



ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE VERGALHÃO DE AÇO POR VERGALHÃO DE POLÍMERO DE FIBRA DE VIDRO EM UMA VIGA DE CONCRETO ARMADO

¹Mateus de Freitas Munhos; ²Jorgelino Pedro de Santana Junior

¹Discente do Curso de Engenharia Civil da Universidade Paranaense - UNIPAR

²Docente do Curso de Engenharia Civil da Universidade Paranaense – UNIPAR

Resumo

Levando em conta que a corrosão é um agente prejudicial ao aço, causando enormes danos às estruturas, é importante a busca por alternativas que minimizem esses danos. Assim, então, surge o vergalhão de polímero de fibra de vidro que apresenta como principal vantagem a resistência em ambientes corrosivos. O estudo tem por objetivo realizar uma análise a partir da substituição parcial do vergalhão de aço por vergalhão de polímero de fibra de vidro para que seja possível verificar a viabilidade técnica da utilização do mesmo em uma viga de concreto armado. Logo, o estudo foi realizado a partir dos ensaios de granulometria nos agregados, abatimento do tronco de cone e ensaio de compressão no concreto. Além disso, foram confeccionadas seis vigas de concreto armado, sendo três de aço e três de polímero de fibra de vidro e, em seguida, foram submetidas ao ensaio de tração na flexão para verificar a resistência à tração das vigas. A partir desse ensaio foi possível obter a resistência à tração das vigas de concreto armado, obtendo como resultado uma resistência média das vigas de aço de 14,6Mpa e das vigas de polímero de fibra de vidro de 11,9Mpa. Observou-se, então, que a resistência do aço é 22,68% maior, porém, não inviabilizando a utilização da fibra de vidro, visto que os dois materiais apresentaram resistência necessária para uma estrutura.

Palavras-chave: Aço; Concreto armado; Fibra de Vidro; Vergalhão.

Abstract

Taking into account that corrosion is a harmful agent to steel, causing enormous damage to structures, it is important to search for alternatives that minimize this damage. Thus, fiberglass polymer rebar appears, with its main advantage being resistance in corrosive environments. The study aims to carry out an analysis based on the partial replacement of steel rebar by fiberglass polymer rebar so that it is possible to verify the technical feasibility of using it in a reinforced concrete beam. Therefore, the study was carried out based on granulometry tests on the aggregates, slump of the cone frustum and compression test on the concrete. In addition, six reinforced concrete beams were manufactured, three of which were made of steel and three of fiberglass polymer, and were then subjected to a flexural tensile test to verify the beams' tensile strength. From this test it was possible to obtain the tensile strength of the reinforced concrete beams, resulting in an average strength of the steel beams of 14.6Mpa and of the fiberglass polymer beams of 11.9Mpa. It was then observed that the resistance of steel is 22.68% greater, however, this does not preclude the use of fiberglass, as both materials presented the necessary resistance for a structure.

Key-words: Steel; Reinforced concrete; Fiberglass; Rebar.

1 Introdução

A partir da evolução dos materiais utilizados na construção civil, foi proporcionado o aumento da capacidade dos elementos estruturais e o maior aproveitamento das condições de trabalho oferecidas pelas estruturas. Porém, ainda existe a necessidade de realizar intervenções em tais estruturas com o intuito de melhorar, em relação à qualidade, durabilidade e também a mudança de uso que possa ocorrer (VARES, 2019).

Orlando (2019), afirma que nos últimos anos estão ocorrendo desenvolvimentos de novos materiais, técnicas de execução e um maior conhecimento sobre o comportamento das estruturas. Esse desenvolvimento tem por objetivo buscar o aumento da qualidade e durabilidade das construções em elementos de concreto a partir de três formas, sendo elas: áreas de reparos (Correção de defeitos), reforços (Aumento da resistência) e recuperação (Retornar as suas propriedades mecânicas).

Segundo Matias e Romanichen (2020), as estruturas de concreto armado são as mais utilizadas no setor da construção civil, sendo normalmente utilizado o aço como armação. Porém, em alguns casos existe a necessidade de utilizar outros tipos de materiais em alternativa ao aço na armação do concreto, visto que o aço não apresenta resistência à corrosão. Logo, já existem obras que usam outros materiais em substituição ao aço, por exemplo, o Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV).

O vergalhão, material utilizado como armadura em estruturas de concreto como vigas, pilares e lajes, apresenta como principal função a resistência à tração e, além disso, confere à estrutura resistência à compressão, flexão, fissuração, entre outros. Na construção civil, o vergalhão pode ser constituído por variados tipos de materiais, sendo os principais o aço, a fibra de carbono e a fibra de vidro (SANTOS; ALMEIDA; CRUZ, 2022).

De acordo com Berton (2019), no Brasil, o aço ainda é o material mais utilizado como reforço de estruturas de concreto armado, mas sua utilização nem sempre é a mais correta. Aos poucos, com o avanço da tecnologia, vem sendo proporcionado novos produtos para a construção civil, sendo um dos destaques as fibras que possuem como propriedades resistência à tração, a íons de clorídricos e a ataques químicos, baixo peso por metro e não condutividade elétrica. Além disso, a autora ainda destaca que a corrosão é um dos grandes problemas que afeta a durabilidade de estruturas de concreto armado, sobretudo, quando elas estão localizadas em regiões com classe de agressividade ambiental elevada.

Os vergalhões de PRFV se destacam por apresentar resistência à tração maior que a do aço e, além disso, suportam interferências do meio, por exemplo, temperatura e processos químicos, sem afetar a segurança da estrutura. Porém, vale ressaltar que o PRFV apresenta um módulo de elasticidade inferior ao aço, o que implica em um comportamento elástico da estrutura, diferindo do aço que apresenta um escoamento da armadura (KASAI, 2022).

Portanto, o estudo tem por objetivo realizar uma análise comparativa a respeito da resistência à tração do vergalhão revestido com compósito de fibra de vidro em relação ao vergalhão de aço como armação em uma estrutura de concreto, verificando sua viabilidade técnica para a utilização como elemento estrutural em construções.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Concreto

Segundo Helene e Andrade (2005), a mistura do Cimento Portland com a água forma uma pasta de fluidez variável à quantidade de água, como visto na Figura 01 (a). Essa

mistura quando envolvida com agregados miúdos forma a argamassa, a qual pode ser observada na Figura 01 (b). Por último, quando são adicionados os agregados graúdos produz-se o concreto que se apresenta em estado fluído nas primeiras horas, permitindo ser moldado em diferentes formas, o mesmo pode ser visto na Figura 01 (c). Após um tempo, a mistura é endurecida em virtude da reação da água com o cimento, para assim, garantir uma resistência mecânica ao material que o transforma em um excelente elemento estrutural.

Figura 01: (a) Pasta; (b) Argamassa e (c) Concreto



Fonte:(a); (b) e (c) Adaptado de Bastos (2006)

De acordo com Botelho e Marchetti (2019), o aglomerante, areia, britas e água, apresentados na Figura 02 (a), (b) e (c) e, em alguns casos, os aditivos para aprimorar suas propriedades são elementos que compõe o concreto. O concreto apresenta como principal qualidade a resistência à compressão que está relacionada a duas características fundamentais do concreto, sendo elas: teor de cimento por (m³) de concreto e a relação água/cimento.

Figura 02: (a) Aglomerante; (b) areia e (c) brita



Fonte: (a); (b) e (c) Adaptado de Bastos (2006)

A tecnologia do concreto tem por objetivo buscar a proporção mais correta para a produção do mesmo, visando que toda essa mistura garanta as propriedades físicas, mecânicas, de durabilidade e trabalhabilidade do material. Portanto, o estado de fluidez da pasta formada de água e cimento depende principalmente da granulometria do concreto e a quantidade de água utilizada (HELENE; ANDRADE, 2005).

A NBR 8953/2015 classifica as classes de concreto de acordo com a sua resistência, conforme a Tabela 01, sendo que concretos com menos de 20Mpa não são estruturais.

Tabela 01: Classes de resistência de concretos estruturais

Classes de resistência Grupo I	Resistência característica à compressão (Mpa)	Classes de resistência Grupo II	Resistência característica à compressão (Mpa)
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

Fonte: NBR 8953 (2015)

2.1.1 Aglomerante

O aglomerante é um material em forma de pó que apresenta propriedades ligantes, e a partir da mistura com água forma uma pasta que endurece após a secagem. O Cimento Portland (CP), aglomerante utilizado no concreto, é proveniente da similaridade da cor e da qualidade do cimento hidratado com a pedra de Portland. A utilização do nome ocorre atualmente para se referir a um aglomerante obtido pela mistura harmônica de materiais calcários e argilosos ou materiais contendo sílica, alumina ou óxido de ferro, aquecidos a uma temperatura para realizar a clínquerização (SÁNCHEZ FILHO, 2023).

Segundo Belato e Silva (2013), o processo de fabricação do cimento Portland pode ser realizado a partir de quatro formas com etapas semelhantes. Todas as etapas consistem na extração das matérias-primas, mistura, moagem e aquecimento das mesmas em um forno para a formação do clínquer, principal elemento na composição do cimento Portland. Os quatro processos de fabricação são:

- Via úmida: a matéria-prima sofre moagem em adição com água, sendo introduzida no forno na forma de lama ou pasta;
- Via seca: a mistura é moída e adicionado ao forno seca e em forma de pó;
- Via semi-úmida: semelhante à via úmida, a matéria-prima vai para a moagem úmida, mas antes de ser introduzida ao forno passa por um processo de secagem;
- Via semi-seca: é adicionado à matéria-prima cerca de 10% a 15% de água, quantidade menor em relação aos processos de via úmida e semi-úmida, onde é adicionado cerca de 30% a 40% e 20% de água em peso, respectivamente. Nesse processo também é realizado a secagem antes de ser introduzido ao forno.

Sánchez Filho (2023) destaca que o cimento Portland, aglomerante utilizado no concreto, é um dos materiais mais utilizados no setor da construção civil, sendo um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que solidifica na presença de água e não se decompõe mesmo que seja novamente submetido à ação da água. No Quadro 01, é possível observar os principais tipos de cimento Portland utilizados.

