

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

RENATA GNATTA BORGES

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE ARGAMASSA DE ALTA RESISTÊNCIA
COMO REFORÇO ESTRUTURAL DE VIGAS EM CONCRETO
ARMADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2021

RENATA GNATTA BORGES

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE ARGAMASSA DE ALTA RESISTÊNCIA COMO
REFORÇO ESTRUTURAL DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO**

**Study of the application of high strength mortar in structural reinforcement of
concrete beams**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer.

CURITIBA

2021



[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.

RENATA GNATTA BORGES

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE ARGAMASSA DE ALTA RESISTÊNCIA COMO
REFORÇO ESTRUTURAL DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO**

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: 27 de agosto de 2021

Wellington Mazer

Prof. Doutor em Engenharia Civil e Infra-estrutura Aeronáutica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Adauto José Miranda de Lima

Prof. Doutor em Engenharia Civil e Florestal
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Arthur Medeiros

Prof. Doutor em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2021

Dedico este trabalho à minha família pelo apoio incondicional, ao meu orientador e professores que me fizeram amar esta profissão, e especialmente ao meu pai, por mais uma vez estar presente e me ajudar a alcançar minhas conquistas.

RESUMO

O concreto de pós reativos (CPR), classificado como UHPC (*Ultra High Performance Concrete*), possui alta visibilidade e atenção na área de tecnologia do concreto, devido à suas propriedades e desempenho promissores como altas resistências e durabilidade. No entanto, apesar de seu grande destaque científico, ainda não é comum ver sua utilização em aplicações reais da construção civil. Inicialmente, o trabalho tinha o intuito de analisar o desempenho do CPR em aplicações de reforço estrutural em vigas de concreto armado. No entanto, na etapa de produção dos corpos de prova, foi adicionado mais água do que o traço previsto e não foi realizada a etapa de cura úmida, fazendo com que o material produzido não atingisse as características desejadas, principalmente de alta resistência. Desta forma, o reforço utilizado foi descaracterizado como concreto de pós reativos e classificado como uma argamassa de alta resistência. Com esta nova definição, objetivo do estudo foi avaliar o comportamento do material quanto à sua resistência mecânica, deformabilidade e aderência à estrutura a ser reforçada, para estudar a viabilidade desta aplicação em um cenário real. A metodologia utilizada foi a pesquisa experimental. Como modelo de estudo, foram feitas vigas em concreto armado convencional que após o tempo adequado de cura receberam um reforço composto por argamassa de alta resistência. Para fins de comparação, uma proporção das amostras não recebeu o reforço. A partir dos corpos de prova, foram realizados ensaios de flexão em três pontos e de compressão axial de amostras da argamassa produzida. Os resultados de resistência à compressão da argamassa tiveram uma média de 25 MPa, frente ao f_{ck} de 20 MPa do concreto convencional produzido. Nos ensaios de flexão, o material apresentou um desempenho positivo no reforço estrutural das vigas de concreto quando posicionado na região de compressão do elemento, aumentando em 40,38% a resistência à flexão quando comparado às amostras de referência. Também foram realizados testes com o reforço posicionado na face inferior da viga, para analisar seu comportamento na região de tração da estrutura. Neste caso, os valores de resistência se mostraram inferiores às amostras de referência, indicando que a camada de argamassa rompeu por tração.

Palavras-chave: Concreto de Pós Reativos. Reforço estrutural. Argamassa de alta resistência. Tecnologia do Concreto.

ABSTRACT

Reactive Powder Concrete (CPR), classified as an UHPC (Ultra High Performance Concrete), has high visibility and attention in the area of concrete technology, due to its promising properties and performance such as high strength and durability. However, despite its great scientific prominence, it is still not common to see its use in real civil construction applications. Initially, the work was intended to analyze the performance of CPR in structural reinforcement applications in concrete beams. However, in the production stage of the specimens, more water was added than the expected mix and the wet curing stage was not performed, causing the material produced not to reach the desired characteristics, especially of high resistance. Then, the reinforcement used was disqualified as reactive powder concrete and classified as a high-resistance mortar. With this new definition, the objective of the study was to evaluate the behavior of the material regarding its mechanical strength, deformability and adhesion to the structure to be reinforced, to study the feasibility of this application in a real scenario. The methodology used was experimental research. As a study model, beams were made in conventional reinforced concrete, which after adequate curing time received a reinforcement composed of high-strength mortar. For comparison purposes, a proportion of the samples were not reinforced. From the specimens, three-point bending and axial compression tests were performed on samples of the produced mortar. The mortar compressive strength results had an average of 25 MPa, compared to the f_{ck} of 20 MPa of the conventional concrete produced. In the bending tests, the material presented a positive performance in the structural reinforcement of the concrete beams when positioned in the element's compression region, increasing the bending strength by 40.38% when compared to the reference samples. Tests were also carried out with the reinforcement positioned on the underside of the beam, to analyze its behavior in the structure's tensile region. In this case, the strength values were lower than the reference samples, indicating that the mortar layer ruptured by traction tension.

Keywords: Reactive Powder Concrete. Structural Reinforcement. Mortar. Concrete Technology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Seção transversal simplificada da passarela de Sherbrooke.	19
Figura 2 - Passarela de Sherbrooke, Canadá.....	19
Figura 3 - Microestrutura de uma amostra de concreto convencional.....	20
Figura 4 - Viga simplesmente apoiada com forças aplicadas e diagramas.	22
Figura 5 - Tensões resultantes na seção transversal de uma viga submetida à flexão simples.....	23
Figura 6 - Detalhamento das amostras, medidas em centímetros.....	31
Figura 7 - Projeto de armaduras das vigas de concreto.....	32
Figura 8 - Esquema do ensaio de flexão em três pontos.....	33
Figura 9 - Armaduras posicionadas nas formas.	37
Figura 10 - Formas preenchidas com concreto fresco.....	37
Figura 11 - Aparência da mistura no traço previsto.....	38
Figura 12 - Amostras com reforço CPR no estado fresco.....	39
Figura 13 - Ensaio de viga em concreto convencional (REF) submetida à flexão.	41
Figura 14 - Ensaio de viga em concreto reforçada (SUP).....	41
Figura 15 - Ensaio de viga em concreto reforçada (INF).....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades químicas do cimento utilizado.....	27
Tabela 2 - Propriedades físicas do cimento utilizado	27
Tabela 3 - Valores de coeficientes de traço em massa do material de reforço (argamassa)	29
Tabela 4 - Especificações físicas e químicas da sílica ativa.....	29
Tabela 5 - Caracterização química do pó de quartzo.....	30
Tabela 6 - Descrição e quantidade de amostras.....	31
Tabela 7 - Resultados de resistência à compressão das amostras do material de reforço.....	40
Tabela 8 - Cargas de ruptura dos ensaios de flexão, em Newtons.....	42
Tabela 9 - Valores calculados de momento médio.....	43
Tabela 10 - Esforços atuantes na armadura e no concreto.....	44
Tabela 11 - Linha neutra e tensões nas vigas.....	44
Tabela 12 - Valores calculados de tensão de cisalhamento.....	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.1.1 Objetivo Geral	14
1.1.2 Objetivos Específicos.....	14
1.2 JUSTIFICATIVA	14
1.3 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 TECNOLOGIA DO CONCRETO – CONCEITOS BÁSICOS	16
2.1.1 Concreto Convencional	16
2.1.2 Concreto de Alto Desempenho	16
2.1.3 Concreto de Pós Reativos	18
2.1.4 Microestrutura do Concreto	20
2.2 ELEMENTOS DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO	21
2.3 REFORÇO ESTRUTURAL.....	23
2.3.1 Sinais e Causas de Deficiência Estruturais em Viga	23
2.3.2 Técnicas Atuais de Reforço Estrutural em Vigas de Concreto Armado	25
2.3.3 Reforço Estrutural com Concreto	25
2.3.4 Argamassas de reparo	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 MATERIAIS	27
3.1.1 Vigas de concreto convencional.....	27
3.1.2 Argamassa de alta resistência	28
3.2 PROJETO	31
3.2.1 Protótipos	31
3.2.2 Projeto de armaduras	32
3.3 ENSAIOS	32
3.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO	33
3.5 CÁLCULO DA TENSÃO AXIAL.....	34
3.6 TENSÃO DE CISALHAMENTO	36
3.7 EXECUÇÃO	36
3.7.1 Produção das vigas de concreto referência	36
3.7.2 Produção da argamassa de reforço	37
4 RESULTADOS	40
4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL	40
4.2 RESISTÊNCIA À FLEXÃO	40
4.2.1 Tensão axial.....	43
4.2.2 TENSÃO DE CISALHAMENTO	44
5 CONCLUSÃO	46
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	47
6 REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

Formado por partículas de diâmetro máximo menor que 2 mm, o Concreto de Pós Reativos (doravante CPR) tem atraído cada vez mais atenção de pesquisadores em todo o mundo, em razão de suas propriedades e características superiores em relação aos concretos de alto desempenho conhecidos. Normalmente, levam em sua composição areia, pó de quartzo, sílica ativa, cimento Portland e aditivos. São livres de agregados graúdos para aumento da homogeneidade, o que se tornou um grande diferencial para seu desempenho de resistência, com resultados próximos a 200 MPa para compressão em alguns experimentos sem cura térmica (VANDERLEI, 2004).

