



**Análise comparativa entre vigas de concreto armado em aço e em polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP).**

*Comparative analysis between reinforced concrete beams with steel and glass fiber reinforced polymer (GFRP).*

Gustavo de Melo Borba Teixeira (1); Larissa Lisboa Costa Da Silva (2); Murilo Souza Inacio (3); Nathália Alves de Almeida (4); Pedro Custódio de Oliveira (5); Victor de Farias Magalhães (6); Luciana Tiemi Kataoka de Freitas (7).

- (1) *Graduando em Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, gustavo.dmbt@gmail.com;*
- (2) *Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, lariee.lisboa@gmail.com;*
- (3) *Graduando em Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, murilo\_souzainacio@outlook.com;*
- (4) *Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, nathaliaalmeida2001@gmail.com;*
- (5) *Graduando em Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, pedrinhogogo18@gmail.com;*
- (6) *Graduando em Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, fariasvictor010@gmail.com;*
- (7) *Profª Doutora, Departamento de Engenharia, Universidade Anhembi Morumbi, luciana.kataoka@ulife.com.br.*

### **Resumo**

A possibilidade do uso de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) em substituição ao aço data da década de 50 sendo internacionalmente estudada desde então, o que permitiu a publicação de normas e recomendações para uso do material.

Neste trabalho, as recomendações técnicas para utilização de armaduras compostas por GFRP em estruturas de concreto, publicadas pelo IBRACON/ ABECE são utilizadas para dimensionamento e posterior comparação empírica e teórica entre as vigas armadas com polímero reforçado com fibra de vidro e as armadas com aço considerando a resistência a flexão, o procedimento de moldagem e o comportamento mecânico dos materiais.

Pode-se concluir a partir desta pesquisa que, além de as peças armadas com GFRP possuírem menor peso, também apresentam resultados de comportamento e resistência semelhantes às peças armadas com aço, permitindo estruturas mais duradouras e econômicas a longo prazo, dados o menor uso de aço e de concreto e a baixa manutenção das peças graças às propriedades anticorrosivas das barras de polímero.

*Palavras-Chave: estruturas, resistência, polímero, concreto, durabilidade.*

### **Abstract**

The possibility of using Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) as a substitute for steel dates back to the 1950s has been internationally studied since then, allowing the publication of norms and recommendations for the usage of the material. In this research, the technical recommendations for the use of GFRP-composed reinforcements in concrete structures, published by IBRACON/ ABECE, are used for beam design and empirical and theoretical comparison of GFRP-reinforced beams and steel-reinforced beams, considering their flexural strength, molding procedure, and mechanical behavior of the materials.

From this research, it can be concluded that, in addition to GFRP-reinforced components being lighter, they also exhibit similar behavior and strength results as steel-reinforced components, allowing long-lasting and cost-effective structures given the reduced use of steel and concrete, and the low maintenance due to the anti-corrosive properties of the polymer bars.

*Keywords: structures, strength, polymer, concrete, durability.*



## Introdução

Em busca de medidas sustentáveis a fim de diminuir futuros impactos ambientais desenvolvidos pelas obras de concreto, a utilização de materiais alternativos como o polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP – *Glass Fiber Reinforced Polymer*) reforça a possível substituição do aço no concreto armado, garantindo propriedades semelhantes às do mesmo na construção civil (CARVALHO, 2011). Tavares (2006) registra que nos anos 50 os Estados Unidos foram os pioneiros diante dos estudos primários para obter-se conhecimento do novo material, seguido do Japão e Europa, onde os estudos avançaram na década de 70. Nesta mesma década, obteve-se no Japão investimentos a longo prazo para o desenvolvimento de pesquisas. Nos anos 90, houve um avanço diante dos estudos desenvolvidos anteriormente chegando a materiais de estudos publicados.

Apesar do aço ser efetivo e tradicionalmente utilizado em estruturas de concreto, ele também é o responsável pelas patologias mais perigosas em construções, relacionadas a sua oxidação e enfraquecimento da estrutura através dela. Além disso, a obtenção do aço para construção é agressiva ao meio ambiente, principalmente na questão de emissão de gases e consumo de energia e recursos hídricos (AMARAL, 2013).

Segundo Carvalho (2011), o emprego do aço no concreto armado, especialmente em obras expostas em meios fortemente agressivos trouxe conhecimento consolidado a respeito dos grandes custos de manutenção e baixa expectativa de vida útil das estruturas, uma vez que o aço sofre degradação com a alteração do pH do concreto à medida que ocorre carbonatação, causando a oxidação das armaduras. O emprego do GFRP é uma alternativa para evitar o processo de degradação da armadura, assim aumentando a vida útil das peças de concreto, principalmente em meios agressivos.

Atualmente, existem normas e estudos publicados com foco no dimensionamento de estruturas utilizando armaduras de polímeros reforçados com fibras (FRP – *Fiber Reinforced Polymer*) não só de vidro, como também de carbono e aramida. A norma americana (ACI 440.1R), norueguesa (NS3473), canadense (CHBDC), japonesa (JSCE), holandesa (BISE) e da *Federation International du Béton* (FIB 9.3) tratam o material de maneiras diferentes através de coeficientes de redução baseados nas condições e normas de concreto armado com aço de cada região (DALFRÉ, FERREIRA e MAZZÚ, 2020). No Brasil, foi publicado em 2021 através do IBRACON/ ABECE o manual de práticas recomendadas e metodologia de dimensionamento para armaduras em FRP (CT 303) (Kapelinski, 2021).

De forma a fundamentar e justificar o presente estudo, é apresentado ao leitor termos e conceitos considerados relevantes sobre as barras de polímero reforçado com fibra de vidro. Em ressalva, a pesquisa é importante para suprir a carência de materiais alternativos no mercado e garantir a paridade em comparação ao aço (INEIA, PROL, BRAUN e JUNIOR, 2021). Levando em consideração o crescente cenário da construção civil e a elevada complexidade de execução de obras em questão de economia e durabilidade, as barras GFRP se apresentam como uma alternativa promissora em diversos tipos de estrutura, mesmo que a implementação de novos materiais neste ramo costume ser lenta, devido ao apego aos métodos tradicionais (KASAI, 2022).

