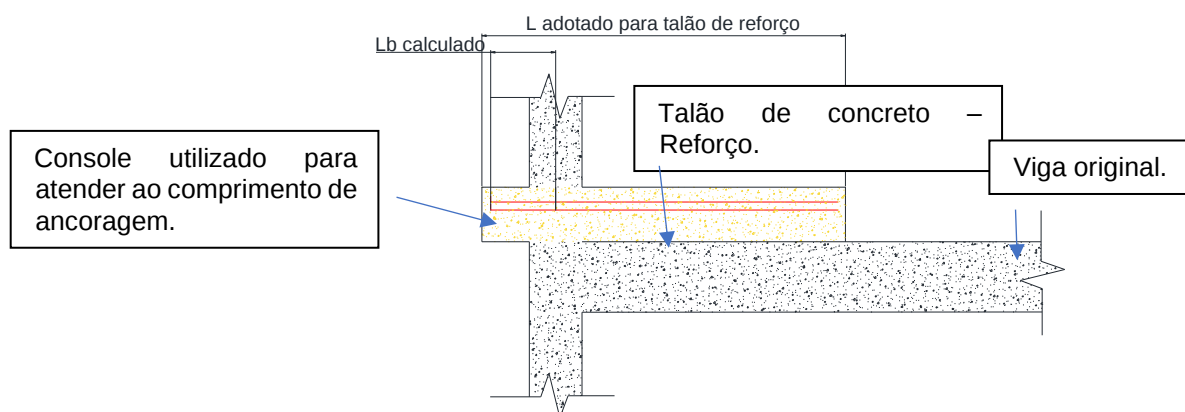
(continuação)

V6 – P9-P5	5 ϕ 16.0	1 camada com 3 barras + 1 camada com 2 barras	5.625 mm
V6 – P5	9 ϕ 16.0	3 camadas com 3 barras	2.000 mm
V6 – P5-P2	5 ϕ 16.0	1 camada com 3 barras + 1 camada com 2 barras	5.625 mm
V6 – P2	3 ϕ 16.0	1 camada com 3 barras	1.300 mm

Fonte: O autor (2021)

Para o cálculo do comprimento do reforço nas seções cujos momentos fletores são negativos foi necessário realizar o cálculo do comprimento de ancoragem dos reforços, que pode ser definido pela tabela 7 do tópico 4.2.3 deste trabalho. Como o comprimento de ancoragem calculado não poderia ser aplicado a viga considerando as dimensões dos pilares, existiam duas alternativas: ou diminuiria o diâmetro das barras de aço, o que diminuiria o comprimento de ancoragem, porém implicaria no consequente aumento do talão de concreto; ou acrescentaria um console como maneira de garantir o comprimento de ancoragem necessário, sendo essa última alternativa a considerada no caso em questão. Entretanto, mesmo com o comprimento de ancoragem definido, a área de talão do reforço deveria aumentar, nesse caso, foi considerado um maior comprimento desse talão, aumentando-o no sentido do meio do vão, de modo a atender as exigências para a área de interface requerida. Essa representação pode ser vista na figura 24.

Figura 24 - Representação de comprimento de ancoragem calculado e adotado para o pilar de extremidade da viga V5.



Fonte: O autor (2021)

Para a verificação da área de interface (A_i), foi considerada apenas a Tensão de aderência entre os dois concretos (τ_R) referente aos estudos de Clímaco e Reagan (2001), visto que ela é a tensão que exige uma maior área requerida. Dessa forma, a tabela 34 mostra a verificação entre as áreas requeridas e adotadas para interface das vigas V5 e V6.

