

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DA BAHIA
CAMPUS DE SALVADOR
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
EDIFICAÇÕES**

**ALICE BUENO BIZARRIA
MARIA EDUARDA SIMAS PARANHOS DA SILVA
REBECA SILVA BATISTA**

**VIGAS REFORÇADAS COM ARGAMASSA POLIMÉRICA E FIBRAS
DE CARBONO**

**SALVADOR - BA
2023**

**ALICE BUENO BIZARRIA
MARIA EDUARDA SIMAS PARANHOS DA SILVA
REBECA SILVA BATISTA**

**VIGAS REFORÇADAS COM ARGAMASSA POLIMÉRICA E FIBRAS
DE CARBONO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia Da Bahia – Campus Salvador, como requisito parcial para a obtenção do grau em Técnico de Edificações.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Silva Fortes
Coorientadora: Prof^a. Esp. Lettycia Pinheiro da Silva

SALVADOR - BA
2023

ESPAÇO RESERVADO PARA FICHA CATALOGRÁFICA

**ALICE BUENO BIZARRIA
MARIA EDUARDA SIMAS PARANHOS DA SILVA
REBECA SILVA BATISTA**

**ANÁLISE DE REFORÇO DE ARGAMASSA POLIMÉRICA COM
FIBRAS DE CARBONO EM VIGAS DE CONCRETO ARMADO**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau em Técnico de Edificações, Campus De Salvador Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia Da Bahia

Salvador, 27 de novembro de 2023.

Banca examinadora

Adriano Silva Fortes – Orientador



Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina/
Universidade do Minho - PT.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - *Campus* Salvador.

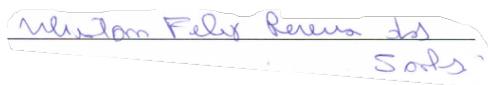
Juliane Santos Souza –



Prof. Mestre em Eng. Civil e Eng. Ambiental

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - *Campus* Salvador.

Ubiratan Félix Pereira dos Santos –



Mestrado em andamento em Planejamento Territorial e Desenvolvimento Social

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - *Campus* Salvador.

À

Susete, Silvia e Cleide, mães fortes e exemplares que nos incentivam todos os dias.

Uilson, Américo e Isacc, pais que nos guiam, inspirando-nos a sermos o melhor de nós.

AGRADECIMENTOS

Dedicamos este trabalho com imenso carinho e gratidão a todos aqueles que nos acompanharam ao longo desta jornada acadêmica;

Agradecemos, primeiramente, a Deus, por nos abençoar, iluminar e nos permitir concluir nossa trajetória no IFBA;

Ao nosso orientador, Adriano Silva Fortes, cuja dedicação e paciência foram fundamentais durante o desenvolvimento do projeto e pelo tempo despendido à realização dessa pesquisa;

À nossa coorientadora, Lettycia Pinheiro da Silva, por todo amparo e auxílio dado durante todas as etapas deste trabalho para que fosse possível a conquista deste objetivo;

Às nossas famílias, que estiveram ao nosso lado em todos os momentos, acreditando em nosso potencial, sendo nossa fonte de amor e inspiração;

Aos amigos e colegas de classe, que compartilharam conhecimentos e experiências enriquecedoras, tornando essa trajetória ainda mais especial;

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia - IFBA;

Por fim, nossa gratidão também se estende a todas as pessoas que, de alguma forma, nos apoiaram e incentivaram em nossa caminhada acadêmica. Cada palavra de estímulo e motivação foi um combustível para nossa determinação.

“Subiu a construção como se fosse máquina
Ergueu no patamar quatro paredes sólidas
Tijolo com tijolo num desenho mágico”

Chico Buarque - Construção (1971)

BIZARRIA, Alice Bueno; SILVA, Maria Eduarda Simas Paranhos da; BATISTA, Rebeca Silva. **Vigas reforçadas com argamassa polimérica e fibras de carbono**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia Da Bahia – *Campus Salvador*, 2023.

RESUMO

Neste estudo, foi analisado o desempenho de vigas de concreto armado com reforço de argamassa polimérica e fibras de carbono (CRFC), nas formas de manta e laminado. O reforço das vigas foi realizado mediante duas técnicas de colagem, sendo a primeira com a manta de fibra de carbono aplicado sobre o adesivo epoxídico em uma das faces das peças, e a segunda, pela aplicação da lâmina em um corte longitudinal executado na camada de argamassa do reforço. Vale-se pontuar, também, que as vigas possuem idades superiores a dez anos. Dessa forma, apresenta-se um estudo experimental envolvendo dez vigas de concreto armado de seção transversal quadrática, com dimensões médias de 7x7x90cm, a fim de avaliar e comparar o comportamento das peças reforçadas. Com esse intuito, cada uma das vigas foi submetida ao ensaio de flexão a quatro pontos, permitindo assim a análise comparativa de seu desempenho sob as diferentes condições de reforço. A primeira viga a ser ensaiada foi a de concreto armado. Posteriormente, se executou o ensaio com um grupo que compreendeu três vigas de referência, nas quais apenas a argamassa polimérica foi utilizada. Em seguida, foi o segundo grupo, composto por três vigas reforçadas com argamassa polimérica e manta de fibra de carbono. Por fim, foi ensaiado o terceiro grupo que englobou três vigas reforçadas com argamassa polimérica e lâmina de fibra de carbono. De acordo com os resultados obtidos, percebe-se que as vigas reforçadas através da incorporação de fibras de carbono demonstram aumento de rigidez, mais especificamente as reforçadas com laminado, ademais, houve a corroboração da viabilidade técnica dos reforços empregados neste trabalho, visto que evidenciou-se um substancial aumento na capacidade de carga e na rigidez à flexão das peças sob avaliação, que foram reforçadas com fibra de carbono.

Palavras-chave: Reforço; Fibras de carbono; Vigas; Manta; Laminado.

BIZARRIA, Alice Bueno; SILVA, Maria Eduarda Simas Paranhos da; BATISTA, Rebeca Silva. **Beams reinforced with polymer mortar and carbon fibers.** 2023. Completion of course work – Instituto Federal De Educação, Ciência E Tecnologia Da Bahia– Campus Salvador, 2023.

ABSTRACT

In this study, the performance of reinforced concrete beams reinforced with polymer mortar and carbon fibers (CRFC), in blanket and laminate forms, was analyzed. The reinforcement of the beams was carried out using two gluing techniques, the first with the carbon fiber blanket applied over the epoxy adhesive, on one of the sides of the pieces, and the second, by applying the blade to a longitudinal cut made in the layer of reinforcement mortar. It is also worth noting that the beams are over ten years old. Therefore, an experimental study is presented involving ten reinforced concrete beams with a quadratic cross section, with average dimensions of 7x7x90cm, in order to evaluate and compare the behavior of the reinforced parts. For this purpose, each of the beams was subjected to progressive loads until structural failure was reached, thus allowing comparative analysis of their performance under different reinforcement conditions. The first beam to be tested was reinforced concrete without any type of reinforcement. Subsequently, the test was carried out with a group that comprised three reference beams, in which only the polymeric mortar was used. Next was the second group, made up of three beams reinforced with polymer mortar and carbon fiber blanket. Finally, the third group was tested, which included three beams reinforced with polymer mortar and carbon fiber laminate. According to the results obtained, it can be seen that the beams reinforced through the incorporation of carbon fibers demonstrate an increase in stiffness, more specifically those reinforced with laminate, in addition, there was corroboration of the technical viability of the reinforcements used in this work, as it demonstrated there was a substantial increase in the load capacity and bending stiffness of the parts under evaluation, which were reinforced with carbon fiber.