No entanto, apesar de resultados surpreendentes, não há muitos registros de utilização deste concreto de ultra alto desempenho, principalmente em escala nacional. O Canadá, um dos locais pioneiros de estudo do CPR, contempla alguns exemplos de aplicação deste material, como a passarela de Sherbrooke que apresenta um vão de 60 metros e é revestida superficialmente por placas de CPR de apenas 3 cm de espessura (BLAIS e COUTURE, 1999). Além desta, há também a revitalização de uma ponte rodoviária que teve seus tabuleiros e pavimentação substituídos por laje de CPR com 5 cm de espessura, diminuindo notavelmente a carga na estrutura (VANDERLEI, 2004).

Uma justificativa para este reduzido número de obras com este concreto é o elevado custo de fabricação, relacionado ao maior volume de cimento necessário, que em alguns casos supera os 700 kg/m³, e também à quantidade considerável de nanosílica utilizada. Além disso, por ter surgido há menos de três décadas, ainda não há um acervo científico consolidado sobre este material, carecendo de normatização, pesquisas e conhecimento sobre seu comportamento como estrutura.

No entanto, contrabalanceando seu elevado custo de produção, o CPR pode ter aplicações interessantes na construção de estruturas espaciais leves, vigas, colunas, pontes, passarelas e túneis pré-fabricados, com notável diminuição de espessura e dimensões de projeto que podem diminuir o custo total (ANDRADE, 2015).

Neste contexto, este estudo visa realizar a aplicação deste concreto especial como reforço estrutural em vigas de concreto convencional, com o intuito de analisar

o desempenho do CPR como alternativa para técnicas de patologia e reparos estruturais em obras de qualquer porte.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa consiste em analisar o desempenho de uma argamassa de alta resistência como reforço estrutural em vigas de concreto convencional.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Verificar o desempenho da argamassa de alta resistência na região de compressão e tração de vigas submetidas à flexão;
- Analisar o comportamento da estrutura mista composta pelo concreto convencional e argamassa de reforço em relação à aderência.

1.2 JUSTIFICATIVA

A pesquisa pretende encontrar na área de reforço estrutural uma aplicação prática e viável para argamassas de alta resistência. Desta maneira, espera-se contribuir com o acervo de conhecimento das áreas de tecnologia do concreto e reforço estrutural.

1.3 DELIMITAÇÕES DA PESQUISA

As vigas foram produzidas em fôrmas de madeira já existentes, e cada exemplar tinha as dimensões de 15x15x50cm. O concreto referência tinha f_{ck} de 20 MPa e foi dosado pelo método ABCP com traço 1 : 2,00 : 3,00 : 0,60 (consumo em massa de cimento : areia : brita : a/c). Em sua produção, foi utilizado cimento CP II, areia média e brita 1 provenientes dos materiais de pesquisa disponibilizados pela

universidade e água da rede de saneamento do local. As vigas em concreto convencional tiveram 28 dias de cura em condições ambientes.

O material de reforço era inicialmente proposto a ser um concreto de pós reativos, mas devido às limitações do estudo causados pela pandemia e disponibilidade de tempo, não foi possível realizar retestes e nem as etapas de cura úmida ou submersa das amostras. Somado ao fato de que foi adicionado mais água do que previsto no traço inicial por dificuldades na mistura, o material produzido não se assemelha à um concreto de ultra alto desempenho e nem tem as características mecânicas para tal, sendo assim classificado como uma argamassa de alta resistência.

A argamassa foi misturada em betoneira mecânica de 150 litros. Em sua composição foi utilizado cimento CP V ARI, areia média disponibilizada pela universidade, pó de quartzo, nanosílica ativa, fibras de polipropileno e água da rede do local. O método de dosagem e traço do material constam na metodologia do trabalho.

Antes do lançamento do material de reforço, foi aplicado uma camada de resina sintética de alto desempenho, que proporciona aderência das argamassas aos mais diversos substratos. A camada de reforço teve 10 dias de cura antes de ser submetida aos ensaios de resistência.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TECNOLOGIA DO CONCRETO – CONCEITOS BÁSICOS

2.1.1 Concreto Convencional

Consolidado como o material de construção estrutural mais utilizado em obras do mundo inteiro, o concreto convencional é composto pela junção de agregados, aglomerantes e água. Essa junção resulta em um material estrutural com propriedades intimamente ligadas à proporção de cada componente, à qualidade da matéria-prima, aos procedimentos de mistura e às diversas interações químicas que ocorrem em todo o processo de produção (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Um concreto considerado como de boa qualidade apresenta propriedades satisfatórias tanto em seu estado fresco como no estado endurecido. As exigências aplicadas para o concreto fresco são relacionadas à coesão e consistência da mistura, que devem permitir o adensamento com os meios disponíveis em obra e evitar a segregação durante o processo de transporte e lançamento do concreto (NEVILLE e BROOKS, 2008).

Em seu estado endurecido, a característica mais popular é sua capacidade de resistência à esforços de compressão. O valor de resistência mecânica do concreto é um bom indicador de sua qualidade em geral, uma vez que está relacionado a outras propriedades desejáveis como impermeabilidade, massa específica, resistência à abração, impactos, esforço de tração, durabilidade e resistência à sulfatos. Um concreto com altos valores de resistência não obrigatoriamente terá todas as qualidades requeridas, mas pode-se dizer, de maneira geral, que um concreto com resistência elevada tem maior probabilidade de satisfazer propriedades desejadas. (NEVILLE e BROOKS, 2008).

2.1.2 Concreto de Alto Desempenho

Concreto de Alto Desempenho é um concreto de cimento Portland produzido com materiais e condições especiais de forma a gerar um concreto com propriedades físicas e químicas superiores aos concretos convencionais. Também referido pela

sigla CAD, este tipo de concreto é projetado para ter melhores propriedades mecânicas e uma maior resistência a produtos químicos agressivos do que o concreto tradicional. (DAFICO, 2001).

A alta resistência à compressão não é a única característica que faz do concreto de alta resistência um material de melhor desempenho estrutural. Por razão da baixíssima porosidade do material, este tende a possuir ainda uma alta resistência aos mais diversos meios agressivos, tais como água do mar, atmosfera urbana, águas contaminadas por efluentes industriais, dentre outros. Isso tudo torna o concreto de alta resistência um material de muito maior durabilidade que o concreto convencional (Tutikian et al, 2011)

Devido ao melhor desempenho quanto à durabilidade e outras propriedades mecânicas, o concreto de alta resistência, quando sua melhor performance geral está garantida, é designado de Concreto de Alto Desempenho. Em suma, a alta resistência mecânica é considerada como sendo só mais uma das muitas de suas características de elevado desempenho. (DAFICO, 2001).

No Brasil, ainda não há uma definição consensual do CAD, apenas do CAR. A ABNT NBR 8953 (2009) – Concretos para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência - divide as misturas em duas classes. A classe I abrange concretos de resistência de 20 até 50MPa, com intervalos de 5MPa. Já a classe II, considerada a classe para os CAR, especifica os concretos de 55 até 80MPa (55, 60, 70 e 80MPa). É importante ressaltar que a ABNT NBR 6118 (2007) utiliza essa mesma classificação. O ACI (American Concrete Institute) adota o mesmo limite de 55MPa para o concreto a ser um CAR.

Portanto, a definição de CAR não contempla a de CAD, por razão de a primeira definição focar a resistência mecânica como elemento básico da sua constituição, enquanto a classificação de CAD contempla todas as propriedades do concreto de modo geral, focado no resultado final: o máximo desempenho global (QUISSANGA, 2019).

Em suma, existem várias definições para CAD, algumas mais simples outras mais complexas. Segundo o ACI (1992), pode-se definir o CAD como: Um concreto que atenda uma combinação especial entre desempenho e requisitos de uniformidade que não pode ser atingida rotineiramente com o uso de componentes convencionais e práticas normais de mistura, lançamento e cura.

