

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GABRIEL DENARDIN BRAZEIRO

**ESTUDO DA ADERÊNCIA ENTRE O CONCRETO E BARRAS DE POLÍMEROS
REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO (FRPV)**

**Alegrete
2023**

GABRIEL DENARDIN BRAZEIRO

**ESTUDO DA ADERÊNCIA ENTRE O CONCRETO E BARRAS DE POLÍMEROS
REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO (FRPV)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Alisson Simonetti Milani

**Alegrete
2023**

GABRIEL DENARDIN BRAZEIRO

**ESTUDO DA ADERENCIA ENTRE O CONCRETO E BARRAS DE POLÍMEROS
REFORÇADOS COM FIBRA DE VIDRO (FRPV)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade
Federal do Pampa, como requisito
parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 20 de janeiro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. ALISSON SIMONETTI MILANI - UNIPAMPA - Orientador

Prof. Dr. EDERLI MARANGON - UNIPAMPA - UNIPAMPA

Prof. Dr. LUIS EDUARDO KOSTESKI - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **ALISSON SIMONETTI MILANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/02/2023, às 15:25, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDERLI MARANGON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/02/2023, às 09:15, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUIS EDUARDO KOSTESKI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/02/2023, às 18:28, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1045134** e o código CRC **2EF9CFEE**.

*Dedico este trabalho à minha família
e a todos que me auxiliaram nessa jornada.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me guiar nessa jornada, não me deixando desistir.

Agradeço a toda a minha família, principalmente aos meus avós, Élio e Elenir, pelo apoio e preocupação, estando ao meu lado sempre que precisei.

Agradeço a minha namorada Poliana, por ter me auxiliado em grande parte dessa conquista e vem me acompanhando até hoje, me ajudando a alcançar meus objetivos e estando ao meu lado em todas as situações. Por isso serei eternamente grato.

Sou eternamente agradecido a minha mãe, Elisiane, pelo amor e carinho, além do apoio nas decisões tomadas.

As minhas tias Elisandra e Adrieli, pela imensa ajuda, principalmente nos momentos difíceis.

Aos demais familiares, pelos momentos compartilhados e pelo apoio.

Também, meu eterno agradecimento ao meu professor e orientador, Alisson Simonetti Milani pelos conselhos e ensinamentos passados, especialmente na vida profissional.

Agradeço ao programa de desenvolvimento acadêmico (PDA), que fomentaram o desenvolvimento do trabalho.

Os meus sinceros agradecimentos a todos os professores do curso de Engenharia Civil, pois todos foram de suma importância para minha formação, compartilhando seus conhecimentos e me ajudando no crescimento profissional.

A todos meu mais sincero obrigado!

*"Quando somos abandonados pelo mundo,
a solidão é superável;
quando somos abandonados por nós
mesmos,
a solidão é quase incurável."
Augusto Cury*