Keywords: Reinforcement; carbon fibers; beams; blanket; laminate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção transversal das vigas.	18
Figura 2 - Seção longitudinal das vigas (cm)	18
Figura 3 - Arranjo dos átomos de carbono.	19
Figura 4 - Aplicação da argamassa polimérica nos corpos de prova.	21
Figura 5 - Faixa aproximada de pH para mudança de cor: 8.0-9.8	24
Figura 6 - Viga fraturada e com aplicação de fenolftaleína.	25
Figura 7 - Aplicação da manta de fibra de carbono nos corpos de prova.	27
Figura 8 - Reforço por colagem de barras em entalhes	28
Figura 9 - Aplicação da lâmina de fibra de carbono nos corpos de prova.	29
Figura 10 - Modelos das vigas após aplicação dos reforços (modelo de comparação sem reforço (a); reforçada com manta (b) e reforçada pela técnica NSM (c)).	29
Figura 11 - Equipamento utilizado, prensa universal.	30
Figura 12 - Data da última calibração	31
Figura 13 - Máquina e dispositivos empregados nos ensaios.	32
Figura 14 - Porcentagem de aumento da resistência das vigas reforçadas comparadas a viga somente armada (VR-ARM)	34
Figura 15 - Fissuração da viga reforçada com argamassa polimérica.	35
Figura 16 - Fissuração da viga reforçada com manta de fibra de carbono.	35
Figura 17 - Fissuração da viga reforçada com lâmina de fibra de carbono.	36
Figura 18 - Gráfico da viga armada de referência	37
Figura 19 - Gráfico das vigas com Argamassa polimérica	37
Figura 20 - Gráfico das vigas com Manta de Fibra de carbono	38
Figura 21 - Gráfico das vigas com Lâmina de Fibra de carbono	38
Figura 22 - Gráfico comparativo entre vigas com lâmina, vigas com manta de Fibra de Carbono e a viga armada sem reforço.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características e propriedades mecânicas da argamassa polimérica.	21
Tabela 2 – Características dos corpos de prova empregados no programa experimental.	22
Tabela 3 - Resultados dos Ensaios	33

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. ESTUDO EXPERIMENTAL.....	15
2.1. MATERIAIS.....	17
2.1.1. CONCRETO.....	17
2.1.2. AÇO.....	18
2.1.3. FIBRAS DE CARBONO.....	19
2.1.4. ARGAMASSA POLIMÉRICA.....	20
2.2. CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS.....	23
2.3. ENSAIO DE CARBONATAÇÃO.....	24
2.3.1. MÉTODO COLORIMÉTRICO.....	25
2.4. APLICAÇÃO DOS REFORÇOS.....	27
2.4.1. REFORÇO COM MANTAS DE FIBRAS DE CARBONO.....	27
2.4.2. REFORÇO COM LAMINADOS DE FIBRAS DE CARBONO.....	28
2.5. EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO.....	31
3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	33
3.1. MOMENTO MÁXIMO.....	33
3.2. MODO DE RUPTURA.....	35
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41

1. INTRODUÇÃO

Apesar do concreto ser conhecido pela sua durabilidade (Süssekind, 1987), muitas manifestações patológicas são frequentemente observadas em edificações, resultantes da negligência quanto à manutenção periódica ou de falhas ocorridas durante as diversas fases do processo construtivo. Além disso, observa-se que a busca pela qualidade em estruturas executadas em concreto armado é uma meta crescente no âmbito da construção civil, seja durante a etapa de concepção até a execução da obra.

Segundo a análise de Verçoza (1991), o favorecimento para o aparecimento de patologias pode ser atribuído, em grande parte, às características inerentes às construções contemporâneas. Apesar de observar-se um avanço do conhecimento em relação às etapas construtivas, bem como aos materiais e técnicas empregados em uma obra, falhas em determinadas fases construtivas continuam a acontecer, provocando manifestações patológicas e alterando as condições normais de utilização da estrutura.

Uma vez que isso ocorre, elementos construtivos como a viga, por exemplo, passam a falhar na sua funcionalidade estrutural e, porquanto, demandar uma forma de reforço que dê manutenção na sua resistência.

Diante dessa realidade, tanto nacional quanto internacional, tornam-se inúmeros os cenários nas quais a fibra de carbono possa ser aplicada como uma forma de reforço, proporcionando ao elemento estrutural degradado, uma manutenção ou acréscimo da capacidade de carga através de sua combinação com os materiais da estrutura original, principalmente nos casos em que técnicas como essa, são economicamente mais viáveis do que a demolição da edificação.

Nesse contexto, considerando que no Brasil, produtos à base de cimento, como o concreto, são predominantemente empregados na construção civil e tendo em vista a carência de conhecimento sobre o comportamento e a resistência de peças de concreto armado com reforço de fibras de carbono, justifica-se a presente pesquisa. Esta propõe o estudo de vigas reforçadas por meio de duas técnicas de reforço: a aplicação de lâminas e de mantas de fibras de carbono, ambas aplicadas

sobre uma camada de argamassa polimérica em três corpos de provas de concreto armado cada.

Dessa forma, quando se opta pela recuperação de estruturas de concreto através de técnicas de reforço, pretende-se que as novas técnicas e materiais utilizados atribuam propriedades mecânicas melhores que as dos materiais originais. Dado esse motivo, o concreto reforçado com fibras (CRF), apresenta-se como uma boa alternativa, devido às novas características conferidas pela adição desse material, como: a tenacidade, a retenção à propagação de fissuras, acréscimo da resistência à tração, ductilidade e maior durabilidade (Reis, 1998). Além do que já foi descrito, o CRF apresenta propriedades mecânicas como a resistência à compressão e a resistência à tração similares ao concreto tradicional, o que torna possível a utilização desse material para contextos de reparo/reforço (Domingues, 2022).

Espera-se, portanto, que, com os resultados deste estudo, haja uma contribuição com o entendimento na área de reforço estrutural no que concerne à tecnologia de fibras de carbono. Logo, com essa finalidade, a pesquisa visa auxiliar na compreensão das vantagens do emprego dessas técnicas de reforço para o desenvolvimento de estruturas mais eficientes e duráveis, com uma significativa redução de manutenções decorrentes de falhas mecânicas e, além disso, ampliando as informações a serem consideradas durante uma reabilitação estrutural.

Para fins de pesquisa, optou-se pela viga como objeto de estudo, por conta da sua alta aplicabilidade em edificações de diferentes tipologias estruturais. As vigas utilizadas neste trabalho foram moldadas e usadas como referencial teórico por Santana (2013). Ademais, a aparelhagem disponível para realização do estudo experimental é mais cabível para as especificidades desse elemento.

2. ESTUDO EXPERIMENTAL

Segundo Gil (2002), uma pesquisa possui caráter descritivo quando faz uso de técnicas padronizadas de coleta de dados. Para o autor, as pesquisas descritivas visam descobrir a existência de associações entre variáveis.

Mediante o exposto, pode-se afirmar que a presente pesquisa possui caráter descritivo, pois o trabalho será realizado por meio de técnicas padronizadas para coletar e analisar dados referentes ao reforço dos corpos de prova que serão utilizados no experimento. Será observada a relação entre a lâmina de fibra de carbono na argamassa polimérica com o concreto armado, assim como da manta de fibra de carbono também aplicada em argamassa polimérica com o concreto armado do corpo de prova.

Salienta-se ainda que a pesquisa possui natureza qualitativa quanto à diferença da resistência entre os corpos de prova ensaiados com a aplicação da lâmina e da manta de fibra de carbono e aqueles em que não foram utilizadas as fibras de carbono. Em conformidade com as características apresentadas, o trabalho foi executado através das seguintes etapas:

- Inicialmente, foi feita a preparação de dez corpos de prova para a realização dos ensaios. Os corpos de prova tiveram suas superfícies escarificadas (apicoadas) para que fosse possível remover a camada superficial do concreto e prepará-lo para o recebimento da camada de argamassa e, logo após, foram limpas, de modo a remover partículas soltas e desagregadas.
- Em seguida, foi executada a aplicação da argamassa polimérica em nove corpos de prova. Após o tempo de cura da argamassa, três corpos de prova receberam a manta de fibra de carbono, três a lâmina de fibra de carbono, três permaneceram apenas com a argamassa e um permaneceu sem a aplicação de qualquer tipo de reforço. Foram feitos, então, ensaios laboratoriais que atestaram a resistência mecânica, avaliando o comportamento estrutural das vigas.
- Após a realização dos ensaios de resistência e com base nos resultados, foram construídos gráficos a fim de comparar a rigidez,

flecha e carga suportada entre as vigas com e sem reforço. Através desses gráficos, foi possível chegar à conclusão sobre qual dos métodos de reforço é mais eficiente.

- Também foram efetuados, através do método colorimétrico, ensaios de carbonatação, a fim de determinar o grau e profundidade da carbonatação dos corpos de prova, visto que todos os dez corpos de prova apresentavam a idade de 10 anos.

2.1. MATERIAIS

Para a condução deste estudo, foram empregados os seguintes materiais, nomeadamente cimento, areia, aço e pedra britada, na aplicação de reforço em vigas estruturais. Esta abordagem visa abranger um amplo espectro das edificações que incorporam concreto armado convencional em suas construções, incluindo aquelas que requerem intervenções imediatas para reabilitação ou alteração nas condições de uso de sua estrutura.

