

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Paulo Ricardo Domingues de Vasconcelos

**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO:
UMA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DOS PRFV EM VIGAS DE CONCRETO**

Santa Cruz do Sul

2024

Paulo Ricardo Domingues de Vasconcelos

**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO:
UMA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DOS PRFV EM VIGAS DE CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Me. Henrique Luiz Rupp

Santa Cruz do Sul

2024

Paulo Ricardo Domingues de Vasconcelos

**ANÁLISE DE ALTERNATIVAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO: UMA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DOS PRFV EM VIGAS DE
CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade de Santa Cruz do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Me. Henrique Luiz Rupp
Professor Orientador – UNISC

Santa Cruz do Sul
2024

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha mãe, Débora, que não só me ensinou os valores fundamentais da educação, mas também foi meu exemplo de dedicação e perseverança. Minha eterna gratidão à minha tia Nereida, que cuidou de mim como uma mãe, oferecendo amor, carinho e suporte em todos os momentos. Ao meu pai, Paulo Roberto, agradeço por ser minha maior inspiração, sempre acreditando em mim e me incentivando a buscar a excelência em cada passo. Aos meus irmãos, Brenda e Lorenzo, agradeço por estarem sempre ao meu lado, me apoiando com carinho.

Não poderia deixar de agradecer à minha namorada, Eduarda, que esteve ao meu lado com paciência e companheirismo incondicional ao longo dessa jornada acadêmica, oferecendo o suporte emocional que me manteve firme nos momentos mais desafiadores.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Me. Henrique Luiz Rupp, que aceitou o desafio de me orientar, mesmo quando eu estava com dificuldades para definir o tema. Sua paciência, dedicação e sabedoria foram essenciais para que eu encontrasse o caminho certo e me desenvolvesse ao longo do trabalho. Agradeço também ao Henrique Eichner que me auxiliou em toda a parte experimental do trabalho, contribuindo com seu conhecimento e apoio que foram valiosos para a conclusão do trabalho.

Por fim, agradeço aos amigos, colegas e professores que nunca mediram esforços para compartilhar seus conhecimentos e experiências. O apoio e a presença de cada um, especialmente nos momentos mais difíceis, foram fundamentais para que eu seguisse em frente e superasse os desafios ao longo dessa jornada.

RESUMO

Com o crescimento da indústria da construção civil, o concreto se tornou um material indispensável em edificações, graças às suas características e resistência. Tradicionalmente, o aço é usado como reforço estrutural em vigas de concreto armado devido à sua resistência. No entanto, o aço apresenta algumas desvantagens, como a suscetibilidade à corrosão e sua alta densidade, o que pode ocasionar problemas nas estruturas ao longo do tempo. Em busca de alternativas mais eficientes, os Polímeros Reforçados com Fibra de Vidro (PRFV) emergem como uma possível solução, oferecendo maior resistência a agentes externos, como variações de temperatura e processos químicos, além de serem mais econômicos e leves. Este trabalho apresenta um estudo teórico-experimental de quatro protótipos de vigas: uma armada com aço (viga testemunho) e três com barras de PRFV. Foram realizados ensaios de flexão nas vigas, tração nas barras e compressão no concreto. Os resultados desses ensaios foram comparados, destacando o desempenho das barras de aço e de PRFV. A pesquisa visa analisar os aspectos técnicos da substituição do aço pelo PRFV, avaliando seu desempenho em termos de resistência e trabalhabilidade. A relevância deste estudo reside na necessidade crescente de soluções sustentáveis e eficientes no setor da construção civil, promovendo inovação e otimização de custos, especialmente diante do aumento significativo dos preços do aço.

Palavras-chave: vigas em concreto armado, polímero reforçado com fibras de vidro, Inovação, desempenho.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Estrutura de concreto armado	15
Figura 02 - Representação dos componentes do concreto	16
Figura 03 - Barra de aço CA-50	17
Figura 04 - Detalhamento de Viga de Concreto Armado em 3D	19
Figura 05 - Representação do cobrimento nominal	21
Figura 06 - Representação do vão efetivo	23
Figura 07 - Vergalhão de Fibra de Vidro	26
Figura 08 - Propriedades física-mecânicas	27
Figura 09 - Processo de fabricação de vergalhões de PRFV.	27
Figura 10 - Cálculo da armadura transversal	30
Figura 11 - Representação dos estribos	31
Figura 12 - Detalhes do Ensaio de Stuttgart	32
Figura 13 - Croqui da fôrma utilizada	35
Figura 14 - Croqui das peças	35
Figura 15 - Projeto estrutural da viga	36
Figura 16 - Dimensões das vigas experimentais	37
Figura 17 - Representação do estribo	38
Figura 18 - Armadura mínima nas vigas armadas com PRFV	39
Figura 19 - Fôrma concluída	41
Figura 20 - Barras de PRFV previamente cortadas	42
Figura 21 - Estribos dobrados	42
Figura 22 - Armaduras finalizadas	43
Figura 23 - Fôrma preparada para recebimento do concreto	45
Figura 24 - Concretagem finalizada	46
Figura 25 - Vigas de concreto	47
Figura 26 - Corpos de prova submersos	47
Figura 27 - Barras de aço e PRFV a serem tracionadas	49
Figura 28 - Tração na barra de aço	49
Figura 29 - Tração na barra de PRFV	50
Figura 30 - Barras de aço e PRFV após o rompimento	50
Figura 31 - Corpo de prova durante o ensaio	52
Figura 32 - Corpo de prova rompido	53
Figura 33 - Viga testemunho	55
Figura 34 - Viga testemunho rompida	56
Figura 35 - Viga PRFV 1	57
Figura 36 - Fissuração da Viga PRFV 1 durante o ensaio	57
Figura 37 - Viga PRFV 1 rompida	58
Figura 38 - Viga testemunho rompida por cisalhamento	63
Figura 39 - Viga PRFV rompida por tração	63
Figura 40 - Viga PRFV com fissuração	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Características das barras CA-50	18
Tabela 02 - Propriedades mecânicas das barras CA-50	19
Tabela 03 - Classes de agressividade ambiental	20
Tabela 04 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e seu cobrimento nominal	22
Tabela 05 - Taxas mínimas de armadura de flexão para vigas	24
Tabela 06 - Volume de concreto total	33
Tabela 07 - Quantitativo de materiais para produção do concreto	34
Tabela 08 - Quantitativo de armadura	36
Tabela 09 - Resultado de tração nas barras de aço e PRFV	51
Tabela 10 - Resultado dos corpos de prova	54
Tabela 11 - Momento e a carga de ruptura da viga armada com aço	59
Tabela 12 - Momento e a carga de ruptura da viga armada com PRFV	60
Tabela 13 - Resultado do ensaio de flexão nas vigas	61

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Análise dos resultados

62

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	6
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Área e Limitação do Tema	12
2 JUSTIFICATIVA	12
3 OBJETIVOS	13
3.1 Objetivo Geral	13
3.2 Objetivos Específicos	13
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
4.1 Estrutura de Concreto Armado	14
4.2 Concreto	15
4.3 Aço	17
4.4 Vigas de Concreto Armado	19
4.4.1 Classe de Agressividade Ambiental	20
4.4.2 Cobrimento Nominal	20
4.4.3 Estados-limites	22
4.5 Dimensionamento de Vigas Armadas com aço	22
4.5.1 Disposições Gerais	22
4.5.2 Dimensionamento de vigas utilizando Coeficiente K	24
4.6 Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro (PRFV)	25
4.6.1 Características	26
4.6.2 Produção	27
4.7 Dimensionamentos de Vigas Armadas com Fibra de Vidro	28
4.8 Dimensionamento de vigas de concreto armado à força cortante	28
5 METODOLOGIA	31
5.1 Quantitativo de material	33
5.1.1 Concreto	33
5.1.2 Fôrma	34
5.1.3 Armadura longitudinal e transversal	36
5.2 Dimensionamento	37
5.2.1 Armadura longitudinal mínima e máxima de flexão	37
5.2.2 Armadura transversal	38
5.2.3 Armadura mínima de flexão nas vigas armadas com PRFV	39
5.3 Execução das vigas	40
5.3.1 Montagem das formas	40
5.3.2 Montagem das armaduras	41
5.3.3 Concretagem	44
5.4 Ensaios executados	48
5.4.1 Ensaio de tração nas barras	48
5.4.2 Ensaio de compressão nos corpos de prova	52
5.4.3 Ensaio de flexão nas vigas	55
5.5 Cálculo do momento e carga estimada de ruptura	59
6 RESULTADOS	61

6.1 Análise comparativa das vigas	62
7 CONCLUSÃO	65
8 REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da indústria da construção civil, o concreto emergiu como um material fundamental para atender à crescente demanda por novas edificações. Sua versatilidade e alta resistência fazem com que seja amplamente utilizado em uma variedade de aplicações construtivas, desde a fundação até os revestimentos finais das estruturas. A capacidade do concreto de se moldar conforme as necessidades do projeto, combinada com suas propriedades estruturais robustas, contribui significativamente para a durabilidade e a estabilidade das construções modernas.

Atualmente, o aço é o material mais utilizado como reforço estrutural em vigas de concreto armado, devido às suas vantagens comprovadas, como sua homogeneidade e resistência à tração, compressão e flexão, além de sua alta ductilidade. No entanto, o aço apresenta algumas limitações, como sua suscetibilidade à corrosão, alta densidade e condutividade térmica, o que pode levar ao aparecimento de patologias nas edificações ao longo do tempo.

A crescente busca por materiais mais duráveis e resistentes a essas patologias tem impulsionado o desenvolvimento de alternativas, como o PRFV (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro). Este material apresenta potencial para substituir o aço, oferecendo resistência à tração e a agentes externos, como variações de temperatura e processos químicos, além de proporcionar melhor custo-benefício para a obra.

Sendo assim, a exploração do PRFV como alternativa ao aço não só pode melhorar a eficiência estrutural, mas também contribuir para a inovação e sustentabilidade na construção civil, apontando novas direções para o desenvolvimento de estruturas mais robustas e duráveis.

1.1 Área e Limitação do Tema

O presente trabalho foca-se na área de estruturas de concreto armado, com ênfase no estudo do uso de Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro (PRFV) como uma alternativa ao aço tradicional. O principal problema a ser abordado é a exploração do PRFV para substituir ou reduzir a quantidade de aço nas vigas de estruturas de concreto armado, buscando otimizar os resultados econômicos sem comprometer a resistência e a durabilidade das construções.

2 JUSTIFICATIVA

A estrutura de concreto armado é amplamente reconhecida como um dos principais métodos construtivos na atualidade devido à sua comprovada resistência e durabilidade. No entanto, com o aumento significativo do preço do aço, torna-se imprescindível explorar alternativas que possam substituir ou reduzir a quantidade de aço em estruturas.

Com isso, visando resultados de resistência equivalentes ou superiores, inovação e otimização de custos nas obras, o trabalho em questão tem como principal material de estudos analisar a substituição do aço por polímero reforçado com fibras de vidro (PRFV) como reforço em vigas de concreto.

Dessa forma, permite-se identificar qual material oferece melhor desempenho em termos de resistência, durabilidade e custo-benefício, facilitando a seleção de soluções mais eficientes e sustentáveis para a construção civil.

3 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho estão divididos em geral e específicos, apresentados subsequentemente.

3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica da substituição das barras de aço por barras de polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV) em estruturas de concreto armado.

3.2 Objetivos Específicos

Dimensionar estruturas de concreto armado utilizando aço e PRFV conforme suas respectivas normas.

Apresentar as propriedades, aplicações, vantagens e desvantagens de cada componente do concreto armado.

Executar ensaios de flexão para comparar o desempenho das estruturas dimensionadas.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Estrutura de Concreto Armado

A estrutura de concreto armado é um dos métodos construtivos mais amplamente utilizados na atualidade. Este tipo de estrutura é composto por concreto e é reforçado com barras de aço. As barras de aço, conhecidas como armaduras, são incorporadas ao concreto para fornecer resistência à tração, compensando a baixa resistência do concreto a esforços de tração. Esse sistema combina a alta resistência à compressão do concreto com a capacidade de suportar tensões de tração do aço, resultando em uma estrutura robusta e durável que é capaz de suportar uma ampla gama de cargas e esforços.