Quadro 01: Tipos de cimento Portland (CP)

(Continua)

Tipo de Cimento	Sigla	Classe de Resistência
Comum	CPI	25, 32 e 40
	CPI-S	25, 32 e 40

(Conclusão)

Tipo de cimento	Sigla	Classe de Resistência
Composto	CPII-E	25, 32 e 40
	CPII-Z	25, 32 e 40
	CPII-F	CPII-F-32 e CPIII-40
Alto-forno	CPIII	CPIII-32 e CPIII-40
Pozolânico	CPIV	25 e 32
Alta resistência inicial	CPV-ARI	-
Branco	CPB	CPB-32
	CPB	-
Resistente a sulfatos	São os cimentos originais acrescidos da sigla "RS", por exemplo, CPIII-32 RS	
Baixo calor de hidratação	São os cimentos originais acrescidos da sigla "BC", por exemplo, CPIV-32 RS	

Fonte: Sánchez Filho (2023)

2.1.2 Agregados

A NBR 7211/2022 define os tipos de agregados, sendo classificados em agregados miúdos e agregados graúdos. O agregado miúdo é definido como os grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha em 150 µm. Já o agregado graúdo é definido como os grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 75mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha em 4,75mm.

A classificação dos tipos de agregados varia de acordo com cada autor. Segundo Damo (2011), os agregados podem ser classificados como:

- Agregados naturais: são aqueles derivados de rochas existentes, sendo encontrados na natureza ou provenientes do processo de fragmentação de rochas, são adequados para uso;
- Agregados artificiais: são produzidos a partir de processos industriais, por exemplo, a argila expandida;
- Agregados reciclados: são resíduos granulares industriais produzidos a partir de entulho de construção ou demolição sendo adequados para o uso.

De acordo com Sbrighi Neto (2005), a seleção incorreta de agregados para a utilização do concreto pode ocasionar manifestações patológicas graves. Por isso, se faz necessário o estudo das propriedades e aplicação dos agregados durante a sua seleção, para assim buscar um ótimo custo benefício. Logo, no Quadro 02 é possível observar a relação da propriedade do concreto a partir das características dos agregados selecionados.

Quadro 02: Propriedades do concreto com as características dos agregados
(Continua)

Propriedades do concreto	Características relevantes do agregado
Resistência mecânica	Resistência mecânica e sanidade
	Textura superficial
	Limpeza

(Conclusão)

Propriedades do concreto	Características relevantes do agregado
Resistência mecânica	Forma dos grãos
	Dimensão máximo
Retração	Módulo de elasticidade
	Forma dos grãos
	Textura superficial
	Limpeza
	Dimensão máxima
Módulo elasticidade	Granulometria
	Módulo de elasticidade
	Coefficiente de Poisson
Resistência à derrapagem	Tendência ao polímero (abrasão)
	Textura superficial
Economia	Forma dos grãos
	Textura superficial
	Granulometria
	Dimensão máxima
	Beneficiamento requerido
	Disponibilidade

Fonte: Sbrigui Neto (2005)

2.1.3 Água

Segundo Oliveira (2020), a água é muito importante para o concreto, necessitando estar em ótimas condições, visto que ela desempenha a função de hidratar o cimento para assim poder unir aos demais elementos, garantindo resistência, durabilidade e trabalhabilidade ao concreto. Logo, para todo concreto, existe uma relação água/cimento que serve para conferir uma hidratação na quantidade adequada em relação aos outros elementos, onde a água pode contribuir para um amassamento correto. Então, é importante saber a granulometria, área superficial, capacidade de absorção e teor de umidade dos outros elementos para definir o consumo de água adequada na dosagem do concreto.

A dosagem de água abaixo do ideal no concreto interfere diretamente na trabalhabilidade, podendo resultar na dificuldade de operação da mistura, transporte, lançamento, adensamento e acabamento. Além disso, quando ocorre a compensação na dosagem através da adição de água sem estar previsto, pode afetar na resistência do concreto e ocorrer surgimento de ninhos (MACIEL; COELHO; PEREIRA, 2020).

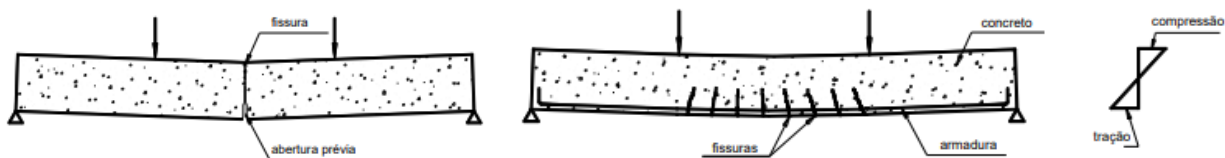
2.2 Concreto Armado

A NBR 6118/2023 define como concreto armado, elementos que apresentem comportamento estrutural a partir da aderência entre o concreto e a armadura sem que ocorra um alongamento inicial da armadura antes da materialização da aderência. No concreto armado, ocorre a utilização de armadura passiva, ou seja, é a armadura que não apresenta tensões iniciais, logo, não ocorre um alongamento prévio da armadura a partir de forças de protensão, por exemplo, os vergalhões de aço.

De acordo com Porto e Fernandes (2015), o concreto apresenta boa resistência à compressão, porém, não à tração, logo, a utilização do concreto simples se apresenta muito limitada. Por isso, em ocasiões que se faz necessário a resistência aos esforços de compressão e tração são associados junto ao concreto, materiais que apresentem alta resistência à tração, surgindo, assim, o concreto armado (concreto e armadura passiva). Na Figura 03 (a) e (b) é possível observar a diferença de comportamento entre uma viga com concreto simples em relação a uma com concreto armado.

Ainda, segundo os mesmos autores, o concreto armado apresenta algumas vantagens, tais quais: facilidade de execução, economia, adaptação a qualquer tipo de forma, estrutura monolítica e hiperestática, resistência a efeitos atmosféricos, térmicos e desgastes mecânicos, manutenção e grande durabilidade. Porém, o concreto armado apresenta algumas desvantagens, por exemplo, peso próprio elevado, baixo grau de proteção térmica e isolamento acústico e fissuração da região tracionada.

Figura 03: (a) Viga de concreto e (b) viga de concreto armado



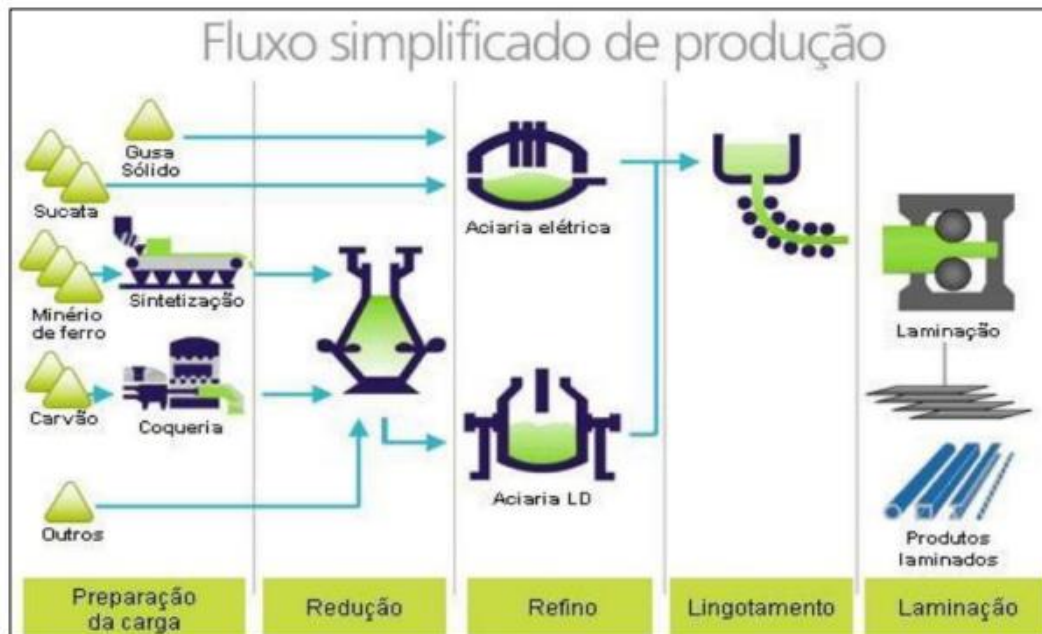
Fonte: Bastos (2006)

2.3 Vergalhão de aço

De acordo com Isidro Neto *et al.* (2021), o aço é uma liga de ferro e carbono. O aço é produzido a partir de algumas etapas (exemplificado na Figura 04), sendo elas:

- Processo de preparação: no alto forno, o carvão e o minério são preparados para melhorar seu rendimento e economia. O carvão é destilado e o minério é transformado em pelotas;
- Processo de redução: dentro do alto forno acontece a remoção do oxigênio do ferro a partir da associação do carvão ao oxigênio, permitindo que ocorra a ligação do ferro ao carbono. Além disso, o ferro se liquefaz, sendo chamado de ferro gusa ou ferro de primeira fusão;
- Processo de refino: é realizada em fornos a oxigênio ou elétricos. O ferro gusa em estado líquido é levado para a aciaria, onde a partir de queima de impurezas e adições é transformado no aço;
- Processo de laminação: na última etapa, o aço em solidificação é deformado mecanicamente e transformado em produtos siderúrgicos, por exemplo, vergalhões, arames, bobinas, chapas, etc.

Figura 04: Etapas de produção do aço



Fonte: Imianowsky e Walendowsky (2017)

Segundo Ferraz (2003), o vergalhão de aço é um elemento que visa a aplicação estrutural, ou seja, é um material que tem por função suportar cargas, sendo utilizado para reforçar o concreto, barras, chapas e perfis visando a sua aplicação estrutural. O vergalhão de aço apresenta algumas qualidades, tais quais: resistência ao escoamento para evitar a deformação plástica, resistência à tenacidade para evitar fratura frágil, boa soldabilidade, boa formabilidade e custo reduzido. O Quadro 03 apresenta dados a respeito das propriedades do vergalhão.

Quadro 03: Propriedade físico-mecânicas do vergalhão de aço CA-50

Característica	Vergalhão de aço
Limite de resistência à tração	500 (Mpa)
Alongamento relativo	14 (%)
Módulo de elasticidade	200000 (Mpa)
Limite de resistência à compressão	390 (Mpa)
Limite de resistência transversal	273 (Mpa)
Resistência à corrosão	Corrosivo
Condutibilidade térmica	Sim
Condutibilidade elétrica	Sim
Durabilidade	Aproximadamente 50 anos

Fonte: Haizer Building Solution (2023)

Imianowsky e Walendowsky (2017) afirmam que, durante o emprego do aço, deve ser levado em consideração a corrosão, patologia química ou eletrolítica que causa alteração físico-química no aço devido ao contato com o meio. A corrosão é um dos grandes fatores prejudiciais ao aço, visto que ela faz com que o aço transforme em um composto químico similar ao ferro, conseqüentemente ocorre a perda de propriedades essenciais

durante sua utilização, por exemplo, resistência mecânica, elasticidade, ductilidade, redução na seção, entre outros. Logo, durante o projeto, devem ser evitadas soluções inadequadas em virtude dessa limitação do aço.

