

REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO: CORRELAÇÃO ENTRE O SISTEMA CONVENCIONAL E SISTEMA DE FIBRA DE CARBONO

REINFORCEMENT OF CONCRETE STRUCTURES: CORRELATION BETWEEN THE CONVENTIONAL SYSTEM AND THE CARBON FIBER SYSTEM

RODRIGO AZEVEDO GONÇALVES PIRES
UNINOVE – UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO

JANE DA CUNHA CALADO
UNINOVE – UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO

JOÃO ALEXANDRE PASCHOALIN FILHO
UNINOVE – UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO

BEATRIZ LEITE DOS SANTOS
UNINOVE – UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO

Comunicação:

O XIII SINGEP foi realizado em conjunto com a 13th Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge), em formato híbrido, com sede presencial na UNINOVE - Universidade Nove de Julho, no Brasil.

REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO: CORRELAÇÃO ENTRE O SISTEMA CONVENCIONAL E SISTEMA DE FIBRA DE CARBONO

Objetivo do estudo

Comparar teoricamente os sistemas de reforço estrutural convencional e com polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) em lajes de concreto armado, identificando características, vantagens e limitações de cada técnica, visando eficiência, durabilidade e sustentabilidade construtiva.

Relevância/originalidade

O estudo é relevante por comparar de forma sistemática o reforço estrutural convencional e o com PRFC, e sua originalidade está em integrar desempenho, sustentabilidade e aplicabilidade prática, ampliando alternativas para reabilitação de estruturas de concreto.

Metodologia/abordagem

Pesquisa qualitativa, exploratória e descritiva, baseada em levantamento bibliográfico e documental, analisando estudos sobre reforço estrutural convencional e com PRFC, com comparação teórica das técnicas, materiais e resultados para identificar aspectos críticos e orientar a escolha do método mais adequado.

Principais resultados

O sistema convencional apresentou maior demanda logística, mão de obra e resíduos; o PRFC mostrou execução mais simples, menor impacto ambiental e boa durabilidade. Ambos tiveram bom desempenho estrutural, mas o PRFC destacou-se pela leveza, alta resistência e rapidez de aplicação.

Contribuições teóricas/metodológicas

Apresenta análise comparativa entre sistemas de reforço estrutural convencional e PRFC, destacando critérios técnicos, propriedades mecânicas e condições de aplicação, contribuindo para decisões de projeto mais eficientes e fundamentadas em evidências bibliográficas.

Contribuições sociais/para a gestão

Indicar soluções de reforço mais sustentáveis, rápidas e econômicas. Socialmente, reduz impactos ambientais e amplia a segurança e durabilidade das edificações, beneficiando usuários e a coletividade.

Palavras-chave: Armadura de Concreto, Fibra de Carbono, Reforço Estrutural em lajes

REINFORCEMENT OF CONCRETE STRUCTURES: CORRELATION BETWEEN THE CONVENTIONAL SYSTEM AND THE CARBON FIBER SYSTEM

Study purpose

Compare theoretically the conventional structural reinforcement systems and carbon fiber reinforced polymer (CFRP) systems in reinforced concrete slabs, identifying the characteristics, advantages, and limitations of each technique, aiming at efficiency, durability, and construction sustainability.

Relevance / originality

The study is relevant for systematically comparing conventional structural reinforcement with CFRP, and its originality lies in integrating performance, sustainability, and practical applicability, expanding alternatives for the rehabilitation of concrete structures.

Methodology / approach

Qualitative, exploratory, and descriptive research, based on bibliographic and documentary review, analyzing studies on conventional structural reinforcement and CFRP, with theoretical comparison of techniques, materials, and results to identify critical aspects and guide the choice of the most suitable method.

Main results

The conventional system demanded greater logistics, labor, and waste generation; the CFRP system offered simpler execution, lower environmental impact, and good durability. Both showed good structural performance, but CFRP stood out for its lightness, high strength, and fast application.

Theoretical / methodological contributions

It presents a comparative analysis between conventional reinforcement and CFRP systems, highlighting technical criteria, mechanical properties, and application conditions, contributing to more efficient design decisions supported by bibliographic evidence.

Social / management contributions

It indicates more sustainable, faster, and cost-effective reinforcement solutions. Socially, it reduces environmental impacts while enhancing building safety and durability, benefiting users and society as a whole.

Keywords: Concrete Armor, Carbon Fiber, Structural Reinforcement in Slabs

REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO: CORRELAÇÃO ENTRE O SISTEMA CONVENCIONAL E SISTEMA DE FIBRA DE CARBONO

1 Introdução

O reforço estrutural vem ganhando grande destaque, especialmente, pelo avanço tecnológico e o uso de equipamentos mais robustos (Pereira, 2015). Cury e Mello (2024) ressaltaram a importância de aprofundar os estudos sobre as patologias da construção e as possibilidades de reforços estruturais, por meio de pesquisas em parceria com as diversas áreas do conhecimento.

O sistema de reforços convencionais, utilizado para reforço de estruturas de concreto, compõem-se da adição de armaduras, ferragens e concreto. Soares (2024) definiu concreto armado como a união do concreto simples a um material resistente à tração, armação envolvida no concreto de tal modo que ambos resistam aos esforços solicitantes. Contudo, conforme evidenciado por Meurer (2024) o reforço estrutural composto por polímeros reforçados com fibras de carbono torna a estrutura mais resistente e capaz de suportar os esforços de tração e transmitir os esforços externos através das tensões tangenciais.

Segundo Soares (2024) é relevante discutir a contextualização das estruturas de concreto, analisar a conceituação e as peculiaridades executivas, bem como a vida útil dos sistemas de reforço estrutural, características dos materiais, etapas executivas, controle da qualidade, dificuldades executivas e condições do uso destes sistemas.

Os dois tipos de reforços foram elaborados e executados na intervenção de uma laje de concreto armado, que recebeu um carregamento não previsto anteriormente. A adição de armadura ferragens e concreto na laje é o método conhecido como convencional, sendo o mais conhecido e bastante utilizado. O outro método composto pela adição da manta de fibra de carbono (PRFC) é menos conhecido, mas vem se difundindo pela forma de manuseio e a sua execução (Soares, 2024).

Lemos (2024) afirmou que o incremento de armadura e aumento da área da seção transversal do concreto é a mais antiga técnica de reforço estrutural utilizada, tendo em vista sua semelhança com a característica da produção do concreto armado. Seu uso acompanha construções de concreto armado desde suas primeiras concepções.

A proposta desse estudo consistiu em um comparativo entre o sistema convencional e o sistema reforçado com a fibra de carbono. Buscou-se identificar as características que envolvem cada uma das técnicas e destacar suas vantagens e funcionalidades na edificação. Foram observados reforços nas vigas, onde se obteve uma armadura menor que a projetada, isso gerou resultados significativos sendo utilizado em diversos projetos estruturais de concreto armado.

2 Referencial Teórico

O concreto pode ser considerado o material mais utilizado na indústria, principalmente, no setor da construção civil. Trata-se de um material composto por uma mistura de areia, cimento, brita, água e aditivos e possui baixa resistência aos esforços de tração e alta resistência aos esforços de compressão.