Conforme a NBR 6118:2023, que estabelece as diretrizes para projetos de estruturas de concreto, é importante seguir critérios de segurança e qualidade para garantir que as estruturas suportem as cargas corretamente durante sua vida útil. Isso reforça a importância das normas técnicas no desenvolvimento de estruturas seguras e duráveis.

De acordo com Barros e Melhado, os edifícios produzidos em concreto armado frequentemente são denominados como edifícios convencionais ou tradicionais. Isso se refere a estruturas compostas por pilares, vigas e lajes de concreto armado moldados no local, que representam o método tradicional de construção com concreto armado.

Portanto, o concreto armado é essencial na construção civil, e entender suas melhores práticas e recomendações é crucial para garantir que as estruturas sejam seguras e duráveis. A prática continua a evoluir com novas tecnologias, mantendo o concreto armado como uma solução fundamental na engenharia civil.

Figura 01 - Estrutura de concreto armado



Fonte: O que é concreto armado? Disponível em:

<https://www.aecweb.com.br/revista/materias/concreto-armado-e-solucao-duravel-e-economica/6993>

4.2 Concreto

O concreto é um material essencial na construção civil, amplamente utilizado devido à sua versatilidade e especificações. Ele é composto por uma mistura de cimento, água, agregados miúdos (areia) e agregados graúdos (brita), que, ao reagirem, formam uma massa resistente capaz de suportar grandes cargas e condições.

Conforme Neville (1997), a resistência do concreto normalmente é considerada sua propriedade mais importante, embora, em muitas situações práticas, outras características, como a durabilidade e a permeabilidade, possam ser mais relevantes. No entanto, a resistência costuma fornecer uma ideia geral da qualidade do concreto, visto que está diretamente relacionada à estrutura da pasta de cimento hidratada. Além do mais, a resistência é, quase invariavelmente, um elemento fundamental no projeto estrutural, e é especificada para fins de controle.

Ainda segundo Neville (1997), a relação água/cimento (A/C) é um parâmetro essencial no controle de qualidade do concreto. Essa relação deve ser cuidadosamente monitorada, pois uma quantidade excessiva de água pode comprometer a resistência mecânica, enquanto uma relação água/cimento muito baixa pode dificultar a trabalhabilidade e a homogeneidade da mistura.

Figura 02 - Representação dos componentes do concreto



Fonte: 7 Tipos de Concreto e suas Principais Características Disponível em:

<https://educacivil.com/7-tipos-de-concreto/>

A dosagem ou proporcionamento conforme a NBR 12655:2015 é definida como a medida dos materiais componentes do concreto para preparo do volume desejado e pode ser considerada uma das variáveis mais críticas no desempenho do concreto. Geralmente chamado de traço é representado em números que indicam a proporção de cada componente. Por exemplo, um traço 1:2:3 refere-se a uma parte de cimento, duas partes de areia e três partes de brita.

Desta forma, otimização dessas variações permite a obtenção de um material com as propriedades mecânicas desejadas, seja em pequenas construções residenciais ou em grandes obras de infraestrutura, garantindo a durabilidade e a segurança da estrutura.

4.3 Aço

Conforme a NBR 7480:2007, que regulamenta a classificação de barras e fios de aço para concreto armado, classifica-se como barras os produtos de diâmetro nominal de 6,3 mm ou superior, obtidos exclusivamente por laminação a quente, sem processos posteriores de deformação mecânica. Já os fios são produtos de diâmetro nominal de 10,0 mm ou inferior, obtidos a partir de fio-máquina por trefilação ou laminação a frio.

As barras de aço CA-50 são amplamente utilizadas em obras de concreto armado devido às suas propriedades mecânicas específicas, essenciais para a integridade e segurança das estruturas. Conforme a NBR 7480:2007, a designação 'CA-50' refere-se à resistência característica do aço, que é de 500 MPa (ou 50 kgf/mm²). Além dessa resistência, outro aspecto importante é a presença de nervuras na superfície das barras, que melhoram a aderência ao concreto e garantem uma integração eficaz entre os materiais.

Figura 03 - Barra de aço CA-50



Fonte: Vergalhões CA-50 Disponível em: <https://www.fa-aco.com.br/vergalhoes-ca-50>

Além das características mencionadas anteriormente, outras propriedades importantes das barras de aço CA-50 estão apresentadas nas tabelas apresentadas na NBR 7480:2007. Esta norma estabelece critérios para as especificações técnicas,

incluindo informações sobre resistência, ductilidade e desempenho em diferentes condições de uso. As tabelas a seguir apresentam essas características adicionais, fornecendo uma visão abrangente das qualidades do aço CA-50 e sua adequação para aplicações na construção civil.

Tabela 01 - Características das barras CA-50

Diâmetro nominal ^a mm	Massa e tolerância por unidade de comprimento		Valores nominais	
Barras	Massa nominal ^b kg/m	Máxima variação permitida para massa nominal	Área da seção mm ²	Perímetro mm
6,3	0,245	± 7%	31,2	19,8
8,0	0,395	± 7%	50,3	25,1
10,0	0,617	± 6%	78,5	31,4
12,5	0,963	± 6%	122,7	39,3
16,0	1,578	± 5%	201,1	50,3
20,0	2,466	± 5%	314,2	62,8
22,0	2,984	± 4%	380,1	69,1
25,0	3,853	± 4%	490,9	78,5
32,0	6,313	± 4%	804,2	100,5
40,0	9,865	± 4%	1256,6	125,7

^a Outros diâmetros nominais podem ser fornecidos a pedido do comprador, mantendo-se as faixas de tolerância do diâmetro mais próximo.

^b A densidade linear de massa (em quilogramas por metro) é obtida pelo produto da área da seção nominal em metros quadrados por 7 850 kg/m³.

Fonte: Tabela B1 da ABNT NBR 7480:2007

Tabela 02 - Propriedades mecânicas das barras CA-50

Categoria	Valores mínimos de tração				Ensaio de dobramento a 180 °		Aderência	
	Resistência característica de escoamento ^a f_{yk} MPa ^g	Limite de resistência ^b f_{st} MPa ^f	Alongamento após ruptura em 10 Φ ^c A %	Alongamento total na força máxima ^d A_{gt} %	Diâmetro do pino mm		Coeficiente de conformação superficial mínimo η	
					$\phi < 20$	$\phi \geq 20$	$\Phi > 10$ mm	$\Phi \geq 10$ mm
CA-25	250	1,20 f_y	18	-	2 ϕ	4 ϕ	1,0	1,0
CA-50	500	1,08 f_y	8	5	3 ϕ	6 ϕ	1,0	1,5
CA-60	600	1,05 f_y ^c	5	-	5 ϕ	-	1,0	1,5

^a Valor característico do limite superior de escoamento f_{yk} da ABNT NBR 6118 obtido a partir do LE ou δ_e da ABNT NBR ISO 6892.

^b O mesmo que resistência convencional à ruptura ou resistência convencional à tração (LR ou δ_t da ABNT NBR ISO 6892).

^c Φ é o diâmetro nominal, conforme 3.4.

^d O alongamento deve ser atendido através do critério de alongamento após ruptura (A) ou alongamento total na força máxima (A_{gt}).

^e Para efeitos práticos de aplicação desta Norma, pode-se admitir 1 MPa = 0,1 kgf/mm².

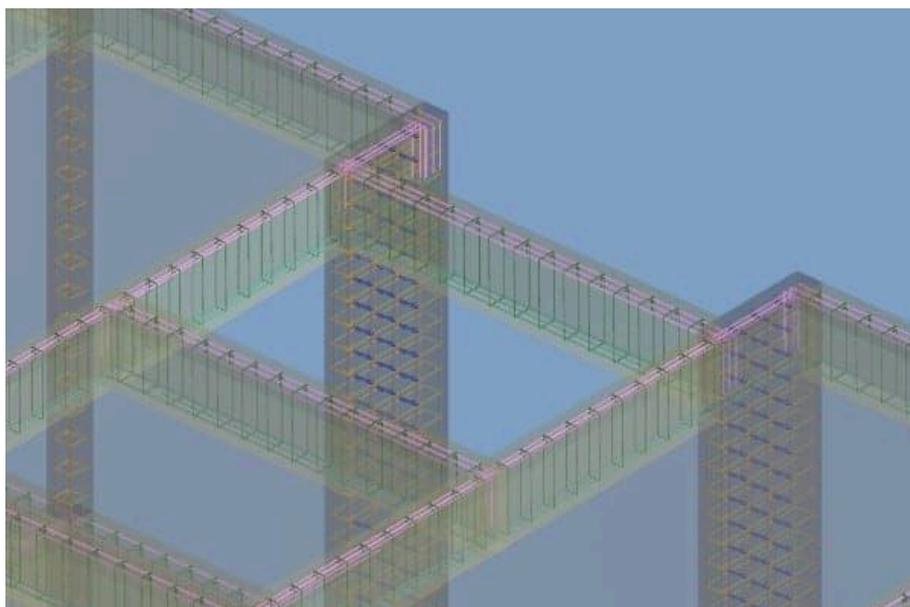
^f f_{st} mínimo de 660 MPa.

Fonte: Tabela B2 da ABNT NBR 7480:2007

4.4 Vigas de Concreto Armado

Vigas são elementos lineares dentro de uma estrutura que, segundo a NBR 6118:2023, definem-se como “aquelas em que o comprimento longitudinal supera em pelo menos três vezes a maior dimensão da seção transversal”.

Figura 04 - Detalhamento de Viga de Concreto Armado em 3D



Fonte: O que é uma Viga de Concreto Armado? Disponível em:

<https://carluc.com.br/projeto-estrutural/viga-de-concreto-armado/>

4.4.1 Classe de Agressividade Ambiental

Conforme a NBR 6118:2023, a classe de agressividade ambiental está relacionada às ações físicas e químicas que o ambiente exerce sobre as estruturas de concreto, independentemente das ações mecânicas, variações volumétricas de origem térmica, retração hidráulica, ou outras influências previstas no dimensionamento das estruturas. Essa classificação pode ser determinada com base nos parâmetros apresentados na tabela a seguir, que auxilia na identificação do nível de agressividade ambiental a que a estrutura estará exposta.

Tabela 03 - Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submerso	
II	Moderada	Urbano ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinho ^a	Grande
		Industrial ^{a, b}	
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c}	Elevado
		Respingos de maré	

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

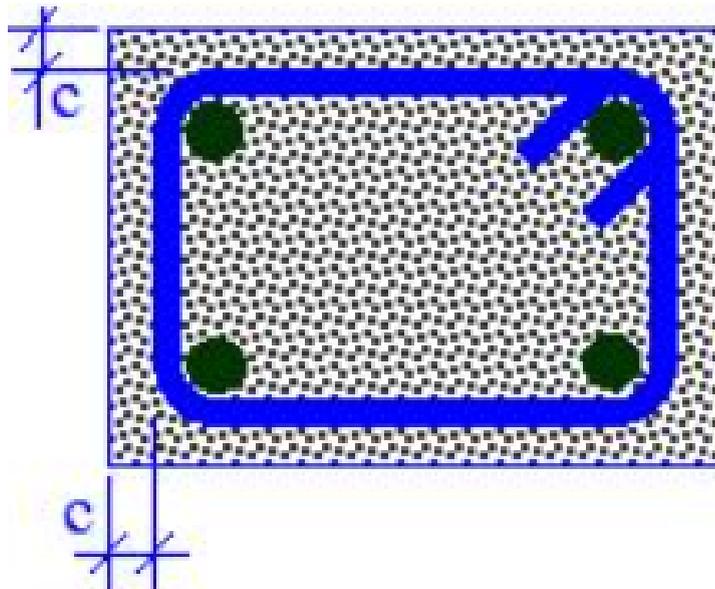
^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas, elementos em contato com solo contaminado ou água subterrânea contaminada.

Fonte: Tabela 6.1 da ABNT NBR 6118:2023

4.4.2 Cobrimento Nominal

O cobrimento nominal é a espessura de concreto que envolve as armaduras de uma estrutura, medida a partir da face externa do concreto até a superfície das armaduras.

Figura 05 - Representação do cobrimento nominal



Fonte: Cobrimento Nominal Disponível em:

<http://www.clubedoconcreto.com.br/2015/06/cobrimento-nominal>.

Esse parâmetro é influenciado pela classe de agressividade ambiental, uma vez que ambientes mais agressivos demandam um maior cobrimento para assegurar a proteção das armaduras contra a corrosão e garantir a durabilidade da estrutura.