2.1.1. CONCRETO

O concreto é um material misto, em que faz parte da sua constituição um aglomerante, sendo o Cimento *Portland* o mais conhecido, água, agregado miúdo (areia natural ou artificial) e agregado graúdo (sendo o mais utilizado a pedra britada), podendo ou não conter adições ou aditivos químicos que visam conferir características antes não atribuídas ao concreto (acelerar ou retardar o início da pega, aumentar a trabalhabilidade etc) (Bastos, 2006).

No ramo da Construção Civil, o concreto juntamente com a armadura possui inúmeras propriedades quando combinados que possibilitam a aplicação em diferentes situações e a construção de elementos para os mais variados tipos de obra.

Para a realização desse estudo foi utilizado um concreto convencional, de resistência característica igual a 20 MPa. No traço do concreto executado nas vigas foi usado cimento *Portland* composto CP-II, com areia natural e brita 1, sem a adição

de aditivos, com uma dosagem de 1: 2,18: 2,82 com um relação água/ aglomerante de 0,60 e um consumo de cimento de 355,4 kg/m³.

Todas as dez vigas foram moldadas no mesmo dia utilizando fôrmas de madeira e com o concreto de uma mesma betoneira com o objetivo de analisar um único tipo de concreto. O adensamento das vigas foi executado de forma manual e com a cura promovida através da saturação das superfícies dos corpos de prova durante 10 dias. Para os ensaios deste trabalho, as vigas estudadas possuem uma idade de 10 anos.

2.1.2. AÇO

O concreto, tais como as pedras naturais, apresenta alta resistência à compressão, sendo um excelente material para ser empregado em elementos estruturais (como pilares) que são primariamente submetidos à compressão, porém, devido a sua característica de baixa resistência à tração, o seu uso isolado é proibido em elementos submetidos totalmente ou parcialmente à tração, como vigas, lajes e outros elementos (Nilson *et al.*, 2010).

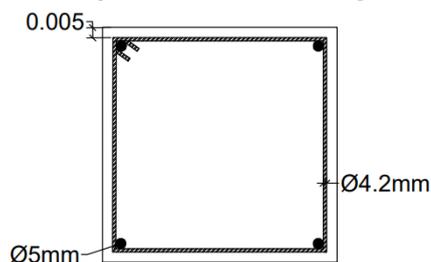
Para que não haja essas limitações, a integração do aço com o concreto é adotado sendo convenientemente posicionado na estrutura para suportar, de forma eficaz, as tensões de tração. O sistema consiste em um conjunto de barras de aço que constitui a armadura, cuja cobertura dada pelo concreto origina o concreto armado, material que demonstra notável eficácia quando aplicado na infraestrutura de uma obra.

Esses aços são categorizados em barras ou fios, e a sua classificação baseia-se no valor característico da resistência de início de escoamento (f_{yk}), em kgf/cm² ou kN/mm², sendo divididos nas categorias CA-25, CA-50 as barras e os fios na categoria CA-60 (com características de soldabilidade) (Fortes, 2000).

As armaduras das vigas ensaiadas foram confeccionadas com armadura longitudinal convencional de 5 mm, em aço CA 50, e estribos de 4,2mm, em aço CA60. O cobrimento sobre as armaduras com o concreto foi de 5mm.

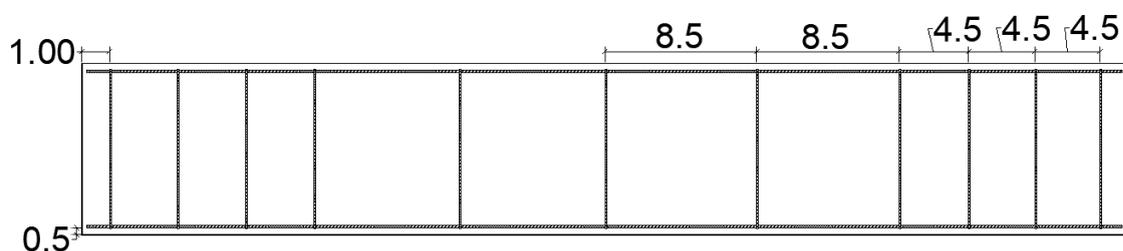
Nas figuras 1 e 2, estão representadas a seção transversal e a seção longitudinal das vigas ensaiadas, respectivamente.

Figura 1 - Seção transversal das vigas.



Fonte: Autoras, 2023

Figura 2 - Seção longitudinal das vigas (cm)

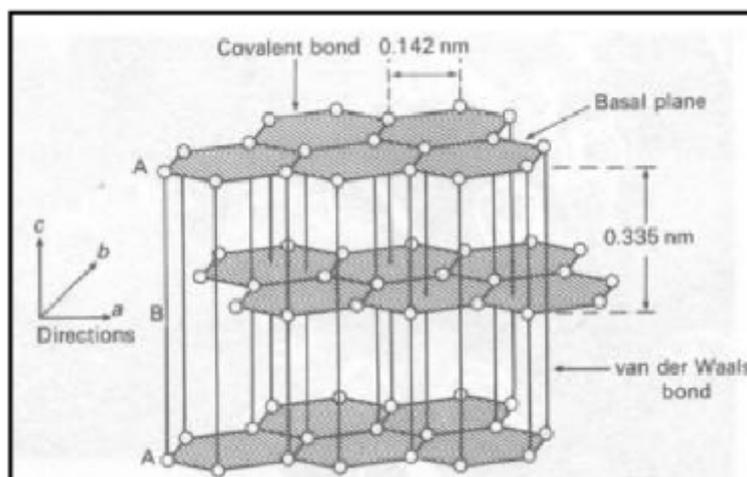


Fonte: Autoras, 2023

2.1.3. FIBRAS DE CARBONO

As fibras de carbono são resultados da oxidação de fibras precursoras e do processamento a elevadas temperaturas, variando de 1.000°C a 1.500°C. Durante esse processo térmico, as fibras resultantes apresentam os átomos de carbono alinhados ao longo da fibra precursora, garantindo elevada resistência ao produto final (Machado, 2009), como representado na figura 3.

Figura 3 - Arranjo dos átomos de carbono.



Fonte: Fiorelli, 2002

Em razão de proporcionar resistência a cargas, o uso das fibras de carbono já demonstrou grande eficiência em indústrias como a aeroespacial, automobilística e naval (Leal e Fagundes, 2020). Sua utilização é um passo importante na evolução tecnológica da engenharia aplicada à reabilitação de estruturas e demonstra a evolução da indústria da construção civil (Fortes, 2000), sendo significativamente empregada em diversos lugares do mundo, como no Japão, Estados Unidos e continente europeu, por exemplo. No Brasil, além da sua aplicação para garantir durabilidade a pontes e viadutos, e reabilitar patrimônios históricos, devido às grandes quantidades de alterações que são realizadas no uso das edificações, se tornou necessário o reforço das estruturas para se adequarem às novas exigências de carregamento (Fortes, 2004).

Segundo Machado (2009), as fibras de carbono podem apresentar as seguintes características, quando aplicadas em sistemas compostos estruturados:

- Extraordinária resistência mecânica;
- Extraordinária rigidez;
- Bom comportamento à fadiga e à atuação de cargas cíclicas;
- Elevada resistência a ataques químicos diversos;
- Não são afetados pela corrosão por se tratar de um produto inerte;
- Estabilidade térmica e reológica;
- Extrema leveza, devido ao baixo peso específico do sistema (da ordem de 1,6g/cm³ a 1,9g/cm³ , cerca de 5 vezes menor do que o do aço

estrutural) chega-se ao ponto de não se considerar o seu peso próprio nos reforços.

Desse modo, de acordo com Fortes (2000, p. 52), “as propriedades mecânicas das fibras serão tão melhores quanto melhor for o processo de fabricação, devendo-se adotar aquele que conduza a melhor relação entre custo e benefício.”