2.4 Vergalhão de Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV)

De acordo com Vares (2019), a fibra de vidro utilizada para revestir vergalhões é um material compósito. Os materiais compósitos poliméricos são a combinação entre uma matriz e um reforço, ou seja, o PRFV é resultado da combinação entre as fibras incorporadas em uma matriz formada por polímeros, adições e aditivos. A matriz tem a função de impregnar as fibras, sendo responsável por transferir as tensões, manter a posição e distanciamento e fornecer proteção, enquanto as fibras devem garantir resistência e rigidez ao compósito. Esse tipo de material tem como foco apresentar um desempenho mecânico superior quando ocorre sua combinação.

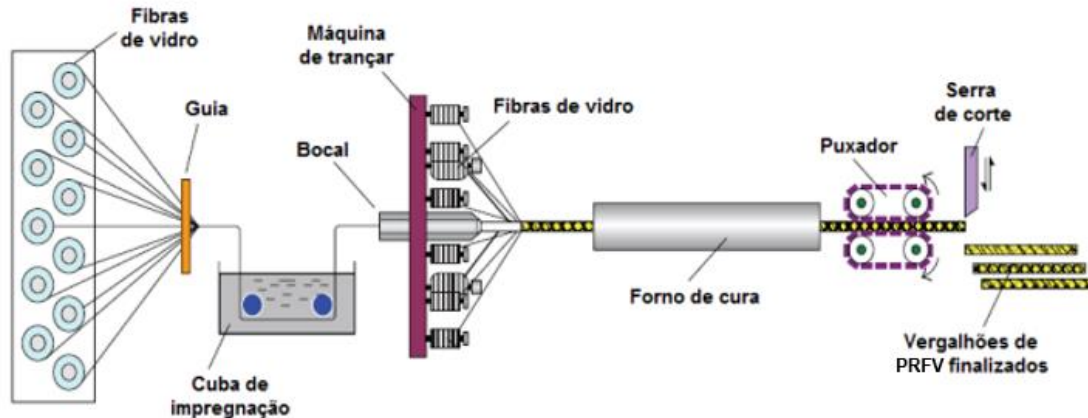
Segundo Moura (2021), os vergalhões de PRFV, ilustrados na Figura 05, são produzidos a partir do processo de pultrusão de fibras e resinas, ou seja, processo que consiste em tensionar as fibras de vidro a partir de uma máquina em sentido à cuba de impregnação, onde ocorre a impregnação das fibras com uma resina líquida e finaliza com a associação da fibra de vidro e resina polimérica passando por um molde circular que confecciona a forma da seção transversal do vergalhão, conforme a Figura 06. Além disso, acaso forem vergalhões helicoidais, é realizada a adição de fibras de vidro na superfície por meio da máquina de trançar, a partir do enrolamento de uma ou mais fibras de vidro, depois, ocorre o aquecimento do vergalhão para reticular a resina polimérica e finaliza o processo com o corte do vergalhão na medida desejada.

Figura 05: Vergalhado de PFRV



Fonte: Moura (2021)

Figura 06: Processo de produção do vergalhão de PRFV



Fonte: Adaptado Moura (2021)

Andrade (2022) destaca em sua pesquisa que as principais fibras de vidro utilizadas são vidro-E (EGlass), vidro-S (S-Glass) e vidro-AR (AR-Glass). As fibras de vidro-E apresentam composição de borossilicato de cal-alumínio, sendo o principal composto utilizado por ter propriedades isolantes de eletricidade, alta resistência mecânica e a umidade. Já as fibras de vidro-S apresentam maior resistência à tração e as fibras de vidro-AR por ter a adição de Zircônio apresentam maior resistência ao ataque alcalino. O Quadro 04 exemplifica os principais tipos de fibra de vidro utilizado no mercado.

Quadro 04: Principais tipos de fibras de vidro

Tipo de fibra	Propriedade	Composição	Aplicação
E (Electrical)	Baixa condutividade elétrica	Borossilicato de cal-alumínio e baixo teor de álcalis (<1%)	Utilização usual
A (Alkali)	Boa condutividade elétrica	Apresenta metais alcalinos, vidro de cal e sódio	Utilização e telecomunicação de fibra óptica, de semicondutores e células fotoelétricas
C (Chemical)	Alta resistência química	Apresenta 50-60% de Sílica	Utilização em acabamentos de superfícies, alta resistência à corrosão
E-CR (Electrical chemically resistant)	Alta resistência em ambientes com ácidos	Sem a presença de boro	Utilização em ambientes corrosivos por apresentar alta resistência a ácidos
R ou S (Strength)	Alta resistência	Apresentam alumínio e sílica	Utilização em aplicações de alto desempenho por apresentarem excelentes propriedades mecânicas
AR (Alkali resistant)	Alta resistência aos álcalis	Apresentam zircônio	Utilização em concretos reforçados com fibras, álcali resistente

Fonte: Adaptado Andrade (2022) e Moura (2021)

Em seu estudo Kasai (2022), afirma que a fibra de vidro é muito utilizada em aplicações industriais, visto que apresenta uma boa relação entre custo e benefício. O vergalhão de fibra de vidro apresenta diversas vantagens, sendo algumas delas: elevada resistência mecânica à tração em comparação com o vergalhão de aço, resistência a elementos químicos, água e corrosão, leveza e neutralidade magnética, as quais estão destacadas no Quadro 05. Por isso, essas características benéficas fazem o material se tornar uma boa alternativa no âmbito da construção civil. Porém, Orlando (2019) destaca que existem alguns malefícios nas fibras de vidro que devem ser ressaltados, por exemplo, elas apresentam baixo módulo de elasticidade e de resistência à abrasão e, além disso, dificuldade de adesão à matriz polimérica em presença de umidade.

Quadro 05: Propriedades físicas-mecânicas do vergalhão PRFV

Característica	Vergalhão de PRFV
Limite de resistência à tração	800 Mpa
Alongamento relativo	2,2%
Módulo de elasticidade	50.000 Mpa
Limite de resistência à compressão	300 Mpa
Limite de resistência transversal	150 Mpa
Resistência à corrosão	Não corrosivo
Condutibilidade térmica	Não condutor
Condutibilidade elétrica	Não
Durabilidade	Superior a 80 anos

Fonte: Haizer Building Solution (2023)

3 Metodologia

O trabalho, proposto a partir de revisões bibliográficas, consiste em realizar vigas de concreto armado com aço e PRFV para verificar a resistência à tração por meio do ensaio de tração por flexão de corpos de prova de concreto para, assim, verificar a viabilidade técnica da utilização do PRFV. Todo o estudo experimental do trabalho foi realizada no laboratório de Engenharia Civil da Unipar na cidade de Guaíra- PR.

3.1 Dimensionamento das vigas

3.1.1 Dimensões das vigas

De acordo com a NBR 5738/2015, os corpos de provas prismáticos devem ter seções transversais quadradas, com superfícies lisas e livres de saliência. Além disso, a norma estabelece as dimensões mínimas para corpos de provas e vãos de ensaios, conforme mostra a tabela 02. Portanto, seguindo os parâmetros estabelecidos foi adotada para todas as vigas uma seção quadrada de 15 cm e comprimento de 60cm. Vale ressaltar que a norma prevê condições mínimas para ensaio, logo, foram adotadas medidas que se adequam melhor ao aparelho utilizado durante o ensaio.

Tabela 02: Dimensões do corpo de prova e vão de ensaio

(Continua)

Dimensão básica mm	Comprimento mínimo mm	Vão de ensaio mm
100	350	300
150	500	450

(Conclusão)		
Dimensão básica mm	Comprimento mínimo mm	Vão de ensaio mm
250	800	750
450	1400	1350

Fonte: NBR 5738 (2015)

3.1.2 Número de amostragem

Seguindo o mesmo padrão adotado por Bacáro, Moreno e Shiotani (2017), durante a realização do ensaio foram criados nove corpos de provas cilíndricos para cada betonada de concreto para verificação da resistência a partir do ensaio de compressão. Para a concretagem das vigas foram necessárias duas betonadas de concreto, logo, foram criados dezoito corpos de provas cilíndricos, sendo rompidos seis corpos aos 7 dias, seis corpos aos 14 dias e seis corpos aos 28 dias.

Utilizando como base o estudo de Vares (2019), foram confeccionadas seis vigas de concreto armado, sendo três vigas com armadura de aço sendo concretadas na segunda betonada e três vigas com armadura de PRFV sendo concretadas na primeira betonada, conforme exposto no Quadro 06. Posteriormente, todas as vigas foram rompidas aos 28 dias a partir do ensaio de tração por flexão.

Quadro 06: Detalhe de amostras

Amostras	Material
VA 1 ao 3	Viga de concreto armado com aço
VF 1 ao 3	Viga de concreto armado com PRFV

Fonte: O autor (2023)

3.1.3 Concreto

O concreto utilizado na confecção das vigas apresentou o traço de 1:2,90:3,60:0,70 na primeira betonada (30/08) e o traço de 1:2,90:3,60:0,60 na segunda betonada (12/09), visando atingir a resistência de 25Mpa aos 28 dias seguindo os parâmetros adotados por Vares (2019). Assim, como no estudo da autora, houve uma mudança na relação água/cimento, ou seja, ocorreu uma diminuição da quantidade de água no concreto visando aumentar a resistência.

A mudança de traço ocorreu porque a perspectiva de resistência aos 28 dias obtida a partir do rompimento do concreto da primeira betonada aos 7 dias era muito próximo de 25Mpa. Logo, para minimizar o risco do concreto da segunda betonada apresentar uma resistência abaixo do previsto, foi realizado a mudança do traço.

3.1.4 Armadura da viga

As vigas foram confeccionadas com dois tipos de armadura, sendo uma com vergalhão de aço e a outra com PRFV. Para o dimensionamento da viga com aço foi utilizado como base a NBR 6118/2023 (Projeto de estruturas de concreto – Procedimento) e para a viga com fibra de vidro foi utilizada como base a norma norte americana ACI 440.1R-15 e recomendações do fabricante, porque no Brasil ainda não existe uma norma que regularize sua utilização. No apêndice 01 é possível verificar o memorial de cálculo para dimensionamento das armaduras.