A tabela a seguir apresenta as classes de agressividade ambiental e suas recomendações de cobrimento nominal para as armaduras em estruturas de concreto.

Tabela 04 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e seu cobrimento nominal

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ^c
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ^b	20	25	35	45
	Viga ^b /pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo ^d	30		40	50
Concreto protendido ^a	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

^a Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: Tabela 7.2 da ABNT NBR 6118:2023

4.4.3 Estados-limites

Conforme a NBR 6118:2023, as estruturas de concreto armado devem ser dimensionadas considerando o estado-limite último (ELU) e o estado-limite de serviço (ELS), definidos da seguinte maneira: o ELU está diretamente relacionado à segurança estrutural, garantindo que a estrutura não perca sua capacidade resistente. Já o ELS diz respeito ao conforto, à durabilidade e à aparência da estrutura, assegurando seu desempenho adequado em condições normais de uso.

4.5 Dimensionamento de Vigas Armadas com aço

4.5.1 Disposições Gerais

Conforme a NBR 6118:2023 no item 14.6.2.4 o vão efetivo de uma viga pode ser calculado a partir da expressão da figura a seguir

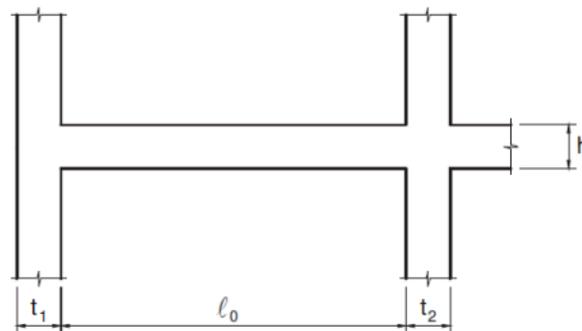
Figura 06 - Representação do vão efetivo

$$\ell_{ef} = \ell_o + a_1 + a_2$$

com:

$$a_1 \leq \begin{cases} t_1/2 \\ 0,3 h \end{cases}$$

$$a_2 \leq \begin{cases} t_2/2 \\ 0,3 h \end{cases}$$



Fonte: adaptado do item 14.6.2.4 - NBR 6118:2023

A altura e largura da viga, conforme Bastos (2021), a preferência dos engenheiros e arquitetos é que as vigas fiquem embutidas nas paredes de vedação, de tal forma que não possam ser percebidas visualmente. Para que isso ocorra, a largura das vigas deve ser escolhida em função da espessura final da parede, a qual depende basicamente das dimensões e da posição de assentamento das unidades de alvenaria. Já a altura da viga existem diversos fatores que influenciam, mas um dos dos mais importante é o vão, por isso uma forma prática de estimar é utilizando a fórmula a seguir

$$h_1 = \frac{\ell_{ef,1}}{12}$$

Equação 1

Lembrando que essa fórmula deve ser utilizada como forma de estimativa, ou seja, em casos específicos, como obras de grande ou pequeno porte, os valores da altura das vigas, considerando uma altura mínima indicada de 25cm, podem precisar de alterações com o objetivo de se adequar melhor a situação.

Conforme a NBR 6118:2023 A armadura mínima de tração, em elementos estruturais armados ou protendidos deve ser determinada pelo dimensionamento da seção a um momento fletor mínimo dado pela expressão a seguir, respeitada a taxa mínima absoluta 0,15%.

Tabela 05 - Taxas mínimas de armadura de flexão para vigas

Forma da seção	Valores de $\rho_{\min}^{(a)}$ (%)														
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retangular	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256
(a) Os valores de ρ_{\min} estabelecidos nesta Tabela pressupõem o uso de aço CA-50, $d/h = 0,8$, $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$. Caso esses fatores sejam diferentes, ρ_{\min} deve ser recalculado. $\rho_{\min} = A_{s,\min}/A_c$															

Fonte: ABNT NBR 6118:2023

Enquanto na armadura máxima de tração a soma das armaduras de tração e de compressão ($A_s + A'_s$) não pode ter valor maior que 4 % A_c , calculada na região fora da zona de emendas, devendo ser garantidas as condições de ductilidade requeridas em 14.6.4.3.

4.5.2 Dimensionamento de vigas utilizando Coeficiente K

Com o intuito de facilitar o cálculo manual, há muitos anos vem se ensinando no Brasil o dimensionamento de vigas com a utilização de tabelas com coeficientes K. Para diferentes posições da linha neutra, expressa pela relação $x = x/d$, são tabelados coeficientes K_c e K_s , relativos à resistência do concreto e à tensão na armadura tracionada (Bastos, 2021).

Para começar a realização do dimensionamento é necessário que se calcule o momento de cálculo que a viga terá que resistir. utiliza-se a fórmula a seguir para obter esse dado:

$$M_d = 0,68b_w \beta_x d^2 f_{cd} (1 - 0,4\beta_x)$$

Equação 2

Com a finalização do cálculo é necessário utilizar a fórmula a seguir para obter o valor de K_c .

$$K_c = \frac{b_w d^2}{M_d}$$

Equação 3

Após concluir o cálculo é necessário definir o concreto utilizado e, com isso, utilizar o anexo 1 para realizar a verificação do coeficiente K_s .

Com esse valor definido pode-se calcular a área de aço necessária para o dimensionamento da viga a partir da fórmula a seguir

$$A_s = K_s \frac{M_d}{d}$$

Equação 4

Com a área de aço da seção de cálculo, utilize as áreas de cada bitola para definir a quantidade de barras permitidas, de modo a suprir a área obtida anteriormente, determinando assim a área de aço efetivada da viga.

4.6 Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro (PRFV)

A fibra de vidro tem se destacado como uma alternativa viável em diversos setores, como automotivo, aviação, náutica, construção civil e, em menor escala, até na área estética. A escolha por esse material deve à sua alta resistência e leveza, características que o tornam altamente eficiente na construção civil, uma das principais aplicações da fibra de vidro é o uso do Polímero Reforçado por Fibra de Vidro (PRFV) em vergalhões, oferecendo uma alternativa de proteção e resistência à corrosão em comparação aos materiais tradicionais.

Figura 07 - Vergalhão de Fibra de Vidro



Fonte: Vergalhões de GFRP Disponível em: <https://brafib.com.br/sobrenos/>

De acordo com Kasai (2022), os vergalhões de fibra de vidro são classificados como elementos compostos, ou seja, materiais formados pela combinação de dois ou mais componentes distintos. As propriedades desses compostos variam dependendo da proporção de cada material utilizado em sua composição.

4.6.1 Características

Conforme Villar e Souza (2024), o PRFV possui características específicas que devem ser consideradas na concepção do projeto executivo e nas respectivas memórias de design. Segundo os catálogos técnicos, as principais propriedades da fibra de vidro incluem ser um nível de material, com alta resistência à tração, à corrosão e à umidade, além de apresentar baixo coeficiente de dilatação, baixo módulo de elasticidade, e baixa condutividade térmica e elétrica.

Figura 08 - Propriedades física-mecânicas

CARACTERÍSTICA	VERGALHÃO DE GFRP
Limite de resistência à tração – Mpa	800 a 1300
Alongamento relativo – %	2,2 a 2,7
Módulo de elasticidade – GPa	50 a 67
Limite de resistência à compressão – MPa	300
Limite de resistência transversal – MPa	150 a 180
Tensão de aderência ao concreto – MPa	16 a 29
Densidade – g/cm ³	1,25 a 2,10
Resistência à corrosão	Não corrosivo
Condutibilidade térmica	Não condutor
Condutibilidade elétrica	Não
Diâmetros produzidos – mm	2 a 32
Comprimento – m	Bitolas até 12mm conforme solicitação do cliente. Acima disso barras de até 12m
Característica ecológica	Não tóxico (pelo grau de influência no organismo humano). Classe 4 de perigo ambiental (pouco perigoso).
Durabilidade	Projetada para não menos de 80 anos

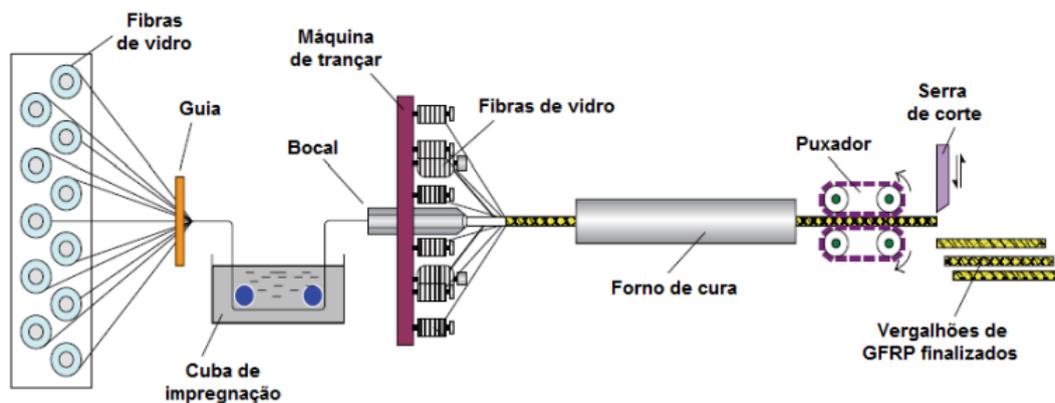
Fonte: Propriedades física-mecânicas Disponível em:

<https://www.haizergroup.com.br/haizervergalhoes>

4.6.2 Produção

Os vergalhões de PRFV são produzidos a partir do método de pultrusão que consiste em tensionar as fibras de vidro com um equipamento e direcioná-las a uma cuba de impregnação, onde entram em contato com uma resina líquida e, em seguida, são moldadas na forma de vergalhões. As nervuras na superfície podem ser feitas pela adição de fibras de vidro. Na figura a seguir é apresentado o processo de fabricação.

Figura 09 - Processo de fabricação de vergalhões de PRFV.



Fonte: MOURA, 2021

De acordo com a ASTM D7957 (ASTM, 2017), os vergalhões de PRFV são produzidos com diâmetros que variam de 6,3 a 32,3 mm.

4.7 Dimensionamentos de Vigas Armadas com Fibra de Vidro

No Brasil, ainda não há uma norma específica para o dimensionamento de vigas de concreto armado com PRFV. Entretanto, a NBR 6118:2023 pode ser utilizada como base de cálculo, complementada pela norma americana ACI 440:2015, que fornece disposições adicionais para o uso de PRFV e adota o mesmo conceito de estados limites em seus dimensionamentos, ou seja, para realização dos cálculos é substituído a tensão do aço pela tensão de ruptura do PRFV.

De acordo com o estudo de Bischoff e Gross (2011) sobre o projeto de deflexão em concreto reforçado com PRFV, o módulo de elasticidade do PRFV resulta em uma flecha superior em comparação com vigas armadas com aço. A baixa ductilidade do PRFV, associada ao seu modo de ruptura imediata, exige um coeficiente de segurança maior, pois cargas acima das previsões no dimensionamento podem levar ao colapso estrutural. Essas características do

concreto armado com PRFV, contudo, são aceitáveis desde que os critérios de serviço e resistência sejam atendidos.

4.8 Dimensionamento de vigas de concreto armado à força cortante

Para realizar o dimensionamento da armadura transversal das vigas, será utilizado o Modelo de Cálculo I, conforme apresentado na NBR 6118:2023. Segundo o item 17.4.2.2 desta norma, o Modelo de Cálculo I adota a treliça clássica de Ritter-Mörch, que assume um ângulo de 45° entre as diagonais comprimidas de concreto (bielas de especificações) e o eixo longitudinal do elemento estrutural. Além disso, a parcela complementar V_c é considerada constante, independentemente da força cortante solicitante V_{Sd} .

Como primeiro passo o cálculo da verificação da compressão diagonal do concreto utilizando valor da força cortante solicitante de cálculo (V_{Sd}) e a força cortante resistente de cálculo (V_{Rd2}), conforme fórmula a seguir.

$$V_{Sd} \leq V_{Rd2}$$

Equação 5

Para que a verificação esteja conforme é necessário que o valor de V_{Sd} seja menor ou igual ao V_{Rd2} .