Tabela 34 - Área requerida e adotada para interface das vigas V5 e V6:

VIGA	Asef (mm ²)	f_y (MPa)	τ_R (MPa)	τ_{lim} (MPa)	Ai req. (mm ²)	Ai adot. (mm ²)
V5 – P8	1.400	500	2,41	1,20	580.912,9	600.000
V5 – P8-P4	1.000	500	2,41	1,20	829.875,52	1.124.000
V5 – P4	1.800	500	2,41	1,20	746.888	800.000
V5 – P4-P1	600	500	2,41	1,20	497.925,3	1.124.000
V5 – P1	1.000	500	2,41	1,20	414.937,76	520.000
V6 – P9	1.400	500	2,41	1,20	580.912,9	600.000
V6 – P9-P5	1.000	500	2,41	1,20	829.875,52	1.124.000
V6 – P5	1.800	500	2,41	1,20	746.888	800.000
V6 – P5-P2	600	500	2,41	1,20	497.925,3	1.124.000
V6 – P2	1.000	500	2,41	1,20	414.937,76	520.000

Onde:
Asef = Área de aço efetiva;
 f_y = Tensão de escoamento Nominal;
 τ_R = Tensão resistente a aderência entre dois concretos distintos;
 τ_{lim} = Tensão cisalhante limite;
Ai req = Área de interface requerida;
Ai adot = Área de interface adotada.

Fonte: O autor (2021)

O procedimento utilizado para execução do reforço para a viga V3 é o mesmo que foi utilizado para as vigas V5 e V6, sendo a única alteração a utilização de mais seções de cálculo. A tabela 35 mostra os resultados de dimensionamento, enquanto a tabela 36 apresenta a disposição das barras de aço em camadas, os diâmetros delas, além dos comprimentos de reforço. A tabela 37 mostra a verificação para área de interface requerida e adotada para a viga V3.

Tabela 35 - Resultados do dimensionamento da viga V3 para o reforço por encamisamento parcial.

VIGA	Mu (N.mm) - 10 ⁶	Ms1 (N.mm) - 10 ⁶	Asf (mm ²)	x _p (mm)	Seç T:
V3 – P7	85,60	-201,65	893,00	135,44	280x260 mm
V3 – P7-P8	42,38	125,09	665,96	78,29	280x260 mm
V3 – P8	83,10	-237,71	1281,85	185,25	280x260 mm
V3 – P8-P9	34,29	104,42	547,44	79,26	280x260 mm
V3 – P9	86,41	-238,52	1336,37	203,61	280x260 mm
V3 – P9-P10	42,38	125,09	665,96	78,29	280x260 mm
V3 – P10	85,60	-201,65	893,00	135,44	280x260 mm
Onde: Mu= Momento Resistente da Seção; Ms1= Momento Solicitante Final (após o carregamento); Asf= Área de aço obtida para o reforço; Xp= Posição da linha neutra; Sec T = Seção transversal adotada para o talão de concreto.					

Fonte: O autor (2021)

Tabela 36 - Disposição das barras de aço em camadas, diâmetros e comprimentos de reforço para a viga V3 por encamisamento parcial.

VIGA	N (und)	Disposição	Comprimento do reforço
V3 – P7	5 ϕ 16.0	1 camada com 3 barras + 1 camada com 2 barras	1.300 mm
V3 – P7-P8	4 ϕ 16.0	1 camada com 4 barras	5.620 mm
V3 – P8	7 ϕ 16.0	1 camadas com 4 barras + 1 camada com 3 barras	1.500 mm
V3 – P8-P9	3 ϕ 16.0	1 camada com 3 barras	5.620 mm
V3 – P9	7 ϕ 16.0	1 camadas com 4 barras + 1 camada com 3 barras	1.300 mm
V3 – P9-P10	4 ϕ 16.0	1 camada com 4 barras	1.500 mm
V3 – P10	5 ϕ 16.0	1 camada com 3 barras + 1 camada com 2 barras	1.300 mm

Fonte: O autor (2021)

Tabela 37 - Área requerida e adotada para interface da viga V3:

VIGA	Asef (mm ²)	f _y (MPa)	τ _R (MPa)	τ _{lim} (MPa)	Ai req. (mm ²)	Ai adot. (mm ²)
V3 – P7	1.000	500	2,41	1,20	414.938	520.000
V3 – P7-P8	800	500	2,41	1,20	663.900	1.140.000
V3 – P8	1.400	500	2,41	1,20	580.913	600.000
V3 – P8-P9	600	500	2,41	1,20	479.925	1.110.000
V3 – P9	1.400	500	2,41	1,20	580.913	600.000
V3 – P9-P10	800	500	2,41	1,20	663.900	1.140.000
V3 – P10	1.000	500	2,41	1,20	414.938	520.000

Onde:
Asef = Área de aço efetiva;
f_y = Tensão de escoamento Nominal;
τ_R = Tensão resistente a aderência entre dois concretos distintos;
τ_{lim} = Tensão cisalhante limite;
Ai req = Área de interface requerida;
Ai adot = Área de interface adotada.