A substituição da armadura na viga ocorreu de forma parcial, ou seja, três vigas foram armadas todas com aço. Porém, nas vigas de PRFV, ocorreu a substituição apenas

na armadura longitudinal, a qual pode ser verificada na Figura 07 (a) e (b) (na Figura a armação está rotacionada para melhorar a visualização da armadura longitudinal), visto que por só ter sido realizado o ensaio de tração na flexão, as armaduras transversais e porta-estribos não impactariam no resultado final. Além disso, no vergalhão de PRFV não é possível realizar dobras na obra, logo, a confecção da armadura transversal é realizada somente durante o processo de produção, inviabilizando a utilização da mesma no estudo.

Figura 07: (a) Armação das vigas de Aço e (b) Armação das vigas de PRFV



Fonte: (a) e (b) O autor (2023)

3.2 Ensaio de granulometria nos agregados do concreto

Seguindo os parâmetros da NBR 17054/2022, ocorreu o ensaio de granulometria dos agregados miúdos e graúdos que foram utilizados na composição do concreto. O ensaio foi iniciado a partir da coleta da amostra, sendo coletado 2 kg de areia e 4 kg de brita 1, podendo ser visto na Figura 08 (a) e (b), umedecidas em laboratório para evitar segregação, e posteriormente separadas para formar duas amostras de cada agregado. Em seguida, foram secadas em uma estufa por 24 horas para serem esfriadas a uma temperatura ambiente, conforme Figura 08 (c).

Figura 08: (a) Amostra de agregado miúdo; (b) Amostra de agregado graúdo e (c) Estufa



Fonte: (a); (b) e (c) O autor (2023)

Com as amostras prontas, foi iniciado o peneiramento com as malhas por meio de um agitador mecânico. Seguindo a Tabela 03 da NBR 17054/2022 que determina quais peneiras podem ser utilizadas. Para os agregados miúdos foram utilizadas as peneiras com abertura de malha em ordem decrescente de 4,75mm, 2,36mm, 1,18mm, 600µm, 300µm,

150µm e fundo. Já para os agregados graúdos foram utilizadas as peneiras com abertura de malha em ordem decrescente de 25mm, 19mm, 12,5mm, 9,5mm, 6,3mm e fundo.

Tabela 03: Abertura de malhas

Série normal	Série intermediária
75mm	-
-	63mm
-	50mm
37,5mm	-
-	31,5mm
-	25mm
19mm	-
-	12,5mm
9,5mm	-
-	6,3mm
4,75mm	-
2,36mm	-
1,18mm	-
600µm	-
300µm	-
150µm	-

Fonte: NBR 17054 (2022)

O peneiramento da amostra ocorreu da seguinte forma: as peneiras foram encaixadas de modo a formar um único conjunto de peneiras, sendo distribuídas as malhas em ordem crescente de baixo para cima; embaixo ficou um fundo para coletar as amostras que passaram por todas as peneiras, conforme visto na Figura 09. A agitação ocorreu em um intervalo de tempo que permitiu a separação e classificação prévia dos diferentes tamanhos de grãos da amostra.

Figura 09: Conjunto de peneiras e agitador mecânico



Fonte: O autor (2023)

Finalizado o peneiramento, cada peneira foi agitada manualmente em movimentos laterais e circulares alternados para remover o material retido e foram escovadas para

realizar a limpeza. A massa removida é considerada como retida e a que passou para próxima peneira é passante. Com o ensaio foi possível obter a massa total de material retido em cada peneira e no fundo, porcentagens médias, retidas e acumuladas, determinado o módulo de finura, dimensão máxima característica do agregado e curva granulométrica.

3.3 Produção do concreto

O concreto utilizado nas vigas foi produzido no laboratório da Unipar por meio de uma betoneira. Para a composição do concreto utilizou-se, como aglomerante, o cimento CP V-ARI adquirido em comércio local, como agregados utilizou-se a areia e brita 01 e a água de consumo da Unipar (fornecida pela Sanepar), ilustrado na Figura 10 (a), (b), (c) e (d).

Figura 10: (a) Cimento CP V-ARI; (b) Areia; (c) Brita 01; (d) Água



Fonte: (a); (b); (c) e (d) O autor (2023)

3.4 Ensaio de abatimento do tronco de cone

O ensaio de abatimento do tronco de cone foi realizado seguindo o que determina a NBR 16889/2020. Esse ensaio ocorreu durante a produção do concreto, onde foi retirada uma pequena amostra para realizar o ensaio.

O procedimento foi iniciado com o molde sobre a placa de base e uma pessoa com os pés em cima das aletas do molde, visto nas Figura 11 (a) e (b). O procedimento foi feito em três camadas com aproximadamente um terço da altura do molde, sendo que em cada etapa foi realizado 25 golpes. No momento do golpeamento, todos os 25 golpes com a haste nas três camadas foram realizados de forma uniforme em movimentos circulares para que ocorra uma compactação da amostra dentro do molde. Na última camada foi colocada uma quantidade a mais para que fosse realizado o rasamento da amostra com uma colher de pedreiro.

Figura 11: (a) Golpeamento da amostra e (b) rasamento da amostra



Fonte: (a) e (b) O autor (2023)

Após o preenchimento da amostra, o molde foi retirado na direção vertical em um intervalo de 5s a 10s. Em seguida, foi medido o abatimento do concreto que é determinado pela diferença de altura entre o molde e a altura da amostra.

3.5 Moldagem das vigas

Como dito anteriormente, foram moldadas 06 vigas com seção de 15x15cm e comprimento de 60cm. Seguindo o que está previsto na NBR 5738/2015, foram utilizadas madeiras, visto que garantem estanqueidade e são inertes ao concreto; as caixarias que serviram de moldes para todas as vigas foram revestidas por um desmoldante para que não reagisse com o cimento, visto na Figura 12.

Figura 12: Caixarias utilizadas como molde para as vigas



Fonte: O autor (2023)

Durante a moldagem das vigas, o concreto foi colocado por uma concha em quantidades similares sendo distribuído de maneira uniforme em toda a forma e para assegurar sua simetria foi utilizado uma haste em movimento circular para nivelar o concreto. O concreto foi distribuído em duas camadas de acordo com a Tabela 04, sendo que cada camada foi golpeada 75 vezes para garantir o adensamento.

Tabela 04: Número de camadas para moldagem de corpos de prova^a
(Continua)

Tipo de corpo de prova	Dimensão básica (d) mm	Número de camadas em função do tipo de adensamento		Número de golpes para adensamento manual
		Mecânico	Manual	
Cilíndrico	100	1	2	12
	150	2	3	25
	200	2	4	50
	250	3	5	75
	300	3	6	100
	450	5	-	-

(Conclusão)

Tipo de corpo de prova	Dimensão básica (d) mm	Número de camadas em função do tipo de adensamento		Número de golpes para adensamento manual
		Mecânico	Manual	
Prismático	100	1	1	75
	150	1	2	75
	250	2	3	200
	450 ^B	3	-	-

a Para concretos com abatimento superior a 160mm, a quantidade de camadas deve ser reduzida à metade da estabelecida nesta Tabela. Caso o número de camadas resulte fracionário, arredondar para o inteiro superior mais próximo.

B no caso de dimensão básica de 450mm, somente é permitido adensamento mecânico.

Fonte: NBR 5738 (2015)

Os golpes foram realizados de forma uniforme na viga sem que danifique a forma. Durante a execução da segunda camada, foi colocada uma quantidade em excesso que permite o adensamento da viga para preencher todos os vazios e, posteriormente, o rasamento para eliminar o excesso, podendo ser visto nas Figuras 13 (a) e (b).

Figura 13: (a) Golpeamento das vigas e (b) Rasamento das vigas



Fonte: (a) e (b) O autor (2023)

Posterior à moldagem das vigas, elas foram armazenadas em uma superfície rígida, horizontal e livre de vibrações, visto na Figura 14 (a). Após 48 horas, as vigas foram desenformadas e colocadas em um reservatório com água durante 28 dias para ser feita a cura do concreto, visto na Figura 14 (b).

Figura 14: (a) Vigas concretada e (b) Vigas armazenadas em um tanque para cura



Fonte: (a) e (b) O autor (2023)

3.6 Ensaio compressão em corpos cilíndricos

Durante a produção do concreto utilizado na moldagem das vigas foram moldados nove corpos de provas cilíndricos para cada betonada para determinar a resistência do concreto e, posteriormente a moldagem, foram colocados em uma bacia com água cobrindo os corpos de prova para realizar a cura do concreto, visto na Figura 15 (a), (b) e (c). A partir desses corpos de provas, foi realizado o ensaio de compressão em corpos cilíndricos seguindo os parâmetros exigidos pela NBR 5739/2018.

Figura 15: (a) e (b) Corpos de provas moldados e (c) Corpos de provas armazenados em uma bacia



Fonte: (a); (b) e (c) O autor (2023)

Inicialmente, foi necessário determinar o diâmetro e a altura do corpo de prova, medindo sempre a partir do eixo transversal para o diâmetro e longitudinal para a altura. Além disso, antes de iniciar o rompimento, foram limpas e secas as faces do prato do equipamento e do corpo de prova, e foram retificados os corpos de provas. Em seguida, foi iniciado o rompimento do corpo de prova, sendo colocado o mesmo no centro do prato inferior do equipamento. Assim que posicionado, o ensaio foi iniciado sendo aplicada uma força contínua e sem choques para garantir que ocorra o rompimento no intervalo em que a máquina foi calibrada.

3.7 Ensaio de tração por flexão de corpos de prova de concreto

Posteriormente, realizada a confecção das seis vigas e respeitado o tempo de cura de 28 dias do concreto, foi feito o ensaio de tração por flexão nas vigas de acordo com a NBR 12142/2010, que estabelece todos os passos que devem ser seguidos durante o ensaio. Após a realização do ensaio, foi obtida a resistência à tração na flexão de cada viga.