Pedroza e Abdalla (2024) ressaltaram que o principal fator de deterioração das estruturas de concreto armado é a interação com o meio ambiente, pela penetração de agentes agressivos nos polos do concreto. O tamanho dos poros e microfissuras influenciará na absorção de agentes agressivos pelo concreto, comprometendo a estrutura.

Pereira (2015) destacou que a porosidade da pasta de cimento endurecida é o que influencia no transporte substâncias para o interior do concreto. As características físicas e

químicas, bem como as condições ambientais, são aspectos determinantes na deterioração das estruturas de concreto armado (Pedroza & Abdalla, 2024).

Dentre as diversas opções para modificação das propriedades e obtenção de um concreto diferenciado, apontadas por Lemos (2024), estão a “incorporação de aditivos, adições minerais, pigmentos e fibras, com técnicas de execução diferenciadas”. Segundo o autor, o concreto preparado com a incorporação desses elementos atende à demanda de uma estrutura durável e resistente às solicitações externas, mesmo na sua combinação mais desfavorável.

A adição de componentes que aumentam a durabilidade não pode comprometer as propriedades ou alterar a plasticidade da mistura. A durabilidade da estrutura, bem como o desempenho mínimo obtido estão previstos na ABNT NBR 6118:2023 – Projeto de estruturas de concreto – Procedimento – que estabelecem os procedimentos de dosagem, mistura, adensamento, acabamento, cura, desforma e manutenção na estrutura (NBR 6118, 2023).

Algumas patologias podem se manifestar na estrutura de concreto, causando fissuras, eflorescências, corrosão das armaduras, dentre outros efeitos que comprometem o desempenho exigido para utilização, portanto, para desempenho satisfatório, devem ser atendidas as condições de segurança determinadas pelos estados limites últimos de utilização da estrutura (Lemos, 2024).

Pereira (2015) apontou que, dentre os problemas patológicos mais comuns no concreto armado, são evidenciados o aparecimento de fissuras e as flechas, ocorridos em laje. Essas patologias podem ser causadas pela utilização de concreto inadequado, altura útil da laje inadequada, causando restrições no uso ou pela insuficiência na taxa de armadura, dentre outros.

Entende-se por durabilidade do concreto os requisitos necessários de manutenção da capacidade resistente, forma e aparência da estrutura quando sujeita aos carregamentos, condições ambientais e devem ser verificados: Cobrimento, Composição, Compactação e Cura (Pereira, 2015). Sob esse aspecto estão: rigidez, estabilidade, conforto térmico e acústico, resistência, dentre outros; as condições de serviço interferem diretamente na integridade, permeabilidade e durabilidade.

2.1 Concreto Armado

As técnicas construtivas em alvenaria utilizam componentes e materiais que garantem resistência na edificação, considerando as ações de tensão e compressão entre seus elementos. No sistema construtivo convencional, a combinação de aço e concreto permite que os esforços de tração sejam absorvidos pelo aço e os esforços de compressão sejam absorvidos pelo concreto (Menezes, 2024)

O concreto serve como investida para utilização de refugo de diversos materiais, não só pelo seu vasto campo de aplicação, como também pelas inúmeras possibilidades de substituição de seus componentes. Trata-se de um material de construção proveniente da mistura, em proporção adequada, de: aglomerantes, agregados e água, onde é frequente o emprego de aditivos e adições (Menezes, 2024).

Meurer (2024) definiu concreto como a associação do concreto simples com uma armadura, usualmente constituída por barras de aço. Os dois materiais devem resistir solidariamente aos esforços solicitantes. Essa solidariedade é garantida pela aderência.

Soares (2024) lembrou que o concreto possui alta resistência à compressão e baixa resistência à tração, por isso, as barras da armadura têm a função de absorver os esforços de tração que surgem nas peças submetidas à flexão ou à tração.

Concreto armado é um componente que utiliza agregados, como reforço, para suportar as cargas de compressão e de barras de aço para suportar as tensões de trações que o concreto não suportar (Cury & Mello, 2024).

Menezes (2024) destacou a importância de se fazer o reforço ao cortante, uma vez que os colapsos ocorrem subitamente, enquanto colapsos por flexão são progressivos e permitem a percepção dos danos, antes da ruptura.



Figura 1. Sistema convencional
Fonte: (Pereira, 2015).

O concreto armado surgiu como insumo de construção, na Europa, no século XIX e, somente no início do século XX, iniciaram-se as primeiras construções, no Brasil. As primeiras estruturas construídas, utilizando-se concreto armado foram no estado do Rio de Janeiro, na construção de casas, em Copacabana. A partir daí, ampliaram-se os estudos para melhor aplicação da tecnologia (Cury & Mello, 2024).

A tecnologia se desenvolveu de forma progressiva e tornou-se um dos métodos estruturais mais populares e utilizados, devido a fatores como: boa resistência à maioria dos tipos de solicitação, quando realizado o cálculo correto e adequado detalhamento das armaduras; é moldável e sua estrutura é monolítica; baixo custo dos materiais e de mão de obra; é pouco permeável à água, quando dosado corretamente e executado em boas condições de plasticidade, adensamento e cura; possui resistência significativa a choques e vibrações, efeitos térmicos, atmosféricos e a desgastes mecânicos; é mais durável que outros sistemas de construção, protege as armaduras contra corrosão, além de não requerer a utilização de mão de obra especializada, dentre outros (Soares, 2024).

O concreto tem um excelente comportamento a esforços de compressão e baixa resistência a tração. As técnicas utilizadas na execução de memoriais de cálculo facilitam e corroboram para melhorar sua aplicação nos canteiros de obras; a combinação aço e concreto é apropriada para suportar elevadas cargas de compressão e tração, entretanto, durante a execução é preciso observar o cobrimento mínimo da armadura, conforme exigências da Norma, para prevenir o processo de oxidação da estrutura (Meurer, 2024).

Lemos (2024) especificou os processos indicados em casos de reparos no concreto convencional, na qual a parte degradada é substituída pelo concreto de boa qualidade, garantindo que o novo concreto mantenha a aderência com a base.

Embora as vantagens do concreto armado sejam significativas, algumas características devem ser consideradas e atenuadas para suprir as deficiências do concreto, dentre elas destacam-se: a retração e fluência; baixa resistência à tração; baixa ductilidade; fissuração; peso próprio elevado; custo de formas para moldagem; corrosão das armaduras, etc. (Meurer, 2024).

A NBR 6118 – Projeto de estruturas de concreto — Procedimento, estabelece os requisitos básicos exigíveis para o projeto de estruturas de concreto simples, armado e protendido, excluindo aquelas em que se empregam concreto leve, pesado ou outros especiais (NBR 6118, 2023). Diversas outras normas são necessárias à elaboração e concepção do projeto estrutural, conforme especificidades de cada obra.

2.2 Sistema Convencional de Reforço Estrutural

A técnica de reforço mais comumente empregada em reforço de estrutura são as adições de armaduras e aumento da área da seção transversal do concreto, resultando em um método conhecido como convencional.