RESUMO

A utilização de aço como reforço em estruturas de concreto armado, em sistemas construtivos, são, de maneira geral, amplamente difundidos pelo mundo. Ademais, em certas condições ambientais, a armadura utilizada pode estar sujeita ao fenômeno de corrosão, sendo conseqüentemente deteriorada. Dessa forma, novos materiais, como os vergalhões de Polímeros Reforçados com Fibra de vidro (FRPV), estão sendo introduzidos na construção civil para a substituição do aço. As barras de FRPV, são, em geral, materiais compósitos formados por fios contínuos de fibras envoltas por resina. Com o aumento da sua utilização e aplicabilidade no mercado nacional, também há a necessidade de novos estudos, tanto em relação ao seu comportamento, determinando suas propriedades físicas e mecânicas, quanto às normativas e códigos, compreendendo os fatores importantes de dimensionamento de estruturas de concreto armado, o fenômeno de aderência. Fator este que possui efeitos determinantes quanto a sua resistência, como o diâmetro, o tratamento de superfície, a resistência do concreto e o comprimento de ancoragem. O dimensionamento, devido a recente introdução das barras de FRPV, como dito, em estruturas de concreto armado, é baseado no conhecimento já obtido e consolidado de barras de aço. Logo, o presente estudo tem por objetivo realizar o ensaio de arrancamento (pullout), de acordo com a norma americana ASTM D7913/D7913M-14 (2020), com barras de FRPV de diâmetro de 8 mm, 10 mm e 12 mm, inseridas em cubos de concreto com resistência característica de 35 MPa e 50 MPa, com o intuito de obter os valores da resistência de aderência entre as barras e o concreto, comparando o efeito do diâmetro e a influência da resistência do concreto. Os dados obtidos experimentalmente foram comparados com equações encontradas nas normas canadense CSA S806-02 (2002), brasileira CT 303 (2021) e americana ACI 440.1 R-15 (2015). Na realização do programa experimental deste trabalho, os materiais utilizados na produção do concreto foram caracterizados para a dosagem de duas resistências à compressão do concreto, sendo de 35 MPa e 50 MPa, porém os valores encontrados experimentalmente foram de 35,88 MPa e 47,28 MPa. Os resultados obtidos apresentam resistências de aderência estatisticamente semelhantes, entre as barras de FRPV e o concreto, mesmo com o aumento do diâmetro das barras, independente na resistência à compressão do concreto. Outro fator avaliado é a resistência do concreto, os resultados indicam que há uma tendência no aumento da resistência de aderência com o aumento da resistência à compressão do concreto, porém esse aumento só foi significativo neste estudo, para as barras de 8 mm. Conclui-se então que, de acordo com os resultados obtidos nesse estudo, com o aumento da resistência à compressão do concreto, ocorre um aumento na tensão de aderência para barras de 8 mm, em contrapartida, a variação do diâmetro das barras de FRPV, não proporciona mudanças significativas da resistência de aderência da estrutura.

Palavras-chave: Ensaio de arrancamento. Resistência de aderência. Barras de FRPV. Polímeros reforçados com fibra de vidro.

ABSTRACT

The use of steel as reinforcement in reinforced concrete structures, in construction systems, is, in general, widely spread around the world. Furthermore, under certain environmental conditions, the reinforcement used may be subject to the phenomenon of corrosion, consequently deteriorating. Thus, new materials, such as Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) rebars, are being introduced in civil construction to replace steel. GFRP bars are, in general, composite materials formed by continuous strands of fibers surrounded by resin. With the increase in its use and applicability in the national market, there is also a need for further studies, both in relation to its behavior, determining its physical and mechanical properties, as well as to regulations and codes, understanding the important factors for dimensioning concrete structures reinforcement, the bond phenomenon. A factor that has decisive effects on its resistance, such as diameter, surface treatment, concrete strength and anchorage length. The sizing, due to the recent introduction of GFRP bars, as mentioned, in reinforced concrete structures, is based on the knowledge already obtained and consolidated on steel bars. Therefore, the present study aims to carry out the pullout test, in accordance with the American standard ASTM D7913/D7913M-14 (2020), with GFRP bars with diameters of 8 mm, 10 mm and 12 mm, inserted in concrete cubes with characteristic strength of 35 MPa and 50 MPa, in order to obtain the values of bond strength between bars and concrete, comparing the effect of diameter and the influence of concrete strength. Data obtained experimentally were compared with equations found in the Canadian CSA S806-02 (2002), Brazilian CT 303 (2021) and American ACI 440.1 R-15 (2015) standards. In carrying out the experimental program of this work, the materials used in the production of concrete were characterized for the dosage of two compressive strengths of concrete, being 35 MPa and 50 MPa, however the values found experimentally were 35.88 MPa and 47, 28 MPa. The results obtained show statistically similar bond strengths between the GFRP bars and the concrete, even with the increase in the diameter of the bars, regardless of the compressive strength of the concrete. Another evaluated factor is the resistance of the concrete, the results indicate that there is a tendency in the increase of the adhesion resistance with the increase of the compressive strength of the concrete, however this increase was only significant in this study, for the bars of 8 mm. It is then concluded that, according to the results obtained in this study, with the increase in the compressive strength of the concrete, there is an increase in the bond stress for 8 mm bars, in contrast, the variation in the diameter of the FRPV bars, does not provide significant changes in the bond strength of the structure.