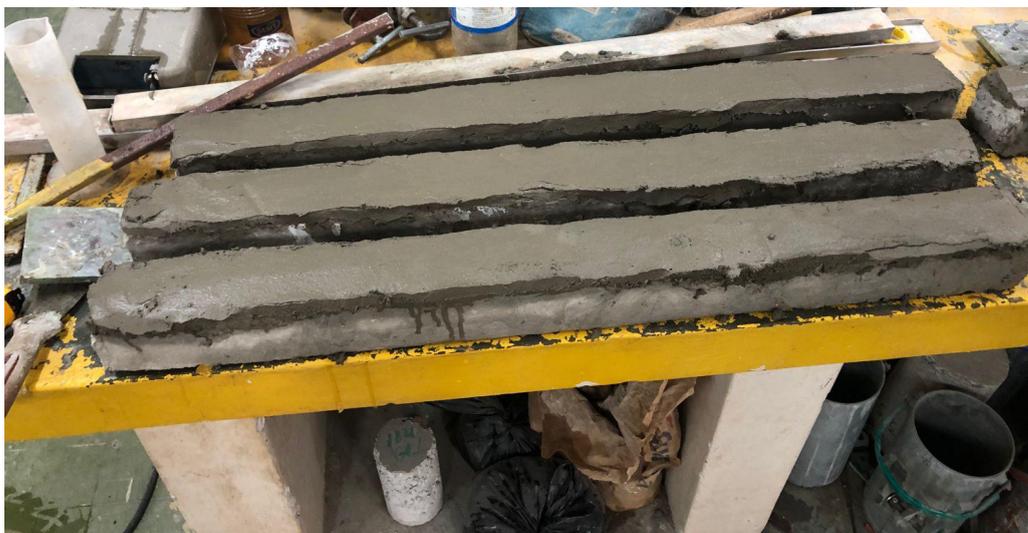
2.1.4. ARGAMASSA POLIMÉRICA

A argamassa polimérica, diferentemente da argamassa tradicional, contém, em sua composição, para além, do aglomerante, água e agregado miúdo, aditivos poliméricas (resinas epóxi, acrílicas, polímeros de estireno butadieno etc) que conferem um melhor desempenho ou mudanças em suas propriedades, normalmente sendo utilizadas para assentamento de tijolos ou blocos em alvenarias de vedação. O seu uso também é recomendado para assentamento de pisos, azulejos e pastilhas durante a etapa de aplicação de revestimento (Oliveira e Alves, 2019).

A composição das argamassas poliméricas varia segundo o fabricante e fornecedor e a depender da finalidade da aplicação. A massa do material já vem pronta para o uso, não necessitando acrescentar nenhum material. Na comparação de custo e rendimento, a argamassa polimérica chega a ser cerca de 30% mais econômica que a argamassa cimentícia habitual e o seu rendimento em alvenaria varia em função do tipo de bloco, mas em média, é de 1,5 kg/m² sendo 20 vezes superior gerando uma redução de desperdícios de cerca de 20% (Moreira *et al.*, 2017).

A argamassa utilizada na preparação dos corpos de prova para o recebimento dos reforços é um produto monocomponente, formulado à base de cimento Portland, fibras sintéticas, aditivos especiais e agregados selecionados que, quando misturados resultam numa argamassa de elevada consistência, coesa e facilmente moldável, como mostra a figura 4.

Figura 4 - Aplicação da argamassa polimérica nos corpos de prova.



Fonte: Autoras, 2023

A relação água/materiais secos é de 0,160, o que resulta numa proporção de 3,2 L de água para cada embalagem de 20 kg de Argamassa Estrutural S90.

A superfície da camada de argamassa não recebeu nenhum tratamento antes da aplicação dos reforços de fibra de carbono.

As características e propriedades mecânicas da argamassa polimérica fornecidas pelo fabricante estão dispostas na Tabela 1:

Tabela 1 - Características e propriedades mecânicas da argamassa polimérica.

Tamanho máximo de agregado	2 mm
Densidade de massa (NBR 13278)	2,209 kg/dm ³
Índice de consistência (NBR 13276)	130 mm
Resistência à compressão (NBR 7215)	20 MPa (24 horas) 30 MPa (3 dias) 45 MPa (7 dias) 50 MPa (28 dias)
Módulo de deformação dinâmico (NBR 15630)	33 GPa
Resistência à tração na flexão (NBR 13279)	9,5 MPa (28 dias)
Resistência de aderência à tração (EN 1542)	> 2 MPa
Penetração de íons cloreto em concreto (ASTM C1202)	1573 A/s
Teor de cloretos	Isento
Tempo em aberto para aplicação (25°C)	20 minutos
Relação água/materiais secos	0,16

Fonte: Informações disponibilizadas pelo fabricante

2.2. CARACTERÍSTICAS DAS VIGAS

Os 10 (dez) corpos de prova de concreto armado foram medidos e suas características, como largura, altura, comprimento e altura da camada de argamassa polimérica, estão apresentados na tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Características dos corpos de prova empregados no programa experimental.

CPs	Altura média (mm)	Largura média (mm)	Comprimento médio (mm)	Camada de Argamassa média (mm)
VR-ARM	70	70	90	-
V-01	70	70	90	10
V-02	65	75	90	15
V-03	70	75	90	10
VRM-04	75	75	90	10
VRM-05	70	70	90	10
VRM-06	70	75	90	15
VRL-07	70	75	90	10
VRL-08	70	70	90	10
VRL-09	70	75	90	15

Fonte: Elaborado pelas autoras (2023).

2.3. ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

Com intuito de explicar a pertinência do ensaio de carbonatação para o presente estudo, é necessário adentrar nas reações e consequências que esse processo químico desencadeia. Uma reação que ocorre de fora para dentro, essa manifestação patológica sucede quando há a carbonatação do hidróxido de cálcio. Ou seja, o hidróxido de cálcio, em meio aquoso, reage com o dióxido de carbono presente no ar e forma carbonato de cálcio. O que, inicialmente, acontece na camada mais exterior de concreto da peça (Papadakis *et al.*, 1991).

A princípio salienta-se que o concreto é um material poroso e que a carbonatação ocorre nos poros, se a rede de poros do concreto não apresenta umidade, a reação é impossibilitada, da mesma forma que ocorre quando os poros estão saturados, já que não pode ser disposto o dióxido de carbono. Portanto, para que ocorra a carbonatação tem que haver um equilíbrio entre a umidade e a disposição do dióxido de carbono, o que é comum nos concretos de cobrimento.

Em segundo plano, a peça de concreto que tem sua camada de cobrimento carbonatada, pode vir a apresentar perda de aderência na sua superfície, já que ao ocorrer carbonatação, haverá, também, a precipitação do carbonato de cálcio, que por sua vez vai colmatar os poros (Silva, 2000).

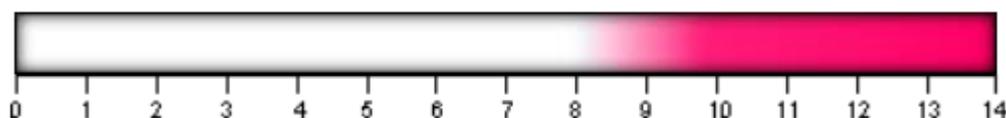
Logo, posto que este estudo busca fazer uma análise comparativa dos corpos de prova com e sem reforço, e que o reforço foi disposto a partir de uma camada de argamassa polimérica, há possibilidade de ter ocorrido prejuízo na aderência da camada de argamassa com o substrato, por conta da colmatação dos poros causada pela carbonatação. Portanto, se faz indispensável ensaiar os corpos de prova para dimensionar sua carbonatação e, a partir disso, chegar a um resultado conclusivo quanto à colmatação.

2.3.1. MÉTODO COLORIMÉTRICO

Para avaliar a profundidade da carbonatação podem ser utilizados diferentes métodos, difração de raios-X, análise térmica diferencial e entre outros. Dentre as opções, o escolhido, para a caracterização das vigas, foi o método colorimétrico de indicadores ácido/base, especificamente utilizando a solução de fenolftaleína.

A seguir, algumas informações relevantes sobre a fenolftaleína estão representadas na figura 5.

Figura 5 - Faixa aproximada de pH para mudança de cor: 8.0-9.8



Fonte: Antoine Frostburg Edu¹

Portanto, a cor da forma ácida é transparente. Já a cor da forma base a coloração vermelho carmim.