Para iniciar o ensaio, a viga foi dividida em três terços conforme a Figura 16. Como o rompimento de todas as vigas ocorreu dentro do terço médio, foi utilizada a seguinte equação para obter a resistência:

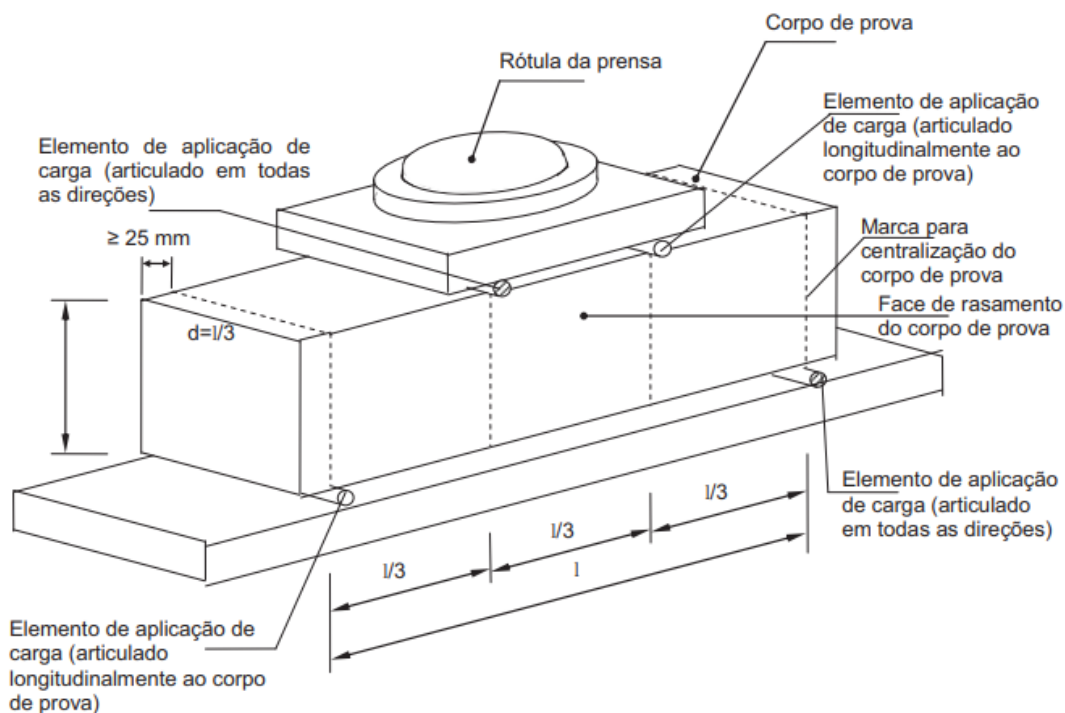
$$f_{ct,t} = \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2}$$

(Equação 01)

Onde:

- $f_{ct,t}$ é a resistência à tração na flexão, expressa em Megapascal (Mpa);
- F é a força máxima registrada na máquina de ensaio, expressa em Newton (N);
- l é a dimensão do vão entre apoios, expressa em milímetros (mm),
- b é a largura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);
- d é a altura média do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

Figura 16: A dispositivo auxiliar para a realização do ensaio a ser acoplado em máquinas que não sejam equipadas para esta finalidade



Fonte: NBR 12142 (2010)

Nesse ensaio, o corpo de prova foi centralizado no equipamento com seu lado maior sobre os apoios, sendo que as faces laterais durante o processo de moldagem ficaram em contato com os elementos de aplicação de força e os apoios de acordo com o que ilustra a Figura 17 (a) e (b). Durante a execução do ensaio, foi aplicada uma força contínua e sem

choques para que a tensão sobre o corpo estivesse em um intervalo de 0,9 MPa/min a 1,2 MPa/min.

Figura 17: (a) e (b) Viga sendo ensaiada no equipamento



Fonte: O Autor (2023)

4 Resultado e Discussão

4.1 Granulometria dos agregados

Na Tabela 05, é possível verificar os resultados obtidos a partir do ensaio de granulometria da areia onde a predominância da amostra é de areia fina.

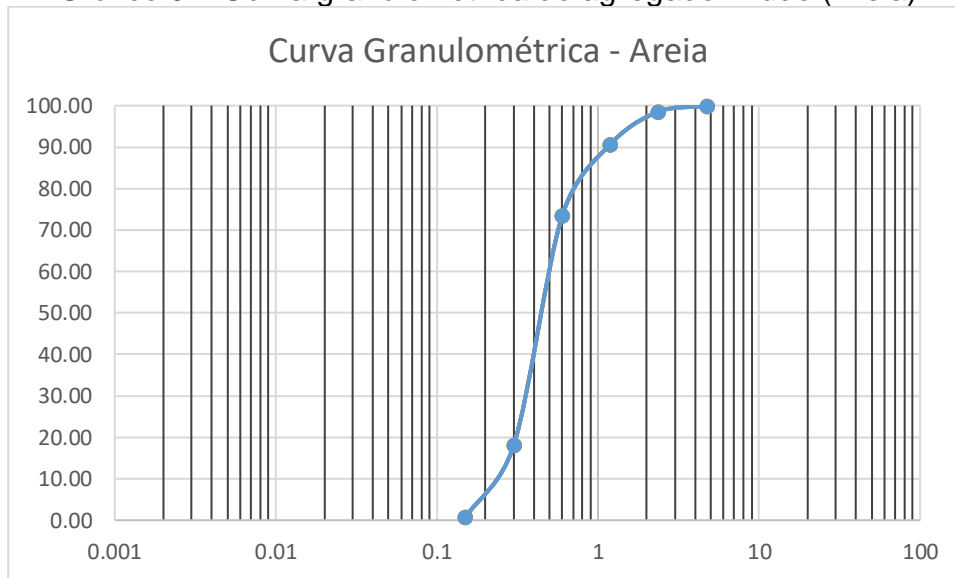
Tabela 05: Resultados do ensaio de granulometria do agregado miúdo (Areia)

Peneiras ABNT (mm)	Massa retida (g)		% retida Individual			% retida acumulada	% passa na peneira	Dimensão máxima (mm)	Módulo de finura
	M1	M2	M1	M2	Média				
4,75	1,18	0,84	0,12	0,08	0,10	0,10	99,90	2,36	2,19
2,36	15,07	12,92	1,51	1,30	1,40	1,50	98,50		
1,18	78,46	80,73	7,86	8,10	7,98	9,49	90,51		
0,6	168,7	171,2	16,90	17,19	17,04	26,53	73,47		
0,3	556,3	547,27	55,76	54,94	55,35	81,88	18,12		
0,15	171,3	175,72	17,17	17,64	17,41	99,29	0,71		
Fundo	6,79	7,42	0,68	0,74	0,71	100,00	0,00		
Total	997,8	996,1	-	-	-	-	-		

Fonte: O Autor (2023)

Outro resultado obtido a partir desse ensaio foi a curva granulométrica do agregado miúdo, a qual pode ser vista no Gráfico 01.

Gráfico 01: Curva granulométrica do agregado miúdo (Areia)



Fonte: O Autor (2023)

Na Tabela 06, é possível verificar os resultados obtidos a partir do ensaio de granulometria da brita, logo, é possível concluir que a brita utilizada no concreto foi a 01.

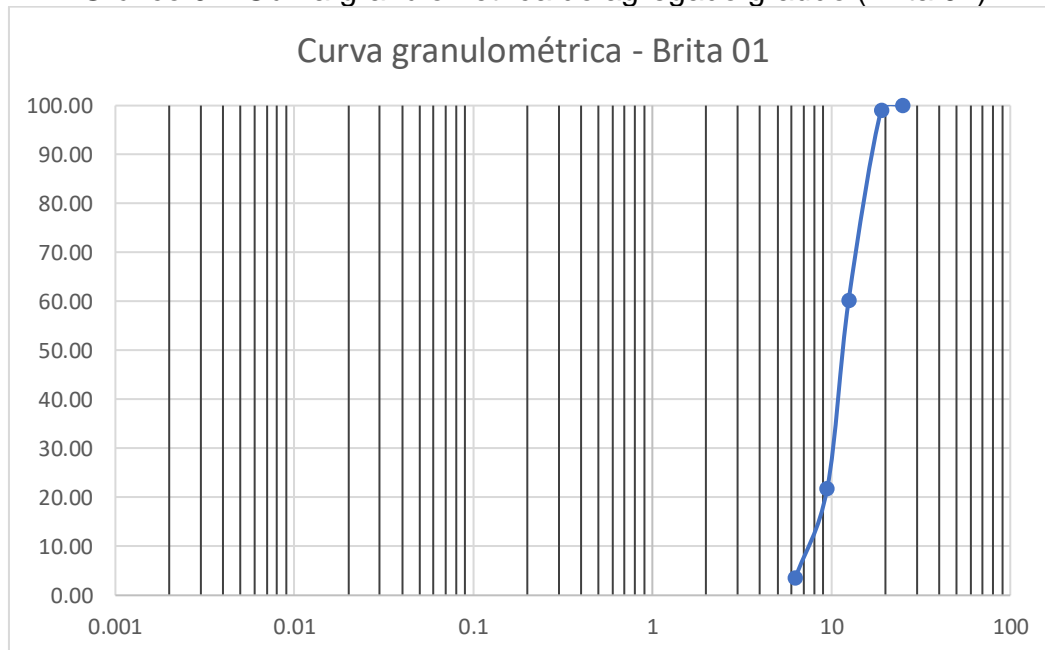
Tabela 06: Resultados do ensaio de granulometria do agregado miúdo (Brita 01)

Peneiras ABNT (mm)	Massa retida (g)		% retida Individual			% retida acumulada	% passa na peneira	Dimensão máxima (mm)	Módulo de finura
	M1	M2	M1	M2	Média				
25	0	0	0	0	0	0	100	19	0,79
19	26,87	11,51	1,34	0,58	0,96	0,96	99,04		
12,5	706,31	844,95	35,33	42,27	38,80	39,76	60,24		
9,5	759,65	772,37	38,00	38,64	38,32	78,08	21,92		
6,3	389,69	344,33	19,49	17,22	18,36	96,44	3,56		
Fundo	116,48	25,93	5,83	1,30	3,56	100,00	0		
Total	1999	1999,1	-	-	-	-	-		

Fonte: O Autor (2023)

Além disso, foi obtida a curva granulométrica do agregado graúdo que pode ser vista no Gráfico 02.

Gráfico 02: Curva granulométrica do agregado graúdo (Brita 01)



Fonte: O Autor (2023)

4.2 Abatimento do concreto

A partir do ensaio de abatimento do tronco de cone, foi obtida a medida do abatimento do concreto. O concreto realizado na primeira betonada (30/08) apresentou um abatimento aproximado de 8 cm, visto na Figura 18 (a). Já, o concreto realizado na segunda betonada (12/09), apresentou um abatimento aproximado de 4 cm, visto na Figura 18 (b).