Devido a isso, o trabalho tem como principal objetivo a análise comparativa entre o comportamento de vigas armadas com GFRP e vigas armadas com aço em relação a sua resistência a esforços de flexão.

## Revisão Bibliográfica

Dalfré, Mazzú e Parsekian (2021) explicam que “o FRP é um material compósito formado pela combinação de fibras, que são responsáveis pela resistência e rigidez, e uma matriz polimérica, responsável por unir as fibras, protegendo-as contra agentes agressivos, e garantindo a transferência de tensões (MACHADO e MACHADO, 2015). A matriz polimérica normalmente é composta por resinas termoendurecíveis do tipo epóxi, podendo também serem utilizados o poliéster e a resina éster vinílica (SAWPAN *et al.*, 2014).”

A fibra de vidro já é atualmente empregada na construção civil juntamente de outros tipos de fibra para reforço do concreto, tem sua aplicabilidade principalmente em meios agressivos, uma vez que a composição da fibra a torna mais resistente a esse tipo de ambiente em relação ao aço. O emprego e estudo das propriedades do GFRP levantou a possibilidade da utilização do próprio como um substituto ao aço das armaduras. Pinheiro, Muzardo e Santos (2003), resumem as propriedades mecânicas mais importantes do aço para aplicação em estruturas de concreto armado em limite elástico, resistência à tração e a ductilidade, propriedades do aço que de acordo com a levantamento feito por Carvalho (2011) podem em sua maioria ser atendidas ou até mesmo superadas por vergalhões feitos com GFRP, conforme ilustrado na tabela 1. Isso torna o material uma das melhores opções para substituição do aço, uma vez que atende as propriedades mecânicas necessárias.

Tabela 1 – Propriedades referentes ao aço e à fibra de vidro

Propriedade	Aço	GFRP
Tensão de escoamento (MPa)	276 a 517	N/A
Resistência à tração (MPa)	483 a 690	483 a 1600
Módulo de elasticidade (GPa)	200	35 a 51
Deformação no escoamento (%)	0,14 a 0,25	N/A
Deformação na ruptura (%)	6,0 a 12,0	1,2 a 3,1

Fonte: Ineia, Pol, Braun e Junior, adaptado (2021).

A principal diferença nas propriedades entre barras de aço e de GFRP está em seu módulo de elasticidade e tensão de escoamento. Conforme ilustrado na figura 1 e apontado por Dalfré, Mazzú e Parsekian (2021), as barras de GFRP possuem módulo de elasticidade equivalente à em média 25% do módulo de elasticidade do aço, enquanto seu comportamento de ruptura é frágil, sem patamar de escoamento, ao contrário do aço que possui comportamento dúctil.

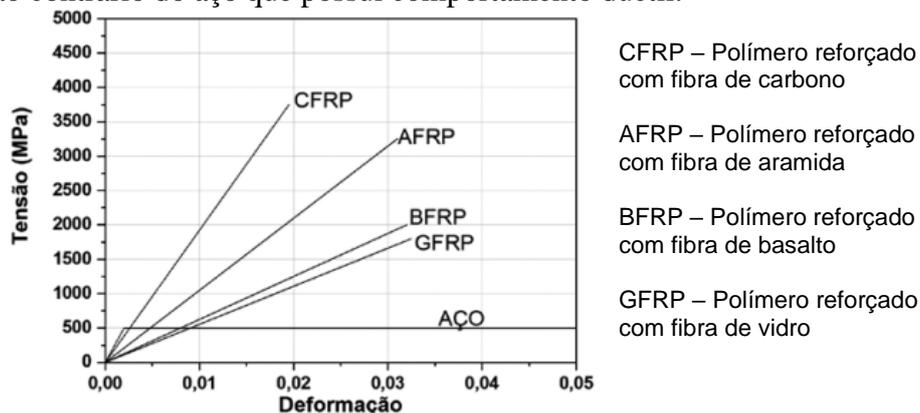


Figura 1 - Gráfico de tensão x deformação do aço e polímeros reforçados com fibras (DALFRÉ, MAZZÚ e PARSEKIAN, 2021)



A ruptura frágil das barras de GFRP requer uma abordagem diferente para dimensionamento à flexão, onde os modelos de cálculo se alteram dependendo do que governará a ruptura da peça, a armadura ou o concreto. Ainda assim, o dimensionamento segundo o CT 303 (2021) é análogo ao demonstrado na NBR 6.118 (2014) para concreto armado com aço.

Diante das disparidades técnicas dos materiais em estudo, Kapelinski (2023), correlaciona características que reafirmam a argumentação sob utilização do GFRP de Pinheiro, Muzardo e Santos (2003), que tornam a sua utilização viável, analisando outras propriedades além das mecânicas, como: peso específico menor que ao aço, térmica e eletricamente não condutora, menor cobrimento de concreto, fácil demolição ao ser aplicadas em estruturas provisórias, entre outras, englobam o glossário de informações necessárias para levantar os pontos principais para defender de sua utilização. As principais vantagens e desvantagens da aplicação do GFRP são vistas no quadro 1.

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens da aplicação do GFRP em estruturas de concreto

Vantagens	Desvantagens
Alta resistência à tração longitudinal	Ruptura à tração frágil, sem escoamento
Resistência à corrosão e ataques químicos	Baixa resistência transversal
Não sofre influências eletromagnéticas	Menor módulo de elasticidade
Baixa densidade	Comportamento anisotrópico
Alta resistência à fadiga	Susceptíveis a danos sob ação de radiações ultravioleta
Térmica e eletricamente não condutor	Alto coeficiente de expansão térmica
Menor cobrimento de concreto	Susceptível ao fogo

Fonte: ACI 440.1R (2015)

Os estudos de Inea, Pol, Braun e Junior (2021) trazem aplicabilidades da fibra de vidro em diversas obras de engenharia, como pontes, viadutos e edifícios, ressaltando sua leveza e durabilidade. Há pontos a serem analisados em ganhos de logística e custo de mão de obra, a partir da medida que a GRFP é mais leve e otimiza o tempo de instalação. Ao considerar orçamentariamente, há um ganho de redução de custos das obras garantindo as mesmas propriedades de resistência.

