

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**BIANCA GENEROSO
TAILA BRANDES ABRAHÃO**

**AVALIAÇÃO DO USO DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO
ASSOCIADO A UMA CAMADA DE COMPÓSITO CIMENTÍCIO COMO REFORÇO
ESTRUTURAL EM VIGAS**

CURITIBA

2022

**BIANCA GENEROSO
TAILA BRANDES ABRAHÃO**

**AVALIAÇÃO DO USO DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO
ASSOCIADO A UMA CAMADA DE COMPÓSITO CIMENTÍCIO COMO REFORÇO
ESTRUTURAL EM VIGAS**

**Evaluation of the use of carbon fiber reinforced polymers associated with a
cement composite layer as structural reinforcement in beams**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Arthur Medeiros.

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**BIANCA GENEROSO
TAILA BRANDES ABRAHÃO**

**AVALIAÇÃO DO USO DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO
ASSOCIADO A UMA CAMADA DE COMPÓSITO CIMENTÍCIO COMO REFORÇO
ESTRUTURAL EM VIGAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 06/junho/2022

Arthur Medeiros
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Wellington Mazer
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

César Augusto Casagrande
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA
2022**

AGRADECIMENTOS

Dedicamos este trabalho às nossas famílias, fontes de incentivo, inspiração e aconchego. Sem eles, nada disso seria possível.

Agradecemos imensamente ao nosso orientador, Professor Dr. Arthur Medeiros que esteve ao nosso lado não só durante o TCC, mas ao longo de toda a nossa trajetória na universidade. Agradecemos também ao Professor Dr. Wellington Mazer, por apoiar a escolha do tema do trabalho e dar o suporte necessário para que tudo acontecesse.

Agradecemos aos professores Dr. Adauto José Miranda de Lima e Dra. Janine Nicolosi Corrêa que tão prontamente se disponibilizaram a nos ajudar. Ao Felipe Perretto, pela contribuição na execução dos ensaios em laboratório e ao Sr. Paulo por nos emprestar diversos equipamentos do canteiro da UTFPR.

Ao Claiton Cremonez, pelo fornecimento do concreto usinado e diversas outras dicas valiosas, à Rafaela Voziniak pela doação de resina e ao Rogério de Almeida Torres que disponibilizou seus funcionários para corte e dobra das armaduras. Ao Mário Luiz Vendramini, por ter despertado nosso interesse por reforços estruturais e ao Augusto Tetsuo Prado Inafuco, por desenvolver um equipamento eletrônico que serviu de suporte para os nossos ensaios.

Por fim, agradecemos ao Leonardo Lourenço Gomes e ao Pedro Henrique Woiciechowski por terem estado conosco e nos ajudado nas horas intermináveis de trabalho em laboratório e a todas as pessoas que, de alguma forma, estiveram ao nosso lado ao longo dessa jornada.

RESUMO

Duas técnicas de reforço estrutural que têm ganhado destaque são a aplicação de uma camada de Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD) e a aplicação de mantas de Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC) nas regiões tracionadas da estrutura de concreto armado. Contudo, o surgimento de tensões de cisalhamento na interface com o substrato caracteriza um modo de ruptura prematuro que impede o máximo aproveitamento do reforço. Como o surgimento dessas tensões pode ser atribuído à diferença da ordem de grandeza do módulo de elasticidade dos dois materiais, o objetivo deste estudo é avaliar se a aplicação de uma camada de CUAD entre os dois elementos auxilia na transmissão desses esforços na interface entre os materiais. Para isso foram confeccionadas 24 vigas, em modelo reduzido, que comparam o desempenho dos seguintes grupos: vigas reforçadas com compósito cimentício, vigas reforçadas com manta com fibra de carbono, vigas reforçadas com uma camada intermediária de compósito cimentício entre o concreto existente e a manta de fibra de carbono e vigas de referência, que não possui nenhum tipo de intervenção. A análise foi realizada através do ensaio de flexão a quatro pontos que permitiu avaliar os valores das cargas de ruptura e das cargas que originaram a primeira fissura em cada amostra. Não foi possível comparar o desempenho entre os grupos de vigas em relação à tensão de ruptura, visto que os modelos reduzidos romperam por cisalhamento. Porém, a análise da carga de aparecimento da primeira fissura de cada amostra possibilitou concluir que a camada de compósito cimentício associada à manta de fibra de carbono foi o grupo de controle que mais retardou o aparecimento das fissuras de flexão, seguido dos grupos de reforço com manta de fibra de carbono e reforço com compósito cimentício.

Palavras-chave: Concreto; Reforço Estrutural; CUAD; PRFC.

ABSTRACT

Two structural reinforcement techniques that have gained prominence are the application of a layer of Ultra High-Performance Concrete (UHPC) and the application of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) in the tensioned regions of the reinforced concrete structures. However, the appearance of shear stresses at the interface with the substrate characterizes a premature failure mode that prevents the maximum use of the reinforcement. As the emergence of these tensions can be attributed to the difference in the order of magnitude of the modulus of elasticity of the two materials, the objective of this study is to evaluate whether the application of a layer of UHPC between the two elements helps in the transmission of these forces at the interface between the materials. For this, 24 beams were made, in a reduced model, which compare the performance of the following groups: beams reinforced with cement composite, beams reinforced with CFRP, beams reinforced with an intermediate layer of cement composite between the existing concrete and the CFRP and reference beams, which do not have any type of intervention. The analysis was carried out through the four-point bending test, which allowed the evaluation of the values of the breaking loads and the loads that originated the first crack in each sample. It was not possible to compare the performance between the groups of beams in relation to failure stress, since the reduced models failed by shear. However, the analysis of the load at the onset of the first crack of each sample made it possible to conclude that the cement composite layer associated with the CFRP was the control group that most delayed the appearance of bending cracks, followed by the reinforcement groups with CFRP and reinforced with cement composite.

Keywords: Concrete; Structural Reinforcement; UHPC; CFRP

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Descrição dos grupos de vigas de concreto armado	21
Figura 2 - Comparativo entre compósitos, aço e alumínio	25
Figura 3 - Preparação do substrato no sistema de cura in situ	27
Figura 4 - Aplicação de manta flexível	27
Figura 5 - Descrição dos grupos de vigas de concreto armado	35
Figura 6 - Detalhamento da armadura	36
Figura 7 - Armaduras posicionadas na forma	36
Figura 8 - Concretagem dos modelos reduzidos	37
Figura 9 - Moldagem dos corpos de prova cilíndricos.....	37
Figura 10 - CUAD no estado fresco	38
Figura 11 - Modelos reduzidos com CUAD no estado fresco.....	39
Figura 12 - Corpos de prova cilíndricos de CUAD	39
Figura 13 - Cura das vigas com a camada de CUAD.....	40
Figura 14 - Manta de PRFC	40
Figura 15 - Regularização com esmerilhadeira	41
Figura 16 - Aplicação da manta de PRFC.....	41
Figura 17 - Ensaio de flexão a quatro pontos	42
Figura 18 - Ensaio de flexão a quatro pontos	43
Figura 19 - Fissura vertical – Ensaio de flexão a quatro pontos.....	48
Figura 20 - Fissura à 45° - Ensaio de flexão a quatro pontos.....	52
Figura 21 - Descolamento do reforço em CUAD.....	53
Figura 22 - Descolamento do reforço em CUAD + PRFC.....	53
Gráfico 1 - Granulometria	33
Gráfico 2 - Resistência à compressão axial - Concreto convencional	45
Gráfico 3 - Resistência à compressão axial - CUAD	46
Gráfico 4 - Resultados da carga de ocorrência da primeira fissura	49
Gráfico 5 - Tensão de Ruptura	51
Gráfico 6 - Tensão x Deformação	53
Quadro 1 - Classes de agressividade ambiental (CAA)	15
Quadro 2 - Correspondência entre CAA, relação a/c e cobrimento.....	15
Quadro 3 - Tipos de intervenção.....	16
Quadro 4 - Propriedades mecânicas de resinas termorrígidas.....	23
Quadro 5 - Propriedades de algumas fibras	24
Quadro 6 - Principais características de instalação de sistemas de reforços com PRFC	26
Quadro 7 - Aplicação de PRF em diversos elementos estruturais	29
Quadro 8 - Grupo de vigas de concreto armado	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades químicas do cimento	31
Tabela 2 - Propriedades físicas do cimento	31
Tabela 3 - Caracterização areia fina.....	32
Tabela 4 - Caracterização areia média.....	32
Tabela 5 - Caracterização areia misturada.....	32
Tabela 6 - Propriedades da sílica ativa.....	33
Tabela 7 - Propriedades químicas do pó de quartzo.....	33
Tabela 8 - Propriedades da manta de PRFC	34
Tabela 9 - Características físicas da resina epóxi	34
Tabela 10 - Resistência à compressão axial - Concreto convencional	45
Tabela 11 - Resistência à compressão axial – CUAD.....	46
Tabela 12 - Testes de Tukey-Kramer para 95% de nível de confiança	46
Tabela 13 - Resultados da carga de ocorrência da primeira fissura	48
Tabela 14 - Testes de Tukey-Kramer para 95% de nível de confiança – Primeira fissura	49
Tabela 15 - Porcentagem de aumento de carga até a primeira fissura	50
Tabela 16 - Tensão de ruptura.....	51
Tabela 17 - Testes de Tukey-Kramer para 95% de nível de confiança	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Objetivos	10
1.1.1	Objetivo geral	10
1.1.2	Objetivos específicos.....	10
1.2	Justificativa	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	Concreto armado	12
2.1.1	Características e propriedade do concreto	12
2.1.2	Requisitos de qualidade	14
2.2	Patologia, intervenções e reforço das estruturas	15
2.3	Concreto de ultra alto desempenho	18
2.4	Reforço estrutural com CUAD	20
2.5	Polímeros reforçados com fibras	21
2.5.1	Matriz.....	22
2.5.2	Fibras	23
2.6	Reforço estrutural com polímero reforçado com fibras	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1	Materiais	31
3.1.1	Cimento	31
3.1.2	Agregados	31
3.1.3	Adição de finos	33
3.1.4	Aditivos.....	34
3.1.5	Fibra de carbono	34
3.1.6	Resina epóxi.....	34
3.2	Métodos	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	Resistência à compressão axial	45
4.2	Carga de ocorrência da primeira fissura	47
4.3	Resistência à flexão	50
5	CONCLUSÕES	55
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	56
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

No início do século XX, Koenen iniciou o desenvolvimento da teoria do concreto armado e, posteriormente, Mörsch deu continuidade a partir da realização de inúmeros ensaios. Portanto, no século XX o concreto armado se estabeleceu como o material de construção mais utilizado nos canteiros de obras (CARVALHO e FILHO, 2014).

Desde então, devido a sua versatilidade e comprovada capacidade de resistir à maioria dos esforços atuantes nas estruturas, o concreto armado foi empregado em inúmeras obras ao redor do mundo. Apesar de o concreto se configurar como um material durável, a degradação ambiental, mudança da utilização do ambiente e possíveis falhas na fase de concepção podem afetar a estabilidade e segurança das estruturas.

Hoje, quase 100 anos após a construção dos primeiros grandes projetos em concreto armado, várias edificações vêm alcançando sua vida útil originalmente prevista e já demandam obras de reparo ou reforço estrutural para prolongar sua vida útil e garantir a estabilidade e integridade de sua estrutura.

Nesse contexto, vários materiais podem ser utilizados para recuperar essas estruturas, tais como: o concreto armado, o concreto protendido, chapas ou perfis metálicos e materiais poliméricos reforçados com fibras vidro ou aramida. Além destes, duas técnicas vêm ganhando espaço por serem modernas e de alto desempenho: a aplicação de mantas de fibra de carbono e a reconstituição das seções transversais com Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD).

Os polímeros reforçados com fibras de carbono (PRFC) são constituídos pela matriz polimérica e pelas fibras de carbono. A matriz é a responsável por unir as fibras, conferir aderência entre a manta e o substrato e, conseqüentemente, transmitir os esforços da peça para as fibras - que constituem o elemento resistente do sistema, ou seja, possuem a função de absorver as tensões de tração geradas pelos esforços solicitantes.

Alternativamente, pode ser realizada a substituição de parte da seção transversal ou a adição de uma camada de concreto de ultra alto desempenho nas regiões mais solicitadas dos elementos estruturais. Esse tipo de concreto é caracterizado pela ausência de agregado graúdo, baixa relação água-cimento e pela presença de adições pozolânicas, propriedades essas que conferem baixa

porosidade, conseqüente ganho de impermeabilidade, aumento na resistência e na durabilidade do material.

Apesar dos dois materiais possuírem excelentes desempenhos, ambos possuem vantagens e desvantagens. O emprego de CUAD é mais eficiente na aderência entre o substrato existente e a nova camada, mas sua fabricação requer materiais especiais, demanda misturadores mais eficientes para a execução, agrega maior peso próprio à estrutura e, além disso, demanda mais tempo no processo de cura antes de liberar a estrutura para receber o carregamento. Já os compósitos de fibra de carbono são uma alternativa de fácil e rápida aplicação, que possuem menor peso próprio e maior resistência à tração e à corrosão quando comparado ao concreto, mas é um material de elevado custo que apresenta como principal problema o seu modo de ruptura (SCHNEIDER et al., 2017).

Conforme observado em ensaios realizados (SCHNEIDER et al., 2017; LEONI, 2016; PIVATTO, 2017), a ruptura do reforço com fibra de carbono geralmente acontece na interface da resina, utilizada na aplicação da manta, com o concreto da peça existente. Quando o elemento estrutural é solicitado, surgem tensões de cisalhamento, atribuídas à diferença de ordem de grandeza do módulo de elasticidade do concreto e da fibra de carbono (SCHNEIDER et al., 2017).

Considerando esses aspectos, a proposta neste estudo é analisar o desempenho de um reforço que associa uma camada intermediária de CUAD com a manta de fibra de carbono para reduzir o efeito das deformações relativas entre os materiais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho de uma camada de CUAD como interface entre uma estrutura de concreto convencional e o reforço de PRFC.

1.1.2 Objetivos específicos

- Verificar se a presença dos reforços de CUAD, PRFC e PRFC associado ao CUAD influencia na tensão de ruptura das vigas de concreto armado.
- Verificar se a presença dos diferentes tipos de reforços influencia na carga de aparecimento da primeira fissura nas vigas de concreto armado.