Fonte: O autor (2021)

Para a viga V2 seguiu-se o mesmo procedimento de cálculo, do qual foi possível obter os resultados mostrados na tabela 38. A tabela 39 apresenta a disposição das barras de aço em camadas, os diâmetros delas, além dos comprimentos de reforço. Já a tabela 40 que mostra a verificação para área de interface requerida e adotada para a viga V2

Tabela 38 - Resultados do dimensionamento da viga V2 para o reforço por encamisamento parcial.

VIGA	Mu (N.mm) - 10 ⁶	Ms1 (N.mm) - 10 ⁶	Asf (mm ²)	x _p (mm)	Seç T:
V2 – P3	84,16	-194,88	873,64	132,27	280x260 mm
V2 – P3-P4	45,55	121,79	596,18	92,82	280x260 mm
V2 – P4	136,95	-333,50	1766,67	269,23	280x260 mm
V2 – P4-P5	34,29	172,65	915,63	132,62	280x260 mm
V2 – P5	53,17	-333,71	1766,67	269,23	280x260 mm
V2 – P5-P6	45,55	120,06	596,18	92,82	280x260 mm
V2 – P6	84,16	-194,70	873,64	132,27	280x260 mm

Onde:
Mu= Momento Resistente da Seção;
Ms1= Momento Solicitante Final (após o carregamento);
Asf= Área de aço obtida para o reforço;
Xp= Posição da linha neutra;
Sec T = Seção transversal adotada para o talão de concreto.

Fonte: O autor (2021)

Tabela 39 - Disposição das barras de aço em camadas, diâmetros e comprimentos de reforço para a viga V2 por encamisamento parcial.

VIGA	N (und)	Disposição	Comprimento do reforço
V2 – P3	5 ϕ 16.0	1 camada com 3 barras + 1 camada com 2 barras	1.300 mm
V2 – P3-P4	3 ϕ 16.0	1 camada com 3 barras	5.700 mm
V2 – P4	9 ϕ 16.0	3 camadas com 3 barras	2.000 mm
V2 – P4-P5	5 ϕ 16.0	1 camada com 3 barras + 1 camada com 2 barras	5.550 mm
V2 – P5	9 ϕ 16.0	3 camadas com 3 barras	2.000 mm
V2 – P5-P6	3 ϕ 16.0	1 camada com 3 barras	5.700 mm
V2 – P6	5 ϕ 16.0	1 camada com 3 barras + 1 camada com 2 barras	1.300 mm

Fonte: O autor (2021)

Tabela 40 - Área requerida e adotada para interface da viga V2:

VIGA	Asef (mm ²)	f_y (MPa)	τ_R (MPa)	τ_{lim} (MPa)	Ai req. (mm ²)	Ai adot. (mm ²)
V2 – P3	1.000	500	2,41	1,20	414.938	520.000
V2 – P3-P4	800	500	2,41	1,20	497.925	2.280.000
V2 – P4	1.800	500	2,41	1,20	746.888	800.000
V2 – P4-P5	1.000	500	2,41	1,20	829.876	2.220.000
V2 – P5	1.800	500	2,41	1,20	746.888	800.000
V2 – P5-P6	800	500	2,41	1,20	497.925	2.280.000
V2 – P6	1.000	500	2,41	1,20	414.938	520.000

Onde:

Asef = Área de aço efetiva;

f_y = Tensão de escoamento Nominal;

τ_R = Tensão resistente a aderência entre dois concretos distintos;

τ_{lim} = Tensão cisalhante limite;

Ai req = Área de interface requerida;

Ai adot = Área de interface adotada.