Meurer (2024) apontou alternativas para aumentar a vida útil das estruturas de concreto armado, ressaltando o uso de misturas inibidoras da corrosão, como: pintura epóxi das barras da armadura, pinturas protetoras da superfície do concreto e proteção catódica da estrutura, devendo considerar o custo e benefício, em relação a extensão da vida útil.

Quando as estruturas existentes estão expostas em ambientes agressivos ou precisam de intervenção para recuperação, é possível utilizar-se aditivos super plastificantes, com adição de cinza volante e sílica ativa e, em proteções externas do concreto, pinturas e proteção catódica da estrutura, para prolongamento da vida útil (Soares, 2024).

Lemos (2024) sugeriu o uso do concreto de alto desempenho no reforço estrutural, que resulta na adoção de espessuras menores, reduzindo alterações significativas nas dimensões dos elementos reforçados, uma vez que, ao concreto podem ser adicionadas fibras, principalmente de aço, que aumentam a ductilidade, a absorção de energia, a durabilidade (Lemos, 2024).

Conforme Meurer (2024), devem ser considerados os mecanismos de envelhecimento e deterioração da estrutura de concreto e acrescidos a estes mecanismos, outros relacionados às ações mecânicas, térmicas, impactos, deformação lenta, dentre outros.

As reações físicas e químicas que atuam diretamente na estrutura do concreto, quando em contato com o meio ambiente, podem apresentar alto nível de cloretos e sulfatos em solos nativos e cloretos em águas naturais ou ambientes com temperatura superior a 40° C e umidade relativa inferior a 90%. Outro fator está relacionado à quantidade de sais transportados pelo ar e componentes sulfurosos que, se combinados ao concreto de alta permeabilidade e cobrimentos inadequados da armadura, acarretará na deterioração precoce (Soares, 2024).

2.2.1 Materiais

As propriedades mecânicas dos materiais utilizados no reforço estrutural (resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, coeficiente de expansão, absorção de água, máxima temperatura de serviço, também respondem pelo bom desempenho e durabilidade da estrutura reforçada.

As propriedades físicas podem estar relacionadas à estrutura molecular do material, dentre elas as propriedades geométricas, propriedades químicas, peso específico, umidade, transmissão térmica, condutividade (Meurer, 2024).

O reforço da estrutura representa o aumento da área da seção transversal e envolve, além da armadura que será adicionada, materiais para garantir o correto tratamento da superfície da estrutura existente, elementos chumbadores e graute, para aumentar a seção transversal. Helenne (1992) relacionou os principais elementos utilizados para este tipo de reforço, destacam-se:

a) Barras de aço: Segundo especificações da NBR 7480:2007, na categoria do CA-50, temos a superfície nervurada e na categoria CA-25, temos a superfície lisa. As classificações dos vergalhões são determinadas, de acordo com o diâmetro da bitola e as barras utilizadas no reforço estrutural correspondem às mesmas especificações das barras utilizadas durante a construção, mantendo-se as mesmas exigências no processo de conservação.

b) Graute: Pode ser definido como um concreto pastoso, que se diferencia quanto a sua fluidez e resistência. Para determinar o graute é preciso identificar a fluidez para preencher os espaços de modo eficiente, eliminar o adensamento e atingir a alta resistência, que permite à seção da estrutura possuir menor dimensão, que em caso de concretos com menor resistência.

Em reforços convencionais, em que se amplia a seção transversal, em geral, há alta taxa de armadura e essa fluidez é imprescindível, pois permite que o reforço seja executado de maneira adequada, preenchendo os vazios entre a forma e a armadura. Com o concreto pastoso obtém-se a alta resistência nos primeiros dias. Normalmente, obras de reforço são urgentes e, em alguns casos, não é preciso aguardar pela cura completa do concreto, para dar continuidade na obra. obtendo-se, em pouco dias, a resistência necessária para a continuidade dos trabalhos.

c) Formas: As formas são desenvolvidas de acordo com o local, normalmente em madeiras, ou metálicas. Reparos que apresentem profundidade entre 2,0 e 5,0 cm, atingindo a armadura, podem ser feitos com graute de base mineral, com retração compensada e alta resistência mecânica, com cura úmida e, em geral, necessitam de montagem de formas com cachimbos e verificação da necessidade de escoramentos. A reconstituição da seção (Souza & Ripper, 1998).

Em profundidades superiores a 5,0 cm os reparos apresentam aberturas para retirada do concreto deteriorado ou contaminado, podem ser utilizados micro- concreto de retração compensada e alta resistência mecânica, com cura úmida e requerem montagem de forma, preparação do substrato e verificação da necessidade de escoramentos (Lemos, 2024).

2.2.2 Reforço com adição de armadura e aumento da seção transversal

Em reforços com adição de armadura e aumento da seção transversal, uma das dificuldades está na execução da forma em que o graute será lançado, visto que, normalmente, a superfície já está concretada.

O graute é um material altamente adensável, sendo imprescindível que as formas sejam vedadas, para que não ocorra vazamento em suas emendas e o processo de fabricação deve ser acompanhado, no canteiro, para prevenir ocorrências durante a execução.

2.2.3 Condições e aspectos do uso do sistema convencional

Para realizar a técnica de reforço estrutural, em um sistema convencional, é preciso considerar alguns itens, que podem ocasionar entraves na sua aplicação ou no posicionamento de formas e armaduras, durante o processo de montagem e inviabilizar a utilização deste método nas estruturas que estão em pleno funcionamento, como: rapidez na execução; ausência de entulho; baixa emissão de ruído; ausência de pó; mão de obra reduzida; dimensões de portas; ausência de guias; capacidade de carga de elevadores (Lemos, 2024).

Em situações na qual há necessidade de aplicação de solda no local, o inconveniente deve ser eliminado ou minimizado ao máximo, dependendo das características do local onde a peça será implementada, além da exigência de adotar-se algumas medidas preventivas, como: observar o peso específico do material e dobrar a atenção com serviço de soldas, utilizando-se profissional qualificado e inspeção regular.

Dentre os fatores que requerem especial atenção, podem ser relacionados: escoramento (devido às vibrações); geração de entulhos, devido ao material escarificado, restos de formas e aço; ruído, devido ao corte de formas e aço; produção de pó, devido ao corte de formas e aço; utilização de material, que deve ser armazenada adequadamente (Lemos, 2024).

2.3 Compósito de Fibra de Carbono

Surgiram novas tecnologias para o reforço estrutural, dentre eles, os materiais compostos, formados pela combinação de dois ou mais materiais, com características mecânicas diferentes, porém muito eficientes. Há mais de 30 anos esses compósitos vêm sendo utilizados, principalmente, na indústria aeronáutica; o campo de aplicação estendeu-se para a indústria naval, indústria automobilística, telecomunicações, etc.

O compósito é o resultado da ligação íntima entre dois ou mais materiais com propriedades diferentes para a obtenção de um novo material eficaz e multifase, com melhoria nas performances individuais de cada um (Mehta, 1997).