1.2 Justificativa

Visto que muitas construções estão se aproximando do final da sua vida útil, conhecimentos sobre reforços estruturais têm sido cada vez mais necessários. Há diversas formas de se recuperar uma estrutura e a escolha deve ser compatível com o método construtivo, situação da edificação, além de ser técnica e economicamente viável. Porém, os próprios reforços estruturais podem apresentar problemas. Por integrarem materiais de diferentes idades e propriedades, tensões podem surgir nesta interface.

Uma técnica de reforço que pode apresentar essas adversidades é o reforço estrutural com Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC). O reforço com fibra de carbono é uma solução usada em construções já existentes, principalmente de concreto armado, que consiste em colar uma manta ou lâmina de polímero reforçado com fibra de carbono na estrutura de concreto. Devido a grande diferença entre os módulos de elasticidade da estrutura e do polímero, surgem tensões de cisalhamento na interface da resina (cola) e do concreto existente que podem prejudicar o desempenho do reforço, condenando a utilização da edificação.

Por esse motivo, o aprimoramento das técnicas de reforço estrutural é necessário não só para a manutenção da utilidade das construções, como para garantir maior durabilidade dos reforços, proporcionando mais conforto e segurança para os usuários.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Entende-se que é importante compreender os fundamentos do concreto armado e as patologias que o atingem para então estudar formas de reforço estrutural. Portanto, o conteúdo deste capítulo contempla uma visão geral sobre esses temas e os dois métodos de reforço objetos desse estudo: Concreto de Ultra Alto Desempenho e Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono.

2.1 Concreto armado

Quando combinados segundo uma proporção bem definida, água, cimento e agregados integram o material de construção mais utilizado nos canteiros de obra: o concreto. O concreto se comporta de maneira bastante eficiente quando submetido a esforços de compressão, porém, apresenta baixa resistência à tração e comportamento frágil.

Tal característica restringe sua aplicação isolada em elementos tracionados ou fletidos. Portanto, para aumentar a resistência dos elementos estruturais de concreto, é possível empregar o aço nas regiões tracionadas do elemento. Dessa forma, através da aderência que existe entre os dois materiais, o concreto e a armadura de aço trabalham em conjunto originando o concreto armado (BASTOS, 2019). Associando as qualidades do concreto (trabalhável, durável, resistente à compressão, ao fogo, a choques e a vibrações) às do aço (ductibilidade, resistência à tração e compressão) é possível construir elementos estruturais de diversas formas, que apresentem comportamento monolítico, que resistem à maioria das solicitações e que já possuem um método construtivo bem consolidado e conhecido no país.

2.1.1 Características e propriedade do concreto

O concreto é um material composto e, conseqüentemente, as características desejadas para seu estado endurecido dependem do planejamento e da sua execução. Dessa forma, a escolha das matérias-primas, o método de dosagem, de mistura, de transporte, de adensamento e de cura têm forte influência sobre o comportamento final desse material.

As principais características do concreto no estado fresco são a consistência, a trabalhabilidade e a homogeneidade (CARVALHO e FILHO, 2014). A primeira se

refere a capacidade do concreto de se deformar e varia com a quantidade de água utilizada, com o tamanho dos agregados e com o emprego de aditivos. Uma das formas de avaliar a consistência do concreto é realizar a medida do abatimento do tronco de cone, *slump*, realizada no ensaio regido pela NBR NM 67 (ABNT, 1998).

A trabalhabilidade está ligada a forma como é feito o adensamento. Concretos com *slump* alto, os chamados concretos autoadensáveis, são praticamente fluídos e dispensam o adensamento. Para alcançar essa fluidez são incorporados aditivos na massa de concreto, dessa forma, não se faz necessário aumentar a relação água/cimento (CARVALHO e FILHO, 2014).

Elevar a relação água/cimento significaria reduzir a resistência do concreto e sua durabilidade, portanto, conforme sugere a NBR 6118 (ABNT, 2014), não é recomendado ultrapassar os limites relacionados com a classe de agressividade.

A homogeneidade é representada pela distribuição dos agregados graúdos dentro da massa de concreto. Quanto mais homogênea for essa distribuição, melhor será a proteção conferida pelo concreto à armadura. Para garantir essas condições, deve ser dada especial atenção às etapas de fabricação, transporte e lançamento do concreto.

Nesse contexto, o adensamento visa evitar a formação de bolhas de ar, de vazios e a segregação dos materiais, e, é por esse motivo, que se configura como uma das etapas mais importantes da execução de uma estrutura de concreto armado. De maneira geral, na maioria das obras, o adensamento é feito de forma mecânica através da imersão de vibradores mecânicos na massa de concreto. A NBR 14931 (ABNT, 2004) traz as recomendações técnicas para o uso de vibradores mecânicos.

No estado endurecido as características mais relevantes são as resistências à compressão e à tração. Durante o dimensionamento, o engenheiro estrutural define a resistência característica à compressão aos 28 dias (f_{ck}) requerida para aquele projeto. A avaliação da resistência no Brasil é feita através do ensaio de compressão axial de corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 15 cm e 30 cm de altura ou de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, moldados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015) e ensaiados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Resumidamente, após decorridos 28 dias da moldagem do corpo de prova, este é posicionado em uma prensa hidráulica que aplica uma carga de compressão e, conhecida essa carga (N_{rup}) e a área da seção transversal do corpo de prova (A), é possível determinar a resistência do corpo de prova (f_{cj}) de acordo com a Equação 1.

$$f_{cj} = N_{rup}/A \quad (1)$$

A resistência característica do concreto à compressão será determinada após a realização desse ensaio em um determinado número de corpos de prova, considerando a média desses valores (f_{cm}) e a distribuição estatística dos resultados, que é definida para um grau de confiança de 95%. Dessa forma, o f_{ck} pode ser determinado conforme a Equação 2.

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,645 \cdot s \quad (2)$$

Para determinar a resistência à tração do concreto, podem ser realizados três tipos de ensaios: flexo-tração, compressão diametral e tração pura. Quando não for possível realizar esses ensaios, a resistência média do concreto à tração pode ser determinada através de expressões, apresentadas pela NBR 6118 (ABNT, 2014), que correlacionam a resistência à compressão com a resistência à tração. Para concretos de até 50 MPa, escopo deste estudo, podem ser utilizadas as equações 3 a 5.

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ct,m} \quad (3)$$

$$f_{ctk,sup} = 1,3 \cdot f_{ct,m} \quad (4)$$

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (5)$$

2.1.2 Requisitos de qualidade

A NBR 6118 (ABNT, 2014), norma nacional vigente que estabelece os critérios gerais e requisitos básicos a serem considerados nos projetos de estruturas de concreto armado, define que a qualidade do concreto deve ser determinada de acordo com três requisitos:

- a) Segurança à ruptura: requisitos relativos à capacidade resistente do elemento estrutural;
- b) Desempenho em serviço: requisitos relativos à abertura de fissuras, deformações excessivas e vibrações indesejáveis;
- c) Durabilidade: requisitos relativos à capacidade da estrutura resistir às influências ambientais.

Com relação à durabilidade, um dos principais fatores que influenciam a perda de qualidade da estrutura é a classe de agressividade ambiental (CAA). A NBR 6118

(ABNT, 2014) estabelece, portanto, quatro classes de agressividade de acordo com as condições de exposição da estrutura naquele ambiente, caracterizadas pelas ações físicas e químicas que agem sobre a estrutura (CARVALHO e FILHO, 2014). Logo, no dimensionamento das estruturas de concreto é possível determinar a classe de agressividade de acordo com os parâmetros dispostos no Quadro 1.

Quadro 1 - Classes de agressividade ambiental (CAA)

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

Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014)

Além da influência do ambiente de exposição, a NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece ainda valores máximos para alguns parâmetros, determinados devido à alta correlação entre a classe de agressividade, a relação água/cimento e o concreto de cobrimento (Quadro 2), de forma a garantir o desempenho da durabilidade das estruturas.

Quadro 2 - Correspondência entre CAA, relação a/c e cobrimento

Classe	Tipo	Classe de agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Cobrimento	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$

Fonte: Adaptado da NBR 6118 (ABNT, 2014)

Todos esses fatores influenciam diretamente no desempenho e na durabilidade das estruturas de concreto, portanto, deve-se dar devida atenção à determinação desses parâmetros na fase de dimensionamento do projeto.

2.2 Patologia, intervenções e reforço das estruturas

A patologia pode ser entendida como a parte da engenharia que estuda os sintomas, os mecanismos, as causas e origens dos defeitos das construções civis, ou seja, é o estudo das partes que compõem o diagnóstico do problema (HELENE, 2012).

Para uma estrutura de concreto armado, um problema é considerado patológico e passível de intervenção, caso afete alguns dos requisitos da construção,

seja a funcionalidade, a resistência ou a estética. As manifestações patológicas no concreto armado comprometem diretamente o desempenho da estrutura, que podem causar impactos estéticos desagradáveis, além de incômodo e sensação de insegurança aos usuários (HELENE, 1998).

Somente após não restar dúvidas na etapa de diagnóstico é que se inicia a fase de recuperação das estruturas, que deve conter um projeto que leve em consideração a resposta da estrutura até então e a avaliação de como as intervenções irão interferir nos anos seguintes (HELENE e PEREIRA, 2003).

Segundo Bolina et al. (2019) e Cardoso (2020), as intervenções realizadas em elementos estruturais costumam ser elencadas dependendo do tipo da manifestação patológica, do local e da magnitude, levando em consideração fatores como: alteração do uso da edificação, ampliação, incidência de ações excepcionais, falta ou deficiência de projeto, execução, uso ou manutenção. As formas mais aceitas de caracterização das intervenções são as chamadas 8R: reabilitação, recuperação, reparo, reforço, restauro, reforma, reconstrução e retrofit. As definições de cada intervenção podem ser encontradas no Quadro 3.

Quadro 3 - Tipos de intervenção

INTERVENÇÃO	OBJETIVO	
Reabilitação	Trazer à condição original que foi perdida ao longo do tempo.	
Recuperação	Correção de anomalias através de um conjunto de operações e técnicas, podendo ser reparo, reforço ou restauro.	
	Reparo	Correção de danos de elementos que afetam alguma peça integrante de um sistema.
	Reforço	Incrementar a resistência e/ou estabilidade do sistema.
	Restauro	Reestabelecer as características originais do ponto de vista de sua concepção histórica.
Reforma	Estabelecer nova forma e condições de uso à edificação, orientada pela NBR 16280 (ABNT, 2020).	
Reconstrução	Construir novamente uma edificação obedecendo os projetos originais.	
Retrofit	Modernizar a edificação de forma a estender a sua vida útil.	

Fonte: adaptado de Cardoso (2020)

Dentre os conceitos apresentados, destaca-se que o reforço estrutural é pautado na necessidade de execução de adequações da capacidade resistente em função do uso. Essa adequação pode ser necessária para reestabelecer o desempenho das estruturas, seja para possibilitar a troca de utilizações-tipo das edificações ou para sanar possíveis manifestações patológicas (BOLINA et al., 2019; MACHADO, 2002; REIS, 2001).

Segundo Oliveira (2013), os problemas patológicos têm suas origens causadas por falhas que ocorrem durante a realização de uma ou mais das atividades inerentes à construção civil, que podem ser divididas em três etapas básicas: concepção (planejamento/ projeto/ materiais), execução e utilização.

De um modo geral, as patologias não tem sua origem concentrada em fatores isolados, mas sofrem influência de um conjunto de variáveis, que podem ser classificadas de acordo com o processo patológico, com os sintomas, com a causa geratriz do problema ou ainda com o momento em que ocorrem (OLIVEIRA, 2013).

As estruturas de concreto armado de hoje são mais sensíveis a possíveis defeitos de materiais, de execução ou de cálculo, embora sejam otimizadas do ponto de vista estrutural e econômico (BEBER, 2003). Além disso, segundo Souza e Ripper (2009), o crescimento acelerado da construção civil e a grande competitividade de mercado, provocaram a necessidade de mais inovações, que acarretam na aceitação de maiores riscos. Tais fatores, aliados ao pouco rigor no controle de qualidade dos materiais, das fases construtivas e da utilização das edificações, vêm provocando a queda da qualidade das construções, chegando a casos em que mesmo antes da ocupação já existam manifestações patológicas que levam a necessidade de reforço (THOMAZ, 2002).

Para mais, atualmente muitas estruturas de concreto armado estão atingindo o período de vida útil inicialmente previsto. Segundo Verzegnassi (2015), foi por volta dos anos 1900 que começaram a surgir as primeiras edificações em concreto armado no Brasil e segundo Moreira (2018) a maioria das estruturas de concreto são projetadas para uma vida útil de 50 anos e grandes estruturas para 100 anos.

Por esses motivos, nas últimas décadas a durabilidade das estruturas de concreto têm sido alvo de enorme preocupação dos profissionais deste segmento. Ainda mais porque a utilização do concreto armado como método construtivo é dominante no Brasil. Segundo Cavalcante et al. (2020), o concreto armado é o material estrutural absolutamente hegemônico nas constituições das cidades brasileiras. Logo, diversas formas de reforço de estruturas têm sido estudadas.

A escolha da técnica de reforço mais adequada deve ser realizada após avaliação criteriosa das características da peça a ser reforçada e dos métodos que podem ser aplicados. A definição pode ser baseada em: desempenho do reforço, preservação da arquitetura, custo de aplicação, facilidade e rapidez na instalação e facilidade de encontrar o material e a mão de obra (NETO et al., 2021).

Complementando, Chastre (2014) afirma que ainda devem ser avaliados pontos como a continuidade ou não da utilização da estrutura durante a intervenção e também a agressividade do ambiente.

Dentre as técnicas de reforço estrutural mais utilizadas estão: aumento de seção transversal, adição de armaduras, protensão externa, aplicação de chapas de aço e encamisamento com concreto de alto desempenho. Além dessas técnicas, estão se tornando usuais os reforços com aplicação de materiais compósitos, como os reforçados com fibra de carbono (BEBER, 2003).