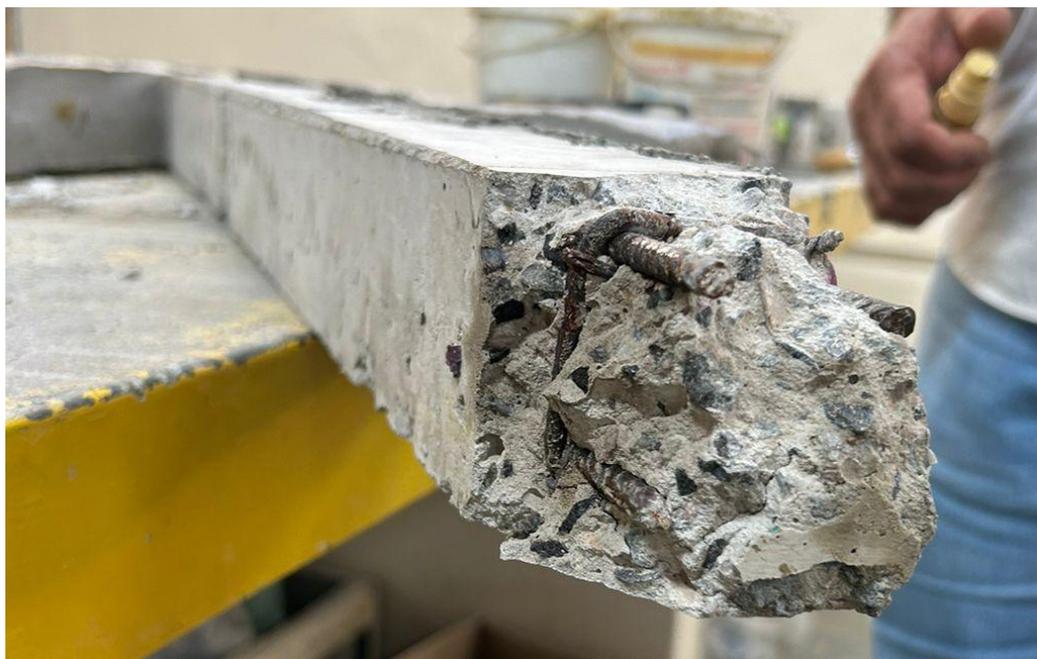
Ao realizar a análise de carbonatação das vigas, utilizou-se uma solução com 1% de fenolftaleína em álcool etílico.

Para avaliar a profundidade de carbonatação por esse método, a solução de fenolftaleína foi aspergida de maneira dispersa na superfície recém fraturada dos corpos-de-prova, então caso não houvesse carbonatação, haveria a coloração do concreto. Ou seja, a parte não carbonatada ficaria vermelho carmim, enquanto a região carbonatada não iria colorir, permanecendo com sua cor original (Silva, 2007).

Para realizar esse procedimento foram elegidas três vigas, que foram fraturadas em suas extremidades. Ao fazer essa análise, as superfícies que tiveram contato com a fenolftaleína permaneceram com sua coloração original, o que é um indicativo de que toda a viga encontra-se carbonatada.

¹ <http://antoine.frostburg.edu/chem/senese/101/acidbase/indicators.shtml> - Acessado em 14/11/2023

Figura 6 - Viga fraturada e com aplicação de fenolftaleína.



Fonte: Autoras, 2023

2.4. APLICAÇÃO DOS REFORÇOS

Os sistemas de reforço com fibra de carbono podem ser encontrados de duas formas, sendo elas, moldados *in loco* (fios, mantas ou tecidos) e pré-fabricados (laminados). A seguir apresentaremos informações sobre os dois sistemas, como a disposição das fibras e o método da execução dos reforços.

2.4.1. REFORÇO COM MANTAS DE FIBRAS DE CARBONO

As mantas de fibra de carbono foram desenvolvidas no início dos anos 90 e os resultados deste tipo de reforço podem ser demonstrados através de inúmeros projetos já realizados (Beber, 2003). A manta é composta por fibras de carbono dispostas em uma única direção, isto é, são unidirecionais.

De acordo com Fortes (2000), a execução do reforço ocorre em duas etapas, sendo a primeira, o preparo da superfície, e a segunda, a aplicação do sistema do reforço. O preparo da superfície inclui o apicoamento, a fim de remover a camada superficial do concreto e prepará-lo para o recebimento, no caso desse estudo, da camada de argamassa, limpeza, de modo a remover partículas soltas e desagregadas, e aplicação do *primer*, que é utilizado exclusivamente visando criar uma ponte de aderência entre o substrato e o reforço (Ferrari, 2007). Após a superfície devidamente preparada, segue-se, então, para a execução do reforço.

A manta de fibra de carbono deve ser aplicada sobre uma camada de resina de saturação bi-componente, à base de epóxi, que, de acordo com Beber (2003), tem como função formar a matriz do compósito de fibra de carbono e promover a transferência de esforços entre as fibras e destas para a superfície onde foi colada.

Uma vez que a manta é posicionada, utiliza-se um rolo de borracha com o objetivo de fixar a fibra, retirar o ar e o excesso de resina. Caso seja previsto em projeto mais de uma camada da manta, basta repetir o processo.

O estudo apresentado foi realizado conforme descrito e exposto nas figuras 7a e 7b.

Figura 7 - Aplicação da manta de fibra de carbono nos corpos de prova.



a) Fonte: As autoras

b) Fonte: As autoras

Segundo as informações do fabricante, a manta utilizada no reforço dos corpos de prova possuem valor médio do módulo de elasticidade, de resistência a tração e de deformação última igual a 240 GPa, 3700 MPa e 15,4%, respectivamente.

2.4.2. REFORÇO COM LAMINADOS DE FIBRAS DE CARBONO

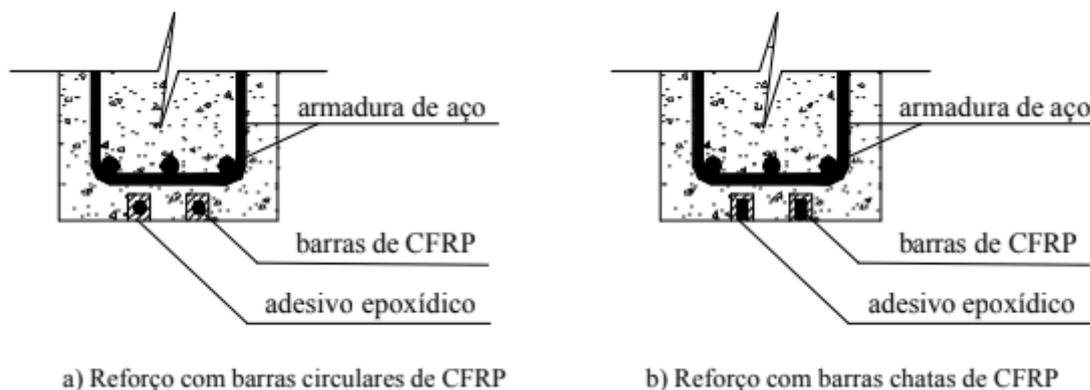
Os laminados de fibra de carbono são formados por camadas contínuas de fibras unidirecionais impregnadas com resinas termoendurecíveis, por meio de um processo de pultrusão, controlando-se a espessura e a largura (Ferrari, 2007).

O reforço com laminados pode ser aplicado usando o mesmo método da manta, com o *primer* e a resina epóxi. No entanto, na tentativa de aprimorar o desempenho do reforço, no início dos anos 2000 surgiu uma nova técnica denominada internacionalmente como *Near-Surface Mounted (NSM)*, que na tradução livre quer dizer instalado próximo à superfície.

Segundo Fortes (2004), a técnica consiste na aplicação de barras de fibras de carbono de seção transversal circular ou retangular, coladas com adesivo epoxídico em entalhes previamente realizados no concreto de cobertura da estrutura a ser reforçada, ficando o reforço disposto próximo à superfície do elemento estrutural,

como ilustrado a seguir na figura 8:

Figura 8 - Reforço por colagem de barras em entalhes



Fonte: Fortes, 2004

Conforme explicado por Arquez (2010), havendo dupla área de contato do laminado com o concreto, este possui maior zona de aderência, o que gera diminuição das tensões de tração e cisalhamento no concreto situado na região de ancoragem. A autora também indica que outra vantagem da técnica é que, por possuir orientação unidirecional das fibras, o laminado potencializa a resistência e rigidez na direção longitudinal.

Nesse estudo foi executada a técnica NSM, conforme descrita, para a aplicação do laminado. Foram utilizados laminados pré-fabricados de fibra de carbono de seção transversal igual a 9.59 ± 0.09 mm de largura e 1.45 ± 0.005 mm de espessura, conforme ilustram as Figuras 9a e 9b.

Figura 9 - Aplicação da lâmina de fibra de carbono nos corpos de prova.