2.1.3 Concreto de Pós Reativos

Categorizado como concreto de ultra alto desempenho, o Concreto de Pós Reativos tem como princípio básico a ausência de agregados graúdos e recebe este nome devido a seus materiais de composição, que são partículas com diâmetro médio de 0,2 mm (TUTIKIAN et al., 2011).

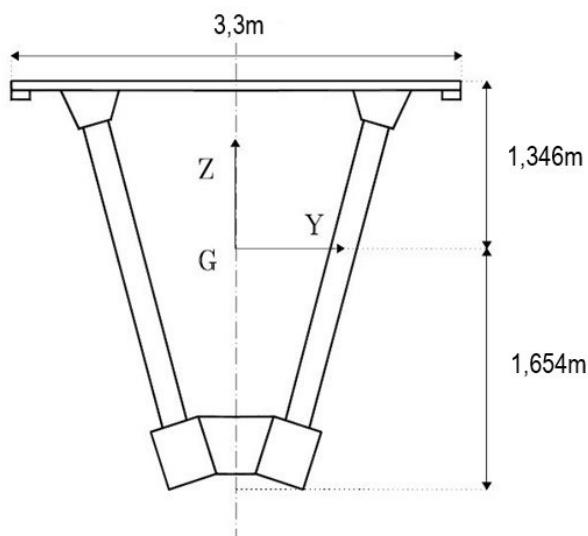
A composição básica do CPR regularmente se constitui de areia de baixa granulometria, cimento comum, pó de quartzo, sílica ativa, adição de fibras de pequenas dimensões, superplastificantes e água com baixíssima relação a/c – próxima de 0,15 (VANDERLEI, 2004).

Os tipos de fibra frequentemente usados neste concreto de ultra alto desempenho incluem aço de alto carbono, PVA, vidro, carbono ou uma combinação desses tipos ou outros. O comportamento dúctil desse material é inédito para o concreto, com capacidade de deformar e suportar cargas de flexão e tração, mesmo após fissuras iniciais. Suas propriedades de alta compressão e tração facilitam uma alta resistência de união, permitindo menor comprimento de ancoragem do aço em aplicações como vazamentos de fechamento entre elementos pré-fabricados. (PERRY, 2001).

A característica principal deste tipo de concreto é sua resistência a altas tensões, que apesar de impressionante, não é o único diferencial deste material. Sua composição e propriedades tornam possíveis características muito desejáveis para um concreto de qualidade e durável, superiores aos valores obtidos com concretos convencionais, além da já mencionada notável resistência à compressão (VANDERLEI, 2004).

A junção destas propriedades possibilita o dimensionamento de estruturas mais esbeltas e inovadoras em suas dimensões. A passarela de Sherbrooke no Canadá, por exemplo, foi construída em um vão de 60 m de comprimento e 3,30 m de largura e é composta em sua superfície por peças de CPR pré-fabricadas com apenas 3 cm de espessura (BLAIS e COUTURE, 1999). Na Figura 1, é possível observar um detalhe de sua seção transversal em projeto e em seguida, na Figura 2, apresenta-se uma foto da estrutura.

Figura 1 - Seção transversal simplificada da passarela de Sherbrooke.



Fonte: PAULTRE et al. (2000)

Figura 2 - Passarela de Sherbrooke, Canadá.



Fonte: REVISTA DE CIÊNCIA & TECNOLOGIA, (2006)

Além de projeto de elementos esbeltos, estudos feitos por Richard et al. (1995) mostram que o CPR pode ser utilizado em estruturas protendidas sem qualquer armadura passiva, uma vez que as tensões primárias são resistidas pela protensão e as tensões secundárias, de compressão e cisalhamento, são resistidas diretamente pelo concreto (BIZ, 2001).

No entanto, o CPR ainda é uma tecnologia inacessível à grande maioria das empresas de construção civil brasileiras devido à carência de estudos e normatização para sua utilização. Além de ainda não oferecer uma viabilidade econômica para que seja empregada (TUTIKIAN et al., 2011).

2.1.4 Microestrutura do Concreto

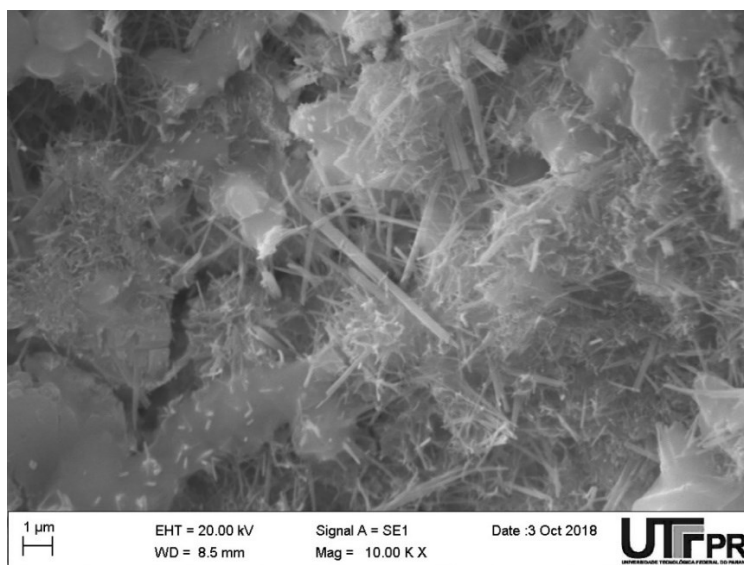
Analisando a seção transversal de uma estrutura de concreto convencional cortada, é possível identificar duas fases de aparência macroscópica: agregados graúdos em diversas formas e dimensões e uma pasta de cimento hidratada que se fortifica como base. Por esta aparência, pode-se dizer que o concreto se apresenta como um material bifásico, com partículas de agregados dispersos em uma matriz de pasta de cimento hidratada (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Em nível microscópico, a microestrutura do concreto se torna muito mais heterogênea e complexa, como pode-se observar na Figura 3. Estudos mostram uma diferença de comportamento da pasta de cimento hidratada com a presença de agregados graúdos (caso do concreto) em relação à esta pasta utilizada em argamassas - sem partículas de tal granulometria.

Mehta e Monteiro (2014) resumem as características singulares da microestrutura do concreto da seguinte forma:

(...) há uma zona de transição na interface, que representa uma pequena região próxima às partículas de agregado graúdo. Apresentando-se na forma de uma camada delgada, normalmente com espessura de 10 a 50 μm em volta do agregado graúdo, a zona de transição na interface é normalmente mais fraca do que os outros dois componentes do concreto - o agregado e a matriz pasta de cimento hidratada. Desse modo, exerce influência bem maior no comportamento mecânico do concreto do que se poderia esperar pela sua dimensão. (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Figura 3 - Microestrutura de uma amostra de concreto convencional



Fonte: SCHIAVINI (2018)

Na Figura 3, pode-se identificar as formas compridas com formato de uma agulha de costura como a etringita, que é a composição mais fraca que constitui o concreto. Além disso, observa-se também as aglomerações de formas esbeltas que podem ser comparadas a pequenos e finos espinhos como as formações de CSH, principal responsável pela resistência da estrutura. Na presença de agregados graúdos, ocorre em geral uma concentração de partículas de etringita e falta de partículas CSH nas proximidades do agregado. Ao se distanciar do mesmo, gradualmente há um aumento na concentração de CSH e redução de etringita, região chamada de zona de transição.

A zona de transição apresenta maior porosidade, concentra microfissuras e limita a resistência mecânica do concreto (TUTIKIAN et al, 2011), sendo, portanto, a região mais frágil e onde se inicia a ruptura do concreto convencional.

Além disso, Mehta e Monteiro (2014) comentam que, diferentemente de outros materiais estruturais, a microestrutura do concreto não pode ser considerada como intrínseca do material, em razão de seus componentes estarem sujeitos a alterações de comportamento devido a mudanças relativas ao tempo, temperatura e umidade ambiente.

Comparando-se a microestrutura do CPR com a do concreto convencional e dos CAD conhecidos atualmente, a microestrutura do CPR se diferencia por não contemplar esta zona de transição na interface entre seus componentes, uma vez que não leva em sua composição agregados graúdos. Esta característica é uma das principais responsáveis pelo elevado valor de resistência à compressão do CPR. Além disso, por ser composto de partículas muito miúdas, apresenta um índice de vazios muito baixo, mais uma vantagem se comparado aos demais tipos de concreto em critérios de porosidade.