A seleção dos materiais de reparo para as estruturas de concreto requer uma compreensão do comportamento do material em sua aplicação e em seu estado permanente, nas condições de serviço e exposição previstas. Um dos maiores desafios para o desempenho bem-sucedido dos materiais de reparo é seu comportamento dimensional em relação ao substrato. Mudanças dimensionais causam tensões internas no material de reparo e no substrato. Altas tensões internas podem resultar em fissuras de tensão, perda da capacidade de transporte de carga ou deterioração. É necessária atenção especial para minimizar essas tensões e selecionar materiais que abordem adequadamente o comportamento dimensional relativo (LEE et al., 2005).

2.3 Concreto de ultra alto desempenho

No contexto da grande evolução do cálculo estrutural, permitindo que projetistas especifiquem estruturas cada vez mais arrojadas em concreto armado e protendido, foram desenvolvidas misturas especiais, com propriedades superiores, chamadas de Concretos de Alta Resistência (CAR), Concretos de Alto Desempenho (CAD), e de Ultra Alto Desempenho (CUAD). De acordo com Aïtcin (2008), o conceito desses concretos especiais se baseia em três princípios básicos:

- Aglomerantes e agregados: aumento da homogeneidade pela eliminação das partículas grossas, limitação da areia para prevenir que entrem em contato entre si na pasta endurecida, melhoria nas propriedades mecânicas da pasta de cimento hidratada e eliminação da zona de transição nas interfaces pasta/agregados;

- Empacotamento: aumento da compacidade pela otimização das dimensões dos grãos dos pós da mistura e, quando possível, pela compressão exercida durante a cura;
- Cura: refinamento da microestrutura da pasta hidratada por tratamento de calor.

Tendo em vista o primeiro princípio de Aïtcin (2008), Tutikian et al. (2011) afirmam que pelo efeito da maior superfície específica, encontrada em grãos de pequenas dimensões, a distribuição das cargas incidentes sobre os grãos é mais homogênea, diminuindo a concentração de tensões em eventual falha da microestrutura, assim, aumentando a resistência última do material. Além disso, segundo Fehling et al. (2015), a relação água/aglomerante usualmente utilizada para a obtenção de um CUAD é de no máximo 0,24, visto que uma relação maior pode gerar retrações por secagem e autógena, assim diminuindo a resistência da matriz, além de formar poros capilares que reduzem sua impermeabilidade.

Em relação ao segundo princípio, Christ et al. (2019) afirmam que o desempenho dos CUAD está ligado diretamente ao empacotamento granular da mistura dos constituintes. Em concordância, Geisenhansluke (2008) e Tayeb et al. (2015) sustentam que o empacotamento leva à mistura uma excelente compacidade, assim, evitando imperfeições devido à quantidade de vazios gerado pela distribuição granulométrica.

A obtenção desses concretos de última geração, segundo Tutikian et al. (2011), foi possível devido à incorporação de outros elementos no concreto, como aditivos, adições minerais e pigmentos, além de procedimentos como cura a altas temperaturas e pressões, consoante ao terceiro princípio. Ressalte-se ainda a importância de corretos procedimentos de mistura, adensamento, acabamento, cura, desforma e manutenção na estrutura, pois, não basta ter uma dosagem bem realizada se a produção não o é.

Segundo Vanderlei (2004), a mistura deve ser iniciada homogeneizando todos os materiais secos, logo, deve-se fluidificar a pasta com aditivos químicos e água. O tempo de mistura para o CUAD é maior que o do concreto convencional, por conta da ausência de agregado graúdo que auxilia na mistura e dispersão dos componentes menores.

Outro fator de atenção, é a seleção dos materiais, que, principalmente se tratando de CUAD, pode ter grande interferência. Para a escolha do cimento,

buscam-se os tipos mais puros possíveis, como o CP V-ARI. A sílica ativa é a adição mineral recomendada devido à forma de suas partículas serem bem arredondadas e com tamanho cerca de 100 vezes menor que o cimento. O agregado de quartzo é recomendado devido às propriedades superiores da rocha mãe, sendo utilizado tanto como areia quanto como pó, para conferir uma boa compacidade à mistura. Também é importante determinar o ponto de saturação do aditivo superplastificante (TUTIKIAN et al., 2011).

Finalizando, o CUAD é um concreto especial que apresenta agregados de pequenas dimensões (atualmente podendo chegar até brita 0) e usa baixa relação água/aglomerante. Assim, apresenta resistência à compressão, aos 28 dias, superior a 150 MPa e resistência à tração superior a 8 MPa, além de elevada tenacidade (quando associado a fibras) e durabilidade (AFGC, 2013; CHRIST et al. 2019).

2.4 Reforço estrutural com CUAD

O Concreto de Ultra Alto Desempenho pode ser aplicado em diversas áreas da construção, como em construção de pontes, passarelas e torres eólicas, na realização de conexões de elementos estruturais ou para recuperação, reforço ou reabilitação estrutural, sendo o reforço de estruturas uma das aplicações com maior potencial (BUTTIGNOL et al., 2018; MAZER et al., 2021).

Dentre os materiais de reparo disponíveis, o concreto é um dos mais utilizados, uma vez que apresenta altas resistências iniciais, expansões controladas e retrações mínimas (REIS, 2001). O CUAD ainda desempenha dupla função: estrutural e de proteção. Além de contribuir para a resistência aos esforços solicitantes da estrutura, atua na proteção contra impactos, ação do fogo, desgaste devido à ação das intempéries e ainda contra o ingresso de agentes agressivos (BUTTIGNOL et al., 2018).

Em concordância, Lee et al. (2005) afirmam que o CUAD possui potencial para agir como reforço estrutural ou retrofit, pois auxilia no fortalecimento da resistência à compressão e à flexão. Os autores obtiveram um aumento de resistência à compressão e à flexão com reforço de 10 mm de CUAD resultou, respectivamente, em cerca de 200% e 150% a mais do que reforços com concreto convencional. Mazer et al. (2021), complementam que a aplicação do CUAD em reforços estruturais pode ser utilizada tanto na região comprimida quanto na região tracionada da viga.

Já, de acordo com Buttignol et al. (2018), a reabilitação estrutural com CUAD pode ser realizada de três maneiras distintas, mostradas na a Figura 1.

Figura 1 - Descrição dos grupos de vigas de concreto armado

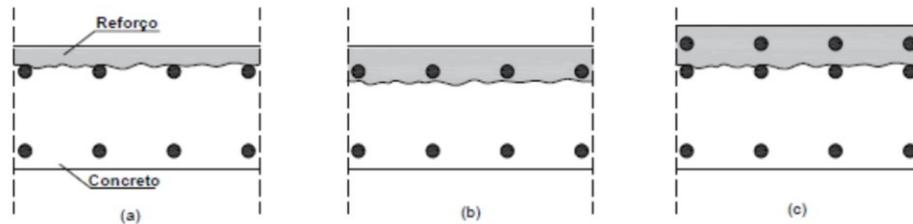


Figura 1 - Configurações de reforço estrutural com CUADRF: (a) reconstituição da camada de cobrimento; (b) recuperação da camada de cobrimento e região da armadura existente; (c) reforço estrutural com aumento da seção e da área de aço.

Fonte: Buttignol et al., 2018

No caso da Figura 1 (a), a camada de cobrimento danificada é substituída por uma nova cobertura de concreto especial. No caso da Figura 1 (b), a deterioração da camada de cobrimento provocou a corrosão da armadura com a formação de fissuras radiais e tangenciais, sendo necessária a remoção do concreto ao redor da armadura para tratamento das barras e recomposição do concreto danificado. No caso “c”, é realizado um reforço com aumento da área de aço e da seção transversal da viga, para proporcionar maior capacidade em função de sobrecargas e aumento do carregamento atuante na estrutura. Nos três casos, a utilização do CUAD garante maior durabilidade e desempenho da estrutura devido à restrição de formação de fissuras na camada de reforço, garantindo uma permeabilidade extremamente baixa de água e íons de cloretos (BUTTIGNOL et al., 2018).

Para realização do reforço, é necessário cuidado especial na interface concreto novo e velho, afirma Borges (2021). Segundo Tayeh et al. (2012), a camada de interface é geralmente a posição mais fraca de toda a estrutura. A capacidade de interligação entre duas interfaces é influenciada por uma série de fatores, como a rugosidade interfacial que é reconhecida como um elemento importante que afeta a resistência de aderência da estrutura mista de concreto (JU et al., 2020).

2.5 Polímeros reforçados com fibras

O reforço de estruturas de concreto armado é realizado quando existe a necessidade de aumentar a capacidade de carga da estrutura, recuperar a perda de resistência, corrigir deficiências construtivas ou de projeto e para reabilitar estruturas afetadas por manifestações patológicas. Para isso, normalmente são utilizados

materiais de construção e técnicas tradicionais, tais como o concreto armado, chapas ou perfis metálicos e o concreto pós-tensionado.

Alternativamente, os compósitos fabricados com fibras vêm ganhando destaque frente aos métodos tradicionais de reforço. Desde os anos 1980, quando esse material começou a ser produzido industrialmente (MACHADO, 2002), os polímeros reforçados com fibra (PRF) passaram a ser utilizados como reforço estrutural nos mais diversos tipos de estruturas: vigas, lajes, pilares, paredes, túneis, silos, tubos e treliças (ACI 440-2R, 2008).

Os polímeros reforçados com fibras são capazes de suportar tensões elevadas devido a interação entre matriz e fibras que interagem na redistribuição das tensões oriundas dos carregamentos externos. Portanto, as propriedades físicas e mecânicas desse tipo de compósito estão diretamente ligadas aos materiais que o compõe: a matriz e o componente disperso.

2.5.1 Matriz

A matriz é o elemento ligante e tem a função de unir as fibras do compósito, mantendo-as corretamente posicionadas, protegendo-as e dando forma ao material. É através da matriz que as solicitações externas serão transmitidas para as fibras (WIERZBICKI, 2021).

Para obter um melhor desempenho do reforço, é indicado que a matriz que constitui o compósito apresente baixo módulo de elasticidade. Dessa forma, quando for submetida a um carregamento externo, a matriz polimérica, sob tensão, irá transferir a carga para as fibras. Assim, obtém-se um material de alta resistência e alto módulo (MITCHELL, 2003).

A grande variedade de matrizes poliméricas existentes se divide entre aquelas fabricadas a partir de resinas termorrígidas ou termoplásticas. Para fins estruturais, as mais utilizadas são as de origem termorrígida, pois conferem estabilidade térmica, resistência química e baixa fluência (BEBER, 2003). As principais propriedades de algumas resinas termorrígidas podem ser observadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Propriedades mecânicas de resinas termorrígidas

Propriedade	Resinas		
	Poliéster	Éster-vinílico	Epóxi
Resistência à tração [MPa]	20 – 100	79 – 90	55 – 130
Módulo de Elasticidade [GPa]	2,1 – 4,1	3,0 – 3,3	2,5 – 4,1
Deformação na ruptura [%]	1 – 6	3,9 – 5,2	1 – 9
Resistência à flexão [MPa]	125	110 – 149	131
Peso específico [kNm ³]	9,8 – 14,2	10,9 – 12,9	10,8 - 12,7

Fonte: Beber (2003)

Conforme Quadro 4, dentre as opções de resinas termorrígidas, encontram-se o poliéster, o éster-vinílico, o uretano metacrilato, fenol e epóxi. O epóxi se destaca entre estes por apresentar aderência entre diversos tipos de fibras e substratos, por serem resistentes a ações químicas e por retraírem pouco durante a cura e por esse motivo é uma das resinas mais utilizadas na aplicação das mantas reforçadas com polímeros.

2.5.2 Fibras

O componente disperso pode ser particulado, fibroso ou estrutural (CALLISTER, 2002). Dentre estes, o que mais tem tido destaque são as fibras, especialmente as de carbono, objeto desse estudo.

As fibras são as responsáveis por determinar a estrutura interna do compósito e, portanto, são os elementos que irão conferir a resistência e determinar a espessura do sistema. Além disso, as fibras devem apresentar elevado módulo de elasticidade para que a interação com a matriz atinja a máxima eficiência (BEBER, 2003). As propriedades de alguns tipos de fibras podem ser observadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Propriedades de algumas fibras

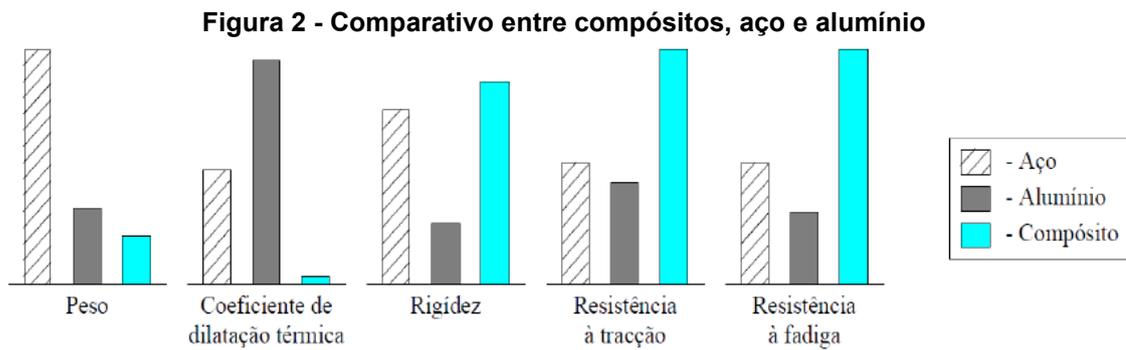
Propriedade	Vidro-E	Aramida (A) Kevlar 49	Carbono de elevada resistência (HS)	Carbono de elevado módulo (HM)	Aço CA-50
Resistência à tração [MPa]	2400	3600	3300 – 5000	1500 – 4700	500 (escoamento) 550 (ruptura)
Módulo de Elasticidade [GPa]	70	130	230 – 300	345 – 590	210
Deformação na ruptura [%]	3,5	2,5	1,5 – 2,2	0,6 – 1,4	0,2 (escoamento) 6 (ruptura)
Peso específico [kNm ³]	25,6	14,4	18	19	78,5
Coeficiente de dilatação térmica [10 ⁻⁶ /°C]	5,0	-2 (longitudinal)	-1 (longitudinal)	-1 (longitudinal)	12 (longitudinal)
		+59 (transversal)	+17 (transversal)		
Custo da fibra [US\$/kg]	2	22	15 – 22	90	1

Fonte: Beber (2003)

Conforme Quadro 5, dentre os diversos tipos de fibra (vidro, carbono, aramida), a fibra de carbono se apresenta como uma das mais promissoras devido à elevada resistência à tração, com alto módulo de elasticidade e pouca deformação na ruptura. Além disso, a força das ligações carbono-carbono conferem à fibra de carbono as seguintes características: é a fibra que apresenta a maior relação entre resistência e rigidez, mantém alta resistência quando submetida a elevadas temperaturas, à temperatura ambiente não é afetada por umidade ou por solventes, é resistente à corrosão eletroquímica, possui elevada resistência à tração, alta durabilidade, consegue se adaptar a diferentes formas geométricas e apresenta boa relação custo-benefício (BEBER, 2003).