Para obter o resultado do V_{Rd2} será utilizado a fórmula apresentada a seguir:

$$V_{Rd2} = 0,27 \alpha_{v2} f_{cd} b_w d (1 + \cot g \alpha)$$

Equação 6

A inclinação da armadura transversal (α) deve estar compreendida entre 45° e 90°. Fazendo a inclinação igual a 90° para estribo vertical e levando em consideração a fórmula do α_{v2} .

$$\alpha_{v2} = 1 - \frac{f_{ck}}{250}$$

Equação 7

Utilizando as fórmulas anteriores obtém-se a fórmula abaixo:

$$V_{Rd2} = 0,27 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{cd} b_w d$$

Equação 8

De acordo com Bastos (2021), essa verificação demonstra que não ocorrerá o esmagamento das bielas de compressão e, dessa forma, segue para o dimensionamento da armadura transversal para a viga. Caso a verificação não esteja em conformidade, é necessário adotar medidas como aumentar a seção da viga ou a resistência do concreto, para que o projeto possa continuar.

Após a verificação estar conforme é necessário realizar o cálculo da armadura transversal a partir das fórmulas na figura a seguir

Figura 10 - Cálculo da armadura transversal

$$V_{Rd3} = V_c + V_{sw}$$

onde

$$V_{sw} = (A_{sw} / s) 0,9 d f_{ywd} (\sin \alpha + \cos \alpha)$$

$V_c = 0$ nos elementos estruturais tracionados quando a linha neutra se situa fora da seção;

$V_c = V_{c0}$ na flexão simples e na flexo-tração com a linha neutra cortando a seção;

$V_c = V_{c0} (1 + M_o / M_{Sd,max}) \leq 2V_{c0}$ na flexo-compressão

$$V_{c0} = 0,6 f_{ctd} b_w d$$

$$f_{ctd} = f_{ctk,inf} / \gamma_c$$

Fonte: adaptado da NBR 6118:2023

Com o valor de V_c conhecido a partir das fórmulas apresentadas, calcula-se a parcela da força cortante a ser resistida pela armadura transversal:

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

Equação 9

E, por fim, para ser calculado a quantidade de aço necessária na viga utiliza-se a fórmula a seguir:

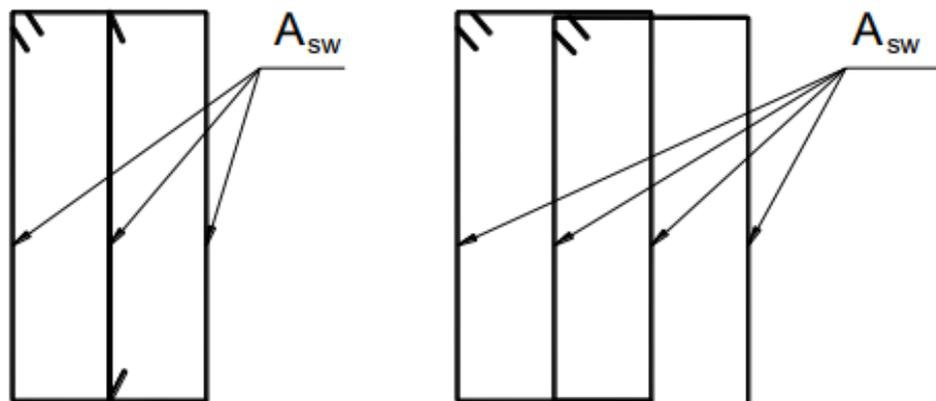
$$\frac{A_{sw,90}}{s} = \frac{V_{sw}}{0,9 d f_{ywd}}$$

Equação 10

É importante ressaltar que o valor obtido retrata a armadura transversal por unidade de comprimento da viga, enquanto o valor do A_{sw} é a área de todos os ramos verticais do estribo.

Conforme Bastos (2021), para estribo de dois ramos, que é o tipo aplicado na grande maioria das vigas, A_{sw} equivale à área dos dois ramos verticais do estribo. Para estribos com três ou quatro ramos, A_{sw} é a área de todos os três ou quatro ramos verticais do estribo.

Figura 11 - Representação dos estribos



Fonte: BASTOS, Paulo Sérgio. Dimensionamento de vigas de concreto armado à força cortante

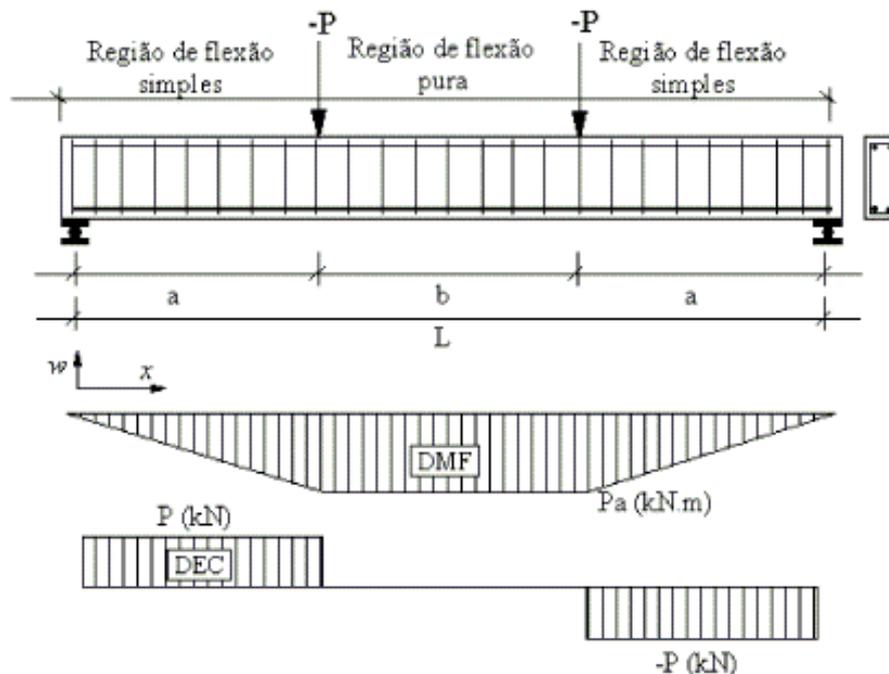
5 METODOLOGIA

O presente estudo foca na comparação entre vigas com armaduras longitudinais de barras de aço e PRFV. Serão desenvolvidos quatro protótipos em laboratório: uma utilizando barras de aço CA 50, sendo esta chamada de viga testemunho, e três com barras de PRFV, sendo nomeadas de PRFV 1 a PRFV 3.

Para a execução desta análise, serão utilizadas duas barras de 10 mm na armadura positiva, localizada na zona de tração da viga, que demanda maior resistência aos esforços, enquanto na armadura negativa serão adotadas duas barras de 6,3 mm, já que essa região não exige grande resistência. O concreto utilizado terá resistência característica de 25 MPa, garantindo o desempenho estrutural adequado.

Após a finalização das vigas citadas, será realizado um ensaio de flexão, denominado ensaio de Stuttgart. De acordo com o Instituto Brasileiro do Concreto, esse ensaio consiste no carregamento gradual em uma peça com duas cargas concentradas simétricas que ao atingir a ruptura, é possível observar flexão pura na parte central da viga e flexão simples (com presença de cisalhamento) nas extremidades.

Figura 12 - Detalhes do Ensaio de Stuttgart



Os critérios de avaliação abrangem as vantagens no processo de fabricação, a carga de ruptura e o comportamento pós-fissuração das vigas. Com base nesses resultados, será possível comparar o desempenho de cada protótipo e determinar a viabilidade do uso de barras de PRFV em estruturas de concreto armado.

5.1 Quantitativo de material

O quantitativo de materiais é essencial para o sucesso de qualquer projeto de construção, pois garante que os materiais necessários sejam estimados de forma correta. Além disso, ter um controle preciso dos materiais permite que a obra seja executada conforme planejado, garantindo qualidade e segurança.

5.1.1 Concreto

Para calcular os materiais necessários para a produção do concreto, é fundamental determinar o volume das vigas executadas. Por isso, o cálculo do volume foi realizado utilizando a tabela apresentada a seguir, garantindo assim a exatidão no dimensionamento e o uso adequado dos materiais.

Tabela 06 - Volume de concreto total

Volume de concreto		
$V = a * b * c$		
a	Largura (Bw)	0,14 m
b	Comprimento (C)	1,25 m
c	Altura (h)	0,25 m
v	Volume da viga	0,044 m ³
Quantidade de vigas		
Vigas com aço		1 Un
Vigas com PRFV		3 Un
Volumes adicionais		
Volume para corpos de prova		0,013 Un
Porcentagem de perda de material		10%
Volume Total		0,206 m³

Fonte: Autor

A quantidade de concreto foi calculada com base no volume das formas das vigas, dos moldes cilíndricos dos corpos de prova, com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, e uma quantidade a mais para realizar o slump test dos concretos.

Lembrando que para ter uma maior segurança na quantidade calculada também foi considerada uma margem de 10% para compensar perdas do material retido na betoneira.

Com isso, foi definido um concreto com resistência característica de 25 MPa, utilizando o traço 1:2,25:3,33:0,6 (cimento CP V ARI: areia média: brita nº 1: água), conforme padronizado no laboratório, para a execução do trabalho. A seguir, são apresentados os componentes utilizados para a produção do concreto.

Tabela 07 - Quantitativo de materiais para produção do concreto

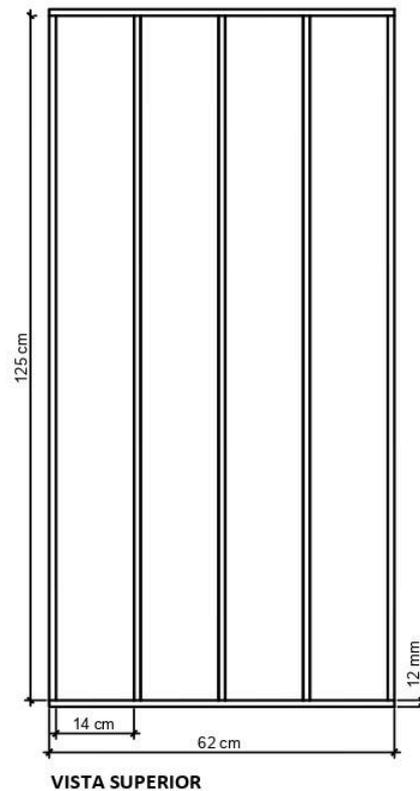
Quantitativo de material		
Cimento CPV ARI	75	kg
Areia média	168,75	Kg
Brita Nº1	249,75	Kg
Água	45	L

Fonte: Autor

5.1.2 Fôrma

Para o quantitativo de material necessário para a montagem das formas, foi realizado um projeto com base nas dimensões da viga especificada no trabalho. A viga possui dimensões de 14 cm x 25 cm x 125 cm, conforme ilustrado no croqui da forma apresentada na figura a seguir.

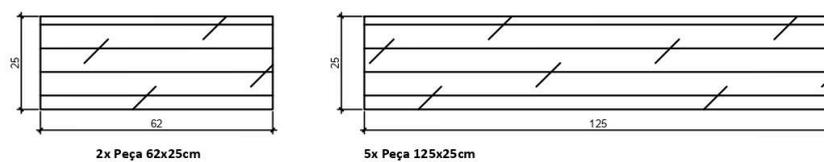
Figura 13 - Croqui da fôrma utilizada



Fonte: Autor

O material utilizado para a montagem das formas foi compensado com espessura de 12 mm, proporcionando a resistência e a estabilidade para realizar a concretagem da viga com maior segurança. A área total de necessidade compensada foi de aproximadamente 1,87 m², considerando apenas as faces laterais e as peças centrais da viga, não sendo necessária uma peça de fundo para a forma, de modo a otimizar o uso do material e reduzir desperdícios.