Em relação a previsibilidade de comportamento, apesar de ser um material relativamente recente, Tavares (2006) cita que apesar da dificuldade de manuseio e montagem devido ao desconhecimento e leveza do material, os resultados foram atingidos de maneira esperada. Kapelinski (2021) mostra em sua dissertação que as vigas armadas com GFRP possuem comportamento semelhante às vigas armadas com aço, inclusive em relação ao momento resistente, e Bandeira, Junior e Prizskulnik (2006) apontam que as peças com GFRP que possuem a ruptura governada pelo concreto possuem previsão de comportamento mais precisas e confiáveis do que aquelas com a ruptura governada pela armadura.

## Materiais e Metodologia

Nesta pesquisa foram desenvolvidas seis vigas, sendo três com armadura longitudinal em GFRP e três em aço para a realização da análise comparativa entre ambas. Neste item serão apresentadas as características das peças e dos materiais utilizados, bem como os métodos adotados para a execução. Todos os ensaios experimentais foram realizados no laboratório da Universidade Anhembi Morumbi, Campus Paulista.

### Dimensionamento

Para o pré-dimensionamento das vigas, foram adotadas largura e altura que se enquadram nos requisitos da NBR 6.118 (2014) e comprimento em conformidade com o mínimo solicitado pela NBR 5.738 (2015). A partir das premissas citadas, as dimensões das vigas foram definidas conforme apresentado na figura 2.

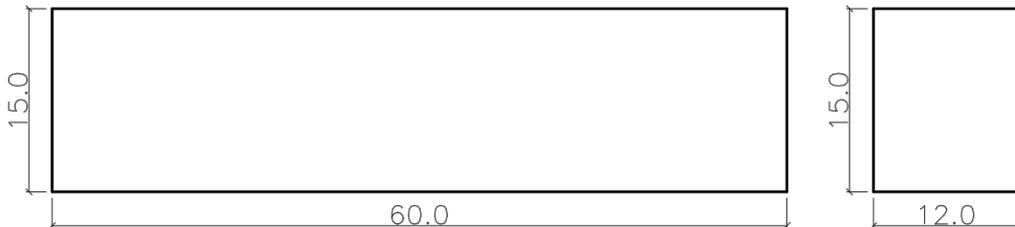


Figura 2 - Dimensões de viga adotadas, cotas em centímetros (Autores, 2023)

Para o dimensionamento, foram consideradas além do peso próprio estimado das peças, duas cargas concentradas atuando com valor de 18kN posicionadas conforme requisito de ensaio da NBR 12.142 (2010), apresentado na figura 3. A carga aplicada foi escolhida baseada na capacidade total do equipamento disponível para ensaio.

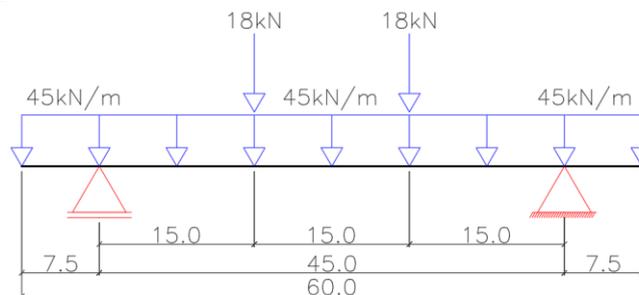
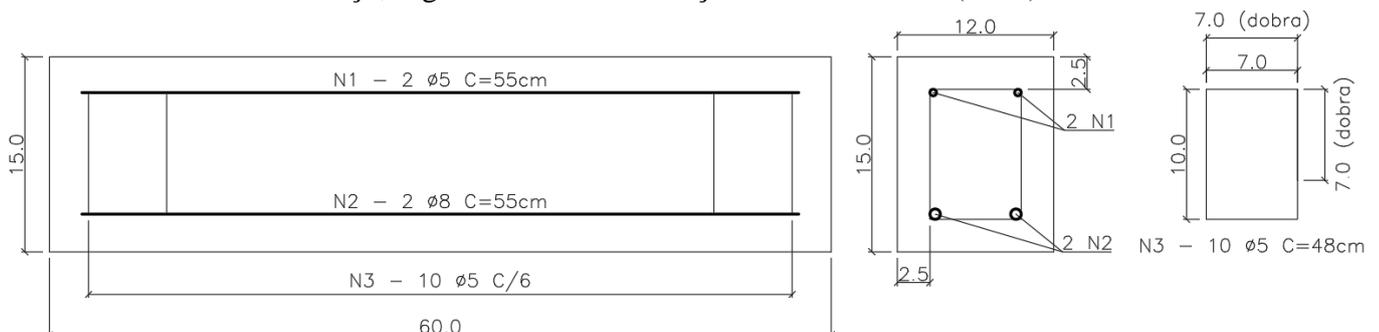


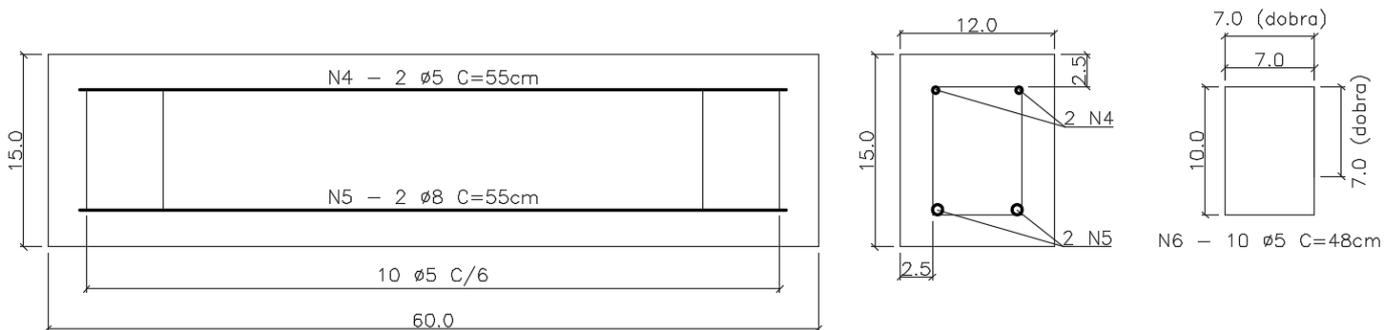
Figura 3 – Diagrama de aplicação de cargas, cotas em centímetros (Autores, 2023)