2.6 Reforço estrutural com polímero reforçado com fibras

A partir do desenvolvimento tecnológico das mantas e lâminas reforçadas com fibras, a utilização desse tipo de material passa a se destacar frente a convencional aplicação de chapas de aço. O reforço com compósitos de PRFC apresenta vantagens significativas, como seu alto desempenho mecânico, leveza, dimensões reduzidas e fácil manuseio, que justificam a atual preferência por esse sistema frente aos tradicionais métodos de reforço. Um comparativo entre as características dos compósitos, aço e alumínio está apresentado na Figura 2.



Fonte: Taly (1998) apud Juvandes (2002)

O comportamento mecânico final do compósito depende diretamente dos materiais que o compõem e da orientação das fibras. Considerando a configuração espacial e a disposição das fibras, é possível encontrar no mercado PRF unidirecionais, bidirecionais ou multidirecionais, porém, para aplicações de reforço em estruturas de concreto, as unidirecionais são as mais apropriadas (PIVATTO, 2017). É possível classificar os compósitos de PRFC quanto ao sistema de aplicação: pré-fabricados ou curados in situ.

Nos sistemas pré-fabricados, o agente adesivo será responsável apenas pela aderência entre o reforço e o substrato, enquanto nos sistemas curados in situ a resina irá desempenhar a função da matriz do compósito, sendo, portanto, responsável pela transferência dos esforços (BEBER, 2003). No Quadro 6 é possível observar as principais características e aspectos de aplicação de cada sistema.

Quadro 6 - Principais características de instalação de sistemas de reforços com PRFC

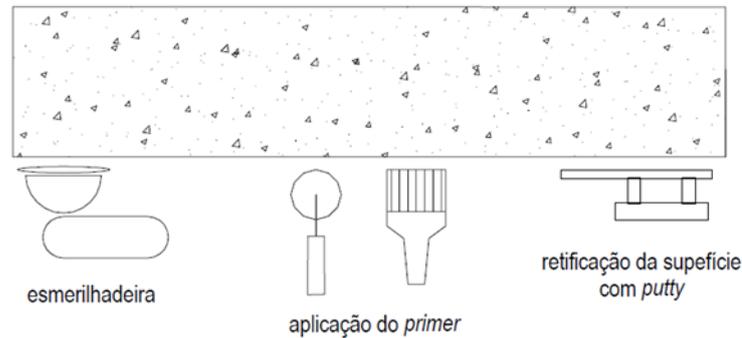
Característica	Sistemas Pré-fabricados	Sistemas curados in situ
Forma	tiras ou laminados	mantas ou tecidos
Espessura	1,0 a 1,5 mm	0,1 a 0,5 mm
Utilização	colagem dos elementos pré-fabricados com adesivo	colagem e impregnação das mantas e tecidos com resina (moldado e curado in situ)
Aspectos típicos da instalação	salvo condições especiais, aplicável somente em superfícies planas	independente da forma da superfície, necessidade de arredondamento dos cantos
	adesivo tixotrópico para colagem geralmente uma única camada rigidez do compósito e tixotropia do adesivo permitem a tolerância de algumas imperfeições na superfície reforçada aplicação simplificada, maior garantia de qualidade (sistema pré-fabricado)	resina de baixa viscosidade para colagem e impregnação frequentemente várias camadas aplicação do putty ¹ é necessária para prevenir o descolamento por imperfeição da superfície versatilidade de aplicação, necessita de rigoroso controle de qualidade
	controle de qualidade (má aplicação e mão de obra de baixa qualidade = perda da ação compósita entre o reforço e a estrutura, problemas na integridade do reforço a longo prazo)	

Fonte: Beber (2003)

Considerando os aspectos dispostos no Quadro 6, o procedimento para execução do reforço externo pode ser resumido nos seguintes passos: preparação da superfície e aplicação do compósito. A preparação da superfície deverá ser realizada para atender o critério de irregularidade máxima igual a 1 mm ou a tolerância recomendada pelo fabricante da manta de PRFC, conforme apontado pelo guia ACI Comitê 440 2R (ACI, 2008). Assim, pode ser necessário preparar a superfície com uma esmerilhadeira equipada com disco diamantado. Em seguida, é necessário aplicar uma camada de primer para reforçar o substrato e, dependendo do nível de deterioração da superfície, pode ser requerida também a regularização com o *putty*, conforme Figura 3 (BEBER, 2003).

¹ *Putty*: produto utilizado para eliminar pequenas irregularidades na superfície de concreto. O objetivo da sua utilização, além de regularizar a superfície, é evitar a formação de bolhas de ar a fim de garantir uma superfície uniforme para a aplicação da manta

Figura 3 - Preparação do substrato no sistema de cura in situ
elemento de concreto

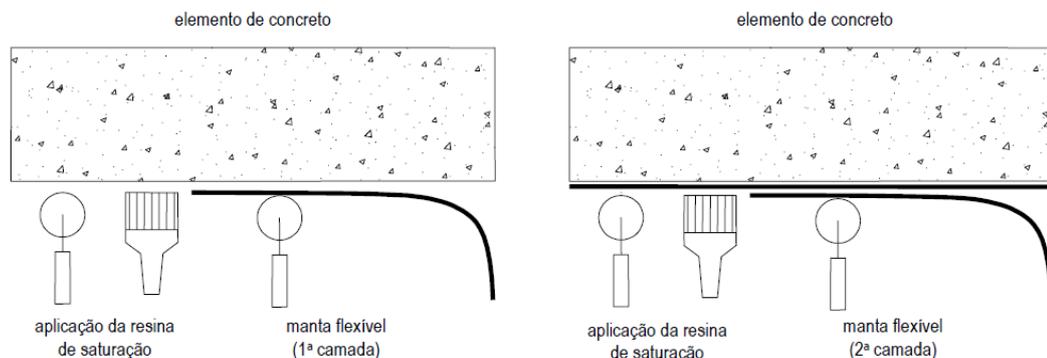


Fonte: Beber (2003)

Realizados os procedimentos indicados na Figura 3, no sistema curado in situ, é necessário ainda realizar a imprimação da superfície com o primer. Esse procedimento pode ser realizado com pincel ou rolo de espuma e serve para preencher os poros do concreto garantindo a ponte de aderência entre o substrato e reforço.

Segundo Beber (2003), após decorridas duas horas da aplicação do primer, a superfície já pode receber a resina de saturação e as fibras, seguindo a sequência de procedimentos apresentados na Figura 4.

Figura 4 - Aplicação de manta flexível



Fonte: Beber (2003)

Conforme o exposto na Figura 4, as mantas flexíveis devem ser então cortadas, com tesoura ou estilete, e pré-impregnadas com resina epóxi, para garantir a orientação das fibras. Para realizar a aplicação da manta, esta deve ser colada em único sentido, com a pressão das mãos do aplicador e com posterior auxílio de um rolo de borracha, a ser movimentado em um único sentido, a fim de expulsar eventuais bolhas de ar. O tempo de cura do reforço irá depender das condições climáticas, mas fica em torno de sete dias.

Já a aplicação do sistema de laminados pré-fabricados é ainda mais simples. Concluída a regularização da superfície, basta apenas realizar a mistura de resina epóxi bi-componente, aplicar uma fina camada na superfície do concreto, outra camada, um pouco mais espessa, na linha central da face do laminado e então fazer o posicionamento do laminado no substrato. Para garantir que não ocorra formação de vazios, faz-se uso do rolo de borracha para pressionar o reforço contra o concreto.

A face do concreto a ser reforçado dependerá do comportamento estrutural que este apresenta, ou seja, das regiões que apresentam tensões de tração. Dessa forma, por exemplo, uma viga a ser reforçada à tração terá o reforço aplicado ao longo da face inferior. No Quadro 7 é possível observar exemplos de aplicação em alguns tipos de elementos estruturais.

Quadro 7 - Aplicação de PRF em diversos elementos estruturais

Sistema FRP	REFORÇO TIPO Comportamento / Forma / Estrutura	
LAMINADOS / MANTAS (unidireccionais)		
	FLEXÃO	
	CORTE	FLEXÃO /CORTE
TECIDOS (bi ou multidireccionais)	COMPRESSÃO / DUCTILIDADE	
SISMO	IMPACTO / EXPLOSÃO	

FONTE: Juvandes (2002)

Tendo em vista a procura por métodos de reforço e recuperação de estruturas de concreto armado vêm demandando técnicas mais rápidas e eficientes, neste trabalho irá estudar o desempenho que uma camada intermediária de Concreto de Ultra Alto Desempenho acrescentará ao reforço realizado através da aplicação de Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono. Busca-se avaliar também se a camada intermediária irá absorver parte das tensões horizontais na interface do reforço com o substrato.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

As vigas de concreto convencional nas quais o reforço foi aplicado foram produzidas com concreto usinado doado por uma concreteira da região. O concreto foi confeccionado com CP II-F-40 e foi requisitado f_{ck} maior ou igual a 25MPa.

Os materiais caracterizados a seguir são aqueles utilizados para a execução do reforço, ou seja, para a produção do CUAD e aplicação da manta de fibra de carbono.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o CP V-ARI, cujas informações sobre as propriedades químicas e físicas estão apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Propriedades químicas do cimento

Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO
4,51%	18,43%	2,80%	62,80%	3,20%
SO_3	P. Fogo	CaO L.	R. Ins.	Eq. Alc.
2,82%	3,47%	1,48%	0,67%	0,64%

Fonte: Fabricante (2022)

Tabela 2 - Propriedades físicas do cimento

Exp. Quente (mm)	Cons. Normal (%)	Blaine (cm^2/g)	#200 (%)	#325 (%)	
0,18	29,7	4.390	0,08	0,45	
Tempo de Pega (h:min)		Resistência à Compressão (MPa)			
Início	Fim	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
02:43	03:44	23,4	37,3	44,8	54,2

Fonte: Fabricante (2022)

O cimento atende à NBR 16697 (ABNT, 2018) e possui massa específica igual a $3.090kg/m^3$.

3.1.2 Agregados

Para a fabricação do CUAD, foram utilizados apenas agregados miúdos. A fim de aumentar a eficiência do empacotamento, foram utilizados dois tipos de areia: areia média e areia fina.

A granulometria, a dimensão máxima característica e o módulo de finura foram obtidos para permitir o cálculo da porcentagem ideal de cara areia. Nas Tabelas 3 e 4 podem ser encontrados os resultados do ensaio granulométrico das areias fina e média, respectivamente. Na Tabela 5, está apresentada a

caracterização da mistura da areia média e fina e no Gráfico 1 a curvas granulométricas.

Tabela 3 - Caracterização areia fina

# (mm)	Massa retida (g)	% Retida (g)	% Acumulada (g)
9,5	0	0	0
6,3	0	0	0
4,8	0	0	0
2,4	0	0	0
1,2	0	0	0
0,6	3,5	0,007	0,007
0,3	62,7	0,126	0,133
0,15	130,6	0,262	0,394
0,075	264,8	0,531	0,925
Fundo	37,5	0,075	1,000
Total	499,1	1,000	-
DMC	0,6		mm
MF	0,53		mm

Fonte: Autores (2022)

Tabela 4 - Caracterização areia média

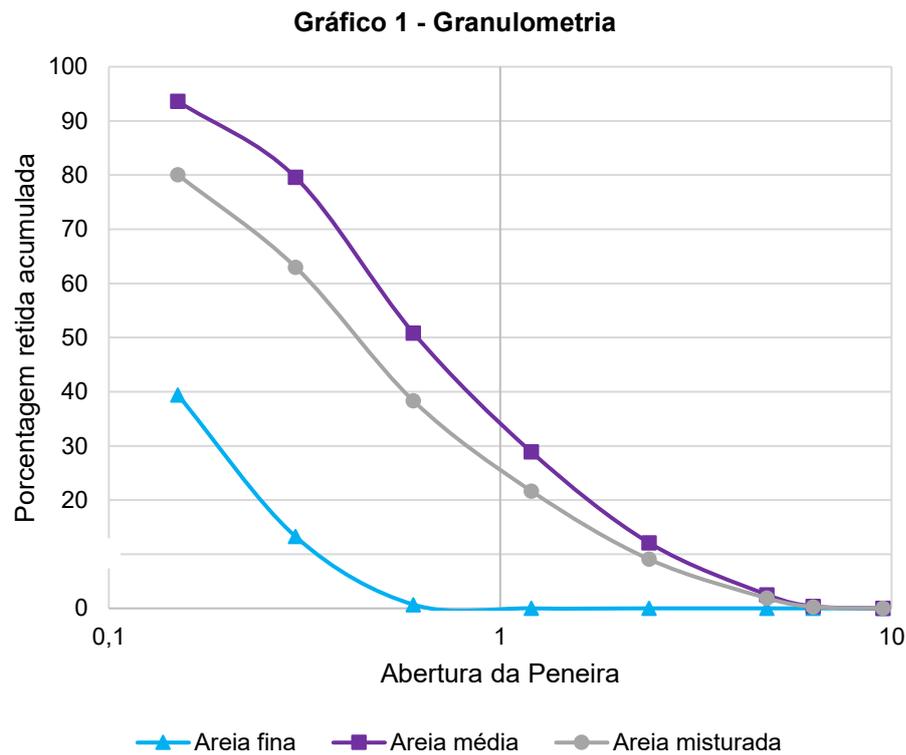
# (mm)	Massa retida (g)	% Retida (g)	% Acumulada (g)
9,5	0	0	0
6,3	1,9	0,004	0,004
4,8	10,7	0,021	0,025
2,4	47,8	0,096	0,121
1,2	83,8	0,168	0,289
0,6	109,6	0,220	0,509
0,3	143,3	0,287	0,796
0,15	70,1	0,140	0,936
0,075	21,6	0,043	0,980
Fundo	10,2	0,020	1,000
Total	499,0	1,000	-
DMC	4,8		mm
MF	2,68		mm

Fonte: Autores (2022)

Tabela 5 - Caracterização areia misturada

# (mm)	Massa retida (g)	% Retida (g)	% Acumulada (g)
9,5	0	0	0
6,3	1,4	0,003	0,003
4,8	8,0	0,016	0,019
2,4	35,9	0,072	0,091
1,2	62,9	0,126	0,271
0,6	83,1	0,166	0,383
0,3	123,2	0,247	0,630
0,15	85,2	0,171	0,801
0,075	82,4	0,165	0,966
Fundo	17,0	0,034	1,000
Total	499,0	1,000	-
DMC	4,8		mm
MF	2,14		mm

Fonte: Autores (2022)



Fonte: Autores (2022)

A partir desses dados foi possível obter a porcentagem ideal de cada tipo de areia. Esse cálculo foi feito segundo o método de Alfred e resultou em 25% de areia fina e 75% de areia média.