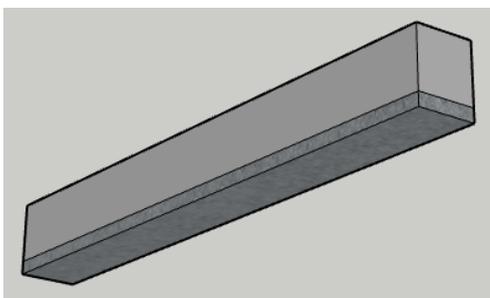


a) Fonte: Autoras, 2023

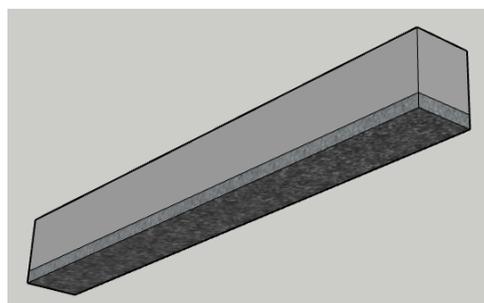


b) Fonte: Autoras, 2023

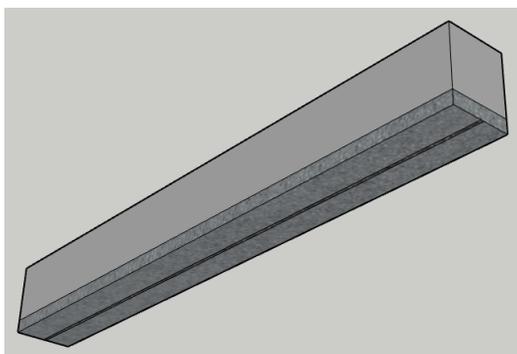
Figura 10 - Modelos das vigas após aplicação dos reforços (modelo de comparação sem reforço (a); reforçada com manta (b) e reforçada pela técnica NSM (c)).



a) Fonte: Autoras, 2023



b) Fonte: Autoras, 2023



c) Fonte: Autoras, 2023

2.5. EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Os ensaios dos corpos de prova foram realizados em uma prensa universal, servo controladora, mantendo o carregamento a ser aplicado sob constante velocidade, que foi mantida em 1mm/1min. A carga foi obtida através de uma célula de carga extensiométrica com capacidade de 200 KN. As flechas máximas (deslocamentos que ocorrem no meio do vão) foram obtidas por meio da instalação de um transdutor de deslocamentos lineares – LVDT (extensiométrico), ligado ao sistema à máquina de ensaios.

Os instrumentos foram gerenciados através de um programa fornecido pelo fabricante do equipamento, que estava ligado ao sistema de aquisição de dados da máquina e possibilitou o acompanhamento dos ensaios, assim como a obtenção dos dados de carga e flecha. As figuras 11 e 12 abaixo mostram os equipamentos utilizados e a data da última calibração da máquina.

Figura 11 - Equipamento utilizado, prensa universal.



Fonte: Autoras, 2023

Figura 12 - Data da última calibração



Fonte: Autoras, 2023

2.6. MODELO E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

As vigas foram submetidas a ensaio de flexão a quatro pontos, dois pontos de apoios nas extremidades e dois pontos de carga concentrada de mesma intensidade aplicadas nos terços médios do vão. O vão entre os apoios foi de 840 mm, com distância de 280 mm entre as cargas.

A célula de carga aplica o carregamento de maneira pontual e concentrada, para que fosse realizado o ensaio de flexão a quatro pontos se utilizou de um prato de metal maciço para que, dessa forma, a distribuição da carga fosse em dois pontos.

Ao passo que a carga era aplicada, o LVDT registrava a flecha para cada incremento de carga, sendo monitorada pelo sistema da máquina de ensaios.

Na Figura 13 podem ser observados a máquina de ensaios e os dispositivos empregados durante os ensaios.

Figura 13 - Máquina e dispositivos empregados nos ensaios.



a) Fonte: Autoras, 2023

b) Fonte: Autoras, 2023

As vigas foram ensaiadas nas idades de 23, 28 e 38 dias.

3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Este capítulo delinea a apresentação dos resultados e a análise derivada dos ensaios conduzidos no âmbito do estudo experimental, que se baseia na investigação de vigas de concreto armado reforçadas por meio da aplicação de uma camada de argamassa polimérica e fibras de carbono, conforme previamente descrito no capítulo anterior.

Os resultados dos ensaios realizados nas vigas são minuciosamente examinados e comparados entre si, com o propósito de se obter uma conclusão relativa à estratégia de reforço mais adequada ao contexto do presente estudo.

É importante observar que os resultados se referem à carga máxima aplicada às vigas ensaiadas.

3.1. MOMENTO MÁXIMO

Na tabela 3 é expressa a flecha em função da carga máxima atingida durante o ensaio, utilizou-se também das expressões da Teoria Clássica da Resistência dos Materiais para calcular os valores de momento fletor, conforme a equação abaixo:

$$M_{max} = \frac{P}{2} \times a$$

P = carga máxima atingida no ensaio das peças;

a = comprimento do terço do vão;

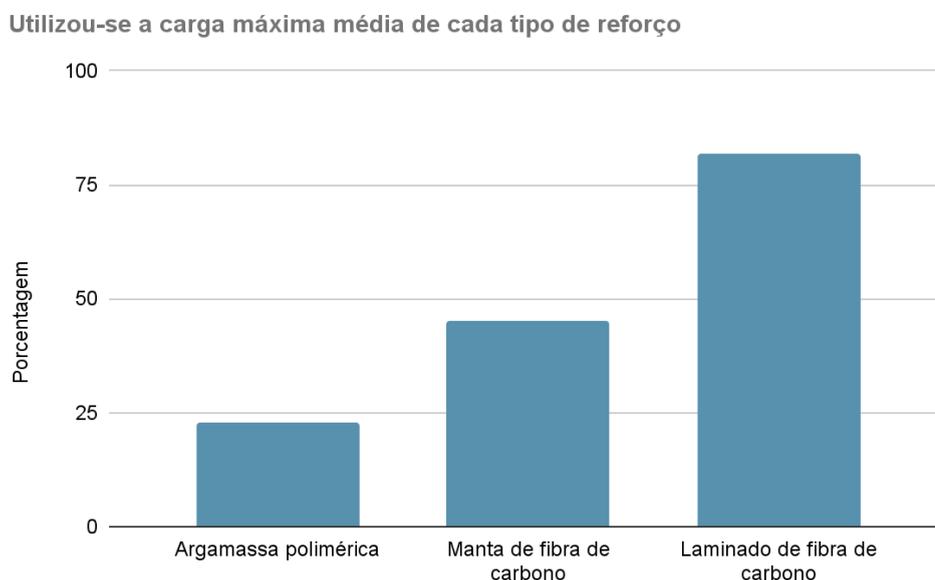
De acordo com os dados apresentados na Tabela 3 e Figura 14, é possível notar que as vigas reforçadas com o laminado de fibra de carbono resistiram a cargas maiores e apresentaram melhor desempenho.

Tabela 3 - Resultados dos Ensaios

	CP'S	CARGA MÁXIMA (KN)	CARGA MÉDIA (KN)	FLECHA (mm)	MOMENTO MÁXIMO (kN.m)
CONCRETO ARMADO	VR-ARM	10,443	10,443	5,08	1,46
ARGAMASSA POLIMÉRICA	V-01	14,588	12,797	8,08	2,04
	V-02	12,337		6,03	1,73
	V-03	11,467		7,35	1,61
MANTA DE FIBRA DE CARBONO	VRM-04	14,924	15,133	6,53	2,09
	VRM-05	15,168		6,59	2,12
	VRM-06	15,306		7,71	2,14
LAMINADO DE FIBRA DE CARBONO	VRL-07	20,367	18,968	7,05	2,85
	VRL-08	18,666		6,63	2,61
	VRL-09	17,872		7,09	2,50

Fonte: Elaborado pelas autoras, 2023

Figura 14 - Porcentagem de aumento da resistência das vigas reforçadas comparadas a viga somente armada (VR-ARM)



Fonte: Autoras, 2023

As vigas reforçadas apenas com argamassa polimérica tiveram um aumento em torno de 23% na sua resistência se comparada com a viga armada de referência, já as vigas com manta de fibra de carbono obtiveram um aumento de 45%, por fim, as com lâmina apresentou um acréscimo de resistência em torno de 82%.

Pode-se considerar que um dos fatores que contribui para essa diferença nos resultados entre a manta e a fibra, é o fato de que o adesivo epóxi não criou aderência com a argamassa polimérica, conforme era esperado, o que resultou no descolamento da manta à medida que a carga aumentava, enquanto o laminado permaneceu fixo no entalhe durante todo o ensaio.

3.2. MODO DE RUPTURA

Nas Figuras 15, 16 e 17, pode-se observar a fissuração resultante dos ensaios nas vigas reforçadas apenas com a argamassa polimérica, com a manta e com o laminado de fibra de carbono, respectivamente.

Figura 15 - Fissuração da viga reforçada com argamassa polimérica.