Figura 14 - Croqui das peças

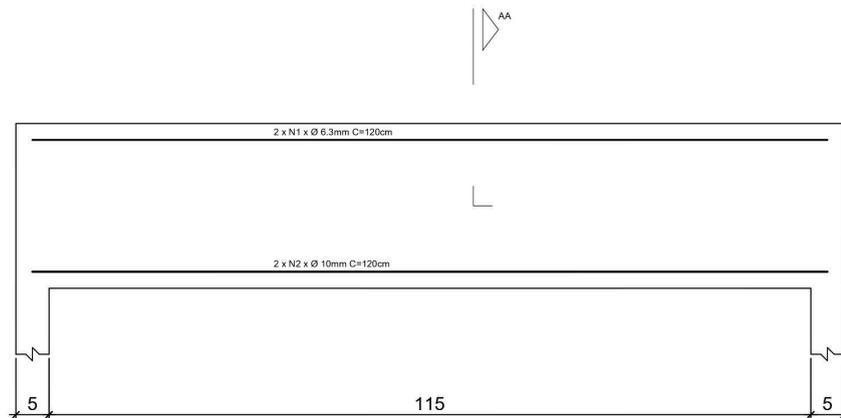


Fonte: Autor

5.1.3 Armadura longitudinal e transversal

Foi dimensionado para cada viga do trabalho em questão 2 barras com diâmetro de 10mm para a parte inferior e 2 barras com diâmetro de 6,3mm para a parte superior como armadura longitudinal da viga e 11 estribos com 5mm distribuídos na viga como armadura transversal. Conforme projeto ilustrado a seguir.

Figura 15 - Projeto estrutural da viga



Fonte: Autor

Com isso, pode-se calcular a quantidade de barras de aço e de PRFV necessárias para produção das vigas do trabalho em questão. A seguir é apresentado a tabela utilizada para quantificar as armaduras.

Tabela 08 - Quantitativo de armadura

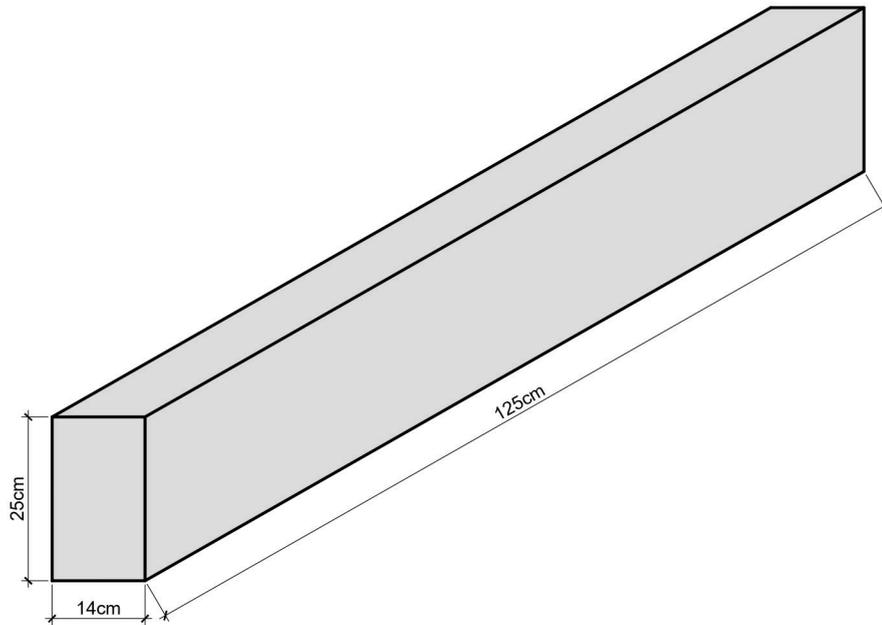
QUANTITATIVO de ARMADURA			
Viga com 14x25x125cm (Bw, Altura e comprimento)			
Barras com 120cm			
Estribos com 72cm			
Barra de aço CA50 10mm	02 Barras	2,40	m
Barra de aço CA50 6.3mm	02 Barras	2,40	m
Barra de aço CA60 5mm	44 Estribos	31,68	m
Barra de PRFV 10mm	06 Barras	7,20	m
Barra de PRFV 6.3mm	06 Barras	7,20	m

Fonte: Autor

5.2 Dimensionamento

As vigas do trabalho em questão possuem 125 cm de comprimento, 14 cm de largura e 25 cm de altura, conforme ilustrado na figura abaixo.

Figura 16 - Dimensões das vigas experimentais



Fonte: Autor

Conforme a NBR 6118:2023 no item 14.6.2.4 o vão efetivo da viga pode ser calculado a partir da fórmula a seguir:

$$l_{ef} = l_o + a_1 + a_2$$

Equação 11

Sendo assim, considerando um apoio de 5 centímetros nas extremidades da viga e um vão total de 125 centímetros, obtém-se o resultado de um vão efetivo de 115 centímetros.

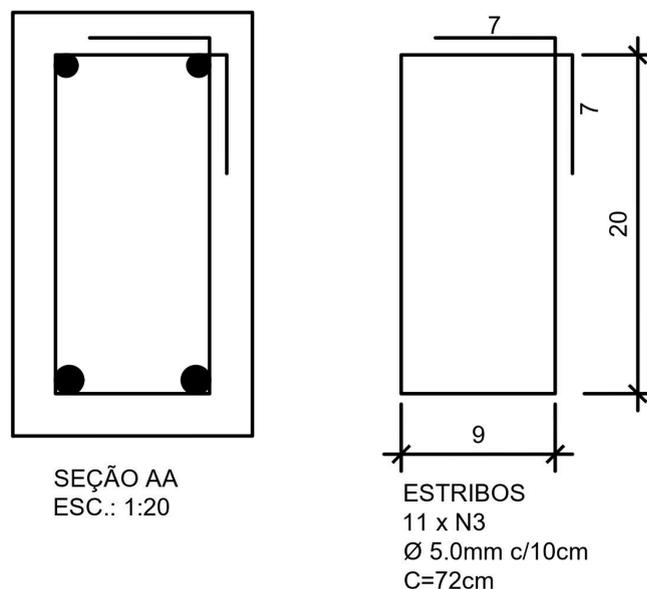
5.2.1 Armadura longitudinal mínima e máxima de flexão

A verificação da armadura longitudinal mínima e máxima foi realizada com base nas recomendações da NBR 6118:2023, complementada por anotações de aula. Para a determinação da armadura mínima, foi utilizada uma taxa de 0,15% da área de concreto, resultando em um valor de 0,525 cm². Para a armadura máxima, considerando-se uma taxa de 4% da área de concreto, obtém-se um valor de 14 cm².

5.2.2 Armadura transversal

De acordo com a NBR 6118:2023, o diâmetro mínimo da barra que compõe o estribo deve ser igual ou superior a 5 mm e inferior a 10 vezes menor que seu Bw. Considerando essas recomendações, foram adotados estribos com diâmetro de 5 mm e espaçamento de 10 cm.

Figura 17 - Representação do estribo



Fonte: Autor

Sendo assim, para uma viga com comprimento total de 1,25 m o número de estribos necessários foi de 11 unidades, utilizando barras de 5 mm como armadura transversal.

5.2.3 Armadura mínima de flexão nas vigas armadas com PRFV

Como relatado anteriormente, o dimensionamento das vigas armadas com PRFV é semelhante ao das vigas armadas com aço. Utilizou-se como referência a norma norte-americana ACI 440:2015, que remete à norma ACI 318:2014 - Requisitos do Código de Construção para Concreto Estrutural.

De acordo com a ACI 318:2014, a área mínima de armadura para uma viga armada com PRFV deve ser o maior valor entre os critérios “a” e “b”, conforme apresentado na figura a seguir.

Figura 18 - Armadura mínima nas vigas armadas com PRFV

$$(a) \frac{3\sqrt{f'_c}}{f_y} b_w d$$

$$(b) \frac{200}{f_y} b_w d$$

Fonte: adaptado – ACI 318:2014

Para a realização dos cálculos, foi estimada uma resistência ao concreto de 25 MPa e definida uma resistência à tração de 26,491kN/cm² para as barras de PRFV. Assim, ao converter esses valores para psi nos cálculos, obtém-se uma área mínima de armadura de 1,56 cm². Com isso, constatou-se que as armaduras longitudinais e transversais tinham a mesma dimensão das utilizadas em vigas armadas com aço.

Conforme as propriedades mecânicas das barras de FRP apresentadas na norma ACI 440:2015, uma barra de polímero reforçada pode ser fabricada com dobras; entretanto, uma vez fabricado, não é possível dobrá-la posteriormente. Essa limitação inviabiliza seu uso como estribo moldado in loco. Devido a essa restrição, optou-se por utilizar barras transversais de aço nas vigas de PRFV, com o mesmo material e dimensões das vigas armadas com aço: ferro com diâmetro de 5 mm e com espaçamento de 10 cm.

5.3 Execução das vigas

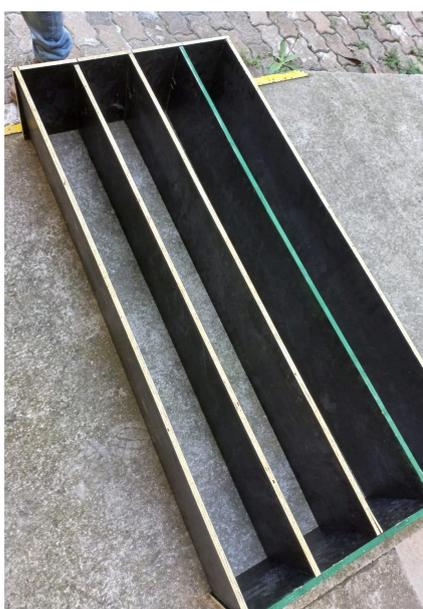
Este trabalho foi realizado no Laboratório do Bloco 50 da Universidade de Santa Cruz do Sul, onde foram utilizadas diversas ferramentas especializadas para a montagem das vigas de concreto. Durante todo o processo, foi adotado procedimentos rigorosos de segurança, incluindo o uso de equipamentos de proteção individual (EPIs), visando garantir a segurança e integridade dos envolvidos nas atividades experimentais.

5.3.1 Montagem das formas

Para a execução das formas, foram disponibilizadas duas folhas de compensados com espessura de 12 mm, que foram utilizadas para realizar os cortes das peças necessárias para montagem.

Foram realizadas marcações com o auxílio de um esquadro, régua e uma caneta, e, em seguida, cortadas duas peças de 63 cm x 25 cm e cinco peças de 125 cm x 25 cm utilizando uma serra circular. As formas foram montadas utilizando pelo menos 3 parafusos para fixação de peças com o objetivo de proporcionar uma maior resistência no momento da fôrma receber o concreto.

Figura 19 - Fôrma concluída



Fonte: Autor

O processo de montagem foi executado com atenção aos detalhes, garantindo a precisão das dimensões das vigas e a qualidade superficial do concreto.

5.3.2 Montagem das armaduras

Conforme apresentado anteriormente, será utilizado no trabalho em questão barras de aço e PRFV de 10 e 6,3 mm como armadura longitudinal e barras de 5mm como armadura transversal. Para a preparação das vigas, foram realizados cortes de 120 cm nas barras de aço de 10 mm e 6,3 mm, e de 72 cm nas barras de 5 mm, utilizando esmerilhadeira e equipamentos de segurança. Já as barras de PRFV de 10 e 6.3 m foram compradas previamente cortadas pelo fornecedor.

Figura 20 - Barras de PRFV previamente cortadas



Fonte: Autor

Após a realização dos cortes, as barras de 5 mm foram dobradas com base de 9 cm, altura de 20 cm e espaçamento de ancoragem de 7 cm, conforme especificado anteriormente.

Figura 21 - Estribos dobrados



Fonte: Autor

Com todas as barras preparadas inicia-se a montagem das vigas utilizando as barras de 6,3mm na parte superior, as barras de 10mm na parte inferior e 11 estribos distribuídos a cada 10 cm na viga.

O processo consiste em apoiar as barras de aço de 10mm nas duas extremidades, distribuir os estribos com a distância conforme citado anteriormente e realizar a amarração do estribo na barra utilizando arame recozido. Após esse processo ser feito na barra de 10mm a armadura é virada e é feito o mesmo processo para as barras 6,3 mm. Esse processo foi executado tanto para a armadura de aço quanto para as armaduras de PRFV.

Figura 22 - Armaduras finalizadas



Fonte: Autor

5.3.3 Concretagem

Com o objetivo de tornar a concretagem mais eficiente, todos os materiais foram separados conforme o quantitativo apresentado anteriormente. Devido ao grande volume de concreto necessário, optou-se pela utilização de duas betoneiras para completar a concretagem da viga, com a separação dos materiais em duas partes iguais. Assim, cada parte consistiu em 37,5 kg de cimento, 84,37 kg de areia, 124,87 kg de brita e 22,5 L de água.