3.1.3 Adição de finos

Foram utilizadas duas adições: sílica ativa e pó de quartzo, cujas características físicas estão apresentadas nas Tabelas 6 e 7, respectivamente.

Tabela 6 - Propriedades da sílica ativa

Massa específica (kg/m ³)	2220
Diâmetro médio das partículas (µm)	0,1 – 5,5

Fonte: Fabricante (2022)

Tabela 7 - Propriedades químicas do pó de quartzo

SiO₂	TiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	MnO
99,20%	0,06%	0,16%	<0,10%	<0,001%
MgO	CaO	Na₂O	K₂O	P₂O₅
0,01%	0,09%	0,03%	0,02%	0,20%

Fonte: Fabricante (2022)

3.1.4 Aditivos

Aditivo superplastificante tipo II, com capacidade de reduzir a relação água/cimento em mais de 20%, a base de policarboxilatos com densidade de 1,09 g/cm³.

3.1.5 Fibra de carbono

As propriedades da manta de polímero reforçado com fibra de carbono estão apresentadas na Tabela 8.

Módulo de deformação	240 kN/mm ²
Resistência à tração (valor médio)	3800 N/mm ²
Alongamento na ruptura	1,55%
Espessura	0,166mm

Fonte: Fabricante (2022)

Conforme demonstrado na Tabela 8, o módulo de elasticidade da manta é cerca de 100x maior que o módulo de elasticidade de um concreto convencional de 25MPa.

3.1.6 Resina epóxi

As características físicas da resina epóxi estão apresentadas na Tabela 9.

Densidade	1,08 g/cm ³
Tempo de trabalhabilidade	20 min
Tempo de liberação	12 horas para trânsito de pedestres
	7 dias para resistência total
Resistência à tração na flexão	23 MPa

Fonte: Fabricante (2022)

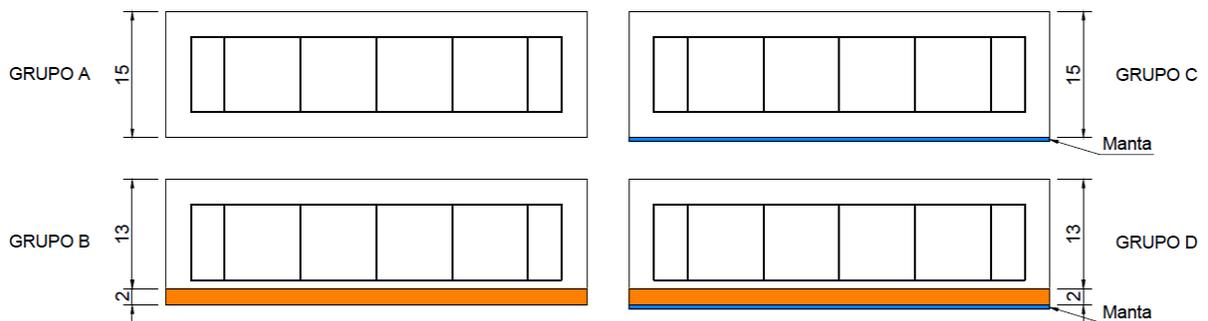
3.2 Métodos

A fim de avaliar o desempenho do reforço estrutural com PRFC associado à camada intermediária de CUAD, a pesquisa foi desenvolvida a partir da produção de 24 vigas de concreto armado em modelo reduzido, com seção transversal de 15 cm x 15 cm e 50 cm de comprimento. Um quarto das amostras se refere ao grupo de controle e os demais grupos possuem diferentes técnicas de reforço estrutural, conforme disposto no Quadro 8 e ilustrado na Figura 5.

Quadro 8 - Grupo de vigas de concreto armado

GRUPO	DESCRIÇÃO	QUANTIDADE DE CORPOS DE PROVA
A	Vigas de referência, sem reforço	6
B	Vigas com aplicação de reforço com CUAD	6
C	Vigas com aplicação de reforço com PRFC	6
D	Vigas com aplicação de reforço com PRFC e camada intermediária de CUAD	6

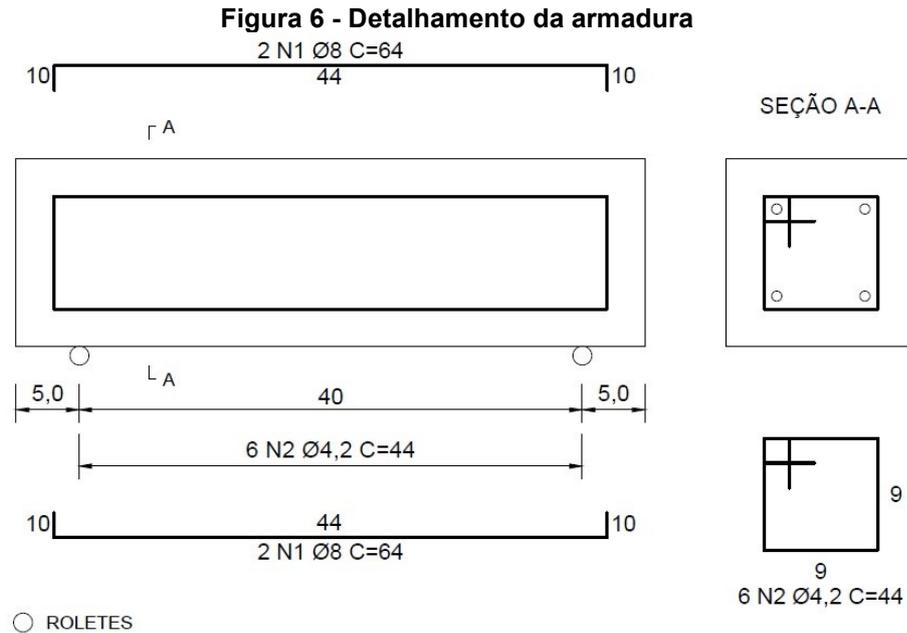
Fonte: Autores (2022)

Figura 5 - Descrição dos grupos de vigas de concreto armado

Fonte: Autores (2022)

O método de reforço do grupo B consiste na concretagem dos modelos reduzidos até a altura de 13 cm - para não alterar a capacidade resistente da viga por aumento de seção transversal - e posterior aplicação da camada de CUAD até a altura de 15 cm. Já o reforço do grupo C é feito através da aplicação da manta de PRFC na zona de flexão da viga. A associação dessas duas técnicas dá origem ao reforço aplicado nas vigas do grupo D.

Para confeccionar as vigas de concreto armado, foram utilizadas formas de madeira disponíveis na Universidade Tecnológica Federal do Paraná e armadura comercial cortada, dobrada e montada, constituída de 2 barras de 8 mm nas faces inferior e superior da viga e estribos de 4,2 mm a cada 7,5 cm, em aço CA-50. Para simular uma estrutura presente num ambiente de agressividade correspondente à classe II, foram adotados cobertura mínimo de 3,0 cm e resistência à compressão do concreto igual à 25 MPa. O detalhamento da armadura está apresentado na Figura 6.



Fonte: Autores (2022)

Como o intuito do estudo é comparar o desempenho dos reforços estruturais, as vigas não foram dimensionadas para uma carga específica, logo, o detalhamento foi determinado de forma a atender os critérios de armadura mínima sugeridos pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

A partir da especificação da resistência característica do concreto aos 28 dias, 25MPa, os modelos reduzidos foram moldados em uma empresa fornecedora de concreto usinado, para onde as formas haviam sido previamente transportadas. Após a aplicação de desmoldante nas formas e posicionamento das armaduras (Figura 7), as vigas dos grupos A e C foram concretadas até a altura de 15 cm e as vigas dos grupos B e D até 13 cm (Figura 8), para posteriormente receber a camada de CUAD. A fim de assegurar o correto adensamento, o concreto foi colocado na forma em duas camadas, nas quais foram aplicados 75 golpes com uma haste de aço.

Figura 7 - Armaduras posicionadas na forma



Fonte: Autores (2022)

Figura 8 - Concretagem dos modelos reduzidos



Fonte: Autores (2022)

Simultaneamente à concretagem das vigas, foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos 10 cm x 20 cm, como pode ser observado na Figura 9, para posterior determinação da resistência à compressão.

Figura 9 - Moldagem dos corpos de prova cilíndricos



Fonte: Autores (2022)

Após decorridas 72 horas, os modelos reduzidos e os corpos de prova cilíndricos foram desmoldados e transportados para a universidade. Com o objetivo de simular uma situação real de construção de edifício de médio padrão, o processo de cura foi realizado ao ar livre.

A camada de concreto de ultra alto desempenho das vigas dos grupos B e D foi fabricada no laboratório da UTFPR vinte e um dias após a primeira concretagem.

O traço do CUAD foi escolhido segundo Maia (2021). A autora propôs um método de dosagem para este tipo de concreto e obteve amostras com trabalhabilidade adequada e resistências em torno de 150 MPa utilizando o traço 1 : 0,25 : 0,239 : 1,461 : 0,2 : 0,045 (Cimento: Sílica: Pó de quartzo: Areia: Água: Superplastificante).

Considerando os agregados disponíveis, foi necessário melhorar o empacotamento das partículas, para isso, foi utilizado o método de empacotamento de Alfred. A partir da caracterização das areias, conforme o item 3.1.2, a melhor proporção encontrada foi de 25% de areia fina para 75% de areia média. Desta forma, o traço final utilizado corresponde a 1 : 0,25 : 0,239 : 1,096 : 0,365 : 0,2 : 0,045 (Cimento: Sílica: Pó de quartzo: Areia média: Areia fina: Água: Superplastificante).

O processo de fabricação do CUAD iniciou com a preparação dos materiais e após a pesagem de cada traço, deu-se início ao processo de mistura.

O concreto de ultra alto desempenho foi executado na argamassadeira de acordo com o procedimento de Maia (2021) e seguindo as recomendações dos autores Hung et al. (2020), Jung et al. (2020), Sohail et al. (2021) e Zdeb (2019), que preconizam a pré mistura e homogeneização de todo o material seco (aglomerantes, agregados e adição de finos).

Inicialmente, foi colocado 30% da água e da pré mistura dos materiais secos na cuba e preparada uma solução de aditivo superplastificante com 50% da água. A argamassadeira foi ligada em velocidade lenta e a água foi adicionada aos poucos, formando uma pasta de consistência seca. Sucessivamente, porções de água com aditivo e pré mistura seca foram sendo incorporadas até que todo o material fosse colocado e totalmente homogeneizado (Figura 10). A argamassadeira foi mantida na velocidade lenta durante todo o processo que durou, em média, 10 minutos.

Figura 10 - CUAD no estado fresco



Fonte: Autores (2022)

A preparação da superfície dos modelos reduzidos foi realizada através da aplicação de resina para ponte de aderência sobre a superfície do concreto convencional. Em seguida, o CUAD foi despejado nas vigas dos grupos B e D, para completar sua concretagem até a altura de 15 cm (Figura 11). Também foram moldados 6 corpos de prova 5 cm x 10 cm, para posterior determinação da resistência à compressão, como pode ser observado na Figura 12.

Figura 11 - Modelos reduzidos com CUAD no estado fresco



Fonte: Autores (2022)

Figura 12 - Corpos de prova cilíndricos de CUAD



Fonte: Autores (2022)

Os concretos de ultra alto desempenho normalmente recebem cura térmica para atingir suas elevadas resistências. Porém, devido a impossibilidade de fazer esse

tipo de cura nos modelos reduzidos, optou-se por fazer a cura da camada de CUAD por imersão em água durante 7 dias (Figura 13). As mesmas condições foram aplicadas aos corpos de prova cilíndricos.

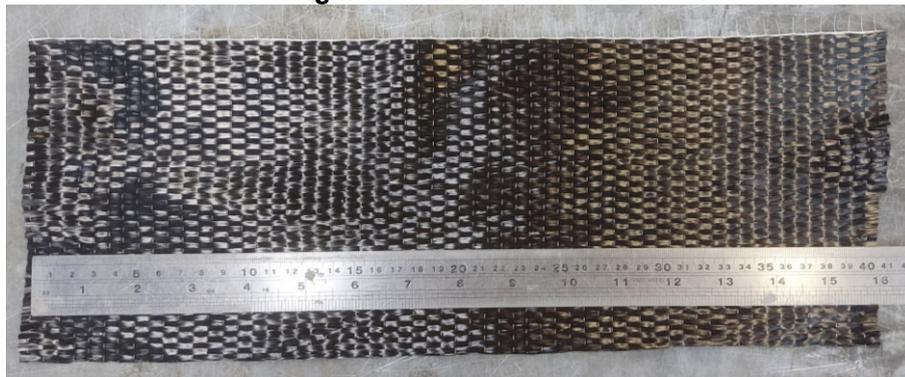
Figura 13 - Cura das vigas com a camada de CUAD



Fonte: Autores (2022)

Após 17 dias da aplicação do CUAD, as vigas dos grupos C e D receberam a aplicação da manta de fibra de carbono na face inferior da viga. A manta de PRFC utilizada possui espessura de 0,166 mm e foi cortada em faixas de 13 cm de largura e 40 cm de comprimento, conforme é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Manta de PRFC



Fonte: Autores (2022)

Visto que para aplicar a manta é necessário que a superfície do concreto esteja regularizada e limpa, foram executados o lixamento e aspiração da face inferior das vigas (Figura 15). Em seguida, conforme orienta o fabricante da manta, foi aplicada uma fina camada de primer.