Keywords: Pullout test. Bond strength. GFRP bars. Glass fiber reinforced polymer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de fabricação	19
Figura 2 – Vazios distribuídos próximos: à borda (esquerda), ao centro (direita)	20
Figura 3 – Comparação das curvas de tensão de aderência pelo deslocamento com diferentes diâmetros de barras de FRPV inseridos no HFRC (a) e concreto normal (b)	26
Figura 4 – Barras de FRP e diferentes revestimentos superficiais	27
Figura 5 – Comparação das curvas de tensão de aderência pelo deslocamento com diferentes tratamentos de superfície de barras de FRPV inseri- dos no HFRC (a) e concreto normal (b)	28
Figura 6 – Curva de aderência-deslocamento de vergalhões para a extremidade (a) descarregada e (b) carregada	28
Figura 7 – Comparação das curvas de tensão de aderência pelo deslocamento (a) e força de carga máxima com diferentes comprimentos de anco- ragem de barras de FRPV (b)	30
Figura 8 – Distribuição das tensões ao longo de (a) barras retas e (b) barras com cabeça	31
Figura 9 – Organograma.	32
Figura 10 – Agregado miúdo utilizado na dosagem do concreto.	34
Figura 11 – Curva granulométrica do agregado miúdo.	34
Figura 12 – Agregado graúdo utilizado na dosagem do concreto.	35
Figura 13 – Curva granulométrica do agregado graúdo.	35
Figura 14 – Barras de FRPV com diâmetros de 12 mm (esquerda), 10 mm (centro) e 8 mm (direita).	38
Figura 15 – Concretagem dos corpos de prova cúbicos.	39
(a) Preparação para concretagem	39
(b) CP concretado	39
Figura 16 – Realização do ensaio de arrancamento direto.	40
Figura 17 – Posicionamento do LVDT superior.	41
Figura 18 – Dimensões da amostra e esquema de moldagem na horizontal.	42
Figura 19 – Posicionamento das barras.	43
Figura 20 – Cura dos corpos de prova prismáticos.	43
Figura 21 – Esquema da montagem e preparação do corpo de prova para o ensaio de arrancamento direto.	44
Figura 22 – Esquema da ancoragem da extremidade livre da barra.	45
Figura 23 – Curvas de resistência de aderência pelo deslocamento para o con- creto C35.	51
Figura 24 – Curvas de resistência de aderência pelo deslocamento para o con- creto C50.	52
Figura 25 – Representação da região de ancoragem da barra de FRPV.	53
(a)	53
(b)	53
Figura 26 – Comparação das curvas de aderência entre resistências do concreto para as barras de diâmetro de 8 mm.	55
Figura 27 – Comparação das curvas de aderência entre resistências do concreto para as barras de diâmetro de 10 mm.	55

Figura 28 – Comparação das curvas de aderência entre resistências do concreto para as barras de diâmetro de 12 mm.	56
Figura 29 – Média da máxima resistência de aderência.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Nomenclatura utilizada para os traços de concreto.	36
Tabela 2 – Dosagem unitária dos traços.	36
Tabela 3 – Valores de referência das propriedades mecânicas de barras de FRP.	37
Tabela 4 – Resumo da Metodologia.	39
Tabela 5 – Valores médios para determinação do diâmetro efetivo (d_b) das barras.	46
Tabela 6 – Dados do comprimento das barras.	47
Tabela 7 – Média das resistências dos corpos de prova cilíndricos.	49
Tabela 8 – Valores obtidos de tensão de aderência.	50
Tabela 9 – Teste de Tukey.	56
Tabela 10 – Tensão média de aderência obtidas experimentalmente e baseadas em códigos.	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Área nominal