Fonte: O autor (2021)

De posse de todos os dados do dimensionamento para os reforços nas vigas analisadas (V1, V2, V3, V4, V5, V6 e V7) foi iniciada a estimativa de custos para a execução da técnica. Esses custos contemplaram o valor para as barras de aço, formas de madeira, estribos com aço CA-60 e diâmetro de 5.0 mm, posicionados a cada 150 mm ao longo do talão de reforço. Já o custo da mão de obra, que foi

calculado a partir de dados fornecidos pela plataforma ORSE/SINAPI. Esses custos estimados estão expressos na tabela 41.

Tabela 41 - Custos estimados para aplicação do reforço por encamisamento parcial da estrutura.

VIGA	Custo do Material	Custo da Mão de Obra	Custo total
V1	R\$ 1.225,86	R\$ 207,76	R\$ 1.433,62
V2	R\$4.526,39	R\$881,58	R\$5.407,97
V3	R\$ 4.428,02	R\$ 844,15	R\$5.272,17
V4	R\$ 1.225,86	R\$ 207,76	R\$ 1.433,62
V5	R\$ 3.763,55	R\$ 600,82	R\$ 4.364,37
V6	R\$ 3.763,55	R\$ 600,82	R\$ 4.364,37
V7	R\$ 1.225,86	R\$ 207,76	R\$ 1.433,62

Fonte: O autor (2021)

Dessa forma, ao analisar os custos da técnica percebe-se que o custo de material nas vigas menores (V1, V4 e V7) é um custo estimado bem próximo do que foi analisado para o reforço com lâminas, sendo, inclusive, o reforço por lâmina ainda mais barato, para esses casos, visto que se utilizou uma pequena quantidade do material. Entretanto, ao se analisar a mão de obra do reforço por encamisamento fica claro o motivo principal pelo baixo custo total esperado para o emprego dessa técnica. O comparativo geral de preços estimados pode ser apresentado pela tabela 42.

Tabela 42 - Comparativo entre custos estimados para execução dos três tipos de reforço.

VIGA	Lâmina de PRFC	Chapas de aço	Encamisamento
V1	R\$ 3.589,23	R\$ 1.768,80	R\$ 1.433,62
V2	R\$ 13.131,04	R\$12.933,45	R\$ 5.407,97
V3	R\$ 13.541,39	R\$12.906,76	R\$ 5.272,17
V4	R\$ 3.589,23	R\$ 1.768,80	R\$ 1.433,62
V5	R\$ 9.027,59	R\$ 10.815,76	R\$ 4.364,37
V6	R\$ 9.027,59	R\$ 10.815,76	R\$ 4.364,37
V7	R\$ 3.589,23	R\$ 1.768,80	R\$ 1.433,62

Fonte: O autor (2021)

Ao analisar a tabela fica evidente que a técnica do encamisamento parcial possui um custo menor para sua execução, pode-se perceber ainda que apesar do reforço por chapas de aço ter um preço bem semelhante para aplicação em vigas menores; ao se aplicá-la em vigas maiores, que exigem uma quantidade maior de reforço, seu preço aumenta drasticamente, principalmente em função do material ser mais caro do que o material utilizado pelo encamisamento e lâmina; e, além disso, também por sua mão de obra ser relativamente cara. No caso das lâminas de PRFC, percebe-se que é uma técnica mais cara para aplicação já em pequenas vigas, fato observado principalmente pelo alto custo de sua mão de obra, que deve ser a mais especializada dentre as três técnicas. Entretanto, com o aumento do porte do elemento estrutural, seu custo estimado aumentou de forma parecida com o que ocorreu para o reforço com chapas de aço, isso ocorre principalmente em virtude da alta deformabilidade máxima do material, que torna possível utilizar uma quantidade menor de lâminas, o que tornaria a técnica não tão cara. Entretanto, o custo da mão de obra, mais uma vez, é observado como o aspecto negativo mesmo para vigas que requeiram menor quantidade de material de reforço.

Para comparar as técnicas, não somente o custo estimado deve ser levado em conta, por isso a tabela 43 mostra uma síntese entre os principais aspectos comparativos do uso das técnicas, com suas principais vantagens e desvantagens.