Soares (2024) salientou que a resistência ao esforço cortante aumenta, quando envolvida com fibra de carbono, porém, a quantidade e tipo de fibra utilizada, elementos como as cargas e os apoios e a resistência do concreto interferem na resistência final. Os reforços de fibra de carbono são similares ao aço convencional dos estribos, alcançando o estado limite último para o esforço cortante.



Figura 2. Sistema de compósitos de fibra de carbono
Fonte: (Pereira, 2015).

O reforço estrutural com utilização de polímeros é recente e demanda ensaios adicionais e suporte com dados analíticos, para que seja consolidada e ampliada a sua utilização. Photiou, Hollaway e Chryssanthopoulos (2004) relataram os primeiros ensaios, para utilização dos materiais compostos, como reforço externo em elementos de concreto armado, iniciados nos anos 1980, no laboratório suíço de materiais na cidade de Zürich, por iniciativa do Professor Urs. Meier.

A intenção das investigações era usar compostos, levando em consideração sua fácil trabalhabilidade e leveza. Dentre os diferentes tipos de fibras (carbono, vidro, aramida), que podiam servir para este uso, os pesquisadores optaram por utilizar as fibras de carbono por conter um fator de elasticidade semelhante ao do concreto armado. Tanto as fibras de vidro, quanto as de aramida, fornecem propriedades muito inferiores e as fibras de vidro não resistem ao ataque de materiais alcalinos; em relação às matrizes, a mais compatível com as fibras de carbono é a resina epóxi (Kataota; Machado & Bittencourt, 2010).

Ripper (1998) apontou vantagens na utilização de fibra de carbono, pois são rígidas, leves, bom comportamento na atuação de cargas cíclicas e fadiga, além da resistência na exposição às substâncias químicas, contudo, pela boa condutividade elétrica podem evoluir para a corrosão galvânica, quando em contato com metais. A resina epóxi é a que melhor se aglutina com as fibras e possui maior aderência a elas, além de apresentar cura sem retração, característica importante para a finalidade que lhe será dada.

Os laboratórios do *Swiss Federal Materials and Research Laboratories* (EMPA), dentre outros institutos de nível internacional, inovaram as pesquisas com materiais compostos e publicaram uma série de boletins com os resultados obtidos. O material passou a ser utilizado

na construção civil japonesa, devido a necessidade de estruturas mais fortes e resistentes, devido a suscetibilidade dos países asiáticos sofrerem abalos sísmicos.

No Brasil, esse polímero foi usado em meados de 1988, para reforçar estrutura viaduto Santa Teresa, desde então, o material vem sendo pesquisado para melhor aplicação na construção. Conforme Pedroza e Abdalla (2024), o encobrimento da estrutura utilizando os Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC) é utilizado em construções de concreto armado, pois muitas das suas aplicações foram utilizadas para restaurações de patologias em concreto armado. Pereira (2015) destacou que o uso de fibras de carbono aumenta a resistência das vigas, não sendo necessário um sistema especial de ancoragem.

2.3.1. Reforço Sistema PRFC - polímeros reforçados com fibras de carbono

As Fibras de Carbono PRFC – polímeros reforçados com fibras de carbono – vêm sendo utilizadas em reforços estruturais, pelo fácil manuseio, alta performance, por serem um material com características mecânicas muito sólidas e com diversas configurações de resistências, muitas vezes, superando a resistência do aço (Pedroza & Abdalla, 2024).

Lemos (2024) salientou que a produção dessas fibras tem como característica a exposição ao ar das fibras e exposição às altas temperaturas, quanto maior a exposição à temperatura, maior será o módulo de elasticidade obtido no material. A maior característica do polímero de fibra de Carbono são baixo peso, alta resistência e grande fator de elasticidade do material e principalmente sua grande capacidade a resistência ao fogo por ser uma superfície densa e compacta que acaba refletindo o calor de forma eficiente (Pedroza & Abdalla, 2024).

2.3.2. Materiais Utilizados

- a) Primer: é um revestimento pré-dosado, polimérico e mono componente, indicado para impermeabilização prevenção da corrosão do aço, aumentando a aderência para facilitar os reparos estruturais (Viapol, 2019).
- b) Adesivos: é um adesivo de epóxi, de viscosidade controlada, indicado para colagem de concreto, aço e outros (Viapol, 2019).
- c) Sistemas de Injeção: É um adesivo à base epóxi, de baixa viscosidade e não contém de solventes, para injeção de trincas e fissuras estruturais (Viapol, 2019).
- d) Argamassas: É um, composto feito de cimento *Portland*, areia selecionada e aditivos especiais, pronta para o uso, obtém-se um grante com elevada resistência mecânica e fluidez (Viapol, 2019).
- e) Reforço Estrutural (Fibra) Manta: É uma manta de polímero fibra de carbono, para utilização no reforço estrutural, com filamentos posicionados em direção única. Sua aplicação é realizada com resinas especiais de epóxi e moldada *in Loco*, para melhor aderência (Viapol, 2019).

2.3.3. Reforço com adição de PRFC

f) Reforço de Lajes a Flexão: Recomenda-se o uso de laminados retos e o tecido em alguns tipos de reforço de vigas e lajes submetidas à flexão. A boa aplicação da resina que une os laminados a superfície do concreto é essencial para que o reforço não descole, enquanto ele age na zona de tração, além de ser responsável por transmitir o esforço cortante de um material para o outro Meurer (2024).

No caso das lajes os esforços de flexão podem ser efetuados com as mantas de PRFC, podendo ser executados nas duas direções da laje, conforme apresentado na Figura 3.



Figura 3. Representação esquemática em laje de concreto
Fonte: (Asope, 2019).

A Figura 4 mostra como ficará a laje de concreto com o reforço de PRFC, após a conclusão do serviço.



Figura 4. Foto do reforço com PRFC, em laje de concreto
Fonte: (Asope, 2019).

Deve ser aplicada a manta, para o esforço de flexão e, após, os outros esforços de corte e confinamento. Essa sequência de execução garante ao esforço de flexão e corte, a condição de “colagem crítica”, que é a aderência íntima entre o concreto e a manta de PRFC para o esforço por confinamento, obtendo-se a condição denominada “contato íntimo”, onde a aderência entre a manta de PRFC e o concreto não são obrigatórias (Viapol, 2019).

2.3.4. Condições do uso do sistema PRFC

A técnica de reforço estrutural, utilizando o sistema PRFC, possibilita rapidez na execução; ausência de entulho (apenas no local reparo); baixa emissão de ruído; ausência de pó; mão de obra reduzida. Podem ocorrer inconvenientes na aplicação das técnicas de reforço e comprometer a estabilidade da estrutura, daí a importância de analisar a Técnica do local a ser reparado e observar se o material utilizado atenderá aos requisitos técnicos estipulados.

3 Metodologia

Esse estudo caracteriza-se como qualitativo e, conforme descrito por Creswell (2014), utiliza-se de materiais e métodos diversos, para análise dos fenômenos em visão ampla, possibilitando adotar uma ou mais estratégias de investigação, como guia para o estudo.