A partir do carregamento, foram calculados os esforços solicitantes nas peças e dimensionadas as armaduras longitudinais e transversais (figuras 4 e 5). Para o modelo de viga armada em aço foram utilizados os procedimentos prescritos na NBR 6.118 (2014), enquanto para a armadura em GFRP foram utilizadas as recomendações da CT 303 (2021). As armaduras transversais de ambos os modelos foram dimensionadas em aço, seguindo as recomendações da NBR 6.118 (2014).



LISTA DE BARRAS - MODELOS EM AÇO					
N	Material	Ø(mm)	Qty.	Comprimentos	
				Unidade (cm)	Total (m)
1	Aço CA-50	5	2	55	1,10
2	Aço CA-50	8	2	55	1,10
3	Aço CA-50	5	10	48	4,80

Figura 4 - Detalhamento dos modelos armado em aço



LISTA DE BARRAS - MODELOS EM GFRP					
N	Material	Ø(mm)	Qty.	Comprimentos	
				Unidade (cm)	Total (m)
4	GFRP	5	2	55	1,10
5	GFRP	8	2	55	1,10
6	Aço CA-50	5	10	48	4,80

Figura 5 - Detalhamento dos modelos armados em GFRP

### Materiais

O desenvolvimento do projeto foi realizado através da colaboração dos encarregados e funcionários da empresa Zigurate e do Consórcio AeroGru, mediante ao fornecimento de materiais e mão de obra necessários para a execução.

A princípio, foram fabricadas seis formas de madeirite (figura 6), seguindo as medidas especificadas no projeto.

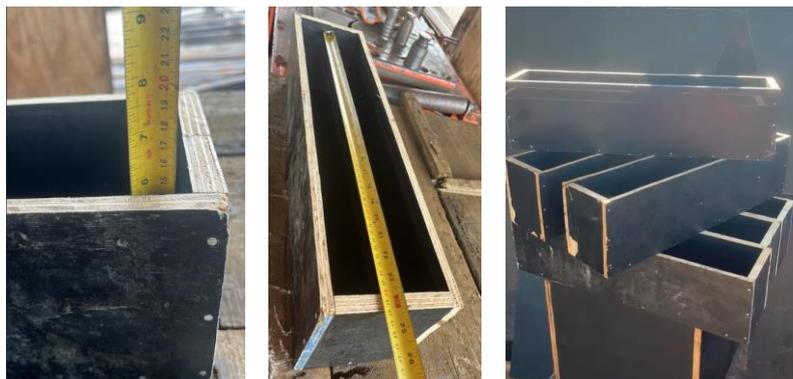


Figura 6 - Formas para moldagem das vigas (Autores, 2023)

Além das formas para moldagem das vigas, foram separadas nove formas cilíndricas (figura 7) para moldagem de corpos de prova para ensaio de resistência a compressão do concreto, obedecendo as

dimensões de moldagem da NBR 5.738 (2015). As dimensões de todas as formas utilizadas podem estar apresentadas na tabela 2.



Figura 7 - Forma para moldagem de corpos de prova (Autores, 2023)

Tabela 2 – Formas para moldagem

Forma	Aplicação	Quantidade	Dimensões (cm)
Prismática	Vigas	6	12x15x60
Cilíndrica	Corpos de prova	9	φ10x20

Fonte: Autores, (2023)

## Armaduras

### Aço

Foi utilizado aço CA-50 para a obtenção dos estribos, que foram dobrados manualmente pelos armadores do consórcio através de chave apropriada para a atividade (figura 8).



Figura 8 - Dobra de aço em canteiro (Autores, 2023)

O aço CA-50 utilizado para as armaduras longitudinais também foi fornecido pela AeroGru e cortado em obra de acordo com as especificações do projeto.

### GFRP

Os vergalhões de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) apresentados na figura 9, foram fornecidos pela Fama Fiberglass já nas dimensões de projeto.



Figura 9 - Vergalhões de GFRP (Autores, 2023)

As armaduras transversais e longitudinais foram amarradas com arame e colocadas nas formas para concretagem com espaçadores de 25mm conforme especificações de projeto e indicado na figura 10. As propriedades das barras utilizadas para dimensionamento estão apresentadas na tabela 3, onde foram adotados os valores mínimos estabelecidos pela NBR 6.118 (2010), NBR 7.480 (2022) e CT 303 (2021).



Figura 10 - Armaduras de aço, GFRP e espaçador utilizado (Autores, 2023)

Tabela 3 – Propriedades das barras utilizadas no dimensionamento

Propriedade	Unidade	CA-50	GFRP
Resistência característica de escoamento	MPa	500	800
Módulo de elasticidade	GPa	210	50

Fonte: Autores, (2023)

## Concreto

O concreto utilizado foi fornecido pela concreteira Conereserv,  $f_{ck}=30$ , com traço conforme apresentado na figura 11 e quadro 2.