Tabela 43 - Síntese comparativa entre as técnicas de reforço a flexão abordadas.

TIPO DE REFORÇO A SER UTILIZADO	AREA REQUERIDA/ (mm ²)	CUSTO TOTAL (R\$)	PRINCIPAIS VANTAGENS	PRINCIPAIS DESVANTAGENS
Lâmina de PRFC	5867,10	55495,30	-Baixo peso adicional; -Baixo acréscimo de espessura da Viga.	-Dificuldade de mão de obra especializada.
Chapa de aço SAE 1020	46281,59	52778,13	-Baixo acréscimo de espessura da viga; -Rapidez para execução.	- Dificuldade de mão de obra especializada; - Manutenção mais frequente; - Alto acréscimo de peso à estrutura.
Encamisamento com concreto armado	27641,94	23709,74	-Facilidade de Execução; -Disponibilidade de mão de obra; -Baixo Custo da técnica.	-Maior tempo para execução; -Maior geração de resíduos na aplicação da técnica; -Necessidade de alteração da geometria dos ambientes a serem reforçados.

Fonte: O autor (2021)

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram analisadas as três principais técnicas de reforço à flexão utilizadas em estruturas de concreto armado: Reforço com polímeros reforçados com fibra de carbono (Lâmina e Tecido), reforço com colagem de chapas de aço (SAE 1020) e encamisamento parcial.

No aspecto referente ao dimensionamento desses reforços ficou comprovado, por meio dos cálculos definidos neste trabalho, que o reforço com os PRFC requer uma menor área, visto que esse material possui elevada resistência mecânica em comparação com os materiais utilizados nos outros métodos abordados, para os quais seriam necessárias maiores áreas de reforço.

Com relação ao custo, ficou comprovado que o encamisamento parcial da estrutura é o método mais viável economicamente, visto que para sua execução há disponibilidade de mão de obra com relativa abundância, e essa técnica utiliza materiais com maior aplicação em canteiros de obra.

A utilização de reforços a base de Polímeros reforçados com fibra de carbono, embora apresente ótimos resultados, é uma técnica que a princípio é considerada economicamente inviável para estruturas de pequeno porte, principalmente para o nordeste brasileiro, onde a mão de obra especializada ainda é escassa, e o custo do material é mais alto do que o utilizado em técnicas alternativas a essa. Vale citar ainda, que ao se utilizar em estruturas maiores, por mais caro que seja o método acima, ele apresenta maiores vantagens no que diz respeito ao menor peso acrescido à estrutura, e ao pouco tempo para execução do reforço, em comparação com os outros métodos estudados no presente trabalho.

A utilização do encamisamento surge então como o melhor método para pequenas estruturas. Entretanto, o seu emprego em estruturas de maior porte tende a acarretar o aumento das dimensões da seção transversal e do peso próprio em relação à estrutura original, o que torna mais factível o emprego de outras técnicas de reforço incluindo-se aí as que utilizam os PRFC. Outro ponto negativo para a aplicação da técnica de encamisamento parcial é que em algumas situações se torna necessária alterar as dimensões dos elementos de apoios da viga, e existem situações em que

isso apesar de possível, é, até certo ponto, inviável. Pois, por exemplo, a solução dada no caso da figura 24 deste trabalho é inconveniente no caso de pilares de divisa.

Em contrapartida, a utilização da chapa de aço segue como outra alternativa aos dois métodos. O custo estimado para essa técnica é, em geral, superior ao do encamisamento, para vigas menores, e comparável com as técnicas que envolvem o uso de PRFC para elementos maiores. Entretanto, o alto peso acrescido a estrutura e a necessidade de manutenções mais frequentes contam como pontos negativos, além ainda do fato de ser considerada por vários especialistas como uma técnica ultrapassada.

Assim, pode-se concluir que para utilização em estruturas menores a melhor opção é o encamisamento parcial da estrutura, enquanto para regiões mais desenvolvidas do país, como o sudeste brasileiro, em obras de maior porte, a utilização dos PRFC tem sido bem indicada.