Martins e Theóphilo (2009) sugeriram o uso da técnica de avaliação qualitativa para entender a interação de elementos relacionados ao objeto de estudo. O caráter exploratório e descritivo da pesquisa referem-se à representação da perspectiva do participante e a forma de indução na análise dos dados, uma vez que se busca o entendimento do fenômeno como um todo, na sua complexidade (Godoy, 1995).

A pesquisa envolveu levantamento bibliográfico e pesquisa documental para sua realização e, conforme Gil (2010), trata-se de um instrumento de apoio para a pesquisa e tem como objetivo auxiliar a interpretação e análise de fenômenos. A pesquisa documental e descritiva tem como objetivo analisar e compreender documentos escritos ou verbais que leve à compreensão de uma determinada ação (Martins & Theóphilo, 2009).

Inicialmente, realizou-se uma pesquisa bibliográfica nas bases de dados *Web of Science*, *Scopus* e *Google Acadêmico*, com foco nos temas referentes às técnicas de reforços estrutural, às principais características dos materiais compostos, suas propriedades físicas, mecânicas e as principais configurações dos sistemas de reforços com PRFC.

O levantamento bibliográfico foi dividido em duas etapas, sendo a primeira seção uma abordagem sobre o sistema de concreto convencional, utilizado nas estruturas das construções e a segunda seção a abordagem sobre o sistema de fibra carbono, como reforço estrutural.

Foram revisados os trabalhos mais relevantes existentes na literatura, que tiveram como objetivo análise de técnicas de reforços. Foram expostos os critérios para dimensionamento de reforço ao cisalhamento com PRFC segundo códigos normativos do *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures* - ACI 440 (2004), que estabelece os critérios e recomendações para construção e reforço de estruturas de concreto, utilizando-se materiais compósitos FRP, ligados externamente, para fortalecer as estruturas de concreto. O sistema de fibras, para reforço em estruturas de concreto, são uma alternativa ao reforço tradicional, como aço, colagem de placas, ampliação de seções e pós dimensionamento, com uma técnica de fortalecimento da estrutura leve, fácil de instalar.

Foram selecionados dois trabalhos para comparação entre os sistemas, a saber: i) “Comportamento e Desempenho do Reforço à Flexão de Lajes de Concreto Armado através do Aumento da Seção na Região Comprimida” Soares (2024) e ii) “Estudo Experimental de Sistemas de Reforço ao Cisalhamento em vigas de Concreto Armado, utilizando-se Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC)” (Meurer, 2024).

O estudo (1) observou a aderência, comportamento, desempenho e eficiência do reforço à flexão de lajes de concreto armadas em uma só direção, com o aumento da seção de concreto na região comprimida, solicitado poucos dias após a sua execução. A aplicabilidade das disposições da Norma NBR-6118, de 2014.

O estudo (2) observou o comportamento de materiais compósitos de PRFC em sua aplicação como material estrutural de reforço e recuperação em vigas de concreto armado, submetidas ao esforço cortante. Os Compósitos de Fibra de Carbono, para utilização em concreto armado são feixes de fibras contínuas, na forma de fios, espalhados sobre um adesivo de epóxi, que faz a ligação entre os elementos do sistema. São pré-fabricados, e podem ser comercializados na forma de barras ou grelhas para armadura. Possuem forma, tamanho e rigidez específicos, para serem colados na superfície a ser reforçada.

A análise bibliográfica, proposta nesse trabalho, consistiu na comparação teórica das técnicas de reforço estrutural, em laje de concreto, com o uso de fibras de carbono em relação ao método convencional de reforço estrutural e posterior identificação dos aspectos mais relevantes, em cada trabalho analisado, para que as decisões sobre qual método utilizar, sejam tomadas de maneira eficaz.

Na sequência, foram apresentadas as discussões e avaliações sobre o comportamento do concreto armado que foram reforçadas ao cisalhamento com materiais compostos de fibras de carbono. Obtidas as conclusões finais, a partir da experiência em decorrência deste estudo.

4 Resultados

4.1 Análise do sistema de vigas reforçadas com PRFC, no estudo (i)

O trabalho desenvolvido por Soares (2024), para comparação entre os sistemas de vigas reforçadas com PRFC, denominado (i), apresentou o comportamento de materiais compósitos de PRFC em sua aplicação como material estrutural de reforço e recuperação em vigas de concreto armado submetidas ao esforço cortante. O estado atual do conhecimento apresentado, relacionado à introdução de diferentes modelos conceituais e de dimensionamento de reforços ao cisalhamento com sistemas de PRFC, sistemas com laminados em tiras, laminados em L, laminados embutidos no concreto e faixas de tecido de PRFC.

Em vigas com armadura transversal convencional, reforçadas ao cisalhamento com PRFC, foi analisada a diferença da posição de colagem externa das lâminas de reforço, sobre ou entre os estribos internos. A literatura específica nada menciona sobre este assunto.

Para o programa experimental, os protótipos foram reunidos em cinco séries: a primeira série foi constituída por vigas com sistemas de reforços em laminados que foram embutidos na superfície do concreto; para a segunda série foram utilizados protótipos reforçados com laminados inseridos e uma faixa adicional de laminado colada na região inferior das faces das vigas; a terceira série de vigas continha protótipos com sistemas de reforços com sistemas de laminados colados externamente nas laterais das vigas, na superfície do concreto e situavam-se em duas posições nas faces do concreto, entre ou sobre os estribos de aço internos; na quarta série foram utilizados laminados em forma de L, colados em três faces das vigas, nas mesmas posições que a série anterior.

Algumas utilizações dos sistemas de reforço em PRFC na construção civil para o reforço em vigas, lajes, paredes, pilares, chaminés, reservatórios, silos, tanques, túneis e outros elementos estruturais, sujeitos à deterioração, acréscimo nos carregamentos previstos ou deformações excessivas, causadas por mudança de utilização, erros de projeto ou construção, alteração das normas, reabilitação após abalos sísmicos ou após incêndio.

Quando aplicado em vigas de concreto, o sistema em PRFC pode reforçar à flexão, ao cisalhamento e à torção. O reforço aumenta a resistência à flexão e à compressão por confinamento, quando aplicado em pilares. O sistema de reforço com fibras de carbono é ideal em aplicações para carregamento contínuo. Com o sistema de reforço em PRFC aplicado externamente nas lajes, orientado em uma ou duas direções, as cargas sobre as lajes podem ser aumentadas e as deformações podem ser controladas, a aplicação de fibras ao longo da face interior da laje melhora tanto sua capacidade de carga como também diminui a sua deformação permitindo que esta absorva maiores momentos positivos.

4.2 Análise do sistema de vigas reforçadas com PRFC, no estudo (ii)

O trabalho desenvolvido por Meurer (2024), para comparação entre os sistemas de vigas reforçadas com PRFC, denominado (ii), nesse estudo, apresentou o comportamento de compósitos de PRFC, em sua aplicação estrutural de reforço e recuperação em vigas de concreto armado submetidas ao esforço cortante, sistemas com laminados em tiras, laminados em L, laminados embutidos no concreto e faixas de tecido de PRFC.