Qualidade		TABELA DE TRAÇOS - ESTRUTURAIS							CEML	
Código Interno/Usina	FCK	Usina	Slump Inicial [mm]	Slump Final [mm]	Cimento [Kg]	Consumo Cimento [kg/m³]	Consumo Água [litros/m³]	Relação água/cimento	Aditivos	
									Adicionados na usina [Litros/m³]	Adicionados em campo [Litros/m³]
CEML-111	30	Conereserv	-	220±30	CP III 40 RS - CSN	400	220	0,550	POLIFUNCIONAL - MURAPLAST FK 300 [3,2 litros/m³]	-

Figura 11 - Traço do concreto utilizado (CEML, adaptado, 2023)

Quadro 2 - Traço detalhado do concreto

Material	Quantidade (kg/m <sup>3</sup> )
Cimento CPIII 40-RS	400,00
Areia quartzo	507,00
Areia artificial (granito)	298,00
Brita 0 (granito)	882,00
Água	225,00
Aditivo plastificante multifuncional de pega normal – Muraplast FK 300	3,00

Fonte: CEML, adaptado (2023)

Os agregados utilizados no concreto possuem a caracterização conforme a NBR 7.211 (2022) representada a partir das curvas nas figuras 12, 13 e 14, de modo a garantir que a qualidade do concreto esteja conforme as especificações de projeto.

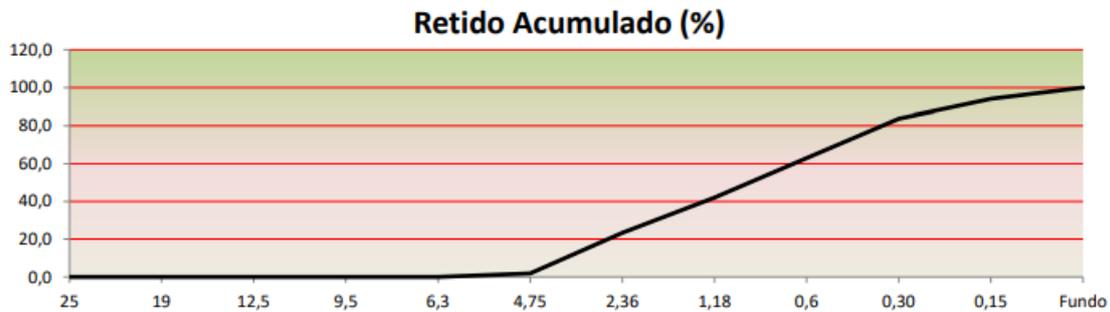


Figura 12 - Granulometria do agregado miúdo, areia artificial - granito (Concreserv, 2023)

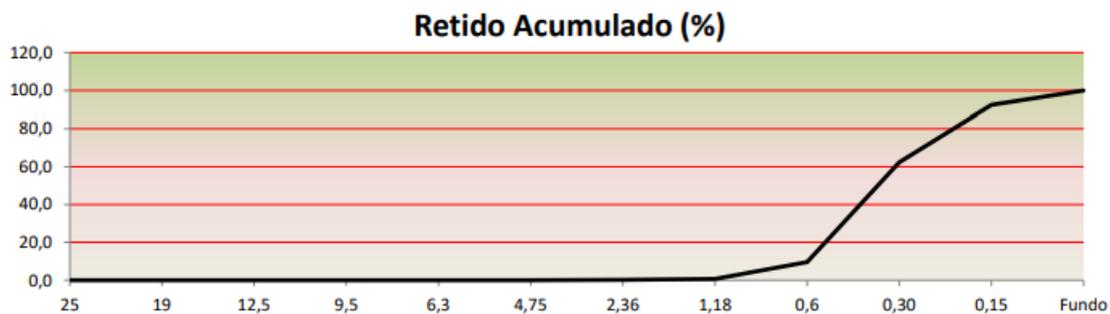


Figura 13 - Granulometria do agregado miúdo, areia de quartzo (Concreserv, 2023)

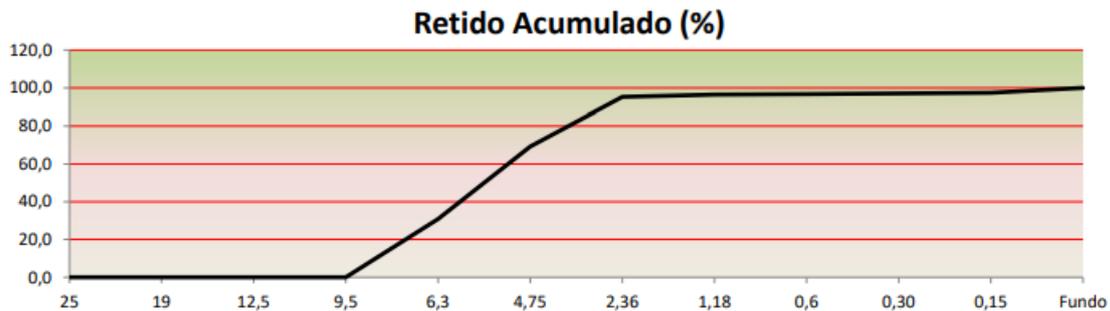


Figura 14 - Granulometria do agregado graúdo, brita 0 (Concreserv, 2023)

O concreto ao ser recebido em obra foi submetido ao ensaio de abatimento do tronco de cone (figura 15) conforme a NBR 16.889 (2020), apresentando um resultado de abatimento igual à 25cm.



Figura 15 - Abatimento do tronco de cone medido em obra

### Moldagem

O último passo para a execução do projeto das vigas foi a moldagem, que ocorreu no canteiro de obras da Obra Monotrilho Leste, no distrito de São Mateus, em São Paulo. Iniciou-se a concretagem, ilustrada pela figura 16, pelas vigas e logo após os corpos de prova, com a moldagem dos corpos de prova seguindo o especificado pela NBR 5.738 (2015) e vibração feita manualmente. As condições climáticas no dia da concretagem eram de chuva e alta umidade relativa do ar, de acordo com o levantamento apresentado na figura 17.