2.2 ELEMENTOS DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO

O concreto armado é constituído pela composição de dois materiais diferentes: o concreto e o aço, nos quais cada um destes atua na estrutura de forma individual. O concreto é responsável por resistir a esforços de compressão, enquanto sua insuficiente resistência intrínseca à tração é compensada pela utilização de barras

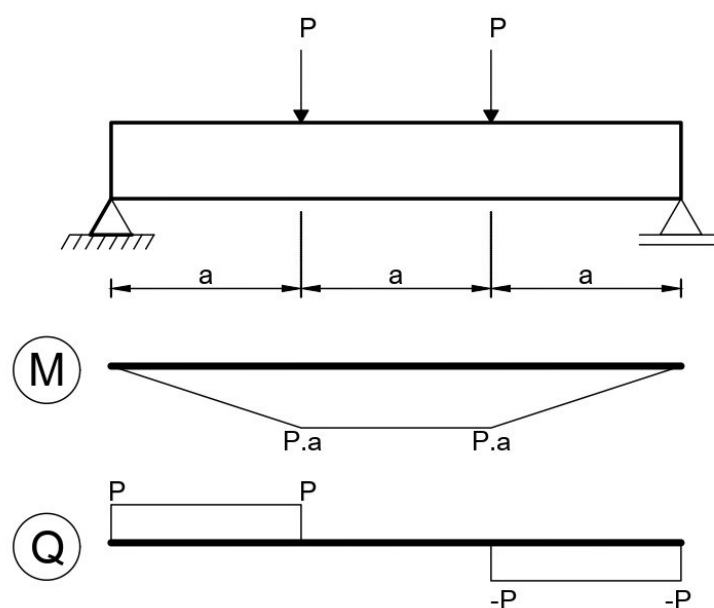
de aço, materiais dúcteis que são posicionados na estrutura nas regiões submetidas à tração.

Além do propósito de resistência a esforços mecânicos, Carvalho e Figueredo (2014) destacam que o concreto, ao envolver o aço, o protege satisfatoriamente contra a oxidação e altas temperaturas.

Vigas são elementos estruturais básicos e presentes nos mais variados tipos de obras de construção civil. Como a NBR 6118 (ABNT, 2014) define, vigas são “Elementos lineares em que a flexão é preponderante”. Em elementos fletidos, ocorrem esforços de compressão e de tração em uma mesma seção transversal, o que exemplifica classicamente a utilização do concreto armado.

Conforme representado na Figura 4, a aplicação de um carregamento crescente em vigas simplesmente apoiadas causa a flexão pura na região central do elemento, gerando o diagrama de momento fletor indicado. Experimentalmente, ao submeter a peça a um carregamento, é possível observar as deformações que ocorrem em sua região central. Essas deformações tendem a fletir e apresentar fissuras verticais a partir do momento em que as tensões de tração igualam e superam os valores de resistência à tração na flexão do concreto.

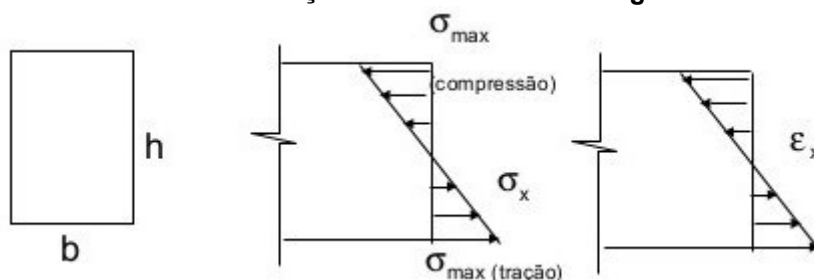
Figura 4 - Viga simplesmente apoiada com forças aplicadas e diagramas.



Fonte: Autora (2021).

Analisando as tensões existentes na seção longitudinal, esquematizada na Figura 5, o momento atuante na região central resulta na compressão da área superior da seção transversal e tração da área inferior, relativas à linha neutra da estrutura.

Figura 5 - Tensões resultantes na seção transversal de uma viga submetida à flexão simples.



Fonte: HIBBELER (2007).

Os casos de deficiência estrutural em vigas que demandam intervenções de reforço à esforços de flexão normalmente são causadas por excesso de carga, seção insuficiente, falta de armaduras, locação inadequada de armaduras, dentre outras razões.

2.3 REFORÇO ESTRUTURAL

2.3.1 Sinais e Causas de Deficiência Estruturais em Viga

A construção civil, desde seus primórdios, apresentou um crescimento notavelmente acelerado, visto que acompanha intimamente o desenvolvimento da sociedade em geral. Com isso, a progressão do desenvolvimento tecnológico relacionado a técnicas de construção civil ocorreu de maneira natural ao longo do tempo, constituindo um acervo científico amplo. A maioria das estruturas de concreto que requerem reforço ou reabilitação está exposta a severas condições ambientais. No hemisfério norte, frequentemente essas circunstâncias severas são o resultado de condições de clima frio, como baixa temperatura, ação de congelamento e descongelamento e exposição a sais de degelo, enquanto no Brasil é comum estas manifestações patológicas estarem relacionadas à ambientes agressivos mais tropicais, como cidades com maresia. Por causa disso, a durabilidade ambiental de ambos os materiais de reparo e métodos usados em aplicações de reabilitação são de extrema importância (EMMONS, 1993).

Ainda assim, por existirem limitações ao livre desenvolvimento científico e somando-se as inevitáveis falhas involuntárias e casos de imperícia, tem sido constatado um número considerável de estruturas com desempenho insatisfatório, se analisadas as finalidades às quais foram propostas (SOUZA e RIPPER, 2009).

Souza e Ripper (2009) definem a durabilidade de uma estrutura como o parâmetro que relaciona a ação de características de deterioração conhecidas desde o projeto em uma determinada construção. Essas características são compostas por fatores climáticos e biológicos do local da obra, bem como a avaliação da resposta apresentada pela estrutura a estes efeitos de agressividade ambiental. Uma estrutura durável é caracterizada por um conjunto de decisões e procedimentos que assegurem um desempenho satisfatório ao longo de sua vida útil, dado todas as condições às quais será exposta.

De maneira geral, pode-se dizer que uma estrutura com desempenho insatisfatório e que necessita de reparos ou reforços pode ser causada em três fases de sua vida: primeiramente, em sua fase de projeto e execução, devido a erros de dimensionamento, más escolhas de materiais e falhas conhecidas em canteiros de construção; em seguida, por falta de manutenção preventiva, que é necessária para o cumprimento e em alguns casos extrapolação de sua vida útil estimada; e por fim, por acidentes ou má utilização da estrutura, como casos de aplicação de cargas e tensões não previstas em projeto (FONSECA, 2016).

Assim como um paciente, as estruturas de concreto manifestam sintomas quando não estão em suas condições ideais e estes devem ser levantados e analisados por um profissional com a competência necessária. Os sintomas mais comuns apresentados por estas estruturas são a fissuração, deformações geométricas excessivas, deslocamentos, mudanças de coloração, desagregações, abrasão, manifestações de microrganismos e eflorescências, dentre outras (THOMAZ, 2001).

No caso de observação de alguma manifestação patológica, é importante buscar as causas relacionadas ao comportamento apresentado pela estrutura, avaliando prioritariamente as condições de segurança da construção (REIS, 2001).

2.3.2 Técnicas Atuais de Reforço Estrutural em Vigas de Concreto Armado

O processo de recuperação de elementos danificados só deve ser iniciado após confirmação por cálculos, análises e ensaios de que as manifestações patológicas encontradas não oferecem risco ao edifício ou estrutura como um todo. Além disso, é necessária a análise global dos efeitos causados pela patologia, para definir se é uma correção provisória ou definitiva (THOMAZ, 2001).

Segundo Souza e Ripper (2009), a escolha e qualidade dos serviços de recuperação de estruturas dependem diretamente da análise precisa das causas e fatores que o tornaram necessários e do estudo detalhado da extensão dos efeitos produzidos.

2.3.3 Reforço Estrutural com Concreto

Dentre os materiais de reparo disponíveis, o concreto é um dos mais utilizados. Para atuar como reforço, este deve apresentar, com prioridade, altas resistências iniciais, expansões controladas e retrações mínimas (REIS, 2001).

A seleção de materiais de reparo para 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 trincas 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).

Para a unidade composta de concreto formada por concreto novo e velho, a característica evidente da estrutura composta de concreto é a existência de interface de união de dois materiais. No entanto, a camada de interface é geralmente a posição fraca de toda a estrutura (TAYEH et al., 2012). 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).