Figura 15 - Regularização com esmerilhadeira



Fonte: Autores (2022)

A seguir, foi realizada a mistura dos dois componentes da resina epóxi, através de misturador elétrico por cerca de 3 minutos. Com a resina pronta para uso, foi realizada sua aplicação e o posicionamento da manta sobre a resina na região central das vigas. Logo, utilizando um rolo metálico específico para tal procedimento, a manta foi pressionada contra a resina através de movimentos longitudinais às fibras, demonstrado na Figura 16, para garantir a aderência entre os materiais e a expulsão de eventuais bolhas de ar.

Figura 16 - Aplicação da manta de PRFC



Fonte: Autores (2022)

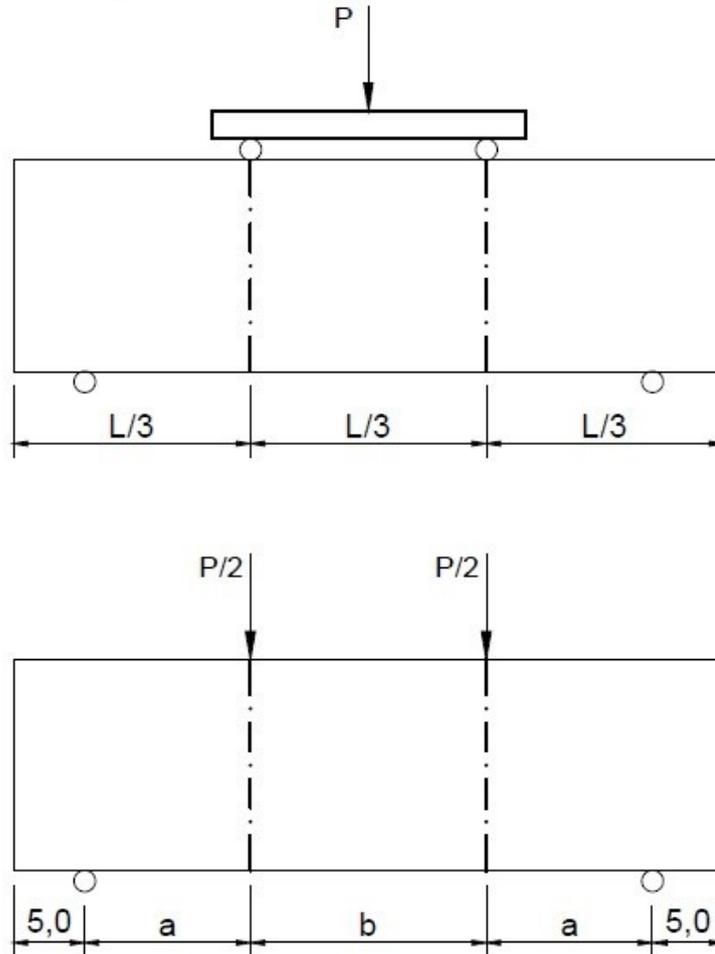
Por fim, foi aplicada uma camada adicional de resina epóxi sobre a manta, para formar uma camada protetora sobre o material de reforço. Finalizados esses procedimentos, as vigas permaneceram por 13 dias no laboratório de concreto da UTFPR antes de serem submetidas aos ensaios.

Para cumprir com os objetivos deste estudo, foram realizados os ensaios de compressão axial dos corpos de prova cilíndricos e flexão a quatro pontos dos modelos reduzidos.

O ensaio de compressão axial foi executado com os 12 corpos de prova cilíndricos, 6 de concreto convencional (10 cm x 20 cm) e 6 de CUAD (5 cm x 10 cm). Os ensaios seguiram as orientações das normas NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 7215 (ABNT, 2019), respectivamente. Nesse ensaio, foram registradas as cargas que ocasionaram o rompimento de cada corpo de prova.

Posteriormente, as vigas dos grupos A, B, C e D, foram submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos, representado pela Figura 17, cuja metodologia foi baseada em Wierzbicki (2021) e seguiu as orientações da ASTM C78-02 (2002) - Método de teste padrão para resistência à flexão do concreto.

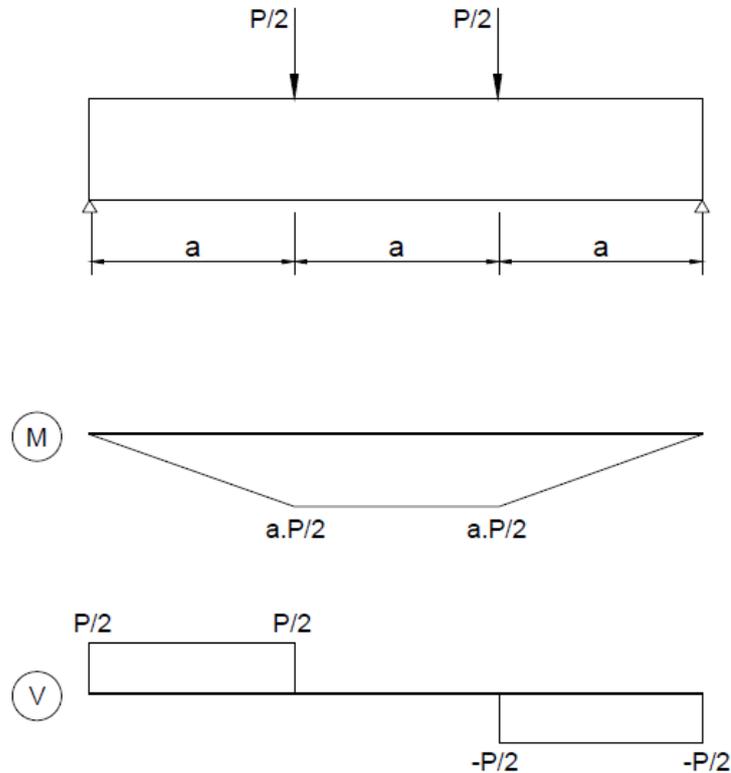
Figura 17 - Ensaio de flexão a quatro pontos



Fonte: Autores (2022)

O ensaio consiste em submeter cada viga simplesmente apoiada à duas cargas pontuais de mesma intensidade, de forma a obter flexão pura na região central da viga, ou seja, momento fletor máximo constante e cisalhamento nulo no trecho central, como demonstrado na Figura 18. Para permitir deslocamentos e rotações as vigas foram dispostas sobre roletes, colocados à 5 cm de cada extremidade.

Figura 18 - Ensaio de flexão a quatro pontos



Fonte: Autores (2022)

Os valores da tensão de resistência à tração na flexão podem ser obtidos a partir do cálculo da tensão correspondente ao momento fletor máximo gerado pela carga de ruptura. Considerando os conceitos da resistência dos materiais, a tensão gerada por momento fletor é aquela descrita pela Equação 3.

$$\sigma_y = \frac{M_y}{I_y} \times x \quad (3)$$

Onde, M_y é o momento interno resultante, I_y é o momento principal de inércia, e x é a distância da fibra mais tracionada à linha neutra. Dessa forma, a partir do momento gerado pela carga de ruptura P , a tensão resistente pode ser calculada de acordo com a Equação 4.

$$\sigma = \frac{P \times l}{b_w \times h^2} \quad (4)$$

Onde, P é a carga de ruptura, l é o comprimento da viga, b_w é a largura das vigas e h é a altura das vigas.

Além da tensão de ruptura, foram registradas as cargas que ocasionaram a primeira fissura na flexão, visto que a abertura de fissuras permite a entrada de agentes agressivos que podem provocar perda de seção, conseqüente mudança do momento de inércia e perda de rigidez. Com o intuito de facilitar a visualização das fissuras, todas as vigas tiveram sua face frontal pintada de branco.

Todos os dados foram submetidos à tratamento estatístico. Inicialmente foi utilizado o Critério de Peirce, para eliminar dados espúrios de forma racional em uma amostra com comportamento normal. Em seguida, foi realizada a Análise de Variância (ANOVA), empregada com o propósito de verificar a existência de diferenças significativas entre algumas ou todas as médias dos grupos analisados. Por fim, foi realizado o teste de múltiplas comparações de Tukey-Kramer visto que havia a necessidade de se efetuar um número elevado de comparações

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados e a análise desses dados, segmentados nos seguintes grupos:

- Resistência à compressão axial dos corpos de prova cilíndricos;
- Resistência à flexão das vigas em modelo reduzido;
- Carga de ocorrência da primeira fissura nas vigas em modelo reduzido.

4.1 Resistência à compressão axial

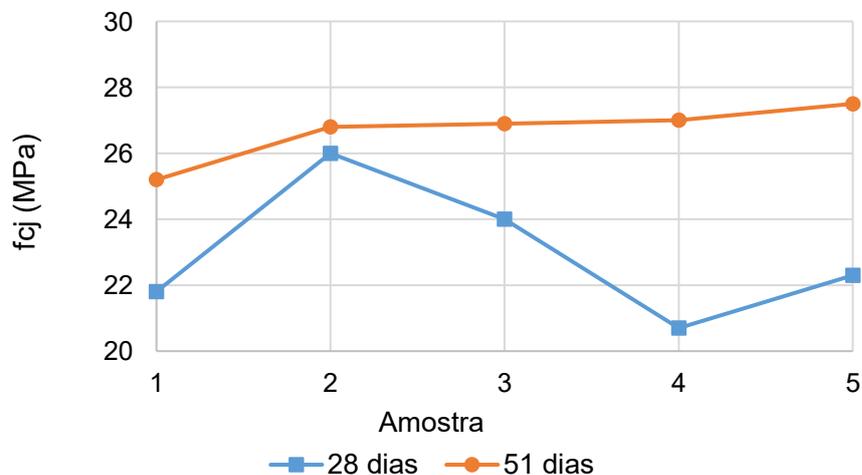
Com objetivo de atestar a resistência à compressão foi realizado o ensaio de compressão axial em 12 corpos de prova de Concreto Convencional (CC), cilíndricos com dimensão 10 x 20 cm. Na Tabela 10 e no Gráfico 2 são apresentados os resultados obtidos após a eliminação dos dados espúrios.

Tabela 10 - Resistência à compressão axial - Concreto convencional

Nº do Corpo de prova	Idades	
	28 dias	51 dias
01	21,8 MPa	25,2 MPa
02	26,0 MPa	26,8 MPa
03	24,0 MPa	26,9 MPa
04	20,7 MPa	27,0 MPa
05	22,3 MPa	27,5 MPa
Média	23,0 MPa	26,7 MPa
Desvio padrão	2,1 MPa	0,9 MPa
Coeficiente de variação	9,0%	3,3%

Fonte: Autores (2022)

Gráfico 2 - Resistência à compressão axial - Concreto convencional



Fonte: Autores (2022)

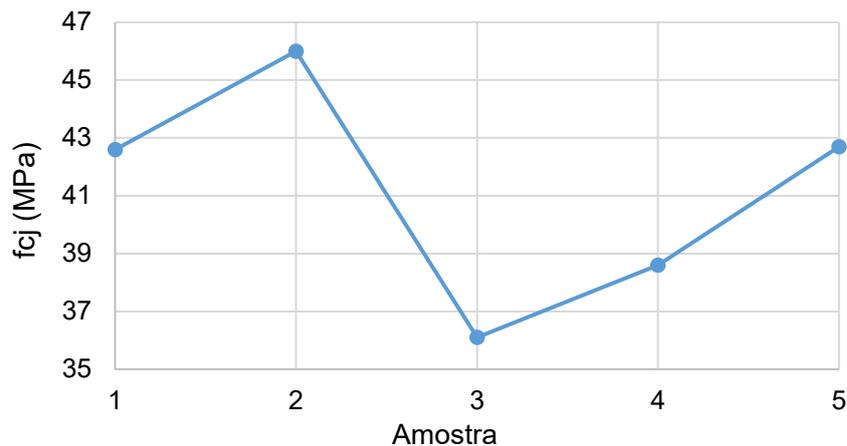
Também foram submetidos ao ensaio 6 corpos de prova de concreto de ultra alto desempenho (CUAD), cilíndricos de dimensão 5x10 cm. Os resultados constam na Tabela 11 e no Gráfico 3.

Tabela 11 - Resistência à compressão axial – CUAD

Nº do Corpo de prova	Idade
	30 dias
01	42,6 MPa
02	46,0 MPa
03	36,1 MPa
04	38,6 MPa
05	42,7 MPa
Média	41,2 MPa
Desvio padrão	3,9 MPa
Coefficiente de variação	9,4%

Fonte: Autores (2022)

Gráfico 3 - Resistência à compressão axial - CUAD



Fonte: Autores (2022)

Para mais, os resultados da análise estatística de resistência à compressão axial dos corpos de prova aqui apresentados, podem ser encontrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Testes de Tukey-Kramer para 95% de nível de confiança

Grupo	Médias	Grupos Homogêneos ¹
Concreto convencional 28 dias	23,0 MPa	X
Concreto convencional 51 dias	26,7 MPa	X
Concreto de ultra alto desempenho	41,2 MPa	Y

¹ Letras diferentes indicam diferenças estatísticas significativas a um nível de confiança de 95%.

Fonte: Autores (2022)

Observa-se, a partir da Tabela 10 e do Gráfico 2, que o Concreto Convencional (CC), com resistência média à compressão de 23,0 MPa, não atingiu a resistência de 25 MPa requerida à empresa fornecedora de concreto usinado aos 28 dias. Isso pode ter ocorrido devido a posterior adição de água para facilitar a moldagem das vigas. Entretanto, aos 51 dias os corpos de prova apresentaram resistência média de 26,7 MPa, superando a resistência requerida. Este comportamento é esperado, visto que concretos fabricados com cimento CP II-F-40 sofrem aumento de resistência após os 28 dias. Porém, ao analisar a Tabela 12 é possível perceber que mesmo havendo aumento de resistência do concreto convencional dos 28 aos 51 dias, estes grupos são estatisticamente iguais, revelando que esta diferença não é relevante.