Como sugestão para estudo em próximos trabalhos, tem-se:

- O estudo comparativo das técnicas de reforço abordadas neste trabalho como reforço ao cisalhamento de vigas;
- O estudo dos efeitos decorrentes do aumento de carregamento, mediante o emprego das técnicas de reforço aqui abordadas, sobre as fundações das estruturas.

3. REFERENCIAS

ACI - American Concrete Institute Committee 440. **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**, 2008.

AGUIAR, Lucas Alves de. **Análise do dimensionamento de estruturas de concreto armado com lajes nervuradas em situação de incêndio: Pórtico modelo teórico e estudo de caso na cidade de Aracaju/SE**. Monografia (Curso de engenharia Civil). Instituto Federal de Sergipe, Aracaju, 2020.

ÂNCORA, **Catálogo Técnico 2019**. Disponível em: <<http://ancora.com.br/site/portfolios/chumbador-af/>> Acesso em 23 de março. 2021.

ARAUJO, Caroline Maia. **Reforço de vigas de concreto à flexão e ao cisalhamento com tecidos de fibra de carbono**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2002.

ARCELORMITTAL. **Guia do aço**. Disponível em: <<https://brasil.arcelormittal.com.br/>> Acesso em 09 de março. 2020.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Edificações habitacionais-Desempenho**. ABNT NBR 15575, Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Forças devidas ao vento em edificações**. ABNT NBR 6123, Rio de Janeiro, 1988.

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

BASF, **Manual Técnico 2017**. Disponível em: <<https://www.master-builders-solutions.com/pt-br/products/masterbrace>> Acesso em 23 de março. 2021.

BAUTECH, **Ficha técnica 8.001**. Disponível em: <<https://bautechbrasil.com.br/>> Acesso em 23 de março. 2021.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Ancoragem e emendas de armaduras**. Notas de aula (Curso de engenharia civil), Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2018.

BORGES, Igor de Oliveira. **Estudo de reforço de vigas e lajes com compósitos de fibra de carbono colados**. Monografia (Curso de engenharia Civil), Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2016.

CAMPOS, Jhon Deivison Santos; SANTOS, Euler Wagner Freitas; CONCEIÇÃO, Rodolfo Santos da. **Análise dos recursos de uma ferramenta computacional quanto ao atendimento às prescrições normativas no projeto de estruturas de concreto armado em situação de incêndio**. In: IBRACON, 2019, Fortaleza. Anais do 61º Congresso Brasileiro de Concreto.

CÁNOVAS, M.F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. Pini, São Paulo, 1988.

CARDOSO, Renata. **Pintura para metais como proteção anticorrosiva**. Rio de Janeiro: Brt - Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas, 2013.

CHEONG, H.K., MACALEVEY, N. **Experimental Behavior of Jacketed Reinforced Concrete Beams**. ASCE Journal of Structural Engineering, v.126, N.6(Junho), p.692-699, 2000.

CLÍMACO, J. C. T. S. **Uma Análise Crítica dos Métodos de Avaliação de Aderência e do Uso de Agentes Adesivos no Reparo de Estruturas de Concreto**. XXV Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Porto Alegre, 1991.

CLÍMACO, J. C. T. S, REGAN, P. E. **Evaluation of Bond Strength Between Old and New Concrete in Structural Repairs**. Magazine of Concrete Research, N.53. p.1-14, 2001.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB). **Assessment on Concrete Structures and Design Procedures for Upgrading**. Bulletin d'Information nº 162, 1983.

FERRARI, Vladimir José; PADARATZ, Ivo José; LORIGGIO, Daniel Domingues. **Reforço à flexão em vigas de concreto armado com mantas de fibra de carbono: mecanismos de incremento de ancoragem**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

FRAGATA, Fernando de L. **Qualificação para Inspetor de Pintura Nível 1 – Módulo I: A Pintura como Técnica da Proteção Anticorrosiva**. Rio de Janeiro: Publit Soluções Editoriais, 2009.

GABARDO, Bianca Paola. **Desempenho de concreto com reforço de tecido de fibra de carbono**. Monografia (Curso de engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2019.