Figura 16 - Processo de concretagem (Autores, 2023)

#### Resumo de dados para 18 de Abril de 2023:

● Temperatura Máxima	24 °C	15:00	● Temperatura Mínima	19 °C	05:00
● Umidade máxima	100.0 %	13:00	● Umidade mínima	78.1 %	01:00
● Pressão máxima	1010 hPa	00:00	● Pressão mínima	1004 hPa	19:00
● Radiação máxima	-- W/m2		● Radiação mínima	-- W/m2	
● Velocidade do vento (Máx)	27.8 km/h	17:10	● Rajadas máximas do vento	42.6 km/h	
● Precipitação acumulada	-- mm				

Figura 17 - Levantamento meteorológico de São Paulo no dia da moldagem (tempo.com, 2023)

Após 48 horas de secagem, foi feito o transporte das vigas e corpos de prova para a obra do AeroGru em Guarulhos, onde foram cuidadosamente desmoldados e identificados para dar início a cura por imersão, seguindo as recomendações da NBR 5.738 (2015), até posteriormente, com a idade de 6 dias, quando todas as peças foram transportadas para o laboratório do campus Paulista da Universidade Anhembi Morumbi, onde a cura e rompimento das peças aconteceram.

### Ensaio laboratoriais

Inicialmente foram feitos testes de resistência a compressão dos corpos de prova cilíndricos de concreto de acordo com o descrito na NBR 5.739 (2018), e o ensaio de resistência da tração na flexão conforme a NBR 12.142 (2010). O cronograma de rompimento das peças foi definido conforme a tabela 4.

Tabela 4 - Rompimento das peças moldadas

Peça	Quantidade	Idade de rompimento (dias)
Corpo de prova cilíndrico	3	7
Corpo de prova cilíndrico	3	14
Corpo de prova cilíndrico	3	28
Vigas armadas com aço (VA)	3	28
Vigas armadas com GFRP (VF)	3	28

Fonte: Autores (2023)

### Equipamentos

Para realização dos ensaios de resistência à compressão, os corpos de prova tiveram suas superfícies retificadas utilizando a máquina de retificação disponível no laboratório do campus Paulista da Universidade Anhembi Morumbi (figura 18).



Figura 18 - Máquina para retifica utilizada (Autores, 2023)

Para os ensaios de compressão e de tração na flexão, foi utilizada a prensa Erca, modelo PEH 100, com capacidade máxima de 100 toneladas (figura 19).



Figura 19 - Prensa hidráulica Erca utilizada (Autores, 2023)

Para o ensaio de resistência a tração na flexão das vigas, foi utilizada junto à prensa aparatos de apoio à viga (figura 20), de modo a distribuir a carga aplicada conforme o procedimento exposto na NBR 12.142 (2010). Os aparatos possuem apoios reguláveis em questão de altura e distanciamento, e foram ajustados conforme instruções da norma e exposto em projeto (figura 3).



Figura 20 - Aparatos de apoio à viga (Autores, 2023)

A partir dos resultados obtidos foram feitas as comparações com os modelos de cálculo e entre os dois modelos de viga, com foco no comportamento durante o ensaio e carga máxima aplicada até a ruína das peças, com base nos dados reais de resistência do concreto e peso próprio das peças.

## Resultados e Discussões

Apesar de Tavares (2006) afirmar dificuldade no manuseio e montagem das armaduras com GFRP, a parte prática desde trabalho não sofreu nenhuma dificuldade. Vale reafirmar que as barras utilizadas foram fornecidas já nas dimensões de projeto e a armadura montada por armadores que não conheciam o material, além das peças dimensionadas serem muito menores do que as utilizadas pela autora citada em sua dissertação.

A partir dos dados obtidos em laboratório, foi calculada a resistência à compressão característica do concreto (tabela 5) a partir dos resultados experimentais obtidos aos 7, 14 e 28 dias (figura 21).

Tabela 5 – Controle do concreto por amostragem total

Idade (dias)	CP (nº)	Carga máxima alcançada (kN)	$f_c$ (MPa)	$f_{cm}$ (MPa)	$f_{ck}$ (Mpa)
7	1	128,40	15,89	20,30	15,89
	2	171,50	21,97		
	3	181,20	23,04		
14	1	175,70	22,30	29,80	22,30
	2	267,00	33,57		
	3	262,40	33,55		
28	1	343,10	43,80	43,11	34,42
	2	406,50	51,11		
	3	273,30	34,42		

Fonte: Autores (2023)

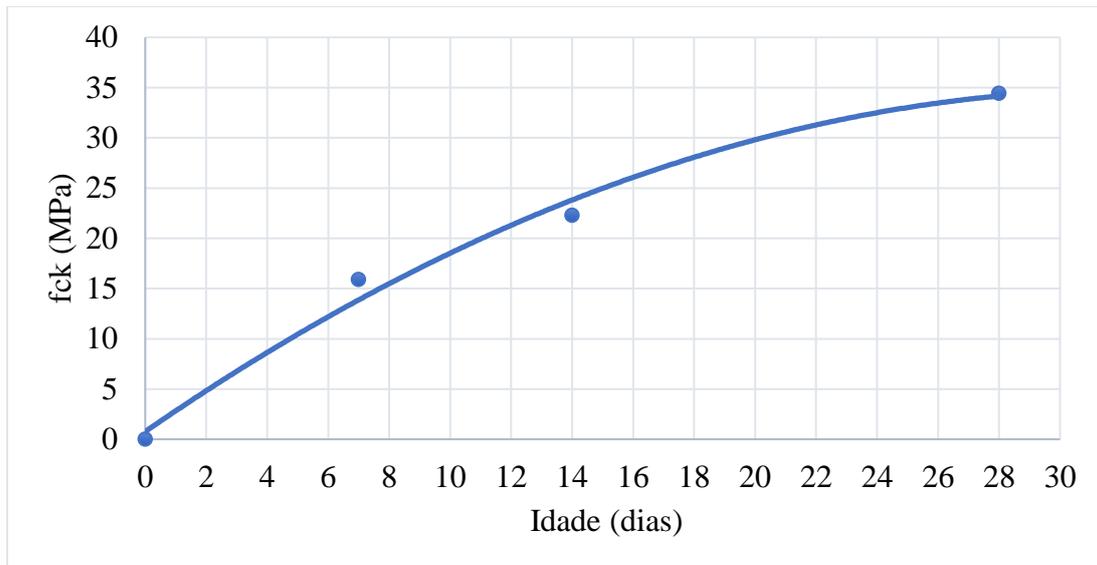


Figura 21 - Gráfico de ganho de resistência do concreto (Autores, 2023)

Ambas as vigas utilizadas nos ensaios foram pesadas, sendo que as vigas armadas com GFRP registraram uma massa média 3,41% menor do que as vigas armadas inteiramente em aço, conforme registrado na tabela 6.