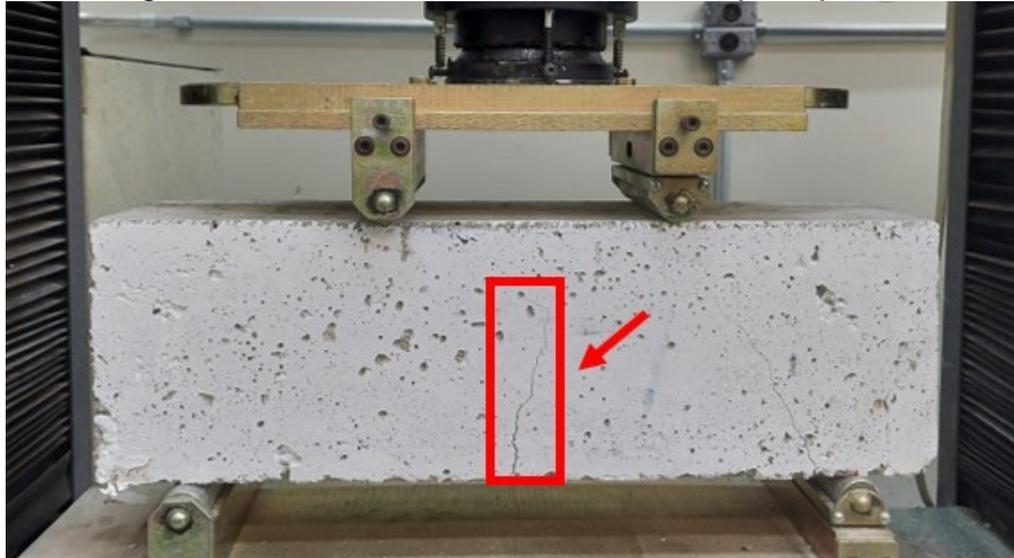
Os resultados de resistência à compressão do concreto de ultra alto desempenho, apresentados na Tabela 11 e Gráfico 3, são inferiores aos resultados obtidos por Maia (2021). Esta divergência pode ser explicada pela ausência de realização de cura térmica, processo que auxilia no ganho de resistência dos CUADs. Desta forma, o material foi classificado como uma argamassa de alta resistência.

Mesmo não atingindo resistência característica de CUAD, foi provado (Tabela 12), que o concreto especial é diferente estatisticamente do Concreto Convencional (CC), haja visto que o CUAD apresenta resistência à compressão 79,5% acima do CC aos 28 dias.

4.2 Carga de ocorrência da primeira fissura

Com o propósito de comparar a carga em que ocorreu a primeira fissura entre os grupos de controle, as 24 vigas foram observadas ininterruptamente durante o ensaio de flexão a quatro pontos. Como observa-se na Figura 19, todas as primeiras fissuras registradas são referentes aos esforços de flexão.

Figura 19 - Fissura vertical – Ensaio de flexão a quatro pontos



Fonte: Autores (2022)

As fissuras características da flexão são verticais e surgiram no meio da viga onde o esforço cortante é nulo.

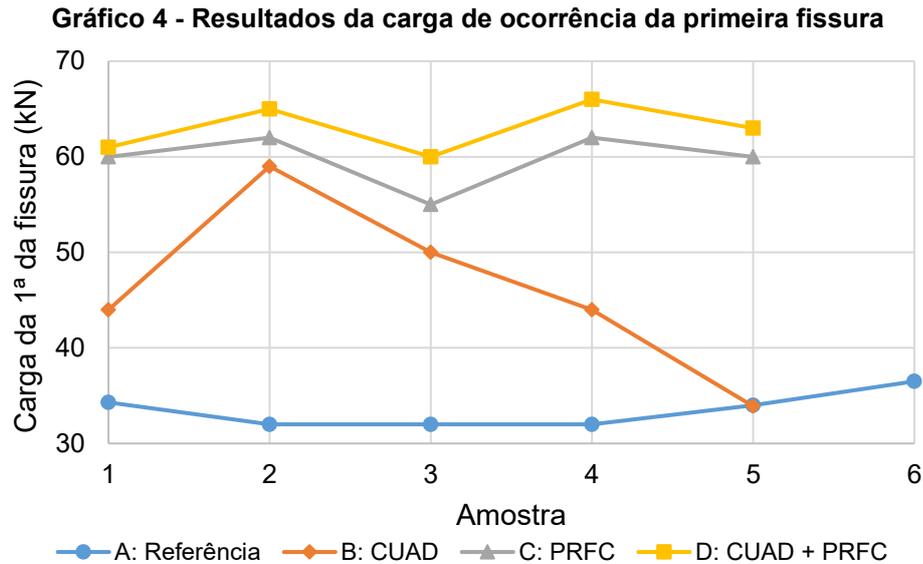
Na Tabela 13 e no Gráfico 4 podem ser observados os resultados anotados durante a observação do ensaio de flexão a quatro pontos.

Tabela 13 - Resultados da carga de ocorrência da primeira fissura

Nº do Corpo de prova	Grupo			
	A	B	C	D
01	34,3 kN	44,0 kN	60,0 kN	61,0 kN
02	32,0 kN	59,0 kN	62,0 kN	65,0 kN
03	32,0 kN	50,0 kN	55,0 kN	60,0 kN
04	32,0 kN	44,0 kN	62,0 kN	66,0 kN
05	34,0 kN	33,9 kN	60,0 kN	63,0 kN
06	36,5 kN	-	-	-
Média	33,8 kN	46,2 kN	59,8 kN	63,0 kN
Desvio padrão	1,9 kN	9,2 kN	2,9 kN	2,5 kN
Coeficiente de variação	5,6%	19,9%	4,8%	4,0%

A: Referência | B: CUAD | C: PRFC | D: CUAD + PRFC

Fonte: Autores (2022)



Verificou-se, a partir do exposto na Tabela 13, que houve aumento da carga de ocorrência da primeira fissura na seguinte ordem: vigas de referência, vigas com reforço de Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD), vigas com reforço de Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC) e vigas com a associação dos reforços de CUAD e PRFC.

Assim, os resultados da análise estatística da carga de ocorrência da primeira fissura, podem ser encontrados na Tabela 14.

Tabela 14 - Testes de Tukey-Kramer para 95% de nível de confiança – Primeira fissura

Grupo	Médias	Grupos Homogêneos ¹
A	33,8 kN	X
B	46,2 kN	Y
C	59,8 kN	Z
D	63,0 kN	Z

A: Referência | B: CUAD | C: PRFC | D: CUAD + PRFC

¹ Letras diferentes indicam diferenças estatísticas significativas a um nível de confiança de 95%.

Fonte: Autores (2022)

Analisando os dados da Tabela 14, é possível provar que o grupo de referência é diferente estatisticamente do grupo de reforço com CUAD e ambos diferentes dos grupos de reforço com PRFC e CUAD associado ao PRFC.

Esses resultados eram esperados, uma vez que foram necessárias cargas mais elevadas para a ocorrência da primeira fissura de flexão nos grupos com reforço.

Ao comparar as vigas de referência às vigas com reforço de Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD), obteve-se aumento de 36,8% na carga aplicada até o

surgimento da primeira fissura, afirmando o melhor desempenho do CUAD em resistir à esforços de tração quando comparado ao concreto convencional.

Comparando os grupos de referência, de reforço com CUAD e os reforços que utilizaram o Polímero Reforçado com Fibras de Carbono (PRFC) é possível perceber os significativos aumentos de carga até o aparecimento da primeira fissura apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Porcentagem de aumento de carga até a primeira fissura

Grupo	B	C	D
A	36,8%	77,1%	86,6%
B	-	29,5%	36,4%

A: Referência | B: CUAD | C: PRFC | D: CUAD + PRFC

Fonte: Autores (2022)

Esse aumento significativo ocorreu porque o PRFC aumentou a rigidez da viga devido ao seu elevado módulo de elasticidade (240 GPa), conforme a teoria dos materiais homogêneos associados.

Enfim, para a comparação entre o grupo de vigas reforçadas com PRFC e o grupo reforçado com CUAD associado ao PRFC, tem-se que são iguais estatisticamente, porém, em termos absolutos, houve aumento de 5,4% na carga aplicada até o surgimento da primeira fissura ao associar o concreto de ultra alto desempenho com o polímero reforçado com fibra de carbono.

4.3 Resistência à flexão

A fim de comparar a tensão de ruptura entre os grupos de controle, as 24 vigas em modelo reduzido foram submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos até atingirem a ruptura. Na Tabela 16 e no Gráfico 5 podem ser observados os resultados obtidos após a eliminação de dados espúrios.

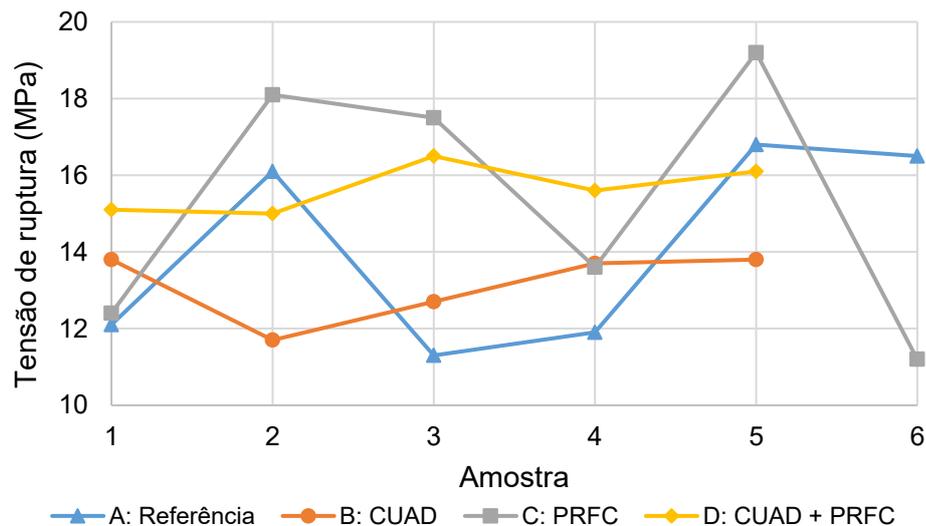
Tabela 16 - Tensão de ruptura

Nº do Corpo de prova	Grupo			
	A	B	C	D
01	12,1 MPa	13,8 MPa	12,4 MPa	15,1 MPa
02	16,1 MPa	11,7 MPa	18,1 MPa	15,0 MPa
03	11,3 MPa	12,7 MPa	17,5 MPa	16,5 MPa
04	11,9 MPa	13,7 MPa	13,6 MPa	15,6 MPa
05	16,8 MPa	13,8 MPa	19,2 MPa	16,1 MPa
06	16,5 MPa	-	11,2 MPa	-
Média	14,1 MPa	13,1 MPa	15,3 MPa	15,6 MPa
Desvio padrão	2,6 MPa	0,9 MPa	3,3 MPa	0,6 MPa
Coefficiente de variação	18,4%	7,1%	21,8%	4,1%

A: Referência | B: CUAD | C: PRFC | D: CUAD + PRFC

Fonte: Autores (2022)

Gráfico 5 - Tensão de Ruptura



Fonte: Autores (2022)

Assim, os resultados da análise estatística do ensaio de flexão a quatro pontos, podem ser encontrados na Tabela 17.

Tabela 17 - Testes de Tukey-Kramer para 95% de nível de confiança

Grupo	Médias	Grupos Homogêneos ¹
A	14,1 MPa	X
B	13,1 MPa	X
C	15,3 MPa	X
D	15,6 MPa	X

A: Referência | B: CUAD | C: PRFC | D: CUAD + PRFC

¹ Letras diferentes indicam diferenças estatísticas significativas a um nível de confiança de 95%.

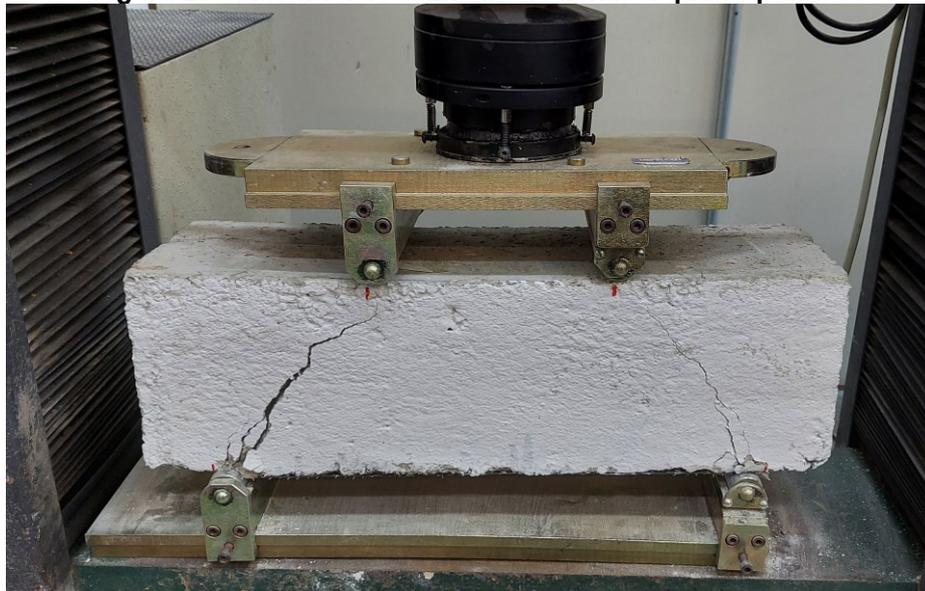
Fonte: Autores (2022)

Ao analisar as Tabelas 16 e 17 é possível perceber que as tensões de ruptura de todos os grupos de vigas são estatisticamente iguais, pois todas as vigas romperam por cisalhamento antes mesmo de atingirem a carga máxima suportada na flexão.

Esse fato pode ser explicado pelas propriedades da seção transversal, que apresentou maior rigidez à flexão do que ao cisalhamento, dessa forma, a carga aplicada superou primeiro a resistência da biela comprimida de concreto, levando a viga à ruptura por cisalhamento mesmo com o baixo espaçamento de estribos adotado (7,5 cm).

Na Figura 20 é possível visualizar as fissuras a 45°, características do cisalhamento, saindo dos apoios inferiores e seguindo em direção aos pontos de aplicação da carga.

Figura 20 - Fissura à 45° - Ensaio de flexão a quatro pontos



Fonte: Autores (2022)

Como as propriedades das vigas e o detalhamento da armadura são os mesmos em todos os grupos de vigas, o resultado de igualdade estatística obtido é coerente, visto que essas são as características que determinam a resistência ao cisalhamento.