Figura 18: (a) Abatimento do concreto na 1ª betonada e (b) Abatimento do concreto na 2ª betonada



Fonte: O Autor (2023)

De acordo com o experimento, ocorreu uma mudança de abatimento no concreto em decorrência da variação da quantidade de água utilizada no concreto. O concreto da primeira betonada (30/08) utilizou uma relação água/cimento de 0,7, ou seja, por ter

utilizado uma maior quantidade de água, o seu abatimento foi superior em relação ao concreto da segunda betonada (12/09) que utilizou uma relação água/cimento de 0,6. Vale ressaltar que, mesmo com a diferença de abatimento, os dois concretos apresentaram boa trabalhabilidade.

De acordo com a Tabela 07, é possível verificar qual a forma de aplicação do concreto em relação ao seu abatimento. Como a concretagem foi realizada em uma forma pequena, não houve necessidade de realizar o adensamento com vibrador, somente o adensamento manual a partir de golpes com a haste já foi suficiente, logo, seguiu como parâmetro a classe S100.

Tabela 07: Classes de consistência

Classe	Abatimento (mm)	Aplicações típicas
S10	$10 \leq A < 50$	Concreto extrusado, vibroprensado ou centrifugado
S50	$50 \leq A < 100$	Alguns tipos de pavimentos e de elementos de fundações
S100	$100 \leq A < 160$	Elementos estruturais, com lançamento convencional
S160	$160 \leq A < 220$	Elementos estruturais com lançamento bombeado do concreto
S220	$A \geq 220$	Elementos estruturais esbeltos ou com alta densidade de armaduras

Nota 1 De comum acordo entre as partes, podem ser criadas classes especiais de consistência, explicitando a respectiva faixa de variação do abatimento

Nota 2 Os exemplos desta Tabela são ilustrativos e não abrangem todos os tipos de aplicações

Fonte: NBR 8953 (2015)

4.3 Resistência do concreto

A partir do ensaio de compressão de corpos cilíndricos foi obtida a resistência do concreto. Na Tabela 08, observa-se a resistência do concreto da primeira betonada desenvolvido no dia 30/08/2023 com traço de 1:2,9:3,6:0,7.

Tabela 08: Resistência do concreto da 1ª betonada (30/08)

Idade	Resistência unit. (Mpa)	Resistência média (Mpa)
7 dias (06/09)	16,4	18,9
	18,4	
	22,0	
14 dias (13/09)	20,4	22,6
	22,8	
	24,7	
28 dias (27/09)	23,5	26,7
	28,2	
	28,4	

Fonte: O Autor (2023)

Já, na Tabela 09, é mostrada a resistência do concreto da segunda betonada desenvolvido no dia 12/09/2023 com traço de 1:2,9:3,6:0,6.

Tabela 09: Resistência do concreto da 2ª betonada (12/09)

Idade	Resistência unit. (Mpa)	Resistência média (Mpa)
7 dias (19/09)	15,9	17,6
	18,2	
	18,8	
14 dias (26/09)	26,8	30,2
	30,7	
	33,2	
28 dias (10/10)	23,2	25,2
	26,0	
	26,5	

Fonte: O Autor (2023)

Ao contrário do estudo de Vares (2019), mesmo com a mudança na relação água/cimento, não houve uma melhora na resistência do concreto. Enquanto o estudo da autora apresentou um aumento de 20% na resistência do concreto, neste estudo houve uma diminuição de 5,62%. Porém, conforme a NBR 6118/2023, para concreto estrutural, o mínimo de resistência é 20Mpa, logo, para o concreto das vigas foi previsto no cálculo uma resistência de 25Mpa para atender a norma. Como os dois concretos atingiram a resistência média de 25Mpa aos vinte e oito dias, não interferiu no ensaio das vigas.

4.4 Resistência à tração das vigas

Com a realização do ensaio de tração na flexão das vigas, foi possível obter a resistência à tração das vigas. Na Tabela 10 é mostrada a resistência das vigas com armadura de aço e PRFV.

Tabela 10: Resistência à tração das vigas

Resistência à tração na Flexão		
Tipos de Vigas	Resistência unit. (Mpa)	Resistência média (Mpa)
VA 1	13,7	14,6
VA 2	13,9	
VA 3	16,3	
VF 1	10,8	11,9
VF 2	12,2	
VF 3	12,7	

Fonte: O Autor (2023)

A partir dos resultados obtidos, foi observado que as vigas de aço apresentaram uma resistência média à tração superior em relação às vigas de PRFV. Porém, por mais que as vigas de PRFV tiveram resistência inferior ao aço, sua resistência foi superior ao que estava calculado, visto que, antes de realizar o ensaio, foi realizado o cálculo para obter a previsão da resistência à tração das vigas. Na Tabela 11 nota-se que as vigas apresentaram uma resistência superior ao que foi previsto no memorial de cálculo localizado no Apêndice 01, obtendo, assim, um ótimo resultado.

Tabela 11: Previsão de resistência à tração das vigas

Vigas	Resistência Prevista (Mpa)	Resistência Obtida (Mpa)
Viga de Aço	2,6	14,6
Viga de PRFV	3,8	11,9

Fonte: O autor (2023)

Bácaro, Moreno e Shiotani (2017) realizaram um estudo semelhante, onde, também, foi desenvolvida uma viga de concreto armado. Os autores por meio de seu estudo obtiveram o resultado de 9,57Mpa de resistência à tração na viga de concreto armado; em relação a esse estudo, a viga de concreto armado com PRFV apresentou uma resistência superior ao aço.

Outro ponto analisado nesse trabalho foi a carga de ruptura das vigas, a qual pode ser vista na Tabela 12. Ressalta-se, também, que a mesma foi obtida a partir do ensaio de tração na flexão. Nesse estudo, foi observado que houve uma diminuição de 15,50% da carga de ruptura média das vigas de PRFV quando comparado com as vigas de aço. Porém, Vares (2019) em sua pesquisa, obteve um aumento de 57,62% da carga de ruptura quando comparado uma viga de PRFV em relação ao aço. É importante ressaltar que houve uma diferença grande no estudo da autora porque ocorreu a utilização do PRFV como reforço estrutural, porém mesmo sendo utilizado como reforço, o vergalhão apresentou um ótimo desempenho.

Tabela 12: Carga de ruptura das vigas

Vigas	Carga de ruptura unit. (KN)	Carga de ruptura média (KN)
VA 1	102,8	118,1
VA 2	113,4	
VA 3	138,2	
VF 1	89,8	99,8
VF 2	105,4	
VF 3	104,1	

Fonte: O Autor (2023)

No estudo de Kasai (2022), é afirmado que o baixo módulo de elasticidade é um dos grandes problemas na utilização do PRFV porque ele apresenta ruptura frágil, não demonstrando sinal prévio de rompimento. De acordo com a Figura 19 (a) e (b), abaixo, é possível observar a diferença na forma de rompimento da viga; enquanto a viga de PRFV rompeu sem deformações, a viga de aço rompeu com grandes deformações, sendo notado o escoamento do aço. Essa diferença é muito importante porque com a deformação do aço é possível interferir na estrutura antes que ocorra o rompimento, podendo ser realizado um reparo ou reforço na mesma.

Figura 19: (a) Viga de PRFV rompida e (b) Viga de aço rompida



Fonte: O autor (2023)

5 Conclusão

Por fim, a partir desse estudo, foi possível compreender o comportamento do vergalhão de PRFV quando utilizado em um elemento estrutural. Logo, concluiu-se que esse vergalhão apresentou uma resistência à tração suficiente para permitir sua utilização em estruturas de concreto armado, mesmo que seja inferior ao aço. Além disso, comparando com outros estudos, o vergalhão de PRFV apresentou um bom desempenho, contribuindo para a expansão de seu uso.

Porém, é importante ressaltar que, por mais que o PRFV apresente uma ótima resistência à tração, seu baixo módulo de elasticidade é algo que deve ser levado em consideração quando utilizado em estruturas de concreto armado. O baixo módulo de elasticidade não permite prever o rompimento da estrutura, visto que sua deformação é pequena, afetando a segurança da estrutura. Outro ponto relacionado é que o vergalhão de PRFV não pode ser dobrado, dificultando, assim, ajustes em obra, sendo realizados todos os ajustes durante o processo de produção na indústria.

Dessa forma, a utilização do vergalhão de PRFV em alternativa ao aço pode ser de valiosa importância para o setor da construção civil, principalmente em ambientes corrosivos, onde ocorrem grandes perdas do aço, sendo necessários reparos, reforços e recuperação da estrutura, ocasionando mais custos. Vale ressaltar que para a sua utilização são necessários mais estudos para análise do vergalhão e, assim, a criação de normativas para regulamentar o seu uso no Brasil que é de suma importância para que seja desenvolvido de forma correta e padronizada.



6 Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars**. Farmington Hills, 2015.

ANDRADE, Everton de Lima de. **Estudo Sobre A Substituição De Armadura Metálica Por Barras De Fibra De Vidro Em Seções De Vigas De Concreto Armado Submetidas À Flexão**. 2022. 55 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/50321/1/ConcretoArmadoSe%c3%a7%c3%a3oDeVigaFlexaoSimplesA%c3%a7oGFRP_Andrade_2022.pdf. Acesso em: 07. jun.2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, p. 9. 2015.

_____. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, p. 13. 2018.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, p. 238. 2023.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto - Requisitos**. Rio de Janeiro, p.14. 2022.

_____. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. Rio de Janeiro, p.7. 2015.

_____. **NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, p. 6. 2010.

_____. **NBR 16889: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, p. 8. 2020.

_____. **NBR 17054: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio**. p. 9. Rio de Janeiro. 2022.

BACÁRO, Gustavo Felipe; MORENO, Saulo Onerom Ferrari; SHIOTANI, André Kazuhiro. **Análise do reforço estrutural em vigas de concreto armado com a utilização de uma e duas camadas de manta de fibras de carbono**. 2017. Trabalho Final de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Paranaense – UNIPAR, 2017.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do concreto armado**. Notas de aula. UNESP. Departamento de Engenharia Civil. São Paulo, 2006.

BELATO, Mariana Natele; SILVA, Rogério José da. **Análise da geração de poluentes na produção de cimento Portland com coprocessamento de resíduos industriais**. 2013.