A primeira série foi constituída por vigas com sistemas de reforços em laminados, que foram embutidos na superfície do concreto. Na segunda série foram utilizados protótipos reforçados com laminados inseridos e uma faixa adicional de laminado, colada na região inferior das faces das vigas. A terceira série de vigas continha protótipos com sistemas de reforços e sistemas de laminados colados externamente nas laterais das vigas, na superfície do

concreto e situavam-se em duas posições, nas faces do concreto, entre ou sobre os estribos de aço internos. Na quarta série foram utilizados laminados em forma de L, colados em três faces das vigas, nas mesmas posições que a série anterior. Na última série foram analisados sistemas de reforços compostos por tiras de tecido dispostos a 90^0 e a 45^0 .

Os resultados obtidos nos ensaios foram interpretados, discutidos e avaliados. Estes resultados indicaram a viabilidade das técnicas utilizadas em vigas de concreto armado, que foram reforçadas ao cisalhamento, com compósitos de fibras de carbono e mostraram que a técnica por inserção de laminados foi a mais eficaz. O reforço com PRFC aumentou a resistência à flexão e à compressão por confinamento, quando aplicado em pilares. O sistema de reforço com fibras de carbono é ideal em aplicações para carregamento contínuo.

4.3 Propriedades Mecânicas do Sistema, nos estudos (i) e (ii)

Tração: a caracterização elástica da matriz empregada nos modelos matemáticos de previsão do comportamento à tração dos compósitos de PRF, requer conhecimento de indicadores elásticos, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, módulo de compressibilidade e indicadores associados à ruína do material: resistência última e extensão de ruptura.

Segundo o estudo de Soares (2024), estes indicadores devem ser avaliados, segundo o princípio dos materiais anisotrópicos e as direções longitudinal e transversal do produto compósito. Os materiais de PRF exibem um comportamento típico linear elástico e sem plastificação, próximo da ruína, quando tracionados. Tal característica apresenta falha quanto à ductilidade das estruturas de concreto, sobretudo, em relação à resposta dinâmica dessas estruturas, perante ações sísmicas. Soares (2024) afirmou que, contrariamente ao que acontece com a resistência à tração, o módulo de elasticidade é, geralmente, inferior ao do aço, particularmente quando se envolvem reforços com fibra de vidro.

Compressão: os compósitos podem ser utilizados em zonas comprimidas de estruturas como vigas, lajes e pilares. A caracterização das propriedades à compressão é semelhante às da tração, mas os seus valores são significativamente reduzidos, quando comparados com os equivalentes à tração, a ruptura à compressão de um compósito reforçado unidirecionalmente pode resultar da microinstabilidade das fibras ou da divisão transversal da matriz.

Cisalhamento e Torção: as propriedades que controlam o comportamento dos PRF sujeitos a esforços de torção ou cortante, são os característicos módulo de distorção e a resistência ao cisalhamento, que apresentam valores inferiores, em relação ao aço utilizado no concreto armado, devido ao forte condicionamento da matriz do compósito.

A resistência ao cisalhamento dos produtos compósitos mais utilizados, segundo Soares (2024) e Meurer (2024), em geral, é bastante baixa. Assim, uma barra ou uma chapa de PRF pode ser facilmente serradas, segundo a direção perpendicular ao eixo principal longitudinal. Quando for necessário contribuir para a resistência ao cisalhamento de um elemento estrutural, é adequado orientar as fibras no produto, de modo a trabalharem axialmente, segundo a direção do esforço de cisalhamento no elemento em causa.

Soares (2024) e Meurer (2024) observaram que os sistemas PRF têm demonstrado incrementar a resistência ao esforço cortante em vigas e pilares de concreto mediante o envolvimento total ou parcial dos elementos, incrementando a resistência ao cisalhamento pode se ter como resultados o colapso por flexão, o qual é de natureza relativamente mais dúctil em comparação com o colapso devido à força cortante. A viga reforçada à flexão com laminados unidirecionais e ao cisalhamento com laminados dobrados na forma de L.

4.4 Tipos de rupturas, nos estudos (i) e (ii)

Ruptura força cortante-compressão: ruptura de peças super armadas transversalmente, nas quais ocorre esmagamento do concreto das bielas, antes que a armadura transversal possa entrar em escoamento. A ruptura é frágil e não há aviso prévio; a segurança é garantida desde que a tensão tangencial de referência não extrapole a tensão última;

Ruptura força cortante-tração: ruptura que acontece em peças sub armadas transversalmente, aquelas cuja armadura transversal atinge o escoamento. Ocorrem grandes deformações na armadura transversal e fissuração excessiva. A segurança desse tipo de ruptura é garantida pela armadura transversal em quantidade adequada;

Ruptura força cortante-flexão: acontece quando as fissuras diagonais de cisalhamento cortam uma parte do banzo comprimido da peça. Com a espessura do banzo diminuída pode ocorrer o esmagamento do concreto. Geralmente, a seção de ruptura está localizada nas proximidades de elevadas forças concentradas. Garante-se a segurança por meio de dimensionamento e detalhamento adequados da viga à flexão;

Ruptura por flexão da armadura longitudinal: ocorre por motivos de deficiência da armadura longitudinal de tração, os quais impedem o funcionamento como treliça. O que garante a segurança contra esse tipo de ruptura é a atenção aos critérios de arranjo das armaduras, em especial no que se refere ao espaçamento e à ancoragem dos estribos.

Em decorrência de uma inadequada ancoragem da armadura longitudinal, pode ocorrer a ruptura por fendilhamento do concreto. Em caso de não haver compressão do concreto transversalmente à armadura, no trecho de ancoragem, suficiente para impedir a fissuração do concreto, deve-se fazer uma armadura de costura, conforme indicado pela NBR 6118.

Em virtude de possíveis rupturas decorrentes das forças cortantes acarretarem o colapso não avisado da estrutura, deve-se garantir no dimensionamento que as solicitações tangenciais não sejam condicionantes da ruína. Como princípio fundamental de segurança, adota-se que os elementos estruturais sejam projetados de tal forma que, na eventualidade de sobrevir à ruína, essa decorra dos efeitos de solicitações normais ou de flexão (NBR 6118, 2023).

5 Análise e discussão dos resultados

A utilização de materiais compósitos de PRFC no reforço estrutural de vigas de concreto armado pode alterar drasticamente seu comportamento estrutural, como o modo de colapso. A ruptura frágil, característica do colapso por cisalhamento, pode ser substituída por ruptura dúctil, característica do colapso por flexão.

Na avaliação das cargas, deslocamentos e modos de ruptura, a viga referência sofreu uma ruptura brusca, típica em peças sub- armadas transversalmente. Após o desenvolvimento de pequenas fissuras de flexão e cisalhamento ocorreu a abertura excessiva de uma fissura de cisalhamento no vão de cisalhamento. Aos 66,50 kN a armadura transversal atingiu o escoamento. O colapso ocorreu aos 77,71 kN e o deslocamento obtido sob a carga aplicada foi de 1,11 cm.