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

ASTM – American Society for Testing and Materials

a/c – Relação água/cimento

C_b – Circunferência nominal das barras

CT – Comitê Técnico

CP – Corpo de Prova

d_b – Diâmetro efetivo das barras

F – Força de tração

FRP – polímeros reforçados com fibras

FRPA – polímeros reforçados com fibras de aramida

FRPB – polímeros reforçados com fibras de basalto

FRPC – polímeros reforçados com fibras de carbono

FRPV – polímeros reforçados com fibras de vidro

HFRC – concreto híbrido reforçado com fibra

l – Comprimento

l_a – Comprimento de aderência

l_b – Comprimento de ancoragem básico

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

m_1 – Massa ao ar

m_2 – Massa submersa

NBR – Norma Brasileira

s – deslocamento

SFRSCC – concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço

LISTA DE SÍMBOLOS

π – Pi

ϕ – Diâmetro

ρ – Densidade da água

τ – Tensão de aderência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos	16
1.2	Justificativa	16
2	BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS	18
2.1	Histórico	18
2.2	Processo de fabricação	18
2.3	Materiais Compósitos	20
2.3.1	Matriz Polimérica	21
2.3.2	Tipos de Fibras	22
3	FENÔMENO DE ADERÊNCIA	24
3.1	Efeito do Diâmetro	25
3.2	Efeito do Tratamento da Superfície	26
3.3	Efeito da Resistência do Concreto	29
3.4	Efeito do Comprimento de Ancoragem	30
4	MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1	Materiais	33
4.1.1	Cimento Portland	33
4.1.2	Aditivo	33
4.1.3	Agregado Miúdo	33
4.1.4	Agregado Graúdo	34
4.1.5	Água	36
4.1.6	Concreto	36
4.1.7	Barras de Polímeros Reforçadas com Fibra de Vidro	36
4.2	Métodos	38
4.2.1	Ancoragem das Barras	44
4.2.2	Diâmetro Efetivo	45
4.2.3	Comprimento das Barras	46
4.2.4	Resistência à Aderência	47
5	RESULTADOS	49
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

A utilização do sistema de construção de estruturas em concreto armado é difundida em todo o mundo, principalmente com a aplicação de barras de aço como reforço. Todavia, seu uso pode ser limitado, pois podem estar sujeitas a corrosão, devido as condições ambientais e agressividade química, fatores estes capazes de causarem deterioração da armadura e, em casos mais avançados, ruptura dos elementos estruturais. Com isso, é necessário o correto monitoramento até a realização do reparo da estrutura ou, dependendo dos casos, a demolição dos elementos comprometidos.

Dessa forma, surgiu o desenvolvimento e emprego de novos materiais na construção, estes capazes de substituir o aço, conhecidos como polímeros reforçados com fibras (FRP). As barras de FRP são compostas por fios contínuos de fibras, podendo estas serem de vidro ou carbono, por exemplo, envoltas por uma resina. Trata-se de um elemento compósito, obtido pelo processo de pultrusão, sendo que a fibra atua como reforço e a resina como matriz e, em forma de vergalhões são capazes de resistir a elevadas cargas de tração, possuem um baixo peso específico, são de elevada durabilidade, porém, para o caso de fibras de vidro, por exemplo, apresentam um baixo módulo de elasticidade, comparado com barras de aço, e ruptura frágil.

Com o crescimento da aplicação das barras de FRP no mercado nacional, surgiu a necessidade do avanço de normativas que amparam a utilização e dimensionamento destas armaduras no sistema construtivo, o qual estão inseridas. Por conseguinte, as suas propriedades mecânicas e físicas podem ser determinadas e avaliadas.

O estudo da aderência entre as barras de aço e o concreto já é consolidado, porém estudos utilizando barras de FRP estão sendo introduzidos recentemente e são baseados no conhecimento obtido por meio dos resultados, comportamentos e ensaios com barras de aço. Por isso, esse trabalho tem como contribuição a avaliação dos métodos de ensaio e influência do diâmetro das barras de FRPV e da resistência à compressão do concreto, que diferentemente da homogeneidade das barras de aço, os vergalhões de FRP apresentam variações na seção transversal ao longo de seu comprimento, necessitando de ensaios para determinar suas características. Alguns parâmetros, tais como o processo de fabricação e o tratamento superficial, dos vergalhões de FRP, possuem influência nas propriedades de aderência.

O método de ensaio por arrancamento ou, como conhecido no inglês como "*pullout test*", é amplamente difundido por ser capaz de comparar a ligação desenvolvida por diferentes barras e materiais. Logo, é possível avaliar, neste ensaio, o comprimento de ancoragem que possui grande influência, sendo um fator importante em relação ao desempenho da ligação, além de ser utilizado para a caracterização das barras, também deve ser capaz de distribuir, de forma uniforme, as tensões da barra para o concreto durante o processo de carregamento. Logo, com o método de teste, utilizado

neste trabalho, pode-se avaliar a ligação entre as barras de FRP e o concreto. Além disso, sabe-se também que a ação de confinamento, causada pelo concreto nas barras, deve ser adequada para resistir aos esforços, mesmo com a fissuração do concreto.