Tabela 6 – Pesos e carga permanente calculada

Material	Modelo	Peso (kg)	Peso médio (kg)	Carga permanente (kN/m)	Carga permanente média (kN/m)
Aço	VA1	26,34	26,41	0,4390	0,4402
	VA2	26,80		0,4467	
	VA3	26,10		0,4350	
GFRP	VF1	25,78	25,51	0,4297	0,4252
	VF2	25,16		0,4193	
	VF3	25,60		0,4267	

Fonte: Autores (2023)

O dimensionamento realizado a partir dos dados experimentais de peso constam na tabela 7. Observa-se que seguindo os procedimentos de cálculo da CT 3030 (2021) para vigas armadas com GFRP (VF) com ruptura governada pelo concreto e da NBR 6.118 (2014) para as vigas armadas com aço (VA), a linha neutra calculada das primeiras possui altura equivalente 218% da altura das vigas com aço com a mesma área de armadura longitudinal.

A grande diferença pode ser explicada pelo método de cálculo utilizado, onde para o aço é considerado principalmente as dimensões da viga, enquanto para o GFRP o fator que mais impacta na profundidade da linha neutra é a taxa de armadura longitudinal. Além disso, apesar do momento de fissuração calculado se apresentar semelhante em todos os modelos com diferença de apenas 0,95%, o momento resistente calculado através das recomendações da norma e manual citados das vigas com GFRP chega a 208% da capacidade calculada para as vigas com aço, graças a maior influência da armadura de GFRP na definição da linha neutra.

Tabela 7 – Momentos calculados para os valores reais de carga permanente e  $f_{ck}$  do concreto

Viga	Carga aplicada (kN)	Momento solicitante (kNm)	Linha neutra (cm)	Momento resistente (kNm)	Momento de fissuração (kNm)
VA1	36,00	2,7099	1,01	2,7099	2,1638
VA2	36,00	2,7101	1,01	2,7101	2,1638
VA3	36,00	2,7098	1,01	2,7098	2,1638
VF1	36,00	2,7097	2,20	5,6441	2,1431
VF2	36,00	2,7094	2,20	5,6441	2,1431
VF3	36,00	2,7096	2,20	5,6441	2,1431

Fonte: Autores (2023)

### Rompimento das vigas e resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência a tração na flexão foi realizado em todas as vigas até o esmagamento do concreto. Os resultados são apresentados na tabela 8. Em relação a carga de ruptura as vigas de aço possuem resistência média a tração na flexão 16,13% superior às vigas de GFRP.

Tabela 8 – Resistência empírica aos esforços de tração na flexão

Modelo	Carga (kN)	Fct (Mpa)	Fct médio (Mpa)
VA1	85,70	19,04	16,93
VA2	73,30	16,29	
VA3	69,60	15,47	
VF1	59,20	13,16	14,20
VF2	65,70	14,60	
VF3	66,80	14,84	

Fonte: Autores (2023)

Observando individualmente cada peça, observa-se que as vigas VA1 e VF1 apresentaram carga de ruptura com diferença muito discrepante em relação as demais vigas dos respectivos modelos. Assim, pode-se excluir esses resultados, chegando a um resultado para as vigas do modelo VA 7,3% superior às demais, conforme a tabela 9.

Tabela 9 – Resistência empírica aos esforços de tração na flexão, desconsiderando os resultados mais discrepantes de cada modelo

Modelo	Carga (kN)	Fct (Mpa)	Fct médio (Mpa)
VA2	73,30	16,29	15,88
VA3	69,60	15,47	
VF2	65,70	14,60	14,72
VF3	66,80	14,84	

Fonte: Autores (2023)

Apesar do desempenho superior das armaduras de aço, as armaduras de GFRP ainda assim resistiram a carga para que foram projetadas, e mesmo que haja uma diferença considerável de resistência de ruptura entre os dois modelos, isso não interfere na usabilidade das vigas, uma vez que as condições de usabilidade são definidas pelo estado limite de serviço, referente a flecha e fissuração, e não pela carga de rompimento.

Todas as vigas estudadas apresentaram fissuração em seu terço médio e esmagamento do concreto. O estado de fissuração final pode ser visto nas figuras 22 e 23.



Figura 22 - Ruptura das vigas armadas em aço (Autores, 2023)



Figura 23 - Ruptura das vigas armadas com GFRP (Autores, 2023)

Apesar da armadura de GFRP apresentar rompimento frágil como afirmado por Dalfré, Mazzú e Parsekian (2021) essa característica não interferiu no comportamento em relação ao carregamento, uma vez que seu dimensionamento foi realizado para ruptura governada pelo concreto conforme recomendado pelas conclusões de Bandeira, Junior e Priszkulnik (2006), trazendo resultados mais uniformes entre os modelos, mesmo com o fato de terem sido moldados fora de ambiente controlado, uma vez que a moldagem foi executada em obra por operadores que tinham experiência apenas com estruturas convencionais.

### **Custo e logística**

Foram levantados com fornecedores dados sobre a comercialização das barras de GFRP e comparados com o que é conhecido da comercialização do aço para a construção civil. Os vergalhões de GFRP são comercializados em rolos de 100m e nas mesmas bitolas comerciais que o aço. Conforme os dados levantados (tabela 10), o GFRP é 76,20% mais leve que o aço, ou seja, seu peso é aproximadamente quatro vezes menor, e seu preço por metro é 19,81% superior ao aço, valor que devido a leveza do material e fácil armazenamento devido ao fato dos rolos ocuparem menor espaço



do que os vergalhões de aço, pode ser compensado através da economia no uso de concreto, dimensionamento e logística.