Por conta do explanado acima, não foi possível comparar o desempenho dos diferentes reforços estruturais em relação a tensão de ruptura na flexão. Entretanto, é interessante ressaltar que todas as vigas que possuíam o CUAD como parte integrante do reforço apresentaram descolamento do reforço, conforme ilustrado nas Figuras 21 e 22.

Figura 21 - Descolamento do reforço em CUAD



Fonte: Autores (2022)

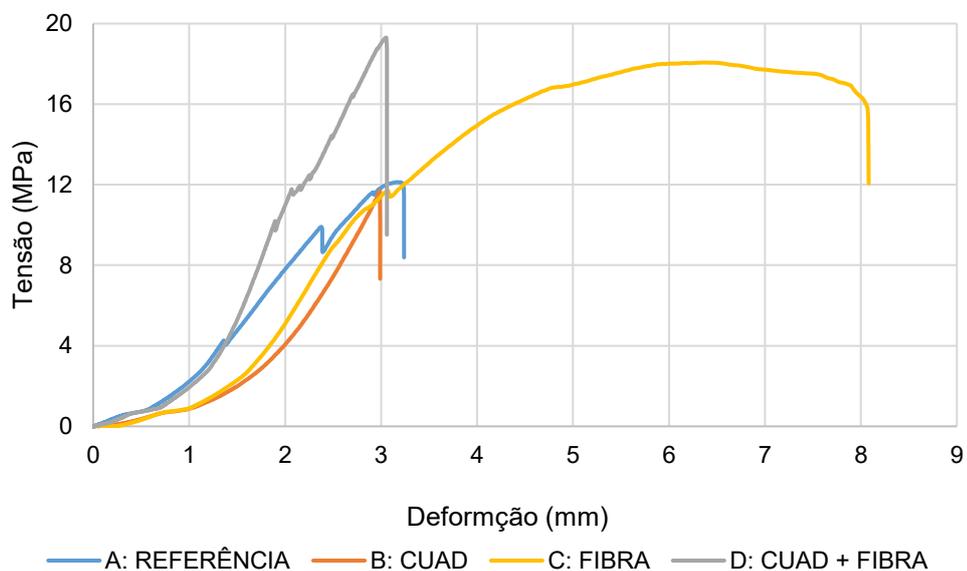
Figura 22 - Descolamento do reforço em CUAD + PRFC



Fonte: Autores (2022)

Além disso, foi observado que o rompimento se deu de maneira frágil. Esse comportamento se confirma na análise do Gráfico 6, que apresenta uma curva referente a um corpo de prova selecionado de cada grupo de controle, para efeito de comparação.

Gráfico 6 - Tensão x Deformação



Fonte: Autores (2022)

É possível perceber que as vigas reforçadas com CUAD, tanto do grupo B quanto do D, não apresentaram patamar de escoamento, caracterizando rompimento frágil. Já nas vigas sem a presença da camada de CUAD, grupos A e C, o patamar de escoamento está presente, caracterizando rompimento dúctil.

5 CONCLUSÕES

A execução desse estudo permitiu avaliar o desempenho do compósito cimentício como camada intermediária entre o substrato de concreto e o reforço com polímeros reforçados com fibras em vigas submetidas à flexão.

O objetivo inicial era produzir um concreto de ultra alto desempenho, porém, devido à ausência da cura térmica durante o processo de fabricação do reforço, o compósito cimentício apresentou resistência à compressão inferior aos limites que caracterizam um CUAD.

A análise dos resultados foi realizada a partir dos dados registrados durante os ensaios de compressão axial e flexão a quatro pontos. Durante a realização do ensaio de flexão foi possível observar que as vigas possuíam a camada de CUAD apresentaram o descolamento da mesma, o que indica a ineficiência do método de aderência utilizado, o que limitou o desempenho do reforço.

A seção transversal utilizada também se mostrou muito mais rígida à flexão do que ao cisalhamento, sendo essa uma das razões para que os modelos reduzidos tenham rompido por cisalhamento antes de alcançar a máxima capacidade resistente à flexão, situação corroborada pelo surgimento de fissuras a 45° a partir dos apoios. Assim, não foi possível comparar o desempenho dos diferentes reforços estruturais em relação a tensão de ruptura na flexão.

Entretanto, foi possível constatar que a presença dos diferentes tipos de reforços foi benéfica quanto ao surgimento de fissuras de flexão. A presença dos reforços, tanto da manta de fibra de carbono, quanto a camada de argamassa de alta resistência, retardaram o aparecimento das primeiras fissuras de flexão, ou seja, foram necessárias cargas mais elevadas para provocar seu surgimento.

Assim, observou-se que dentre os métodos convencionais (grupos B e C), aquele que apresentou o melhor desempenho quanto a abertura de fissuras foi a aplicação da manta de fibra de carbono, que exigiu uma carga 77,1% mais elevada do que o grupo de referência.

Por fim, foi possível constatar que a aplicação da argamassa de alta resistência como camada intermediária do reforço com manta de fibra de carbono pode ser eficiente caso seja garantida adequada aderência com o substrato, pois a associação desses reforços resultou no maior aumento da carga necessária para o surgimento da primeira fissura, 86,6% em relação ao grupo de referência.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A confecção de elementos em concreto de ultra alto desempenho preconiza a utilização de cura do tipo térmica, que não se viabilizou na execução deste estudo. Por esse motivo, caso trabalhos futuros também encontrem a mesma dificuldade, recomenda-se a dosagem de concretos de alto desempenho que dispensem o uso da cura térmica.

Como o método de aderência limitou o desempenho dos reforços com a camada de argamassa, sugere-se que estudos similares prevejam a presença de conectores de cisalhamento ou promover a aderência através da aplicação de resina epóxi.

Além disso, propõe-se o uso de seções transversais com rigidez mais equilibradas que conduzam ao rompimento por flexão de forma anterior ao esmagamento da biela comprimida.

REFERÊNCIAS

- AÏTCIN, P.C. **Binders for durable and sustainable concrete**. Abingdon: Taylor & Francis, 2008 (Modern Concrete Technology, 16).
- ADORNO, F. V; DIAS, F. O; SILVEIRA, J. C. O. **Recuperação e reforço de vigas de concreto armado**. Monografia (Bacharelado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.
- AFGC. Documents scientifiques et techniques Bétons fibrés à ultra-hautes performances - recommandations. In: **Edition Révisée**, Ed. 2013, France.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 440-2R-08 **Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures**. Detroit, July 2008.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C78-02. **Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)**. United States. Jan, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931-1:2004**: Execução de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 16889:2020**: Concreto — determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.
- _____. **NBR 16280:2020**: Reforma em edificações — Sistema de gestão de reformas — Requisitos. Rio de Janeiro, 2020.
- _____. **NBR 5738:2015**: (Versão Corrigida 2016) Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- _____. **NBR 16697:2018**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. **NBR 5739:2018**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. **NBR 6118:2014**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 7215:2019**: Cimento Portland - determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- _____. **NBR NM 67:1998**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do concreto armado**. Bauru: Unesp, 2019.

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

BERGMANN, N. B. B; CHRIST, R; PACHECO, F; TUTIKIAN, B. F. Reforço estrutural de vigas com concreto de ultra-alto desempenho contendo adição híbrida de fibras. In: **59º Congresso Brasileiro de Concreto**. 2017, Bento Gonçalves (RS).

BOLINA, F. L; TUTIKIAN, B. F; HELENE, P. **Patologia de estruturas**. Oficina de Textos, 2019.

BORGES, R. G. **Estudo da aplicação de argamassa de alta resistência como reforço estrutural de vigas em concreto armado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

BUTTIGNOL, T. E. T; FERNANDES, J. F; SOUSA, J. L. A. O; BITTENCOURT, T. N. Aplicações do Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD) em obras de reforço e recuperação de estruturas. In: **60º Congresso Brasileiro de Concreto**. 2018, Foz do Iguaçu (PR).

CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CARDOSO, A. L. A. **Procedimentos de recuperação em estrutura de concreto degradada por agentes corrosivos – estudo de caso em um edifício localizado em Aracaju - SE**. Monografia (Bacharel) – Curso de Engenharia Civil, Instituto Federal de Sergipe – Campus Aracaju. Aracaju, 2020.

CARVALHO, R. C.; FILHO, J. R. de F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**: segundo a NBR 6118:2014. 4. ed. São Carlos, SP: EDUFSCar, 2014.

CAVALCANTE, P. A; MOREIRA, E. M. R; FARIAS, B. M; PIRES, R. C. S. Estudo das patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações. **Epitaya E-books**, v. 1, n. 15, p. 283-300, 2020.

CHASTRE, C. **Materiais e Tecnologias de Reforço de Estruturas de Betão - Potencialidade e Limitações**. Santander (Espanha): Rehabend, p. 1-4, 2014.

CHRIST, R; PACHECO, F; SIMONETTI, C; TUTIKIAN, B. F. Conceitos e aplicações do concreto de ultra alto desempenho: Panorama nacional e internacional. **Revista Diálogos: Economia e Sociedade** (ISSN: 2594-4320), n. 1, p. 89-102, 2019.

FEHLING, E. et al. **Ultra-High Performance Concrete CUAD: Fundamentals, Design, Examples**, 2015.

GEISENHANSLÜKE, C. **Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen**. 2008. Universität Kassel, Kassel, 2008.

HELENE, P. R. L. Corrosão de armaduras para concreto armado. In: **IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo**. Tecnologia das Edificações. São Paulo: PINI, 1988.

HELENE, P. R. L. **Manutenção para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto**. Pini, 4. ed. São Paulo, 2012.

HELENE, P. R. L.; PEREIRA, F. **Manual de reabilitação de Estruturas de Concreto–Reparo, Reforço e Proteção**. São Paulo: Red Rehabilitar, editores, 2003.

HUNG, C.; CHEN, Y.; YEN, C. Workability, fiber distribution, and mechanical properties of CUAD with hooked end steel macro-fibers. In: **Construction and Building Materials**. Volume 260, 2020, 119944, ISSN 0950-0618.

JU, Y; SHEN, T; WANG, D. Bonding behavior between reactive powder concrete and normal strength concrete. In: **Construction and Building Materials**, v. 242, p. 118024, 2020.

JUNG, M.; LEE, Y.; HONG, S.; MOON, J. Carbon nanotubes (CNTs) in ultra-high-performance concrete (CUAD): Dispersion, mechanical properties, and electromagnetic interference (EMI) shielding effectiveness (SE). In: **Cement and Concrete Research**, Volume 131, 2020, 106017, ISSN 0008-8846.

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

LEE, M.G; WANG, Y. C; CHIU, C. T. **A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material**. Construction and Building Materials Journal. Chaoyang University of Technology. Taiwan, China, 2005.

_____. A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material. In: **Construction and building materials**, v. 21, n. 1, p. 182-189, 2007.

LEONI, Renato I. **Reforço de estruturas utilizando fibras de carbono: comparação do desempenho de vigas reforçadas com as técnicas EBR e NSM**. 2016. 72 f.

MACHADO, A. P. **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2002.

MAIA, A. T. **Proposição de um método de dosagem racional de concretos de ultra-alto desempenho**. 2021. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

MAZER, W.; FERREIRA, E. O; BORGES, R. G; PONTES, P. V. Análise de reforço estrutural com Concreto de ultra alto desempenho. In: **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 7, p. 74164-74183, 2021.

MITCHELL, B. S. **An introduction to materials engineering and science for chemical and materials engineers**. 954 p. 1 Ed, John Wiley & Sons Inc, 2003.

MOREIRA, A. L. R. **Previsão de vida útil de estruturas de concreto armado submetidas à ação de íons cloretos**: modelagem numérica e aplicações. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Espírito Santo. Vitória, 2018.

NETO, T. G. P; SOUSA, J. L. C; SOUSA, B. F. M; FROTA, J. I. P; LIMA, E. M. F. Análise teórica comparativa entre os tipos de reforço estrutural aplicados em vigas de concreto armado. In: **Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, p. e20101320182-e20101320182, 2021.

OLIVEIRA, D. F. **Levantamento de causas de patologias na construção civil**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

PIVATTO, A. B. **Análise experimental e computacional de vigas biapoiadas de concreto armado reforçadas à flexão com CRFC**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

REIS, L. S. N. **Sobre a recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2001.

SCHNEIDER, F. H.; SCHULTZ, J. L.; WIERZBICKI, L. R.; MAZER, W. **Análise Do Desempenho da Ancoragem do Reforço de Fibras de Carbono em Vigas Submetidas à Flexão**. Curitiba. Revista Técnico Científica Do Crea-PR, v. 1, p. 1-17, 2017.

SOHAIL, M.G; WANG, B.; RAMAZAN, K.; AL NUAIMI, N.; GENCTURK, B.; ALNAHHAL, W. Durability characteristics of high and ultra-high-performance concretes. In: **Journal of Building Engineering**. Volume 33, January 2021, 101669.

SOUZA, V. C. M; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1. ed. 5. tiragem. São Paulo: PINI, 2009.

TAYEB, R; DOU, X; MAO, Y; ZHANG, Y. Analysis of Cohesive Microsized Particle Packing Structure Using History-Dependent Contact Models. In: **ASME. J. Manuf. Sci. Eng.** April 2016; 138(4): 041005. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.4031246>>. Acesso em: 27 nov 2021.

TAYEH, B. A; BAKAR, B. A; JOHARI, M. M; VOO, Y. L. Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra-high-performance fiber concrete overlay. In: **Construction and building materials**, v. 36, p. 538-548, 2012.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. São Paulo: Pini, 2002.

TUTIKIAN, B. F; ISAIA, G. C; HELENE, P. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. Cap. 36. IBRACON, 2011.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. São Carlos: USP, 2004. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2004.

VERZEGNASSI, E. **Estudo das propriedades no estado fresco e endurecido do concreto leve autoadensável**. Dissertação (mestrado) - Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira (SP), 2015.

WIERZBICKI, L. R. **Análise do desempenho da técnica de reforço NSM (Near Surface Mounted) com fibras de carbono em vigas submetidas à flexão**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

ZDEB, T. Effect of vacuum mixing and curing conditions on mechanical properties and porosity of reactive powder concretes. In: **Construction and Building Materials 209** (2019) 326–339.