2.3.4 Argamassas de reparo

Entende-se por argamassa de reparo um tipo especial de argamassa que apresente a capacidade de adaptação a um substrato de estrutura danificada e desenvolva características de estado endurecido que se aproximem ao máximo daquelas próprias deste substrato, conferindo a este o restabelecimento de sua funcionalidade com segurança. (KUDLANVEC JUNIOR, 2017).

Esta argamassa é composta por uma mistura multifásica de materiais inertes e reativos, com uma pasta envolvendo agregados de origem mineral. A pasta é formada pela fração fina, passante pela peneira #200, composta por aglomerante – que pode ser de cimento Portland ou de base polimérica ou resina, adições e aditivos, formando a fração reativa e partículas inertes que compõem partículas de agregado de dimensão inferior a 0,075 milímetros (fração inerte), enquanto a fração grossa é composta por agregados em partículas de dimensão superior a esta até o limite de 4,75 mm (peneira 4). Esta composição permite o correto funcionamento reológico da argamassa no estado fresco, sendo que a relação entre a fração pasta e a fração agregado determina um bom ou mau comportamento reológico do material. A interação entre agregados quando solicitados a uma tensão de cisalhamento sem uma adequada lubrificação pela pasta, ou seja, sem um volume de pasta suficiente, prejudica as propriedades finais da argamassa (COSTA, 2006).

Em casos de reparos superficiais, as argamassas são amplamente utilizadas, e com frequência levam aditivos em sua composição. Em seguida, existem os endurecedores de superfícies, que são produtos líquidos à base de silicato de sódio ou fluo silicato de magnésio, sódio ou zinco que proporcionam uma camada resistente à abrasão (comumente aplicada em pisos) e os inibidores de corrosão, que atuam recuperando armaduras (REIS, 2001).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Vigas de concreto convencional

O concreto convencional de referência foi produzido a partir do traço 1:2,00:3,00:0,60 (consumo em massa de cimento : areia : brita : a/c) definido pelo Método de Dosagem ABCP. Foi considerado fck de 20 MPa o módulo de finura da areia utilizada de 2,60, dimensão máxima de agregado graúdo igual a 19 mm (brita 1), cimento classe 40 e abatimento de cone de 100 mm. As características dos materiais são descritas abaixo.

a) Cimento

O cimento utilizado na produção das vigas de concreto referência e vigas a serem reforçadas foi um cimento CP V - ARI. As propriedades químicas e físicas do cimento constam nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Propriedades químicas do cimento utilizado.

Propriedades químicas do cimento				
Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
4,26%	18,93%	2,72%	60,73%	4,11%
SO ₃	P. Fogo	CaO L.	R. Ins.	Eq. Alc.
2,99%	3,30%	0,68%	0,77%	0,71%

Fonte: Fabricante (2021).

Tabela 2 - Propriedades físicas do cimento utilizado

Exp. Quente		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325
mm		%	cm ² /g	%	%
0,23		30,0	4.342	0,04	0,43
Tempo de Pega (h:min)		Resistência à Compressão (MPa)			
Início	Fim	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
03:30	04:11	22,6	38,7	44,5	53,0

Fonte: Fabricante (2021).

b) Agregado miúdo

Foi utilizado como agregado miúdo areia natural de granulometria média proveniente de cavas do Rio Iguaçu, na região metropolitana de Curitiba.

c) Agregado graúdo

A brita utilizada como agregado graúdo na produção do concreto foi de classificação brita 1, de origem granítica.

d) Água

A água adicionada à mistura é proveniente da rede de saneamento da universidade.

3.1.2 Argamassa de alta resistência

Como explicado anteriormente, a intenção inicial era produzir um concreto de pós reativos, mas o resultado do material produzido não foi compatível com tais propriedades. Por esta razão, os materiais da argamassa produzida são obtidos de um traço de CPR elaborado com o empacotamento de partículas segundo o método de Andreassen modificado, conforme indicado na equação 1.

$$CPFT = 100 \cdot \left(\frac{D_P^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \quad (1)$$

Onde:

CPFT = porcentagem acumulada de partículas menores que D_p ;

D_p = diâmetro da partícula em questão em mm;

D_s = diâmetro da menor partícula em mm;

D_L = diâmetro da maior partícula em mm;

q = coeficiente de empacotamento

O traço resultante utilizado é mostrado na tabela 3.

Tabela 3 - Valores de coeficientes de traço em massa do material de reforço (argamassa)

Material	Massa (kg)
CP V ARI	1,000
Sílica ativa	0,100
Pó de quartzo	0,150
Areia média	1,128
Areia fina	0,282
Fibra polipropileno	0,0012
Água	0,220
Aditivo	0,030

Fonte: Autora (2021).

a) Cimento

O cimento utilizado na produção do material de reforço foi o mesmo usado nas vigas de referência, CP V – ARI. As tabelas 1 e 2 apresentam as propriedades.

b) Sílica ativa

A Sílica ativa utilizada na produção da argamassa de reforço possui as especificações descritas na tabela 4.

Tabela 4 - Especificações físicas e químicas da sílica ativa.

Massa específica	2200 kg/m³
Teor de SiO₂	> 90%
Superfície Específica (B.E.T)	19000 m²/kg
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio da partícula	0,20 μm
Massa unitária densificado	> 350 kg/m³

Fonte: Fabricante (2021).

c) Pó de quartzo

O pó de quartzo utilizado tem as propriedades listadas na tabela 5.

Tabela 5 - Caracterização química do pó de quartzo.

Propriedades químicas do pó de quartzo	
Umidade (%)	0,020
Perda ao fogo (%)	0,130
Teor de SiO₂ (%)	> 99,000
Teor de Fe₂O₃ (%)	< 0,050
Teor de Al₂O₃ (%)	< 0,300
Teor de TiO₂ (%)	< 0,035

Fonte: Fabricante (2021).

d) Agregado miúdo.

A areia utilizada como agregado miúdo na produção da argamassa de alta resistência foi a mesma utilizada para o concreto referência, natural de granulometria média proveniente de cavas do Rio Iguaçu, na região metropolitana de Curitiba.

e) Aditivo

O aditivo utilizado foi um superplastificante tipo II à base de éter-policarboxilatos com densidade 1,06.

f) Adição de fibras

A fibra adicionada à mistura foi a fibra de poliproleno. A escolha para este tipo de material se dá na medida em que estudos anteriores (MAZER et al., 2021) apontaram que este tipo de fibra gerou melhores resultados na resistência à compressão quando comparado à utilização de fibras metálicas e de vidro, nas condições de produção e cura realizadas.

g) Água: foi utilizada água da rede de saneamento da universidade.

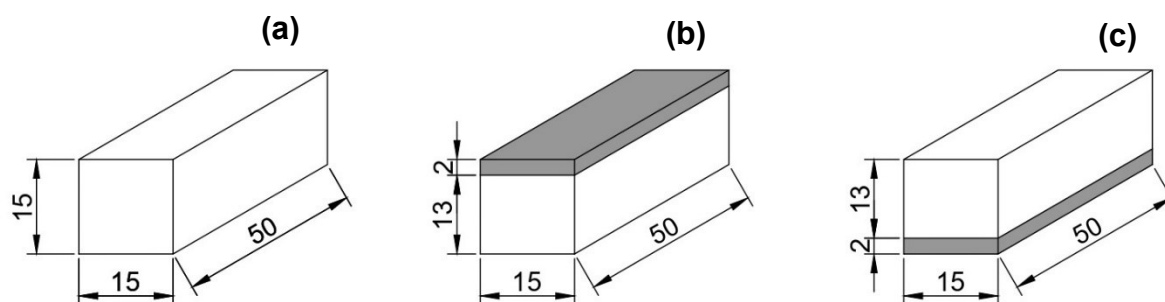
3.2 PROJETO

3.2.1 Protótipos

A pesquisa é de caráter experimental e consiste na produção de 15 vigas de concreto armado convencional em escala reduzida, nas dimensões de 50 cm de comprimento, com 15 cm de largura e 15 cm de altura. Um terço das amostras é composto apenas por concreto convencional, enquanto o restante será preenchido com concreto convencional na altura de 13 cm e, após a cura do concreto, este receberá um reforço com uma camada de 2 cm de CPR na superfície da viga.

Na Figura 6 é possível visualizar o esquema das amostras e na Tabela 6 é possível ver a descrição e o número de corpos de prova para cada tipo de amostra.

Figura 6 - Detalhamento das amostras, medidas em centímetros.



Fonte: Autora (2021).

Tabela 6 - Descrição e quantidade de amostras.