1.1 Objetivos

Os objetivos da pesquisa são apresentados neste item. O foco principal do trabalho é apresentado no objetivo geral, e nos objetivos específicos, destacam pontos importantes que atendem ao objetivo geral.

1.1.1 Objetivo geral

Realizar ensaio de arrancamento (*pullout*), com diâmetros distintos de barras de FRPV e diferentes resistências à compressão do concreto, com o intuito de analisar o comportamento quanto à aderência.

1.1.2 Objetivos específicos

- Obter os valores de resistência à aderência pelo teste de arrancamento.
- Comparar o efeito do diâmetro na resistência de aderência entre o concreto e as barras de FRPV.
- Determinar a influência da resistência à compressão do concreto na resistência de aderência entre o concreto e as barras de FRPV.
- Comparar os dados obtidos experimentalmente da resistência de ligação com as equações apresentadas nas normas CSA S806-02 (2002), CT 303 (2021) e ACI 440.1 R-15 (2015).

1.2 Justificativa

Existe um notável avanço da indústria da construção civil em diversos países, quando se fala em novos materiais. Isso ocorre, principalmente, devido ao fato de que se busca maior durabilidade, melhor conforto ao usuário e menor custo de manutenção, por exemplo. Dessa maneira, esta pesquisa tem significado prático, por contribuir para um importante avanço na tecnologia de construção, fornecendo conhecimento para o adequado desenvolvimento de códigos e normas.

Em países como Japão, Canadá e Estados Unidos, a substituição de barras metálicas por barras não-metálicas é algo difundido e comum (ACI 440.1 R-15, 2015). Enquanto que no Brasil, essa mudança é recente, por haver poucos estudos em relação as barras de FRPV e seu comportamento como elemento estrutural juntamente com o concreto, também existe uma carência de normas que fornecem informações

de dimensionamentos e recomendações, sendo que até então só existe as práticas recomendadas do Comitê Técnico 303. O material em questão já é produzido e comercializado no Brasil por algumas indústrias, tanto em forma de vergalhões, como em forma de malhas.

Destarte, este trabalho tem como propósito contribuir para melhor compreensão do funcionamento e comportamento desses compósitos, principalmente em relação a aderência entre as barras de FRPV e o concreto.

2 BARRAS DE POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS

2.1 Histórico

O concreto vem sendo utilizado pela humanidade a muito tempo, tratando-se de um material plástico, que pode ser moldado ainda fresco, com o intuito de obter a forma desejada, adquirindo resistência necessária para suportar aos esforços solicitantes. Já o aço, a partir da década de 1960 ganhou popularidade, sendo amplamente utilizado em obras residenciais, comerciais, indústrias e até mesmo em obras de arte, em formas de chapas e tubos, com variadas espessuras (CARNEIRO; TEIXEIRA, 2008). A associação desses dois elementos resulta em um material compósito, onde o concreto atua como a matriz e o aço como reforço. Um material compósito pode ser definido como materiais, os quais sua estrutura é formada pela associação de dois ou mais elementos (MOREIRA, 2009).

Após a Segunda Guerra Mundial, na década de 1940, ocorreu um elevado aumento da utilização de materiais compósitos, pela indústria aeroespacial, com o reconhecimento das vantagens que estes materiais possuem, como alta resistência e baixo peso específico. Isso, aliado a economia em rápida expansão dos Estados Unidos, a qual necessitava de materiais baratos para seus consumidores. Porém, apenas na década de 60 que estes materiais foram fortemente considerados para a utilização como reforço em concreto (ACI 440.1 R-15, 2015).