Após a separação do material, procede-se à preparação da fôrma para o recebimento do concreto. Primeiramente, foi colocada uma lona como base da fôrma, com o objetivo de evitar o contato direto do concreto com o solo, dispensando a necessidade de madeira compensada no fundo e facilitando a limpeza ao final do processo. Em seguida, foi colocado um arame em toda a volta da fôrma para garantir uma melhor fixação, aumentando a estabilidade durante a concretagem e prevenindo deformações. Após essas etapas, realizam-se verificações para assegurar que a fôrma está devidamente posicionada e fixada, garantindo a integridade dimensional e o alinhamento da peça estrutural.

Além disso, aplica-se um agente desmoldante nas superfícies internas da fôrma, com o objetivo de facilitar a desforma e evitar aderências indesejadas entre o concreto e a madeira. Para reforçar a fixação na parte superior da fôrma,

posicionaram-se pedaços de madeira, que contribuem para a estabilidade da estrutura durante o processo.

Figura 23 - Fôrma preparada para recebimento do concreto



Fonte: Autor

Com a fôrma finalizada, inicia-se o processo de preparação do concreto que será utilizado na viga. Nesta etapa, os materiais são selecionados cuidadosamente, incluindo cimento, areia, brita e água, seguindo proporções previamente definidas para garantir a qualidade e resistência do concreto.

Primeiramente, adicionam-se a brita e a areia na betoneira, seguidas pela água, que é colocada apenas na quantidade necessária. Após os agregados se misturarem com a água, o cimento é adicionado, assegurando uma mistura homogênea. Durante o processo, a qualidade do concreto é avaliada, verificando-se a necessidade de ajuste na quantidade de água para obter um concreto ideal. Com o concreto pronto, realiza-se o ensaio slump para verificar sua conformidade, resultando em um valor de 16 cm, o que indica uma boa trabalhabilidade do concreto para a aplicação.

Após a preparação do concreto, realiza-se a colocação do material na fôrma, utilizando um carrinho de mão e uma pá para garantir uma aplicação eficiente e controlada. Além disso, são feitos 4 corpos de prova por betoneira com o objetivo de realizar o ensaio de compressão, permitindo avaliar a resistência do concreto utilizado na viga.

Uma vez que todo o concreto é colocado na fôrma, procede-se à vibração do material para eliminar bolhas de ar e assegurar uma compactação adequada, garantindo a integridade e resistência da estrutura. Em seguida, realiza-se o nivelamento da parte superior da viga, facilitando o processo no momento do ensaio.

Figura 24 - Concretagem finalizada



Fonte: Autor

Com a concretagem finalizada, inicia-se o processo de cura, que se estende por 3 dias, com o objetivo de garantir a hidratação adequada do concreto. Durante esse período, a viga é mantida molhada para assegurar que o material mantenha sua resistência e evite perda de qualidade antes da desforma.

Após a conclusão do período de cura, procede-se à desforma das vigas, que envolve a retirada dos materiais de fixação e dos corpos de prova. Esse processo é realizado com cuidado para evitar danos ao concreto, resultando em vigas organizadas e prontas para a realização do ensaio.

Após a desforma, os corpos de prova são submersos em água e as vigas continuam sendo molhadas garantindo que continuem a hidratação necessária para o desenvolvimento adequado da resistência do material.

Figura 25 - Vigas de concreto



Fonte: Autor

Figura 26 - Corpos de prova submersos



Fonte: Autor

5.4 Ensaios executados

Os ensaios realizados neste trabalho tiveram como objetivo principal avaliar o comportamento e desempenho de vigas de concreto armadas com PRFV. Além disso, buscou-se comparar esses resultados com os de vigas armadas com aço, analisando diferenças de resistência e características estruturais entre os materiais, para fundamentar o uso do PRFV como alternativa viável em aplicações estruturais.

5.4.1 Ensaio de tração nas barras

O ensaio de tração nas barras de aço e PRFV foi realizado com o objetivo de avaliar a resistência à tração e a capacidade de deformação destes materiais sob carga, proporcionando uma análise comparativa entre o desempenho do PRFV e o aço. Este ensaio é fundamental para entender o comportamento de ambos os materiais em condições de esforços tensionais, crucial para sua aplicação em estruturas de concreto armado.

Durante a execução, as barras de aço e PRFV foram fixadas em uma máquina de ensaio de tração, onde cargas crescentes foram aplicadas de forma contínua até a ruptura de cada material. Ao longo do teste, foram monitorados parâmetros como a tensão de escoamento, a tensão máxima suportada e a deformação, permitindo uma avaliação detalhada das propriedades mecânicas de ambos os materiais e proporcionando dados essenciais para a comparação de sua performance em condições de tração.

Figura 27 - Barras de aço e PRFV a serem tracionadas



Fonte: Autor

O ensaio foi repetido com três amostras, cada uma cortada com 30 cm de comprimento, para garantir maior precisão nos resultados. A repetição dos ensaios ajudou a minimizar erros e a aumentar a confiabilidade dos dados obtidos.

Figura 28 - Tração na barra de aço



Fonte: Autor

Figura 29 - Tração na barra de PRFV



Fonte: Autor

Embora nas vigas as barras de 6,3 mm, tanto de PRFV quanto de aço, não atuem na tração, ensaios foram realizados com essas barras para aumentar o conhecimento sobre o comportamento de ambos os materiais. Esses testes forneceram informações adicionais sobre as propriedades mecânicas do PRFV e do aço, contribuindo para uma melhor compreensão do desempenho dos materiais.

Figura 30 - Barras de aço e PRFV após o rompimento



Fonte: Autor

Após a execução dos ensaios, são apresentados os resultados das barras de aço e PRFV, incluindo as tensões máximas e as tensões de escoamento obtidas. Esses dados fornecem uma base para a comparação do desempenho mecânico de ambos os materiais. A seguir é apresentada a tabela com os resultados obtidos.

Tabela 09 - Resultado de tração nas barras de aço e PRFV

ENSAIO DE TRAÇÃO NAS BARRAS				
AÇO 10 mm	Tensão Escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Tensão Escoamento (MPa)	Tensão máxima média (MPa)
CP1	596,09	734,48	598,43	739,27
CP2	602,91	741,26		
CP3	596,28	742,08		
PRFV 10 mm	Tensão Escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Tensão Escoamento (MPa)	Tensão máxima média (MPa)
CP1	129,49	211,44	233,76	264,91
CP2	285,09	291,51		
CP3	286,7	291,78		
AÇO 6,3 mm	Tensão Escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Tensão Escoamento (MPa)	Tensão máxima média (MPa)
CP1	609,37	757,38	607,06	758,64
CP2	604,84	756,70		
CP3	606,98	761,83		
PRFV 6,3 mm	Tensão Escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Tensão Escoamento (MPa)	Tensão máxima média (MPa)
CP1	425,15	450,33	379,14	393,23
CP2	328,22	335,44		
CP3	384,04	393,91		

Fonte: Autor

Com os dados apresentados, é possível tirar conclusões sobre o comportamento do aço e do PRFV, permitindo uma comparação detalhada entre os dois materiais em relação às suas propriedades e desempenho nas condições avaliadas.

5.4.2 Ensaio de compressão nos corpos de prova

Para cada betonada, foram produzidos quatro corpos de prova, os quais foram submetidos à força de compressão para avaliar a resistência do concreto.

Figura 31 - Corpo de prova durante o ensaio



Fonte: Autor

Figura 32 - Corpo de prova rompido



Fonte: Autor

Após realização dos ensaios de compressão nos corpos de prova, foi obtido um F_{cm} médio do concreto de 24,57 MPa, conforme a tabela apresentada a seguir.

Tabela 10 - Resultado dos corpos de prova

ENSAIO DE COMPRESSÃO NOS CP's		
BETONADA 1		MÉDIA
CP1	22,44 MPa	24,53 MPa
CP2	21,82 MPa	
CP3	21,18 MPa	
CP4	22,60 MPa	
BETONADA 2		
CP1	27,23 MPa	
CP2	26,95 MPa	
CP3	27,40 MPa	
CP4	26,58 MPa	

Fonte: Autor

Esse ensaio forneceu dados cruciais sobre o comportamento do concreto submetido à compressão, permitindo uma análise detalhada da qualidade do concreto utilizado nas vigas.

Por fim, destaca-se que a resistência do concreto é condicionada por diversos fatores, como a qualidade e a umidade dos materiais utilizados na concretagem, o método de preparação empregado e o tempo de cura, os quais podem influenciar diretamente seu desempenho final.

5.4.3 Ensaio de flexão nas vigas

As vigas ficaram em processo de cura durante 14 dias para que fosse feito o ensaio de compressão nos corpos de prova, após a finalização dos ensaios verificou-se que a média de resistência do concreto atende aos requisitos necessários para a execução do ensaio de flexão nas vigas.

A primeira a ser submetida ao ensaio de Stuttgart foi a viga testemunho conforme figuras a seguir.

Figura 33 - Viga testemunho



Fonte: Autor

A partir da figura a seguir, pode-se verificar que na viga testemunho ocorreu um rompimento próximo ao apoio, o que caracteriza um rompimento por cisalhamento. A viga testemunho rompeu quando submetida a carga 104,8kN.

Figura 34 - Viga testemunho rompida



Fonte: Autor

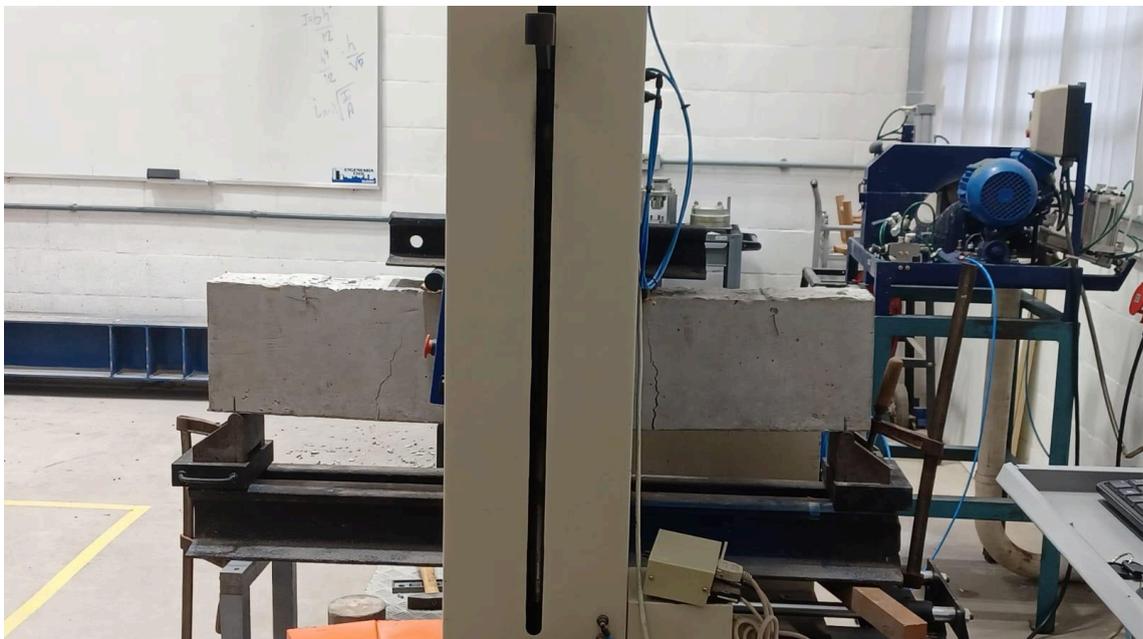
Após a realização dos ensaios nas vigas testemunho, foram testadas as vigas armadas com barras de PRFV, identificadas pelas numerações 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 35 - Viga PRFV 1



Fonte: Autor

Figura 36 - Fissuração da Viga PRFV 1 durante o ensaio



Fonte: Autor

Figura 37 - Viga PRFV 1 rompida



Fonte: Autor

As vigas PRFV 1, PRFV2 e PRFV3, foram submetidas ao mesmo procedimento de ensaio, sendo possível verificar que o seu modo de rompimento foi ocasionado por flexão, ou seja, o surgimento de fissuras na parte central das vigas, tendo início na região tracionada em direção a região comprimida das mesmas, conforme demonstrados nas figuras acima. As vigas PRFV apresentaram uma resistência média de 100,7 kN.