Fonte: Autoras, 2023

Figura 16 - Fissuração da viga reforçada com manta de fibra de carbono.



Fonte: Autoras, 2023

Figura 17 - Fissuração da viga reforçada com lâmina de fibra de carbono.

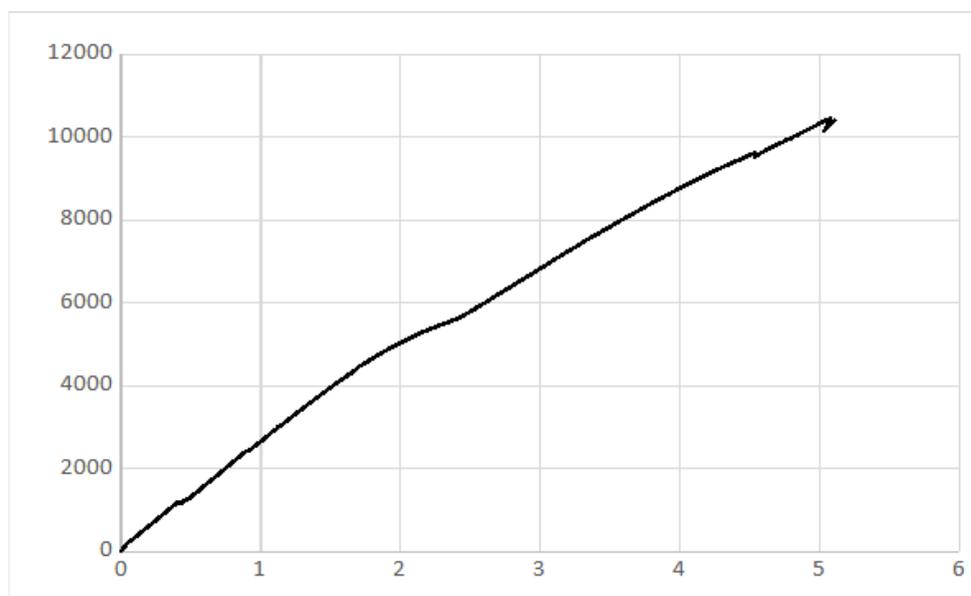


Fonte: Autoras, 2023

A partir do ensaio e da sua análise, concluiu-se que a fibra de carbono em forma de lâmina apresenta um maior acréscimo de resistência, se comparado à manta. No entanto a manta ainda é uma melhor opção se contraposta com um reforço apenas com argamassa polimérica. A viga de referência armada, por sua vez, apresentou uma resistência comum à sua idade.

Os ensaios eram interrompidos quando a flecha alcançava valores elevados e as vigas, por sua vez, não suportavam mais carga. Em seguida estão os gráficos de carga x flecha das vigas ensaiadas.

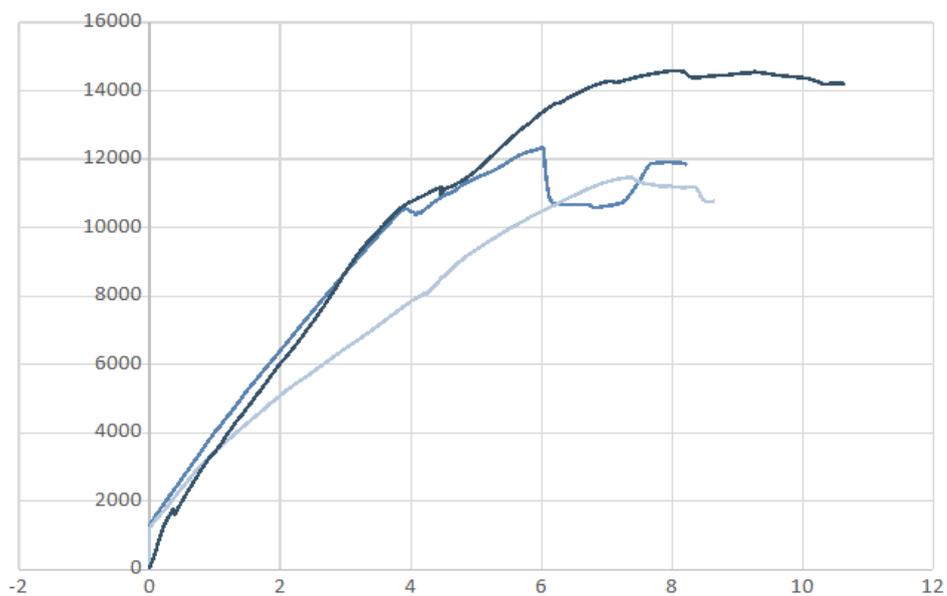
Figura 18 - Gráfico da viga armada de referência



Fonte: Autoras, 2023

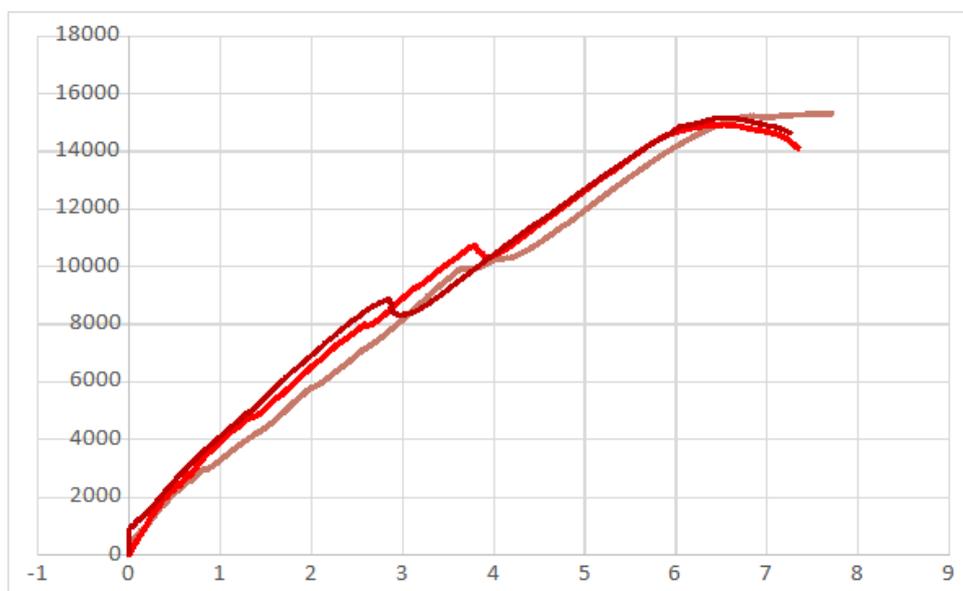
Em decorrência do escoamento do aço, a resistência da viga passa a decrescer. Esse momento é observado na Figura 18, quando a curva apresenta um decréscimo, após atingir sua capacidade de carga máxima.

Figura 19 - Gráfico das vigas com Argamassa polimérica



Fonte: Autoras, 2023

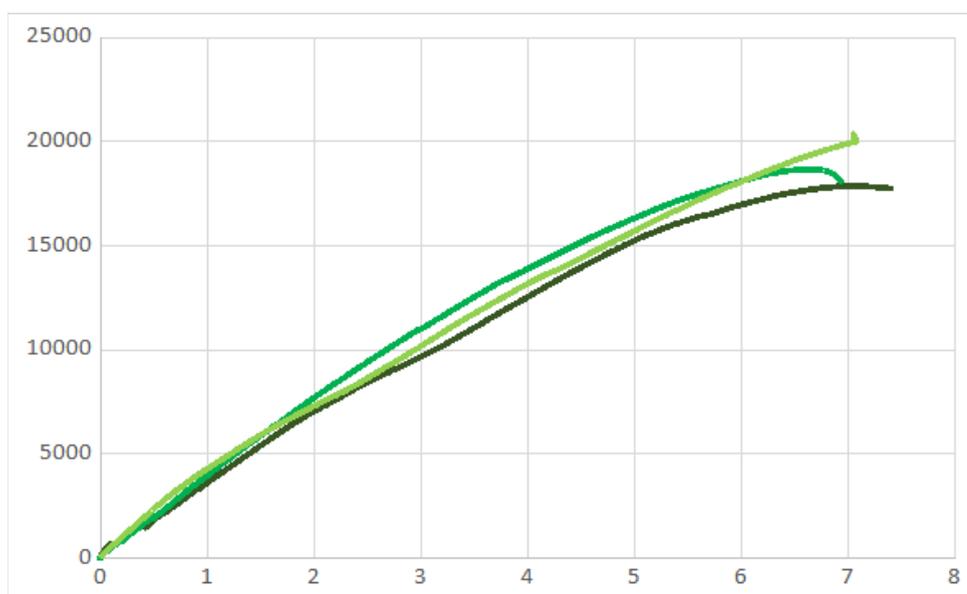
Figura 20 - Gráfico das vigas com Manta de Fibra de carbono



Fonte: Autoras, 2023

A parte da curva em que há um decréscimo da carga ocorre em função do descolamento da manta da camada de argamassa polimérica, portanto, a partir daquele ponto da curva é a armadura que está resistindo aos esforços.