Tipo	Descrição	Quantidade de amostras
REF	Vigas de concreto convencional (referência)	5
SUP	Vigas de concreto convencional com camada de 2 cm de reforço em CPR na parte superior da viga	5
INF	Vigas de concreto convencional com camada de 2 cm de reforço em CPR na parte inferior da viga	5

Fonte: Autora (2021).

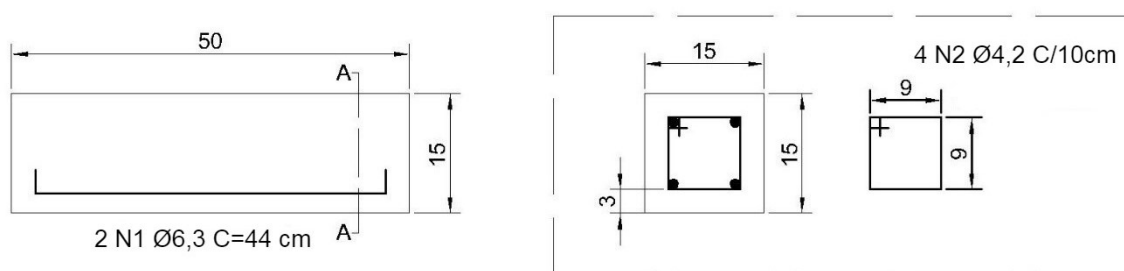
A diferenciação das amostras foi definida de forma a considerar os exemplares do tipo “REF” como referência, enquanto as vigas do tipo “SUP” foram utilizadas para avaliar o desempenho deste UHPC na região de compressão da peça e as amostras do tipo “INF” foram utilizadas para avaliar o material na região de tração do elemento.

3.2.2 Projeto de armaduras

O dimensionamento das armaduras foi realizado com aço CA-50, de forma a garantir a armadura mínima para critérios da NBR 6118 (ABNT, 2014) e tentar evitar a ocorrência da ruptura das vigas por cisalhamento, com um baixo espaçamento entre os estribos.

Desta forma, as vigas receberam as armaduras indicadas na Figura 7.

Figura 7 - Projeto de armaduras das vigas de concreto.



Fonte: Autora (2021).

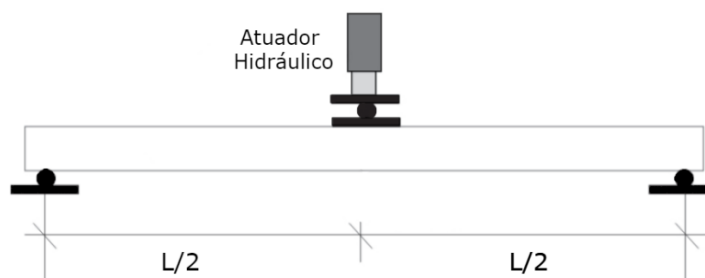
Na confecção das armaduras, foram colocadas duas barras na parte superior da viga para apoiar os estribos. Após prontas, as armaduras foram posicionadas nas formas e escoradas em espaçadores para evitar a exposição do aço e garantir a cobertura na parte inferior das vigas.

Para verificar a resistência à compressão característica da argamassa utilizada como reforço estrutural, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos 5 x 10 cm e submetidos ao ensaio de ruptura por compressão axial, conforme instruções da NBR 5739 (ABNT, 2018).

3.3 ENSAIOS

Após o intervalo de cura de 28 dias para consolidação da resistência do concreto, as amostras serão submetidas a ensaios de flexão em três pontos, realizados no laboratório da universidade e orientados pela norma ASTM C78 / C78M-21, *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)* (ASTM, 2021). Na Figura 8 pode-se conferir o esquema de ensaio citado.

Figura 8 - Esquema do ensaio de flexão em três pontos.



Fonte: Autora (2021).

Primeiramente, as amostras compostas totalmente por concreto convencional foram ensaiadas para obter o parâmetro de resistência das vigas sem receber nenhum tipo de reforço. Em seguida, as amostras que receberam o reforço com CPR foram ensaiadas em duas situações diferentes: com a camada de reforço em CPR posicionada na região de compressão do elemento (na superfície da viga) e com a camada de reforço em CPR posicionada na região de tração (na parte inferior da viga).

Desta forma, foi possível verificar se o reforço com camada de CPR exerce ou não uma melhora na resistência à flexão das vigas em concreto convencional, seja na parte inferior ou superior do elemento.

3.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

A partir dos resultados de cargas de ruptura obtidos, os dados foram submetidos a uma análise de variância, comumente chamada de ANOVA. A análise de variância conhecida é um procedimento utilizado para fazer comparações entre três ou mais grupos em amostras independentes. Ela permite assim, fazer afirmações sobre as médias das populações baseado na análise de variâncias amostrais.

Para realizar comparações entre as médias populacionais através de análise de variância, as hipóteses nulas e alternativa a serem testadas serão:

- H_0 (hipótese nula): As médias populacionais são iguais.
- H_1 (hipótese alternativa): Pelo menos uma das médias populacionais é diferente das demais.

Sendo assim, para testar através da análise de variância, se os parâmetros ou fontes de variações do modelo são iguais a zero temos:

- H0 (hipótese nula): os parâmetros ou fontes de variações do modelo são iguais a zero.

- H1 (hipótese alternativa): Pelo menos um dos parâmetros ou fontes de variações é diferente de zero.

A partir do resultado da análise de variância que demonstrou que uma das médias populacionais se diferenciava das demais, foi realizado o teste de Tukey, um teste exato em que, para a família de todas as comparações duas a duas, a taxa de erro da família dos testes é exatamente α (e o intervalo de confiança é exatamente $1-\alpha$). O teste tem como base a DMS (diferença mínima significativa). Para dados balanceados é calculado da seguinte forma mostrada na equação 2:

$$DMS = q_{\alpha}(g, N - g) \sqrt{\frac{QM_{\text{Erro}}}{n}} \quad (2)$$

Em que n é o número de réplicas do tratamento (nível), q_{α} é um valor tabelado (Tabela do Teste de Tukey) e QM_{Erro} é o quadrado médio do erro. Rejeita-se a igualdade da média de dois tratamentos (i e l) se:

$$|\bar{y}_i - \bar{y}_l| > TSD \quad (3)$$

Um intervalo de confiança de $100(1-\alpha)\%$ para a diferença entre todos os pares de médias é dado por:

$$\bar{y}_i - \bar{y}_l \pm q_{\alpha}(g, N - g) \sqrt{\frac{QM_{\text{Erro}}}{n}} \quad (4)$$

3.5 CÁLCULO DA TENSÃO AXIAL

A tensão de tração máxima existe na face inferior do corpo de prova, diretamente abaixo do ponto de aplicação da carga em que essa tensão no momento da fratura em ensaio de flexão é conhecida por resistência à flexão. A ruptura se dá por tração, iniciando nas fibras inferiores, sendo a tensão normal em uma viga dada por pela equação 5.

$$\sigma = \frac{M}{I}y \quad (5)$$

Onde:

- σ - tensão axial (MPa);

- M - momento fletor máximo (N.m);
- y - distância do eixo neutro à fibra mais externa (m);
- I - momento de inércia de área em relação à linha neutra da seção (m⁴).

O momento fletor máximo é dado pela equação 6.

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{FL}{4} \quad (6)$$

Onde F é a força de ruptura e L o comprimento da viga.

O momento de inércia de área em relação à linha neutra para esta seção retangular de largura 'b' e altura 'a' é dado pela equação 7.

$$I = \frac{ab^3}{12} \quad (7)$$

Por se tratar de uma viga de concreto armado, a linha neutra não se encontra no meio da seção, sendo necessário o seu cálculo utilizando os critérios de concreto armado. Inicialmente foi calculado o momento resistente teórico da seção, considerando a resistência à compressão das vigas de referência e das vigas do tipo C como 20 MPa e para as vigas do tipo B de 25 MPa, que foi a resistência média à compressão do reforço utilizado.