Esses resultados demonstraram uma análise detalhada do desempenho dos materiais em ensaios de flexão, evidenciando a proximidade nos resultados das resistências entre o aço e o PRFV, o que auxilia na conclusão sobre o potencial do PRFV como alternativa viável ao aço em estruturas de concreto armado.

5.5 Cálculo do momento e carga estimada de ruptura

Para a realização do cálculo, foram estabelecidas a resistência de cálculo do concreto à compressão (F_{cm}), com valor de $2,457 \text{ kN/cm}^2$, e a resistência de cálculo ao escoamento do aço (F_{yk}), com $59,843 \text{ kN/cm}^2$, conforme ensaios executados anteriormente, sem a aplicação do fator de segurança, pois no momento de executar o ensaio é necessário calcular levando em consideração o rompimento da estrutura.

Além disso, foi calculada a área de aço necessária para assegurar a resistência estrutural adequada, levando em consideração a utilização de duas barras de 10 mm. Cada barra apresenta uma área de seção transversal de $0,785 \text{ cm}^2$, o que resulta em uma área total de aço de $1,57 \text{ cm}^2$

Tabela 11 - Momento e a carga de ruptura da viga armada com aço

VIGA ARMADA COM AÇO	
1º Passo: Cálculo da distância do X	
$R_{cc} = R_{st}$	
$R_{cc} = 0,68 \cdot B_w \cdot X \cdot F_{cm}$	
$R_{st} = F_{yk}$	
B_w	14 cm
A_s	1,57 cm^2
F_{cm}	2,457 kN/cm^2
F_{yk}	59,843 kN/cm^2
X	4,02 cm
2º Passo: Calcular o d da viga	
$d = h - (\text{Cobrimento} + \varnothing\text{Estribo} + \varnothing\text{Arm. longitudinal}/2)$	
Cobrimento	2,5 cm
$\varnothing\text{Estribo}$	0,5 cm
$\varnothing\text{Arm. longitudinal}$	1 cm
d	21,5 cm
3º Passo: Calcular momento e carga de ruptura estimado da viga	
$M_{d,ruptura} = 0,68 \cdot X \cdot B_w \cdot F_{cm} \cdot (d - 0,4 \cdot X)$	
$P_{,ruptura}/2 = M_{d,ruptura}/(L/3)$	
L	115 cm
$M_{d,ruptura}$	1869,05 kNcm
$P_{,ruptura}$	97,52 kN

Fonte: Autor

Tabela 12 - Momento e a carga de ruptura da viga armada com PRFV

VIGA ARMADA COM PRFV	
1º Passo: Cálculo da distância do X	
$R_{cc} = R_{st}$	
$R_{cc} = 0,68 \cdot B_w \cdot X \cdot F_{cd}$	
$R_{st} = A_s \cdot F_{yd}$	
Bw	14 cm
As	1,57 cm ²
Fcm	2,457 kN/cm ²
Fyd	26,491 kN/cm ²
X	1,78 cm
2º Passo: Calcular o d da viga	
$d = h - (\text{Cobrimento} + \varnothing\text{Estribo} + \varnothing\text{Arm. longitudinal}/2)$	
Cobrimento	2,5 cm
$\varnothing\text{Estribo}$	0,5 cm
$\varnothing\text{Arm. longitudinal}$	1 cm
d	21,5 cm
3º Passo: Calcular momento e carga de ruptura estimado da viga	
$M_{d,ruptura} = 0,68 \cdot X \cdot B_w \cdot F_{cm} \cdot (d - 0,4 \cdot X)$	
$P_{,ruptura}/2 = M_{d,ruptura}/(L/3)$	
L	115 cm
Md,ruptura	864,62 kNcm
P,ruptura	45,11 kN

Fonte: Autor

Tendo em vista que as barras de PRFV não apresentam tensão de escoamento e rompem de forma abrupta, foi adotada a resistência à tração de 26,491 kN/cm².

Por fim, é importante ressaltar que para fins de cálculo o peso próprio da viga foi desconsiderado nos, uma vez que seu valor reduzido não teria impacto significativo no comportamento estrutural da viga.

6 RESULTADOS

Nos ensaios de flexão realizados, foram avaliadas vigas de concreto armado com barras de aço e vigas armadas com PRFV. A tabela a seguir apresenta a comparação entre os valores de ruptura real e os valores estimados calculados para cada tipo de viga:

Tabela 13 - Resultado do ensaio de flexão nas vigas

ENSAIO DE TRAÇÃO NAS VIGAS			
VIGAS	Carga de ruptura calculada (kN)	Carga de ruptura real (kN)	Variação Ruptura Real Ruptura Calculada (kN)
TESTEMUNHA	97,52	104,8	7,47%
PRFV 1	45,11	101,5	125,01%
PRFV 2	45,11	99,72	121,06%
PRFV 3	45,11	100,7	123,23%

Fonte: Autor

Ao analisar a tabela, observa-se que a viga testemunho apresentou um rompimento 7,47% superior ao estimado, um aumento de 7,28kN.

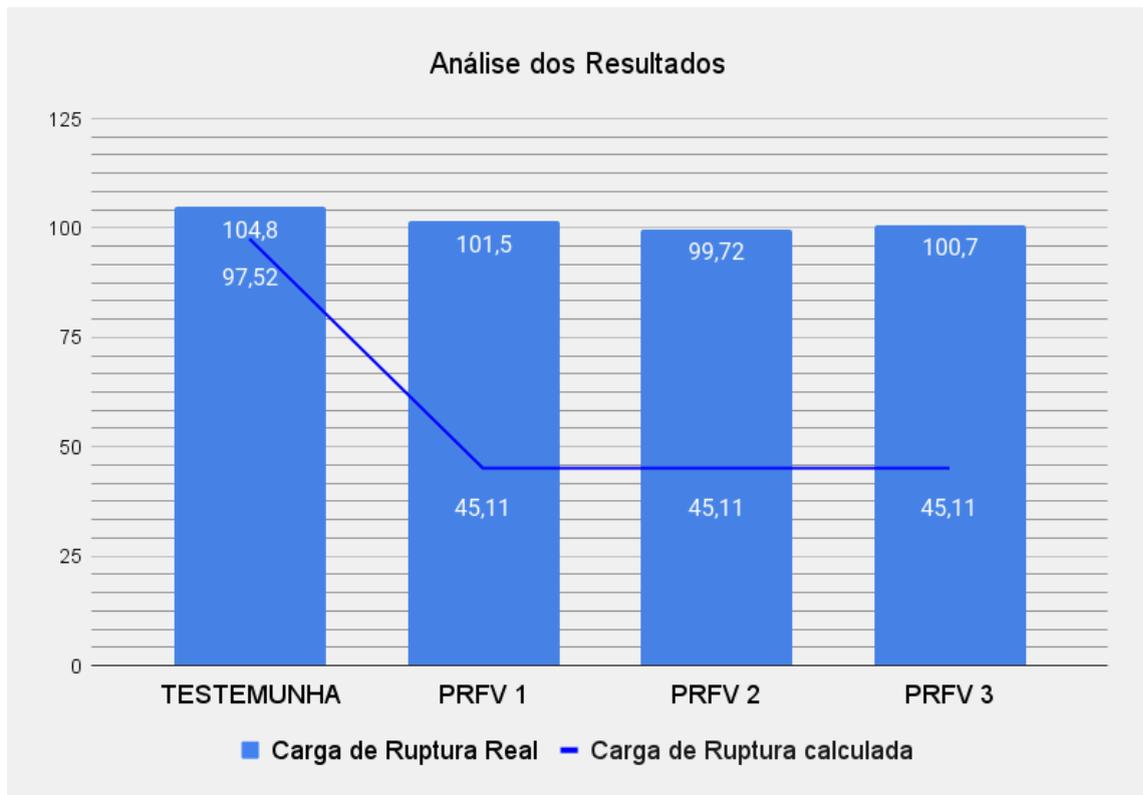
As vigas PRFV 1, 2 e 3 também apresentaram rupturas bem superiores ao estimado, sendo 125,01%, 121,06% e 123,23%, respectivamente. Ao analisar os valores pode-se verificar que as vigas de PRFV apresentaram um rompimento 123,1% em média maior do que o estimado, acarretando num acréscimo de carga médio de 55,53 kN.

Os valores obtidos durante os ensaios foram comparados com as estimativas teóricas com o objetivo de verificar a precisão dos cálculos e o desempenho real das vigas.

6.1 Análise comparativa das vigas

Conforme os ensaios apresentados anteriormente, as vigas PRFV 1, PRFV 2 e PRFV 3 apresentaram respectivamente as resistências de 101,5 kN, 99,72 kN e 100,7 kN e a viga testemunha a resistência de 104,8kN. A proximidade entre os valores é evidenciada nos gráficos a seguir.

Gráfico 01 – Análise dos resultados



Fonte: Autor

Analisando o gráfico apresentado acima, pode-se observar uma diferença significativa entre a carga de ruptura estimada e real nas vigas PRFV 1, 2 e 3. Essa diferença compromete a confiabilidade do material, pois, embora o material tenha suportado durante o teste uma carga maior do que a calculada, não é aceitável considerar um aumento tão expressivo de 123,1%.

Figura 38 - Viga testemunho rompida por cisalhamento



Fonte: Autor

Figura 39 - Viga PRFV rompida por tração



Fonte: Autor

Em última análise, ressalta-se que as vigas PRFV 1, 2 e 3 apresentaram fissuração com o aumento das cargas de forma muito mais rápida do que a viga testemunho, conforme ilustrado nas figuras a seguir.

Figura 40 - Viga PRFV com fissuração



Fonte: Autor

7 CONCLUSÃO

Os ensaios realizados neste estudo possibilitaram uma análise abrangente do desempenho de vigas de concreto armado, utilizando tanto barras de aço quanto de PRFV. O objetivo foi avaliar o PRFV como uma alternativa ao aço em estruturas de concreto armado, comparando suas propriedades mecânicas, como resistência à tração e à flexão, além de analisar a eficiência e o comportamento de cada material sob cargas aplicadas.

Os resultados dos ensaios de flexão indicaram que tanto o aço quanto o PRFV apresentaram boas características de resistência. As vigas de PRFV alcançaram uma resistência média de 100,64 kN, um valor próximo à viga testemunho, que registrou 104,8 kN. Esses resultados confirmam o potencial do PRFV em estruturas de concreto armado como uma alternativa eficaz ao aço quando se trata de resistência à tração.

No entanto, salienta-se que, durante o dimensionamento de estruturas, é essencial que os cálculos apresentem coerência com os resultados experimentais para evitar imprevistos. Nesse sentido, observa-se que as vigas PRFV 1, 2 e 3 apresentam variações significativas entre os resultados experimentais e teóricos, evidenciando desafios na aplicação prática desse material. Além disso, observa-se que as barras de PRF apresentaram resistência à tração em ensaios significativamente inferiores aos valores fornecidos nas bibliografias consultadas, o que reforça a necessidade de uma análise mais detalhada das propriedades do material. Essa disparidade destaca a importância de compreender melhor o desempenho estrutural do PRFV para garantir atenção mais precisa em projetos futuros.

Outro ponto relevante a ser destacado é a fissuração mais rápida das vigas PRFV 1, 2 e 3 à medida que as cargas aumentassem. Durante os ensaios, observou-se que, a partir de 20 kN, as vigas PRFV chegaram a apresentar fissuras visíveis, enquanto na viga de aço as fissuras só apareceram com cargas próximas à ruptura. Embora esse comportamento não tenha comprometido diretamente a

resistência final das vigas PRFV, ele evidencia uma diferença na capacidade de deformação antes da falha.

No que diz respeito à execução de estruturas utilizando PRFV, há aspectos essenciais desse material que merecem destaque. A leveza do PRFV é um dos pontos mais significativos, pois facilita tanto o transporte quanto a montagem das ferragens durante a construção. Comparado ao aço, o PRFV é até quatro vezes mais leve, o que não só contribui para a redução dos custos logísticos, mas também diminui o esforço físico exigido durante a montagem das estruturas.

Entretanto, um desafio a ser considerado na utilização desse material é a dificuldade de encontrar fornecedores que ofereçam o PRFV de forma regular e com as especificações fornecidas. A restrição no número de fornecedores pode impactar a disponibilidade do material e aumentar seus custos, mesmo que o valor unitário do PRFV seja inferior ao do aço. Isso exige um planejamento cuidadoso em projetos que utilizam o PRFV como alternativa ao aço, para garantir que a logística seja adequada.