Com os problemas referentes a corrosão da armadura em construções que utilizam aço como reforço, como alto custo de manutenção, foram investigadas várias soluções para a substituição. Além disso, ocorreu a necessidade de um reforço não metálico para a utilização em locais que não permitem materiais condutores de eletricidade, como bases de reatores de subestações, pistas de aeroportos e laboratórios de eletrônica, por exemplo (BROWN; BARTHOLOMEW, 1996). Logo, as barras de polímeros reforçados com fibras de vidro (FRPV) foram consideradas como alternativas viáveis para a substituição do aço, porém, apenas a partir de 1970 esse tipo de compósito começou a ser produzido comercialmente (ACI 440.1 R-15, 2015). Posteriormente, esse material começou a ser aplicado em outros locais, como tabuleiros de pontes.

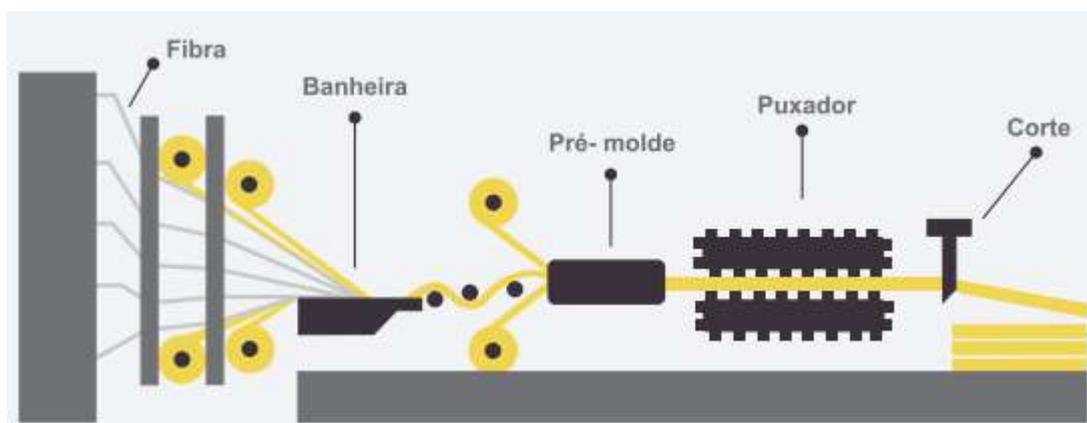
2.2 Processo de fabricação

As barras de FRPV, como dito anteriormente, são produzidas pelo método de pultrusão (Figura 1). O processo de fabricação por esse método consiste na imersão em resina e posterior passagem, por meio do tracionamento das fibras unidirecionais contínuas, por um molde. Para garantir uniformidade e total envolvimento com a resina, as fibras são espalhadas antes de passarem pelo molde. Após, é realizada a cura

com o objetivo de proporcionar a forma final da barra. Vale ressaltar que depois da cura ser realizada, as barras não podem ser dobradas, dito isso, para a produção de estribos e barras dobradas, esse processo deve ser realizado antes da cura (TEIXEIRA *et al.*, 2018). Com o intuito de proporcionar uma melhor aderência entre as barras e o concreto, existem técnicas que podem ser empregadas para o tratamento de superfície, como impregnação externa de areia, deformação superficial ou, até mesmo, uma combinação de métodos (FIB, 2007), sendo que, até o momento, apenas barras com envolvimento helicoidal estão disponíveis no Brasil. As técnicas utilizadas na superfície das barras, para garantir a aderência, são realizadas antes da cura, a qual altera o estado da resina, de líquido para o estado sólido, por meio do calor (NANNI; LUCA; ZADEH, 2014).

A pultrusão é um processo de produção simples que possibilita a fabricação de perfis contínuos, com elevado comprimento e seção transversal constante. As fibras são comercializadas em bobinas, pois facilita o transporte e utilização no processo de pultrusão. Cada diâmetro possui um teor de fibras diferente, pois, de acordo com Gay, Hoa e Tsai (2002), este tem suma importância para garantir uma melhora nas propriedades mecânicas.