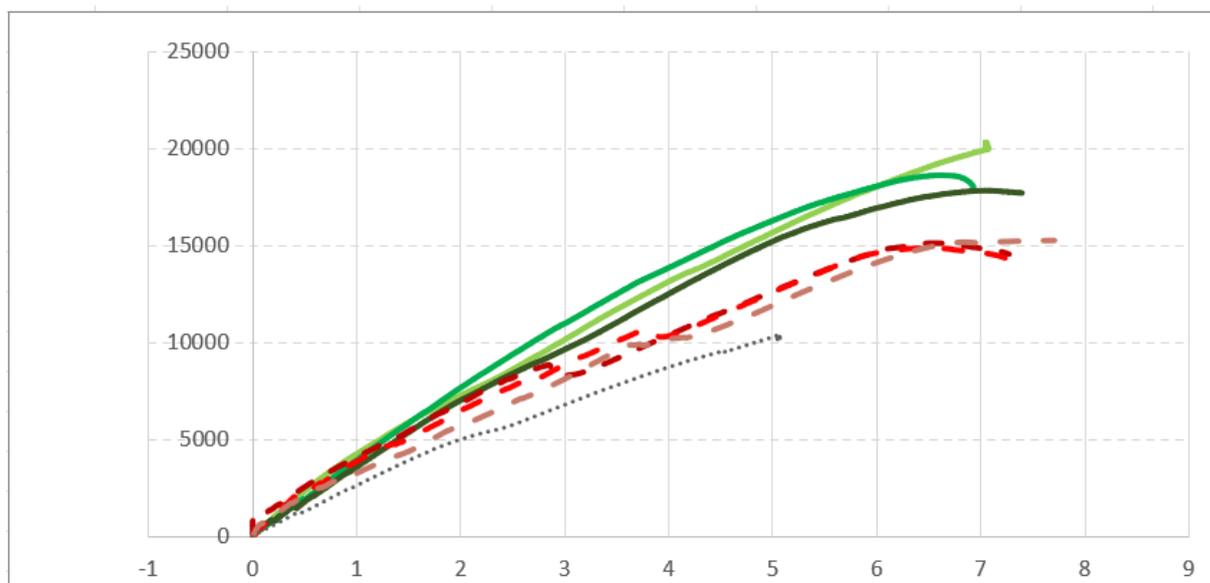
Figura 21 - Gráfico das vigas com Lâmina de Fibra de carbono



Fonte: Autoras, 2023

No caso das vigas com lâminas inseridas (método NSM) não ocorreu descolamento do reforço, motivo que fez as vigas atingirem cargas maiores, comportamento mais eficiente do que a técnica de mantas coladas.

Figura 22 - Gráfico comparativo entre vigas com lâmina, vigas com manta de Fibra de Carbono e a viga armada sem reforço.



Linha verde e contínua: Vigas com lâminas de Fibra de Carbono

Linha vermelha e tracejada: Vigas com mantas de Fibra de Carbono

Linha preta e pontilhada: Viga armada sem reforço

Fonte: As autoras

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, são apresentadas as considerações derivadas da condução dos estudos realizados durante as fases de elaboração e execução deste trabalho, destacando-se, sobretudo, as considerações pertinentes ao estudo experimental.

Desta forma, considera-se que os objetivos propostos para o trabalho foram alcançados. Conforme as informações e os resultados obtidos durante a realização do estudo experimental, pode-se considerar que o reforço de vigas de concreto armado através da aplicação da argamassa polimérica com a aplicação de fibras de carbono mostrou-se eficaz, apresentando considerável ganho de rigidez e da capacidade de carga. Observando que a técnica NSM se comportou melhor do que a técnica de manta colada na superfície das vigas, obtendo-se maiores cargas e menores flechas.

Deve-se destacar que a idade dos corpos de prova e a carbonatação dos mesmos exercem influência direta nos resultados, bem como a aderência reduzida entre o adesivo epoxídico, que fixava a manta de fibra de carbono, e a argamassa polimérica. No entanto, no presente estudo não houve um dimensionado da influência da carbonatação nos resultados obtidos.

Diante da complexidade dos fatores que afetam o reforço de vigas, são sugeridos estudos adicionais para aprimorar a compreensão das técnicas empregadas neste trabalho. Entre as recomendações, destaca-se a pesquisa de novos produtos com melhor aderência entre argamassa polimérica e manta de fibra de carbono, bem como a realização de um estudo comparativo entre peças carbonatadas reforçadas e peças sem colmatação de poros reforçadas, ambas submetidas aos mesmos tipos de ensaios.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARQUEZ, Ana Paula. Aplicação de laminado de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) inserido em substrato de microconcreto com fibras de aço para reforço à flexão de vigas de concreto armado. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. Fundamentos do concreto armado. Bauru: Unesp, 2006.

BEBER, Andriei José. Comportamento Estrutural De Vigas De Concreto Armado Reforçadas Com Compósitos De Fibra De Carbono. 2003.

DOMINGUES, Bárbara et al. Análise da fibra de carbono nas obras da construção civil. 2022.

FERRARI, V. J. Reforço à flexão de vigas de concreto armado com manta de polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC) aderido a substrato de transição constituído por compósito cimentício de alto desempenho. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

FIORELLI, Juliano. Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira. Tese de mestrado – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos. São Carlos. 2002

FORTES, Adriano Silva et al. Vigas de concreto armado reforçadas com fibras de carbono. 2000.

FORTES, Adriano Silva. Estruturas de concreto submetidas à flexão reforçadas com laminados de CFRP colados em entalhes. Florianópolis. Tese (Doutorado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

GIL, Antônio Marcos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 4 ed. São Paulo:Atlas, 2002.

LEAL, Lilian Luna De Souza. FAGUNDES, Fabiano. Reforço estrutural com fibra de carbono. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 05, Ed. 11, Vol. 09, pp. 31-46. Novembro de 2020. ISSN: 2448-0959, Link de acesso:<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/fibra-de-carbono>

MACHADO, Ari De Paula. Manual de Reforço das Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono. VIAPOL. 2009.

MOREIRA, André Araujo Amato; VERMELHO, Lázaro Colodette; ZANI, Matheus Carreiro. Estudo da argamassa polimérica de assentamento de blocos e tijolos segundo aspectos técnicos, econômicos, mercadológicos e de clima organizacional. Revista Espacios, v. 38, n. 53, p. 1-14, 2017.

NILSON, A.H. ; DARWIN, D. ; DOLAN, C.W. Design of concrete structures. 14^a ed., McGraw Hill Higher Education, 2010, 795p.

OLIVEIRA, Gabrielle Brito; DO AMARAL ALVES, Laís. Uso da Argamassa Polimérica na Recuperação Estrutural. Boletim do Gerenciamento, v. 8, n. 8, p. 56-64, 2019.

PAPADAKIS, Vagelis G.; VAYENAS, Costas G.; FARDIS, Michael N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. Materials Journal, v. 88, n. 4, p. 363-373, 1991.

REIS, Andréa Prado Abreu. Reforço de vigas de concreto armado por meio de barras de aço adicionais ou chapas de aço e argamassa de alto desempenho. São Carlos. Dissertação (Mestrado)-Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.

RILEM Concrete Permanent Committee CPC-18, (1984). Measurement of hardened concrete carbonation depth, Materiaux et Constructions, Vol. 17, n°102.

SANTANA, Edvaldo Conceição de. Reforço de pilares de concreto armado por meio de encamisamento. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto Federal da Bahia, 2013.

SILVA, I.J.; LIBORIO, J.B.L.; MELO, A.B. (2000). Influência da estrutura porosa da pasta e concretos de cimento Portland na durabilidade das estruturas. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 29.

SILVA, V. M. (2007). Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida. [s.l.] Universidade de São Paulo.

SÜSSEKIND, J. C. (1987). Curso de Concreto. 5.ed. Rio de Janeiro: Globo. v. I.

VERÇOSA, E. J. (1991). Patologia das Edificações. Porto Alegre: Sagra