171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013. Disponível em:

https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/bitstream/123456789/795/1/dissertacao_belato_2013. PDF. Acesso em: 03. nov. 2023.

BERTON, Kauana Moraes. **Investigação Teórico-Experimental De Vigas Armadas Com Barras De Polímero Reforçado Com Fibra De Vidro (Prfv) Submetidas À Flexão**. 2019. 62 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019. Disponível em:

https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/23480/Berton_Kauana_Moraes_2019_TCC.pdf?sequence=1. Acesso em: 07. jun.2023.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos; MARCHETTI, Osvaldemar. **Concreto armado – Eu te amo**. 10ª ed. elo: Blücher. 2019.

DAMO, Gabriela Ferreira. **Avaliação do desempenho de diferentes agregados miúdos de britagem em concretos de cimento Portland**. 2011. 230 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/95488>. Acesso em: 07. jun.2023.

FERRAZ, Henrique. O aço na construção civil. **Revista Eletrônica de Ciências**. Outubro 2003, n. 22. Disponível em: http://www.atenas.edu.br/uniatenas/assets/files/spic/monography/USO_DO_ACO_NA_CONSTRUCAO_CIVIL.pdf. Acesso em: 07. jun.2023.

HAIZER GROUP SOLUTION. **Catálogo de vergalhão**. 2023. Disponível em: <https://www.haizergroup.com.br/haizervergalhoes>. Acesso em: 07. jun.2023.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações, 2005, p 1-40. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc48.pdf>. Acesso em: 07. jun.2023.

IMIANOWSKY, Guilherme Wank; WALENDOWSKY, Marcus Alberto. **Os principais aços carbono utilizados na construção civil**. Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Santa Catarina - CREA-SC, Santa Catarina, 2017. Disponível em: <http://www.crea-sc.org.br/porta/arquivosSGC/a%C3%A7os%20carbono%20constru%C3%A7%C3%A3o%20civil.pdf>. Acesso em: 07. jun. 2023.

ISIDRO NETO, João. *et al.* **Utilização do aço na construção civil**. 2021. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (técnico em edificações) - Curso Técnico em Edificações da ETEC Júlio de Mesquita. Santo André. 2021. Disponível em: https://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/6792/1/Jo%C3%A3o%20Isidro%20Neto%20Utiliza%C3%A7%C3%A3o%20do%20a%C3%A7o%20na%20constru%C3%A7%C3%A3o%20civil_monografia_TCC.pdf. Acesso em: 07. jun.2023.



KASAI, Murilo Shoji de Souza. **Armadura de fibra de vidro em estruturas de concreto armado**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2022. Disponível em: <
https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/238489/kasai_mss_tcc_ilha.pdf?sequence=7&isAllowed=y>. Acesso em: 19.mai.2023.

MACIEL, Lucas Damas; COELHO, Adenilson Roberto; PEREIRA, Helena Ravache Samy. Estudo das propriedades do concreto convencional com aditivo ou adição de água para correção de consistência. **Revista Matéria**. v. 25, n. 4. 2020. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/rmat/a/X5vbD3xtX8yG9gTkyYb9QFK/?format=html&lang=pt&stop=next>. Acesso em: 07. jun.2023.

MATIAS, Pedro Henrique Peixoto; ROMANICHEN, Romulo Menck. Comparativo entre o uso de barras de aço e barras de polímero reforçado com fibra de vidro em estruturas de concreto armado. **Coletânea de estudos em Engenharia Civil – UNINGÁ** - 2020, Maringá, v. 01, n. 1, p. 128-141. 2020. DOI: 10.46311/978-65-991603-5-6. Disponível em:
<https://uninga.br/hotsite/coletanea-de-estudos-em-engenharia-civil/>. Acesso em: 09 mar. 2023.

MOURA, Ruan Carlos de Araújo. **Análise da durabilidade de armaduras poliméricas reforçadas com fibras de vidro submetidos ao ambiente alcalino e a elevadas temperaturas**. 2021. Tese (Doutor em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Bahia – UFB, 2021. Disponível em: <
https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/34934/1/Tese_Doutorado_Ruan_Moura_PPEC_Final.pdf >. Acesso em: 19.mai.2023.

OLIVEIRA, Ana Martha Carneiro Pires de. **Consumo de água na produção de concreto usinado: quantificação e principais fatores de influência**. 2020. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo. 2020. Disponível em:
http://repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/9493/Ana%20Martha%20Carneiro%20Pires%20de%20Oliveira_.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 07. jun.2023.

ORLANDO, Igor del Gaudio. **Projeto de estruturas de concreto armado reforçadas com Compósitos FRP: dimensionamento à flexão e à Força cortante**. 2019. 196 f. Dissertação (Mestrado em ciências) – Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-17072019-143439/publico/IgordelGaudioOrlandoCorr19.pdf>. Acesso em: 07. jun.2023.

PORTO, Thiago Bomjardim; FERNANDES, Danielle Stefane Gualberto. **Curso básico de concreto armado**. 1ª ed. elo: Oficina dos Textos. 2015.

SÁNCHEZ FILHO, Emil de Souza. **Concreto estrutural**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2023.



SANTOS, Diego Brenner Freire; ALMEIDA, Igor Gabriel da Silva; CRUZ, Cláudia Patrícia Torres. **Estudo comparativo entre os vergalhões de aço e polímero reforçado com fibra de vidro.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Potiguar – UNP, 2022. Disponível em: <
<https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/24880/1/TCC-Diego%20e%20Gabriel.pdf> >. Acesso em: 19.mai.2023.

SBRIGHI NETO, Claudio. Agregados para concreto. *In*: ISAIA, Geraldo Cechella. **Ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005. p. 323-343. Disponível em:
<https://www.passeidireto.com/arquivo/18627347/cap-7-agregados-naturais-britados-e-artificiais-para-concreto>. Acesso em: 07. jun.2023.

VARES, Rhaissa Salamoni. **Estudo do reforço à flexão de vigas biapoiadas em concreto armado com barras de fibra de vidro.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS, 2019. Disponível em: <
<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/200200/001103275.pdf?sequence=1&isAllowed=y> >. Acesso em: 19.mai.2023.

APÊNDICE 01 – MEMORIAL DE CÁLCULO

Para obter a carga de ruptura real da peça e que o rompimento ocorresse por flexão na tração, foi utilizado coeficiente de segurança apenas nos cálculos de verificações da armadura transversal.

Dimensionamento armadura longitudinal - Aço

Dados

- C25= $f_{ck} = 2,5 \text{Kn/cm}^2$
- Aço CA-50= 50Kn/cm^2
- Vergalhão de PRFV= 80Kn/cm^2
- Cobrimento (C_{nom})= 2,5cm (Adotada classe de agressividade ambiental II)
- Altura (h)= 15cm
- Largura (L)= 60cm
- Área de concreto (A_c)= 225cm^2

Altura útil

$$d = h - C_{nom} - \phi e - \frac{\phi}{2}$$

(Equação 02)

- Onde:

d é a altura útil (cm);
 h é a altura da viga (cm);
 C_{nom} é o cobrimento da armadura (cm);
 ϕe é o diâmetro do estribo (cm);
 ϕ é o diâmetro da armadura longitudinal (cm).

$$d = 15 - 2,5 - \phi e - \frac{\phi}{2}$$
$$d = 15 - 2,5 - 0,8 - \frac{0,63}{2}$$
$$d = 11,5 \text{cm}$$

Momento resistente

$$M_{rd1, lim} = 0,251 \cdot b_w \cdot d^2 \cdot f_{ck}$$

(Equação 03)

- Onde:

$M_{rd1, lim}$ é o momento resistente (Kn.cm);
 b_w é a largura da viga (cm);
 d é a altura útil (cm);
 f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão (Kn/cm^2).

$$M_{rd1, lim} = 0,251 \cdot 15 \cdot 11,5^2 \cdot 2,5$$
$$M_{rd1, lim} = 1244,80 \text{Kn.cm}$$
$$M_{sd} < M_{rd1, lim}$$

Posição da linha neutra

$$X = 1,25 \cdot d \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{Mrd1, lim}{0,425 \cdot bw \cdot d^2 \cdot fck}} \right)$$

(Equação 04)

- Onde:

X é a posição da linha neutra (cm);

d é a altura útil (cm);

Mrd1, lim é o momento resistente (Kn.cm);

bw é a largura da viga (cm);

fck é a resistência característica do concreto à compressão (Kn/cm²).

$$X = 1,25 \cdot 11,5 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1244,80}{0,425 \cdot 15 \cdot 11,5^2 \cdot 2,5}} \right)$$

$$X = 5,18cm$$

Verificação do domínio

$$X_{23} = 0,259 \cdot d$$

(Equação 05)

- Onde:

d é a altura útil (cm).

$$X_{23} = 0,259 \cdot 11,5$$

$$X_{23} = 2,98cm$$

$$X_{34} = 0,628 \cdot d$$

(Equação 06)

- Onde:

d é a altura útil (cm).

$$X_{34} = 0,628 \cdot 11,5$$

$$X_{34} = 7,22cm$$

$$X_{23} < X < X_{34} - A \text{ peça está no domínio 3}$$

$$\frac{X}{d} = \frac{5,18}{11,5} = 0,45 \leq 0,45 - OK$$

(Equação 07)

- Onde:

X é a posição da linha neutra (cm);

d é a altura útil (cm).