GIOVANAZ, Alfredo Henrique. **Análise da efetividade de métodos de reforço por encamisamento em pilares curtos de concreto**. Monografia (curso de engenharia civil), Universidade do vale do Taquari, Lajeado, 2018.

GOLIATH, Kíssila Botelho. **Comportamento de colunas curtas reforçadas com compósitos de resina geopolimérica e fibras de carbono**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, 2017.

HIGASHI, Marcos Maki Yamasaki. **Reforço em estruturas de Betão armado com chapas de aço**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.

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

MACHADO, A. de P. **Manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibra de carbono**. 120 p. 2011.

MACHADO, A. de P. **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. 282 p.1 Ed., São Paulo, 2002.

MENEZES, Lucas da Mata Rocha; SANTOS, Danilo Silva dos; MELO, Felipe Guimarães de Souza; SANTOS, Euler Wagner Freitas; CONCEIÇÃO, Rodolfo Santos da. **Estudo para Dimensionamento de Estrutura em Concreto Armado para Edificações Populares**. In: IBRACON, 2016, Belo Horizonte. Anais do 58º Congresso Brasileiro de Concreto.

NAOI, William Mititaka. **Fibra de carbono** [online]. Disponível na internet via correio eletrônico: <thayson_tra@hotmail.com> em 18 de agosto. 2020.

PERELLES, DH; MEDEIROS, MF; GARCEZ, MR. **Aplicação da análise hierárquica como ferramenta de tomada de decisão para escolha do compósito de reforço com polímeros reforçados com fibras**. Alconpat 2013, v. 3, p. 161–176.

PIANCASTELLI, E. M. **Comportamento e Desempenho do Reforço à Flexão de Vigas de Concreto Armado, Solicitado a Baixa Idade e Executado Inclusive Sob Carga**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil). UFMG, Belo Horizonte, 1997.

PIRES, E.F. **Comportamento e Desempenho do Reforço à Flexão de Lajes de Concreto Armado Através do Aumento da Seção na Região Comprimida**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil). UFMG, Belo Horizonte, MG, 2003.

PIVATTO, A.B. **Reforço estrutural à flexão para viga biapoiada de concreto armado por chapas metálicas e compósito reforçado com fibras de carbono**. Monografia (curso de engenharia Civil). Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2014.

PIMENTA, Taia Marinho. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com chapas metálicas, coladas com geopolímero, e com mantas de sisal coladas com resina epóxi.** Paraíba, 2012.

ROMERO, Diana Valéria Schwenk. **Reforço a flexão de vigas de concreto armado por meio de protensão externa.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

SANTOS, Euler Wagner Freitas. **Reforço de vigas de concreto armado a flexão por encamisamento parcial.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

SIMÕES, Maria Luisa de Faria. **Reforço a flexão de vigas de concreto armado por encamisamento parcial.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

SOUSA, Alvaro Fernando Vieira da Silva. **Reparação, reabilitação e reforço de estruturas de betão armado.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.

SOUTO FILHO, Marcello Varella. **Modelagem Numérica de Reforço Estrutural em Vigas de Concreto Armado.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

SOUZA, Denisson dos Santos; AGUIAR, Lucas Alves de; SANTOS, Euler Wagner Freitas. **Estudo do dimensionamento de estruturas em concreto armado, com lajes nervuradas, em situação de incêndio.** In: IBRACON, 2020, Florianópolis. Anais do 62º Congresso Brasileiro de Concreto.

SOUZA, V.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto.** Pini, São Paulo, 2009.

VEDACIT. **Catálogo de produtos.** Disponível em: <
<https://www.vedacit.com.br/produtos-e-solucoes/anticorrosivos/vedacit-protetor-anticorrosivo>> Acesso em 23 de março. 2021.

VIANA, Roberta David de Aquino. **Programa para dimensionamento de reforço à flexão e ao cisalhamento de vigas de concreto armado.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2004.

ZUCCHI, Fernando Luiz. **Técnicas para o reforço de elementos estruturais.** Monografia (curso de engenharia civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2015.