. O nível de tensão das armaduras é proporcional à relação entre o momento atuante e o momento resistente (M/M_r). A partir dessa relação, é possível calcular a tensão na armadura (σ_s) para cada caso, a força de tração na armadura (R_{st}) e a componente de compressão no concreto (R_{cc}), utilizando as expressões 8,9 e 10:

$$\sigma_s = \frac{M}{M_r} * f_{yd} \quad (8)$$

$$R_{st} = A_s * \sigma_s \quad (9)$$

$$R_{cc} = R_{st} \quad (10)$$

Conhecendo a resultante de compressão no concreto (R_{cc}) é possível determinar a posição da linha neutra (x) pela expressão 11:

$$x = \frac{R_{cc}}{0,8*0,85*f_{cd}*b_w} \quad (11)$$

3.6 TENSÃO DE CISALHAMENTO

A tensão de cisalhamento é um tipo de tensão gerada por forças aplicadas em sentidos opostos, porém em direções semelhantes no material analisado, atuando tangencialmente nas estruturas a partir de forças cortantes. Para uma viga com seção transversal retangular, a tensão de cisalhamento varia parabolicamente com a altura, e a tensão máxima ocorre ao longo do eixo neutro.

$$\tau = \frac{V.Q}{I.b} \quad (12)$$

Onde:

V -Força cortante (N)

b - Largura (m)

Momento estático (Q) é dado por: $Q = A.y$

Para elementos de seção transversal retangular, essa expressão resulta, para a tensão máxima de cisalhamento, na expressão 13.

$$\tau = \frac{3.V}{2.A} \quad (13)$$

3.7 EXECUÇÃO

3.7.1 Produção das vigas de concreto referência

A primeira etapa da execução do experimento foi a montagem das armaduras metálicas, aplicação de desmoldante à base de óleo nas formas de madeira confeccionadas no local e então o posicionamento das armaduras utilizando espaçadores de plástico para garantir o cobrimento mínimo, conforme ilustrado na figura 9.

Figura 9 - Armaduras posicionadas nas formas.



Fonte: Autora (2021).

Então, o concreto foi misturado em betoneira mecânica e a mistura foi lançada nas formas. As vigas compostas apenas de concreto convencional foram preenchidas até 15 cm de altura, enquanto as vigas que seriam reforçadas foram preenchidas até 13 cm de altura, restando 2 cm para o reforço com CPR. A figura 10 ilustra a etapa descrita.

Figura 10 - Formas preenchidas com concreto fresco.



Fonte: Autora (2021).

3.7.2 Produção da argamassa de reforço

A produção do CPR em ensaios feitos na universidade sempre foi realizada por meio de argamassadeira eletromecânica com capacidade de 5 L, como indicado por Vanderlei (2004). Neste estudo, porém, devido ao volume de CPR necessário, a mistura foi feita experimentalmente por betoneira eletromecânica. No processo de mistura, foram inseridos na betoneira todos os materiais secos: areia, cimento, sílica ativa, pó de quartzo e a fibra de polipropileno. A betoneira foi acionada por um certo

período até que se desse visivelmente a mistura de todos estes materiais. Em seguida, adicionou-se água e aditivo em pequenas porções com o equipamento em rotação, enquanto observou-se o estado da mistura.

Após toda a quantidade prevista de água e aditivo ser adicionada, a mistura estava visivelmente empelotada e divergente do resultado esperado, como mostrado na figura 11.

Figura 11 - Aparência da mistura no traço previsto.



Fonte: Autora (2021).

Frente ao resultado insatisfatório da massa, foi adicionado mais água para que fosse possível utilizar o material. Foram necessários 2,5 kg a mais de água, totalizando 6,020 kg de água no preparo.

Após a adição imprevista de água, a massa apresentou o aspecto desejável de uma mistura densa e com aspecto de argamassa. Porém, neste processo perdeu sua característica de concreto de pós reativos, que tem como uma das principais propriedades a baixa relação água/cimento.

Antes de lançar a argamassa nas formas, as vigas a serem reforçadas receberam uma aplicação de resina sintética na superfície para proporcionar uma melhor aderência no substrato. Então, tais amostras foram preenchidas com a camada de argamassa em estado fresco, como ilustrado na figura 12.

Figura 12 - Amostras com reforço CPR no estado fresco.



Fonte: Autora (2021).

Os corpos de prova de concreto convencional tiveram 28 dias de cura sem câmara úmida, enquanto os reforços em concreto de pós reativos tiveram 10 dias de cura sem câmara úmida.

4 RESULTADOS

4.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

No primeiro ensaio, foi avaliada a resistência à compressão axial dos corpos de prova cilíndricos 5 x 10 cm moldados com o material utilizado no reforço das vigas de teste. Na Tabela 7, constam os valores.

Tabela 7 - Resultados de resistência à compressão das amostras do material de reforço.

Amostra	Força máxima (N)	Tensão máxima (MPa)
CP 1	47323,36	24,10
CP 2	48459,94	24,68
CP 3	52179,68	26,57
CP 4	49079,90	25,00
CP 5	53522,92	27,26
Média	50113,16	25,52
Desvio Padrão	2344,39	1,19
Coef. Variação (%)	4,67	4,66

Fonte: Autora (2021).

Os resultados de resistência à compressão se apresentaram inferiores aos resultados esperados baseados na literatura (MAZER et al., 2021) para um concreto de pós reativos. Esta divergência pode ser explicada pelo consumo de água elevado que foi necessário pelo uso da betoneira, assim como pela não realização da etapa de cura úmida - que se mostra indispensável para o ganho de resistência do CPR. Desta forma, o material foi classificado como uma argamassa de alta resistência.

4.2 RESISTÊNCIA À FLEXÃO

Nos ensaios de resistência à flexão, foram observados os comportamentos de resistência dos elementos e obtidos os valores máximos de momentos fletores atuantes.

O ensaio e ruptura das vigas de referência são mostrados na figura 13.

Figura 13 - Ensaio de viga em concreto convencional (REF) submetida à flexão.



Fonte: Autora (2021).

Nas vigas de concreto convencional (REF), foi possível observar os comportamentos padrões deste tipo de elemento submetido à flexão, apresentando fissuras na região inferior central da peça.

Na figura 14, é possível observar o comportamento das vigas com reforço de argamassa na área de compressão da peça.

Figura 14 - Ensaio de viga em concreto reforçada (SUP).



Fonte: Autora (2021).

Nas amostras de vigas de concreto convencional reforçadas com uma camada de reforço de argamassa de alta resistência posicionada para cima (SUP), a resposta do elemento à ruptura se deu de forma diferente, apresentando uma

fissuração que se inicia nas proximidades da localização dos apoios e seguem superiormente em direção ao centro da viga. Essa evidência demonstra que a ruptura das peças se deu por cisalhamento e não por flexão.

Por fim, na figura 15 é mostrado o ensaio de flexão em três pontos das vigas com reforço na face inferior.

Figura 15 - Ensaio de viga em concreto reforçada (INF).



Fonte: Autora (2021).

Nas amostras de vigas de concreto convencional reforçadas com uma camada de reforço posicionada para baixo (INF), a ruptura das amostras se mostrou similar às amostras de referência, com fissuração central por esforço fletor.

Na Tabela 8, apresentam-se os valores de cargas de ruptura de cada peça. Os resultados e gráficos individuais das amostras são encontrados no anexo deste trabalho.

Tabela 8 - Cargas de ruptura dos ensaios de flexão, em Newtons.

	REF	SUP	INF
CP 1	33208	37445	16287
CP 2	20455	44314	20204
CP 3	29281	52216	19039
CP 4	41402	39142	29211
CP 5	26861	39152	23798

Média	30241,40 _a	42453,80 _b	21707,80 _a
Desvio Padrão	7769,86	6035,70	4985,88
Coef. Variação (%)	25,69	14,22	22,97

Fonte: Autora (2021).

*Letras iguais representam resultados estatisticamente iguais.

A partir dos resultados obtidos, foi efetuada a análise de variância (ANOVA),. Nesta análise, foi indicado a existência de diferenças estatísticas, e então, foi realizada a comparação de médias pelo teste de Tukey's, que indicou que a carga de ruptura das vigas do tipo SUP é diferente das demais. Este resultado mostra que o reforço na região de compressão da viga gerou um aumento de sua capacidade de carga. O reforço na parte de baixo da viga apresenta a mesma carga de ruptura que a viga de referência. No entanto, a carga de ruptura se apresentou inferior, em média, porque a tensão normal atuante na face inferior da viga é da ordem de 13,8 MPa, que é superior à tensão de tração da argamassa de reforço. Pelo fato de não existir armadura nessa região de reforço, ocorreu o início da ruptura do concreto de reforço.

4.2.1 Tensão axial

Para as vigas REF e INF o momento resistente calculado (M_r) foi de 3,08 kN.m e para a viga SUP foi de 3,11 kN.m. Foram calculados os momentos fletores médios atuantes nas vigas, indicados na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores calculados de momento médio.

	Fmédia (kN)	L (m)	I (m⁴)	M (kN.m)	M/M_r
REF	30,241	0,5	$4,22 \cdot 10^{-5}$	3,02	0,98
SUP	42,454	0,5	$4,22 \cdot 10^{-5}$	4,24	1,36
INF	21,708	0,5	$4,22 \cdot 10^{-5}$	2,17	0,70

Fonte: Autora (2021).