Tabela 10 – Dados de preço e peso dos vergalhões de aço e GFRP

Material	Bitola (mm)	Peso (kg/m)	Preço (R\$/m)
Aço CA-50	8	0,395	3,33
GFRP	8	0,094	3,99

Fonte: Autores (2023)

## Conclusões

A utilização de armaduras não metálicas como opção para incremento da durabilidade de estruturas de concreto e redução na manutenção tem sido discutida cada vez mais no meio técnico. Por ser um material relativamente recente, suas propriedades ainda não são totalmente conhecidas, assim como não há um padrão de fabricação para aplicação na construção civil, e esse fato contribui para que as normas e recomendações existentes tanto no Brasil quanto no estrangeiro ainda se utilizem de coeficientes de segurança altos que podem ser trabalhados e reduzidos futuramente para que os vergalhões de GFRP sejam mais eficientes que os de aço.

Mesmo que os valores de cálculo e empíricos não sejam compatíveis, ainda é possível defender o uso das armaduras de GFRP devido aos resultados de ensaio muito semelhantes aos das vigas armadas com aço utilizadas para referência mesmo não sendo moldadas em ambiente controlado, além do fato dos resultados terem atendido ao proposto no dimensionamento.

Para que a utilização das armaduras de GFRP e outros compostos de fibra possa ser difundida e preferida, é preciso que sejam realizados estudos maiores acerca do comportamento do material em diferentes ambientes, em peças que sejam totalmente armadas com não metálicos, inclusive os estribos, com diferentes configurações de armação, dimensões e aplicação de carregamento. Ainda assim, os resultados deste trabalho contribuem para afirmação das teorias propostas até agora onde o emprego do material é viável e compatível com a construção civil, necessitando de estudos mais específicos para normatização e aplicação em larga escala.

## Agradecimentos

Os autores prestam seus agradecimentos ao consórcio AeroGru pelo apoio na confecção, montagem e transporte dos corpos de prova, vigas e materiais, à Fama Fiberglass, por realizar a doação dos vergalhões de GFRP, à Anhembi Morumbi e ao técnico de laboratório Jonathan, por ceder o espaço e orientação dos procedimentos.

Os agradecimentos também se estendem aos familiares e amigos que apoiaram os autores durante toda a jornada acadêmica, assim como aos professores e principalmente a professora Luciana Freitas, que não apenas orientou este trabalho sendo um farol para o grupo, como também foi uma inspiração para o desenvolvimento do trabalho.



## Referências

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars.** Farmington Hills, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480: Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro, 2010.
- BANDEIRA, Alex Alves; JUNIOR, Alfonso Pappalardo; PRISZKULNIK, Simão. Comportamento à flexão de vigas de concreto armadas com barras de fibra de vidro (GFRP), 2006. São Paulo. **Anais do IV Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto.** São Paulo, USP: 2006. Disponível em: <http://www.dcc.ufpr.br/portal/wp-content/uploads/2019/09/Barras-de-fibra-de-vidro-Epusp.pdf>. Acesso: 20 Abril 2022.
- DO AMARAL, Eliane Domingos. **Ganhos ambientais e econômicos na redução de consumo de aço em uma indústria de autopeças pela aplicação da filosofia Kaizen.** 2013. 89 p. Dissertação Mestrado Profissionalizante em Engenharia Ambiental com ênfase em Gestão Ambiental - Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/106947/318496.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 6 jun. 2022.
- INEIA, A.; POL, W. D. O.; ARENHART BRAUN, J. C.; DA SILVA LOPES, L. Barras de fibra de vidro, uma alternativa inovadora e suas potencialidades: revisão bibliográfica. **Tecno-Lógica**, v. 25, n. 2, p. 243-251, 5 jul. 2021. Disponível em: <https://online.unisc.br/seer/index.php/tecnologica/article/view/16214>. Acesso em: 12 abril 2023.
- KAPELINSKI, Gabriel Klein. **Projeto de vigas armadas com barras de FRP à flexão: comparativo entre o aço e os diferentes tipos de fibra.** Orientador: Professor Alisson Milani. 2023. Tese (Bacharel em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Rio Grande do Sul, 2023. Disponível em: <https://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/riu/8062/1/GABRIEL%20KLEIN%20KAPELINSKI-2023.pdf>. Acesso em: 12 abril 2023.

**Projeto Final de Curso em Engenharia  
Engenharia Civil**

**1º semestre / 2023**

Orientador: Luciana Tiemi Kataoka de Freitas



KASAI, Murilo Shoji de Souza. **Armadura de fibra de vidro em estruturas de concreto armado**. Orientador: Jorge Luis Akasaki. 2022. Tese (Bacharel em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Paulo, 2022. Disponível em: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/238489/kasai\\_mss\\_tcc\\_ilha.pdf?sequence=7&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/238489/kasai_mss_tcc_ilha.pdf?sequence=7&isAllowed=y). Acesso em: 12 abril 2023.

MAZZU, Amanda Duarte Escobal; DALFRÊ, Gláucia Maria; PARSEKIAN, Guilherme Aris. Corrosão Atenuada: Procedimentos para o dimensionamento à flexão e ao cisalhamento de vigas de concreto armadas com barras de FRP (Fiber Reinforced Polymer) segunda o ACI 440.1R (2015). **Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural**, [S. l.], p. 21-29, dez. 2021. Disponível em: <https://site.abece.com.br/wp-content/uploads/2022/03/Armduras-com-Fibras.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2022.

Prática recomendada IBRACON/ABECE. **CT 303: Projeto de estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras (FRP)**. São Paulo, 2021.

TAVARES, Danusa Haick. Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP. Orientador: Professor José Samuel Giongo. 2006. Dissertação (Mestrado em engenharia de estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), São Paulo, 2006. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-22062006-105650/publico/2006ME\\_DanusaHTavares.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-22062006-105650/publico/2006ME_DanusaHTavares.pdf). Acesso em: 20 abril 2023.