Dimensionamento da armadura

$$A_s = \frac{M_{rd1, lim}}{F_{yk} \cdot (d - 0,4 \cdot X)}$$

(Equação 08)

- Onde:

A_s é a área de aço (cm^2);

$M_{rd1, lim}$ é o momento resistente (Kn.cm);

F_{yk} é a resistência da armadura ao escoamento (Kn/cm^2);

d é a altura útil (cm);

X é a posição da linha neutra (cm).

$$A_s = \frac{1244,80}{50 \cdot (11,5 - 0,4 \cdot 5,18)}$$
$$A_s = 2,64 \text{cm}^2$$

$$A_{s, mín} = 0,0015 \cdot A_c$$

(Equação 09)

- Onde:

$A_{s, mín}$ é a área de aço mínima (cm^2);

A_c é a área de concreto da viga (cm^2).

$$A_{s, mín} = 0,0015 \cdot 225$$

$$A_{s, mín} = 0,34 \text{cm}^2$$

$$A_{s, máx} = 0,04 \cdot A_c$$

(Equação 10)

- Onde:

$A_{s, máx}$ é a área de aço máxima (cm^2);

A_c é a área de concreto da viga (cm^2).

$$A_{s, máx} = 0,04 \cdot 225$$

$$A_{s, máx} = 9 \text{cm}^2$$

- Adotado $2\text{Ø}6,3\text{mm}$. Foi utilizado armadura inferior a área de aço calculada para garantir que ocorra a ruptura por tração

$$A_{s, 1\text{Ø}6,3\text{mm}} = \pi \cdot r^2$$

(Equação 11)

- Onde:

$A_{s, 1\text{Ø}6,3\text{mm}}$ é a área do vergalhão (cm^2);

r é o raio do vergalhão (cm).

$$A_{s, 1\text{Ø}6,3\text{mm}} = \pi \cdot 0,315^2$$

$$A_{s, 1\text{Ø}6,3\text{mm}} = 0,31 \text{cm}^2$$

$$A_{s, 1\text{Ø}6,3\text{mm}} = 2 \cdot 0,31 \text{cm}^2 = 0,62 \text{cm}^2$$

$$A_{s, mín} < A_{s, 1} < A_{s, máx}$$

Previsão da carga de ruptura

$$Mrup,s = As,1 \cdot \sigma_s \cdot (d - 0,4 \cdot X)$$

(Equação 12)

- Onde:

$Mrup, s$ é o momento de ruptura da viga (Kn.cm);
 $As,1$ é a área do vergalhão (cm²);
 σ_s é a resistência da armadura ao escoamento (Kn/cm²);
 d é a altura útil (cm);
 X é a posição da linha neutra (cm).

$$Mrup,s = 0,62 \cdot 50 \cdot (11,5 - 0,4 \cdot 5,18)$$

$$Mrup,s = 292,27Kn.cm$$

$$Vrup,s = \frac{Mrup}{\text{Distância da carga até o apoio}}$$

(Equação 13)

- Onde:

$Vrup, s$ é a carga de ruptura (Kn);
 $Mrup, s$ é o momento de ruptura da viga (Kn.cm).

$$Vrup,s = \frac{292,27}{15}$$

$$Vrup,s = 19,48KN$$

Previsão da tensão de ruptura

$$f_{ct,t} = \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2}$$

(Equação 01)

$$f_{ct,t} = \frac{19480 \cdot 450}{150 \cdot 150^2}$$

$$f_{ct,t} = 2,60Mpa$$

Dimensionamento armadura longitudinal - PRFV

Dados

- $f_y, \text{aço} = 500Mpa$
- $f_y, \text{PRFV} = 800Mpa$

Dimensionamento armadura

$$A_{prfv} = \frac{f_{y, \text{aço}}}{0,75 \cdot f_{y, \text{prfv}}} \cdot A_{s,1}$$

(Equação 14)

- Onde:

A_{prfv} é a área do vergalhão de PRFV (cm²);
 $f_{y, \text{aço}}$ é a resistência da armadura ao escoamento (Mpa);
 $f_{y, \text{PRFV}}$ é a resistência da armadura ao escoamento (Mpa);
 $A_{s,1}$ é a área de aço (cm²).

$$A,prfv = \frac{500}{0,75 \cdot 800} \cdot 0,62$$

$$A,prfv = 0,52cm^2$$

- Adotado 2Ø6mm

$$A_{s,2\text{Ø}6mm} = \pi \cdot r^2$$

(Equação 15)

- Onde:

$A_{s,2\text{Ø}6,3mm}$ é a área do vergalhão (cm^2);
 r é o raio do vergalhão (cm).

$$A_{s,2\text{Ø}6mm} = \pi \cdot 0,30^2$$

$$A_{s,2\text{Ø}6mm} = 0,28cm^2$$

$$A_{s,2\text{Ø}6mm} = 2 \cdot 0,28cm^2 = 0,56cm^2$$

$$A,prfv \leq A_{s,2}$$

Previsão da carga de ruptura

$$M_{rup,s} = A_{s,2} \cdot \sigma_s \cdot (d - 0,4 \cdot X)$$

(Equação 16)

- Onde:

$M_{rup,s}$ é o momento de ruptura da viga (Kn.cm);

$A_{s,2}$ é a área do vergalhão (cm^2);

σ_s é a resistência da armadura ao escoamento (Kn/cm²);

d é a altura útil (cm);

X é a posição da linha neutra (cm).

$$M_{rup,s} = 0,56 \cdot 80 \cdot (11,5 - 0,4 \cdot 5,18)$$

$$M_{rup,s} = 422,37Kn.cm$$

$$V_{rup,s} = \frac{M_{rup}}{\text{Distância da carga até o apoio}}$$

(Equação 13)

$$V_{rup,s} = \frac{422,37}{15}$$

$$V_{rup,s} = 28,16Kn$$

Previsão da tensão de ruptura

$$f_{ct,t} = \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2}$$

(Equação 01)

$$f_{ct,t} = \frac{28160 \cdot 450}{150 \cdot 150^2}$$

$$f_{ct,t} = 3,75Mpa$$

Dimensionamento da armadura transversal – Aço

Verificação da força cortante resistente relativa às diagonais comprimidas de concreto

$$\alpha v_2 = 1 - \frac{f_{ck}}{250}$$

(Equação 17)

- Onde:

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão (Kn/cm²).

$$\alpha v_2 = 1 - \frac{25}{250}$$
$$\alpha v_2 = 0,9$$

$$V_{rd2} = 0,27 \cdot \alpha v_2 \cdot f_{ck} \cdot b_w \cdot d$$

(Equação 18)

- Onde:

V_{rd2} é a força cortante resistente (Kn);

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão (Kn/cm²);

b_w é a largura da viga (cm);

d é a altura útil (cm).

$$V_{rd2} = 0,27 \cdot 0,9 \cdot 25 \cdot 15 \cdot 11,5$$

$$V_{rd2} = 104,79Kn$$

Resistência característica ao escoamento do aço da armadura transversal

$$f_{ywk} = \min\left(\begin{matrix} f_{yk} = 500Mpa \\ 500Mpa \end{matrix}\right)$$

(Equação 19)

- Onde:

f_{ywk} é resistência característica ao escoamento do aço (Mpa);

f_{yk} é a resistência da armadura ao escoamento (Mpa).

$$f_{ywk} = 500Mpa = 50Kn/cm^2$$

Resistência de cálculo ao escoamento do aço da armadura transversal

$$f_{ywd} = \min\left(\frac{f_{ywk}}{\gamma_s}\right)$$
$$435Mpa$$

(Equação 20)

- Onde:

f_{ywd} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço (Mpa);

f_{ywk} é a resistência característica ao escoamento do aço (Mpa).

$$f_{ywd} = \min\left(\frac{500}{1,15}\right)$$
$$435Mpa$$
$$f_{ywd} = 435Mpa = 43,5Kn/cm^2$$

Resistência média à tração do concreto

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}$$

(Equação 21)

- Onde:

$f_{ct,m}$ é a resistência média à tração do concreto (Kn/cm²);

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão (Kn/cm²).

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot \sqrt[3]{25^2}$$
$$f_{ct,m} = 2,56\text{Mpa} = 0,256\text{Kn/cm}^2$$

Resistência de cálculo à tração do concreto

$$f_{ct,d} = \frac{0,21 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}}{\gamma_c}$$

(Equação 22)

- Onde:

$f_{ct,d}$ é a resistência de cálculo à tração do concreto (Kn/cm²);

f_{ck} é a resistência característica do concreto à compressão (Kn/cm²).

$$f_{ct,d} = \frac{0,21 \cdot \sqrt[3]{25^2}}{1,4}$$
$$f_{ct,d} = 1,28\text{Mpa} = 0,128\text{Kn/cm}^2$$

Força cortante absorvida por mecanismos complementares ao da treliça de morsh

$$V_c = 0,6 \cdot f_{ct,d} \cdot b_w \cdot d$$

(Equação 23)

- Onde:

V_c é a força cortante absorvida (Kn);

$f_{ct,d}$ é a resistência de cálculo à tração do concreto (Kn/cm²);

b_w é a largura da viga (cm);

d é a altura útil (cm).

$$V_c = 0,6 \cdot 0,128 \cdot 15 \cdot 11,5$$
$$V_c = 13,25\text{Kn}$$

Força cortante resistente de cálculo

$$V_{sd} = V_{rd3} = 90\text{KN} - \text{Adotado para não ocorrer ruptura por cisalhamento}$$

$$V_{rd3} = V_c + V_{sw}$$

$$V_{sw} = V_{rd3} - V_c$$

(Equação 24)

- Onde:

V_{sw} é a força cortante resistente de cálculo (Kn);

V_c é a força cortante absorvida (Kn).

$$V_{sw} = 90 - 13,25$$
$$V_{sw} = 76,75\text{Kn}$$

Armadura transversal mínima

$$A_{sw, \text{mín}} = \frac{20 \cdot f_{ct, m} \cdot b_w}{f_{ywk}}$$

(Equação 25)

- Onde:

$A_{sw, \text{mín}}$ é a armadura de aço mínima (cm^2);
 $f_{ct, m}$ é a resistência média à tração do concreto (Kn/cm^2);
 b_w é a largura da viga (cm);
 f_{ywk} é a resistência característica ao escoamento do aço (Mpa);

$$A_{sw, \text{mín}} = \frac{20 \cdot 0,256 \cdot 15}{43,5}$$

$$A_{sw, \text{mín}} = \frac{1,77 \text{cm}^2}{m} = 0,0177 \text{cm}^2/\text{cm}$$

Dimensionamento da armadura transversal

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{sw}}{0,9 \cdot d \cdot f_{ywd}}$$

(Equação 26)

- Onde:

A_{sw}/s é a área de aço por centímetro (cm^2/cm);
 V_{sw} é a força cortante resistente de cálculo (Kn);
 d é a altura útil (cm);
 f_{ywd} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço (Mpa).

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{76,75}{0,9 \cdot 11,5 \cdot 43,5}$$

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{0,17 \text{cm}^2}{\text{cm}}$$

$$A_s, 3\emptyset 8,0\text{mm} = 0,50 \text{cm}^2 \times 2 \text{ ramos} = 1,01 \text{cm}^2$$

$$s = \frac{A_{sw}}{0,17}$$

$$s = \frac{1,01}{0,17}$$

$$s = 5,94 - \text{Adotado } 8\text{cm}$$

$$\frac{l}{s} = \frac{55}{8}$$

$$\frac{l}{s} = 6,88 = 7 \text{ estribos}$$

- Adotado $7\emptyset 8\text{mm c/ } 8\text{cm}$