É possível observar na Tabela 9 que as vigas tipo REF e INF apresentaram um momento de ruptura inferior ao momento resistente, indicando que não ocorreu o escoamento da armadura. Na tabela 10, são apresentados os resultados esforços atuantes na armadura e no concreto.

Tabela 10 - Esforços atuantes na armadura e no concreto.

	σ_s (kN/cm ²)	Rst (kN)	Rcc (kN)
REF	42,04	26,5	26,5
SUP	43,50	27,4	27,4
INF	29,73	18,7	18,7

Fonte: Autora (2021).

Foram calculados os valores em centímetros da linha neutra de cada tipo de amostra, e então foi possível determinar as tensões na face inferior e superior na seção de máximo momento fletor para cada viga, como indicado na Tabela 11.

Tabela 11 - Linha neutra e tensões nas vigas.

	x (cm)	σ_{sup} (kN/cm ²)	σ_{inf} (kN/cm ²)
REF	1,84	0,26	1,84
SUP	1,50	0,30	2,65
INF	1,30	0,13	1,38

Fonte: Autora (2021).

Na Tabela 11, é possível observar que a utilização do reforço com argamassa de alta resistência na região de compressão da viga gera um aumento na tensão de ruptura da viga mesmo sem ocorrer aumento de seção ou de armadura, indicando a eficiência da utilização desse material.

Foi observado que nas vigas do tipo INF ocorreu o descolamento da camada de reforço em relação ao concreto base da viga, na região de tração, sendo que a tensão atuante na interface entre os dois materiais foi de 1,18 kN/cm² (11,8MPa).

4.2.2 Tensão de cisalhamento

Na tabela 12, pode se comparar os valores de tensão de cisalhamento calculados para cada tipo de viga.

Tabela 12 - Valores calculados de tensão de cisalhamento.

	τ (MPa)
REF	2,02
CPR sup	2,83
CPR inf	1,45

Fonte: Autora (2021).

Utilizando-se da mesma análise de variância realizada para os dados de cargas de ruptura médias e teste de comparação de médias de Tukey, apenas as vigas do tipo SUP, com reforço na parte superior, apresentam diferença estatística, indicando que a utilização de um reforço de argamassa de melhor resistência, mesmo que apenas na camada de compressão, contribui para um aumento na capacidade de carga ao cisalhamento, mesmo sem ser essa a sua função principal.

5 CONCLUSÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do estudo possibilitou uma análise do comportamento de uma argamassa com resistência à compressão superior à do concreto de substrato como material de reforço estrutural, permitindo a avaliação da sua contribuição na capacidade de carga do elemento reforçado e de seu desempenho individual na resistência e aderência.

O material produzido para a pesquisa não alcançou a resistência esperada, devido a quantidade de água que teve que ser adicionada para conseguir a consistência desejada na betoneira, cujo processo foi inédito na universidade, e à não realização da etapa de cura úmida.

Entretanto, a resistência à compressão desta argamassa se mostrou superior à resistência do concreto das vigas, e o material apresentou desempenho satisfatório ao contribuir para aumento da capacidade de carga nas vigas quando posicionado na face superior da estrutura, aumentando em 40,38% a resistência do material quando comparadas as cargas de ruptura médias das vigas de referência e as vigas reforçadas na face superior do elemento. Foi possível notar nas fissuras geradas pela ruptura das peças com essa configuração que estas se apresentaram localizadas próximas aos apoios e seguindo ao centro da viga, o que indica que a ruptura foi causada por cisalhamento e não por flexão. Isto mostra que a camada de argamassa efetuou uma influência positiva na resistência à flexão das amostras, mesmo sem aumento de seção ou armadura.

No caso dos corpos de prova com o reforço posicionado na face inferior das vigas, a capacidade de carga foi menor comparada às amostras de referência pois as rupturas se deram de forma diferente. Analisando os resultados, percebe-se que apesar destas vigas reforçadas inferiormente possuírem a mesma capacidade de carga das vigas de referência, neste caso se apresentou menor por motivo de a tensão de tração do material de reforço ser inferior. Desta forma, a ruptura da camada de argamassa ocorreu por tração antes da ruptura da peça composta.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho promoveu uma série de tópicos de interesse para trabalhos futuros, como por exemplo, o desenvolvimento de um procedimento de produção de CPR voltado à betoneira eletromecânica, que não prejudique a qualidade do material produzido.

A partir dos bons resultados das vigas com reforço de uma argamassa um pouco mais resistente do que o concreto na região de compressão, seria interessante analisar qual seria o resultado do mesmo estudo quando se realizasse o reforço com um concreto de pós reativos com as características de alta resistência desejadas. Além disso, o reforço da região tracionada da viga com um CPR de qualidade pode apresentar resultados diferentes dos obtidos neste estudo, uma vez que provavelmente irá apresentar uma resistência à tração no mínimo superior à tensão das vigas de referência.

E, ainda, pode-se verificar qual seria o desempenho de um reforço composto por CPR adicionado de chapas metálicas na região de tração da viga, visto que a maioria dos reforços estruturais deste tipo são realizados na parte inferior da viga devido à maior praticidade e viabilidade da execução.

6 REFERÊNCIAS

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

ANDRADE, T. C. C. S. **Avaliação do tipo de cura nas propriedades de concretos de pós reativos**. 102p. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Paraná (UFPR). Curitiba, Paraná, 2015.

BIZ, C. E. **Concreto de pós reativos**. 2001. 118p. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Campinas: São Paulo, 2001.

BLAIS, P. Y.; COUTURE, M. **World's First Reactice Powder Concrete Structure**. Precast Prestressed Pedestrian Bridge Journal, Quebec, Canada, 1999.

CARVALHO, R. C.; FIGUEIREDO, J. R. de. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. 4 ed. São Paulo: EdUFSCar, 2014.

EMMONS, P. H. **Concrete repair and maintenance illustrated: Problem analysis, repair strategy and techniques**. R.S. Means Company Inc, Kingston (MA), 1993.

FONSECA, E. F. **Análise do aparecimento de fissuras em regiões de aberturas de paredes de concreto armado – estudo de caso**. 77p. Dissertação (graduação), Centro Universitário de Brasília (UniCEUB). Brasília, Distrito Federal, 2016.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. São Paulo: Editora PEARSON, 2010.

JU, Y.; SHEN, T.; WANG, D. **Bonding behavior between reactive powder concrete and normal strength concrete**. Construction and Building Materials Journal, 2020.

KUDLANVEC JUNIOR, V. L.; **Aderência de argamassas de reparo em substrato de concreto com ênfase no comportamento reológico**. Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Paraná (UFPR). Curitiba, Paraná, 2015.

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.

MAZER, W.; FERREIRA, E. O.; BORGES, R. G.; PONTES, P. V. **Análise de reforço estrutural com Concreto de ultra alto desempenho**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, Paraná, 2021.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3 ed. São Paulo: Editora Ibracon, 2014.

NEVILLE, A. M.; BROOKS J. J. **Tecnologia do concreto**. 2 ed. São Paulo: Bookman Editora. 2008.

PAULTRE, P.; LE MOINE, M.; PROULX, J.; ROY, N.; LÉGERON, F. **Dynamic Testing of the Sherbrooke Pedestrian Bridge**. 16th Congress of IABSE, Lucerne, Switzerland, 2000.

PERRY, V. H.; ZAKARIASEN, D. First Use of Ultra High Performance Concrete for an Innovative Train Station Canopy. Concrete Technology Today. Canada. August 2004.

QUISSANGA, V. M.; PIMENTEL, F. **Concreto de Alto Desempenho (CAD)**. Revista Tecnológica da Universidade Santa Ursula, V2, N1. 2019.

REIS, L. S. N. **Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado**. 114p. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte, Minas Gerais, 2001.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M.; DUGAT, J. Pretensioned beam without conventional reinforcing. FIP Notes, 1995/1, p.2-3.

SCHIAVINI, D. N. **Análise da influência do tipo de cimento na resistência ao ataque por sulfatos**. 2018. Dissertação (bacharelado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2018.

SOUZA, V. C. M., RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**, Ed. Pini, São Paulo, 2009.

TAYEH, B. A.; BAKAR, B. H. A.; JOHARI, M. A. M.; VOO, Y. L. **Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay**. Construction and Building Materials Journal, 2012.

TUTIKIAN, B. F; ISAIA, G. Ce.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 2 vol. 1 ed. São Paulo: Editora Ibracon, 2011.

THOMAZ, E. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. São Paulo: Editora Pini, 2001.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. 196p. Dissertação (doutorado), Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR). São Carlos, São Paulo, 2004.