As vigas que foram reforçadas com o laminado embutido no sentido da espessura da lâmina tiveram excelente desempenho, em termos de incremento de carga e aumento de ductilidade. Todas as vigas ensaiadas apresentaram desempenho semelhante, não havendo descolamento de nenhuma lâmina e os colapsos ocorreram por flexão. Em termos de

ductilidade, o sistema que utilizou os laminados embutidos no sentido da espessura da lâmina de reforço atingiu 538,74% de acréscimo, em relação à viga testemunho.

As vigas reforçadas com laminados inseridos no concreto de recobrimento no sentido da largura do laminado não tiveram desempenho semelhante. O incremento de carga foi menor e a ductilidade teve um incremento menor com acréscimo máximo de 229,73%. Pode-se destacar que somente uma das vigas rompeu por cisalhamento e a ruptura por flexão foi dominante cumprindo um dos objetivos do reforço ao cisalhamento que é evitar a ruptura frágil.

O sistema de reforço foi composto por laminados embutidos na largura e uma faixa adicional, compressão excessiva na parte superior da viga e tração excessiva na parte inferior, ocorrendo a ruptura de estribos e, apesar das vigas apresentarem razoável aumento de carga e baixo incremento de deslocamento, os rompimentos ocorreram na maioria, por cisalhamento.

Provavelmente, o trecho fora da faixa tenha induzido ao aumento de tensões que provocaram os rompimentos. Durante os ensaios, ocorreu na viga V12 descolamento da primeira lâmina próxima à carga aplicada. Na viga V13, quando esta atingiu 103,57 kN, a faixa adicional descolou-se e em seguida soltaram-se a primeira e segunda lâmina, rompendo o concreto e um estribo. A viga V14 rompeu-se por flexão, mas ocorreu desprendimento da faixa adicional e a viga V15 apresentou o mesmo tipo de rompimento da viga V13.

As vigas do grupo que utilizou como sistema de reforço laminados colados nas faces das vigas apresentaram comportamento irregular por apresentar somente uma opção de ancoragem. Assim, o modo de ruptura ficou condicionado ao local onde a fissura crítica cruza a lâmina e, quando isso ocorre em uma região não ancorada, ocorre a ruptura frágil.

As vigas V16, V17, V18, V23, V24, V25, V26 e V30 tiveram um modo de ruptura frágil ocasionado pelo descolamento de faixas de laminado, no vão de cisalhamento, com as cargas ainda baixas, em torno de 50kN. Esse fato ocasionou a abertura excessiva de uma fissura de cisalhamento e a formação de pequenas fissuras de flexão e cisalhamento ao longo da viga, ocorrendo também o rompimento da armadura transversal.

As demais vigas apresentaram ruptura dúctil, pois se romperam por fissuras de flexão apresentando ainda alta ductilidade. A viga V35 atingiu um acréscimo de deslocamento 474% maior que o da viga de referência. O estudo de Soares (2024) apontou que a viga V16, quando ensaiada, iniciou o processo de fissuração aos 55,40 kN. Aos 87,50 kN a segunda lâmina desprende-se iniciando a abertura de uma grande fissura de cisalhamento que levou a viga ao colapso. Na viga V18 aos 86,65 kN houve descolamento da segunda lâmina iniciando-se assim o colapso. Ocorreu a abertura de uma grande fissura de cisalhamento e compressão excessiva do concreto na parte superior da viga.

As vigas do grupo que foram reforçadas com o laminado em L, posicionados sobre os estribos, romperam por flexão, onde a região de tração atingiu o seu máximo e apresentou pequenas fissuras de cisalhamento e flexão ao longo da viga. Nessas vigas, a carga residual do valor próximo da carga máxima correspondente foi mantida até flechas elevadas. Os resultados foram mais uniformes, o que pode significar que o processo de desprendimento das lâminas iniciou no banzo inferior, fissurado por flexão e cisalhamento. Entretanto, as vigas V32 e V33 que possuíam os laminados colados nas faces das vigas sobre os estribos, romperam quando se formou a fissura diagonal de cisalhamento que descolou a segunda lâmina.

Os sistemas de reforços com laminados garantiram aumento em torno de 50% da capacidade de carga das vigas, mas o melhor desempenho dos laminados é mais notório em termos de ductilidade. As vigas que não tiveram descolamento do sistema de reforço atingiram deslocamentos superiores entre 300% e 470%, quando comparado à viga referência. O sistema de reforço que utilizou faixas de tecido de PRFC apresentou desempenho mais uniforme. A pequena variabilidade nos resultados dos protótipos ensaiados pode ser atribuída à condição de ancoragem mais eficiente.

Observando-se os dados apresentados, pode-se concluir que: i) o critério proposto pela fib, apresentou resultado mais próximo dos experimentais, com a média da razão entre eles 8,30% acima da ideal e com baixo coeficiente de variação; ii) o critério de projeto proposto pelo ACI (2004) mostrou-se mais conservador, com a média da razão entre os resultados experimentais e teóricos de 45,82 %, acima do ideal.

Na comparação dos valores analíticos com o valor experimental para o tecido colado em envolvimento total, inferiu-se que: i) o critério proposto pelo ACI (2004), apresentou resultado mais próximo dos experimentais, com a média da razão entre eles de 40,54 % para as tiras de tecido coladas a 90° e 8,26 % para as tiras de tecido coladas a 45°, acima da ideal, e apresentou baixo coeficiente de variação; ii) o critério proposto pela fib mostrou-se mais conservador, com a média da razão entre os resultados experimentais e teóricos de 62,75 % para as tiras de tecido coladas a 90° e 50,64 % para as tiras coladas a 45°, acima do ideal.

Os valores analíticos com o valor experimental para lâminas embutidas no sentido da sua largura, apontou que: i) o critério proposto pelo fib, apresentou resultado mais próximo dos experimentais, com a média da razão de 22,78 % acima da ideal e com baixo coeficiente de variação; ii) o critério de projeto proposto pelo ACI (2004) mostrou-se mais conservador, com a média da razão entre os resultados experimentais e teóricos de 40,04 % acima do ideal.

Para os laminados colados em U, para fins de comparação analítica, foram utilizadas três prescrições normativas. O dimensionamento preliminar proposto pelo EMPA, através de um projeto de investigações de três anos, baseia-se em ensaios prévios e não pode ser considerado como definitivo, devendo ser utilizado com precaução, levando em conta os fatores que influenciam a capacidade resistente ao cisalhamento, em estruturas de concreto armado.

Observando-se os dos valores analíticos com o valor experimental para laminados em U, i) o critério proposto pelo ACI (2004) apresentou resultado mais próximo dos experimentais, com a média da razão entre eles de 3,74 % acima da ideal e com baixo coeficiente de variação; ii) o critério de projeto proposto pela fib mostrou-se mais conservador, com a média da razão entre os resultados experimentais e teóricos de 27,34 % acima do ideal; iii) O critério do EMPA apresentou resultados extremamente distantes dos valores encontrados experimentalmente.