Por fim, conforme os aspectos referenciados ao longo da conclusão, pode-se afirmar que o PRFV possui um potencial extremamente grande para aplicações em construções. No entanto, é de suma importância realizar uma avaliação criteriosa antes de sua utilização, uma vez que o material ainda apresenta várias inconsistências e não conta com normas regulamentadoras específicas no Brasil que regem sua aplicação. Esses fatores tornam o uso do PRFV mais desafiador e, em muitos casos, menos viável do que o aço, especialmente considerando a necessidade de maior compreensão sobre seu desempenho estrutural.

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de estudos mais específicos sobre as normas que regem o uso de polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV), com o objetivo de criar diretrizes claras e seguras para o dimensionamento de estruturas de concreto armado. Além disso, é importante investigar a utilização de barras de PRFV em diferentes tipos de estruturas, como lajes, pilares e vigas de formatos variados, para ampliar seu campo de aplicação e entender melhor seu desempenho em diversas condições de carga. Outro ponto relevante seria a

comparação entre diferentes tipos de polímeros, a fim de avaliar o desempenho de cada um em relação ao aço, identificando a opção mais eficiente em termos de custo e resistência.

8 REFERÊNCIAS

ACI 318-14 Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete, 2014.

ACI 440.1R-15 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars, 2015

ACI 440.2R-17 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM D7957/D7957M: Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118:2023, Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7480:2007, Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655:2015, Concreto de cimento Portland — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento, 2015

BASTOS, Paulo Sérgio. Dimensionamento de vigas de concreto armado à força cortante. Notas de aula, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São Paulo, 2021.

BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. "Vigas de concreto armado." Estruturas de Concreto II (2015).

BASTOS, Paulo Sérgio. FLEXÃO NORMAL SIMPLES - VIGAS. Notas de aula, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São Paulo, 2021.

ROCHA, Andrea Corrêa et al. Ensaio de Stuttgart: reprodução em laboratório. In: 46º Congresso Brasileiro do Concreto. 2004.

BARROS e MELHADO. Recomendações para a produção de estruturas de concreto armado em edifícios. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

NEVILLE, A. M., "Propriedades do concreto", São Paulo, Ed. Pini, 1997.

VILLAR e SOUZA, Viabilidade de Utilização de Vergalhão de Fibra de Vidro. Revista Boletim do Gerenciamento nº 43 (2024)

MOURA, R. Análise da Durabilidade de Armaduras Poliméricas Reforçadas com Fibra de Vidro Submetidas ao Ambiente Alcalino e a Elevadas Temperaturas. 176 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021.

KASAI, M . ARMADURA DE FIBRA DE VIDRO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO - Curso de Engenharia Civil, UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO", 2022.

BISCHOFF, P. H.; GROSS, S. P. Design approach for calculating deflection of FRP – reinforced concrete. American Society of Civil Engineers, 2011.

FILHO, E.S.A.; REAL, M.V. Estudo Comparativo entre Vigas de Concreto Armadas com Barras de Aço e com Barras de PRF. Vol. 11, Ourinhos, 2018.

ALMEIDA, Luiz Carlos de. Fundamentos do concreto armado. Notas de aula da disciplina, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

dos Santos Abreu Filho, Eduardo, Mauro de Vasconcelos Real. "ESTUDO COMPARATIVO ENTRE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE AÇO E COM BARRAS DE PRF." RETEC-Revista de Tecnologias 11.3 (2018).

COELHO, Ronaldo Sérgio de Araújo. "Concreto armado na prática." São Luís: UEMA Ed (2008).

Westwing Home & Living. Concreto armado: o que é, como funciona e sua importância. Disponível em:

<<https://www.westwing.com.br/guiar/concreto-armado/#:~:text=O%20concreto%20armado%20%C3%A9%20um,a%C3%A7o%20oferece%20resist%C3%Aancia%20%C3%A0%20tra%C3%A7%C3%A3o.>>. Acesso em: 12 set. 2024.

Tecnosil. O que é concreto e quais os principais tipos utilizados na construção?. Disponível em:

<<https://www.tecnosilbr.com.br/o-que-e-concreto-e-quais-os-principais-tipos-utilizados-na-construcao-2/>>. Acesso em: 22 set. 2024.

WEG Home. 6 obras de concreto armado para se inspirar. Disponível em: <<https://www.weg.net/weghome/blog/arquitetura/6-obras-de-concreto-armado-para-se-inspirar/>>. Acesso em: 07 out. 2024.

AecWeb. O que é concreto armado?. Disponível em: <<https://www.aecweb.com.br/revista/materias/concreto-armado-e-solucao-duravel-e-economica/6993>>. Acesso em: 23 out. 2024.

EDUCA CIVIL. 7 Tipos de Concreto e suas Principais Características. Disponível em: <<https://educacivil.com/7-tipos-de-concreto/>>. Acesso em: 22 set. 2024.

Carvalho, Matheus. Viga de Concreto Armado – Guia Completo. Disponível em: <<https://carluc.com.br/projeto-estrutural/viga-de-concreto-armado/>>.

Acesso em: 16 out. 2024.

BLOG DA BRAVER. Principais Aplicações de PRFV na Construção Civil. Disponível em: <<https://braverengenharia.com/aplicacoes-prfv/>>. Acesso em: 24 out. 2024.

ANEXO 1

FLEXÃO SIMPLES EM SEÇÃO RETANGULAR - ARMADURA SIMPLES										
$\beta_x = \frac{x}{d}$	K_c (cm ² /kN)								K_s (cm ² /kN)	Dom.
	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	CA-50	
0,01	137,8	103,4	82,7	68,9	59,1	51,7	45,9	41,3	0,023	2
0,02	69,2	51,9	41,5	34,6	29,6	25,9	23,1	20,8	0,023	
0,03	46,3	34,7	27,8	23,2	19,8	17,4	15,4	13,9	0,023	
0,04	34,9	26,2	20,9	17,4	14,9	13,1	11,6	10,5	0,023	
0,05	28,0	21,0	16,8	14,0	12,0	10,5	9,3	8,4	0,023	
0,06	23,4	17,6	14,1	11,7	10,0	8,8	7,8	7,0	0,024	
0,07	20,2	15,1	12,1	10,1	8,6	7,6	6,7	6,1	0,024	
0,08	17,7	13,3	10,6	8,9	7,6	6,6	5,9	5,3	0,024	
0,09	15,8	11,9	9,5	7,9	6,8	5,9	5,3	4,7	0,024	
0,10	14,3	10,7	8,6	7,1	6,1	5,4	4,8	4,3	0,024	
0,11	13,1	9,8	7,8	6,5	5,6	4,9	4,4	3,9	0,024	
0,12	12,0	9,0	7,2	6,0	5,1	4,5	4,0	3,6	0,024	
0,13	11,1	8,4	6,7	5,6	4,8	4,2	3,7	3,3	0,024	
0,14	10,4	7,8	6,2	5,2	4,5	3,9	3,5	3,1	0,024	
0,15	9,7	7,3	5,8	4,9	4,2	3,7	3,2	2,9	0,024	
0,16	9,2	6,9	5,5	4,6	3,9	3,4	3,1	2,7	0,025	
0,17	8,7	6,5	5,2	4,3	3,7	3,2	2,9	2,6	0,025	
0,18	8,2	6,2	4,9	4,1	3,5	3,1	2,7	2,5	0,025	
0,19	7,8	5,9	4,7	3,9	3,4	2,9	2,6	2,3	0,025	
0,20	7,5	5,6	4,5	3,7	3,2	2,8	2,5	2,2	0,025	
0,21	7,1	5,4	4,3	3,6	3,1	2,7	2,4	2,1	0,025	
0,22	6,8	5,1	4,1	3,4	2,9	2,6	2,3	2,1	0,025	
0,23	6,6	4,9	3,9	3,3	2,8	2,5	2,2	2,0	0,025	
0,24	6,3	4,7	3,8	3,2	2,7	2,4	2,1	1,9	0,025	
0,25	6,1	4,6	3,7	3,1	2,6	2,3	2,0	1,8	0,026	
0,26	5,9	4,4	3,5	2,9	2,5	2,2	2,0	1,8	0,026	
0,27	5,7	4,3	3,4	2,8	2,4	2,1	1,9	1,7	0,026	
0,28	5,5	4,1	3,3	2,8	2,4	2,1	1,8	1,7	0,026	
0,29	5,4	4,0	3,2	2,7	2,3	2,0	1,8	1,6	0,026	
0,30	5,2	3,9	3,1	2,6	2,2	1,9	1,7	1,6	0,026	
0,31	5,1	3,8	3,0	2,5	2,2	1,9	1,7	1,5	0,026	
0,32	4,9	3,7	3,0	2,5	2,1	1,8	1,6	1,5	0,026	
0,33	4,8	3,6	2,9	2,4	2,1	1,8	1,6	1,4	0,026	
0,34	4,7	3,5	2,8	2,3	2,0	1,8	1,6	1,4	0,027	
0,35	4,6	3,4	2,7	2,3	2,0	1,7	1,5	1,4	0,027	
0,36	4,5	3,3	2,7	2,2	1,9	1,7	1,5	1,3	0,027	
0,37	4,4	3,3	2,6	2,2	1,9	1,6	1,5	1,3	0,027	
0,38	4,3	3,2	2,6	2,1	1,8	1,6	1,4	1,3	0,027	
0,40	4,1	3,1	2,5	2,0	1,8	1,5	1,4	1,2	0,027	
0,42	3,9	2,9	2,4	2,0	1,7	1,5	1,3	1,2	0,028	
0,44	3,8	2,8	2,3	1,9	1,6	1,4	1,3	1,1	0,028	
0,45	3,7	2,8	2,2	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1	0,028	
0,46	3,7	2,7	2,2	1,8	1,6	1,4	1,2	1,1	0,028	
0,48	3,5	2,7	2,1	1,8	1,5	1,3	1,2	1,1	0,028	
0,50	3,4	2,6	2,1	1,7	1,5	1,3	1,1	1,0	0,029	
0,52	3,3	2,5	2,0	1,7	1,4	1,2	1,1	1,0	0,029	
0,54	3,2	2,4	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0	0,029	
0,56	3,2	2,4	1,9	1,6	1,4	1,2	1,1	0,9	0,030	
0,58	3,1	2,3	1,8	1,5	1,3	1,2	1,0	0,9	0,030	
0,60	3,0	2,3	1,8	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,030	
0,62	2,9	2,2	1,8	1,5	1,3	1,1	1,0	0,9	0,031	
0,63	2,9	2,2	1,7	1,5	1,2	1,1	1,0	0,9	0,031	

ANEXO 2

Forma da seção	Valores de $\rho_{\min}^{(a)}$ (%)														
	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Retangular	0,150	0,150	0,150	0,164	0,179	0,194	0,208	0,211	0,219	0,226	0,233	0,239	0,245	0,251	0,256

(a) Os valores de ρ_{\min} estabelecidos nesta Tabela pressupõem o uso de aço CA-50, $d/h = 0,8$, $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$. Caso esses fatores sejam diferentes, ρ_{\min} deve ser recalculado.

$$\rho_{\min} = A_{s,\min}/A_c$$

ANEXO 3

Diâmetro (mm)		Massa (kg/m)	Área (mm ²)	Perímetro (mm)
Fios	Barras			
2,4	-	0,036	4,5	7,5
3,4	-	0,071	9,1	10,7
3,8	-	0,089	11,3	11,9
4,2	-	0,109	13,9	13,2
4,6	-	0,130	16,6	14,5
5	5	0,154	19,6	17,5
5,5	-	0,187	23,8	17,3
6	-	0,222	28,3	18,8
-	6,3	0,245	31,2	19,8
6,4	-	0,253	32,2	20,1
7	-	0,302	38,5	22,0
8	8	0,395	50,3	25,1
9,5	-	0,558	70,9	29,8
10	10	0,617	78,5	31,4
-	12,5	0,963	122,7	39,3
-	16	1,578	201,1	50,3
-	20	2,466	314,2	62,8
-	22	2,984	380,1	69,1
-	25	3,853	490,9	78,5
-	32	6,313	804,2	100,5
-	40	9,865	1256,6	125,7