Os laminados inseridos no concreto de recobrimento, segundo De Lorenzis (2002), condicionam a contribuição do PRFC para resistência ao esforço cortante (V_f) de uma determinada seção de concreto armado, reforçada ao cisalhamento laminados de PRFC a dois fatores: i) a resistência da ligação colada (contribuição do PRFC para o reforço nessas condições); ii) pela limitação do alongamento máximo do PRFC a 4 %.

Analisando-se os resultados apresentados, pode-se concluir que o critério proposto por De Lorenzis (2002) apresentou resultado próximo aos experimentais. A média da razão entre eles é 14,57 % acima do ideal, mostrando-se conservador. Os valores experimentais indicaram um baixo coeficiente de variação.

No sistema convencional, o material utilizado é o concreto armado, composto por: areia, brita, cimento, água e ferragens, que deve apresentar resistência aos reforços solicitantes. O sistema de PRFC é composto por polímeros de fibra de carbono, primer e resina cola.

Conforme objetivos deste estudo, definiu-se os aspectos críticos do sistema de reforço estrutural convencional e do sistema PRFC. Foi possível destacar quatro aspectos relevantes, sendo: materiais, composição, comportamento e resultados. Ambos os sistemas apresentaram bom desempenho e durabilidade, em suas propriedades mecânicas e físicas, frente a ações do meio-ambiente. A definição correta das forças atuantes, no momento da elaboração do projeto, é essencial no comportamento da estrutura.

De modo geral, as estruturas com reforço de fibras de carbono apresentam resistência e módulo de elasticidade superior, maior resistência à fadiga, resistência à umidade e boa resistência à corrosão.

Considerações Finais

Os sistemas que utilizaram laminados colados nas laterais e lâminas embutidas no sentido da sua largura, apresentaram maior desvio padrão em relação aos valores da capacidade resistente total, mostrando variabilidade considerável entre os resultados experimentais, mesmo utilizando-se estratégias para aumentar a aderência entre as lâminas e o concreto, uma vez que o problema encontra-se na falta de ancoragem e esses sistemas seriam os menos recomendados para fins práticos.

O sistema que utilizou tecido colado em envolvimento total, demonstrou menor variabilidade entre valores da capacidade resistente total, indicada pelo baixo desvio padrão. Entretanto, apresenta problemas na execução, pois para envolver completamente uma viga seria necessário abrir fendas nas lajes, o que torna este sistema na prática, desvantajoso.

O sistema que utilizou laminado colado em U com transposição apresentou os valores dos resultados experimentais menores que os teóricos, sendo que, o critério proposto pelo ACI (2004) foi o que chegou mais próximo. Esse sistema garantiu constância e eficácia nos resultados e ofereceu incrementos de carga e de deslocamento para uma viga V33, que teve uma lâmina descolada e possuía uma fissura diagonal de cisalhamento. O sistema que utilizou laminados inseridos no concreto de recobrimento apresentou resultados experimentais próximos dos teóricos. Verificou-se nos ensaios que este sistema de reforço garantia segurança eficiência e economia. Destaca-se ainda a sua facilidade de execução.

Este trabalho cumpriu a proposta de apresentar a análise teórica do sistema de reforço estrutural convencional e do sistema de reforço PRFC, apresentados em dois estudos distintos. Em pesquisas futuras, sugere-se a análise das tensões por meio de ensaios, para comprovação prática da resistência estrutural dos dois sistemas.

Referências

- American Concrete Institute - ACI 440. (2004). *Guide the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. ACI Committee 440.
- Arcelormittal. (2019). *Determinação dos Diâmetros das Barras CA25 e CA50*. Recuperado em: 2 de maio de 2024, de: <http://longos.arcelormittal.com/pdf/produtos/construcao-civil/outros/manual-fabricacao-ca-50>.
- Asope Engenharia. Reforço estrutural com fibra de carbono. (2019). Recuperado em: 25 de maio de 2025, de: <https://www.asope.com.br/single-post/2018/01/23/Veja-08-motivos-para-optimar-pelo-reforco-estrutural-com-fibra-de-carbono>.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas [ABNT] (2007). NBR 7480 – Aço para Concreto Armado – Procedimento. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas [ABNT] (2023). NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro.
- Creswell, J. W. (2014). *Investigação Qualitativa e Projeto de Pesquisa-: Escolhendo entre Cinco Abordagens*. Penso Editora.
- Cury, P. F., & Mello, I. (2024). Reabilitação de estruturas de concreto armado: desafios e soluções. *Gestão e Gerenciamento*, (30).

- De Lorenzis, L.; Nanni, A. (2002). Bond between near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods and concrete in structural strengthening. *ACI structural Journal*, v.99, n.2, p.123-132.
- Gil, A. C. (2010). Como elaborar projetos de pesquisa. *São Paulo: Atlas*, v.5, n.61, p. 16-17.
- Helenne, P. R. L. (1992). Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto – *Projeto de divulgação tecnológica – Fosroc/Pini*, 1992.
- Kataota, L. T.; Machado, M. A. S; Bittencourt, T. N. (2010). Análise Numérica da Transferência de Carga do Concreto para a Armadura em Pilares de Concreto Armado Devida à Fluência e Retração. In: *Congresso Brasileiro de Concreto*.
- Lemos, B. L. D. S. (2024). Avaliação da capacidade de carga de fundações diretas sobre camada suporte de blocos de rocha compactados.
- Martins, G. A.; Theóphilo, C. R. (2009). Metodologia da investigação científica para ciências sociais aplicadas. *São Paulo: Atlas*.
- Mehta, K. P. (1997). Durability – Critical Issues for the Future. *Concrete International. The Magazine of the American Concrete Institute, Farmington Hills*, v.19, n. 7, p. 27-33.
- Menezes, C. M. (2024). Estudo da ligação de nós de treliça de madeira com fibra de carbono.
- Meurer, L. (2024). Desenvolvimento de compósitos de concreto autoadensável reforçados com telas em fibra de carbono.
- Pedroza, R. V., & Abdalla, A. M. W. (2024). Utilização de compostos de fibra de carbono em reforços de estrutura de concreto armado. *Revista Tecnológica da FATEC*, 15(1).
- Pereira, C. (2015). O que é Concreto Armado? Escola Engenharia. Recuperado em: 9 de junho de 2025, de: <https://www.escolaengenharia.com.br/concreto-armado/>
- Photiou, N.; Hollaway, L. C.; Chryssanthopoulos, M. K. (2004). Strengthening of an artificially degraded steel beam utilising a carbon/glass composite system. In: *Advanced Polymer Composites for Structural Applications in Construction*. Woodhead Publishing, p. 274-283.
- Ripper, T.; Souza, V. C. M. (1998). Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto. 1 ed. *São Paulo: Ed. Pini*, 255 p.
- Soares, G. L. (2024). Alvenaria estrutural: estudo de caso avaliando divergências entre execução da obra e normas.
- Viapol. (2019). Manual de fibra de carbono. Recuperado em: 18 de junho de 2025, de> <http://viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>.