Figura 1 – Processo de fabricação

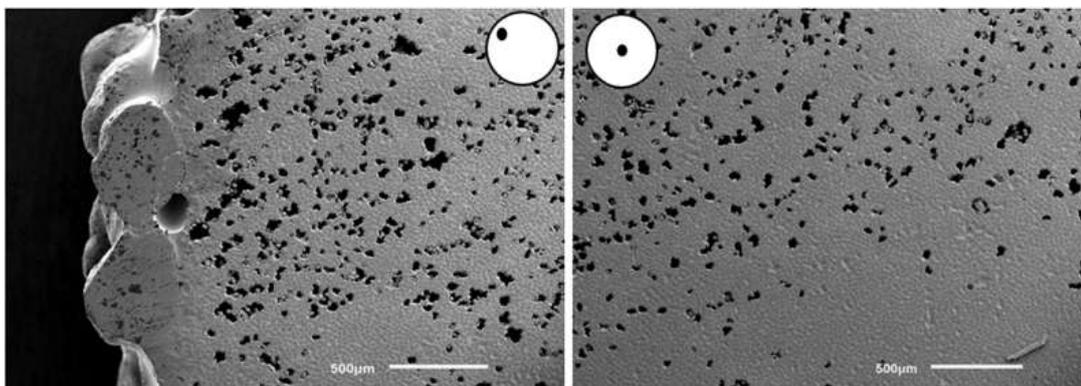


Fonte: STRATUS FRP (2014, p. 1).

Gooranorimi *et al.* (2017) realizou uma investigação microestrutural de barras poliméricas reforçadas com fibras de vidro fabricadas por pultrusão, com intuito de entender e prever o comportamento de barras de FRPV, utilizando microscopia eletrônica de varredura (MEV). Ao analisar quatro barras de mesmo diâmetro, concluiu que cada uma apresentou um padrão microestrutural único, com vazios e defeitos contínuos ao longo de seu comprimento (Figura 2). Os autores indicam que esses comportamentos podem ser relacionados ao processo de fabricação e cura, por se tratar de defeitos contínuos ao longo do comprimento das barras, e podem ser possivelmente reduzidos com melhores práticas de controle de qualidade no sistema produtivo. Alguns fatores que podem influenciar são a velocidade com que as fibras são puxadas, a temperatura

e a velocidade de cura, por exemplo.

Figura 2 – Vazios distribuídos próximos: à borda (esquerda), ao centro (direita)



Fonte: Gooranorimi *et al.* (2017, p. 391).

2.3 Materiais Compósitos

Atualmente, aplicam-se diversos materiais compósitos na engenharia, na busca constante por melhores desempenhos. Uma das grandes utilizações é o material compósito polimérico, denominado como polímero reforçado com fibra (FRP) e, na literatura internacional, como "*fiber-reinforced polymers*". O FRP é constituído, de maneira geral, por fibras contínuas, atuando como reforço, envoltos por uma matriz polimérica. Existe uma vasta gama de resinas e fibras que podem ser usadas na sua composição, as mais conhecidas e estudadas são as barras de FRP com fibras de vidro (FRPV), com fibras de carbono (FRPC), com fibras de basalto (FRPB) e com fibras de aramida (FRPA) (ACI 440.1 R-15, 2015). De acordo com Nanni, Luca e Zadeh (2014), as fibras de basalto começaram a ser utilizadas recentemente, por se tornarem comercialmente disponíveis e, em relação as matrizes, os autores citam que as matrizes mais utilizadas são resinas termofixas, tais como epóxis, poliésteres e ésteres de vinil, sendo que a epóxi é a mais comum, como matriz, em FRPC, e éster vinílico em FRPV, por exemplo. A resina e a composição da matriz pode variar de acordo com o fabricante. Já as fibras, segundo Gay, Hoa e Tsai (2002), são constituídas por milhares de filamentos de diâmetro entre 5 e 15 micrômetros.

As fibras citadas anteriormente, de maneira geral, apresentam características semelhantes na curva de tensão vs deslocamento, pois possuem ruptura frágil, considerados então como materiais elásticos. A utilização desses elementos em compósitos poliméricos se dá, principalmente, pela sua resistência e leveza. No entanto, existem alguns requisitos esperados para sua efetividade nos compósitos, como uniformidade do diâmetro e da superfície da fibra, elevada tenacidade e resistência, durabilidade e custo aceitável (FIB, 2007). Enquanto que os compósitos destinados ao uso em componentes estruturais, têm como requisitos principais uma deformação, sob ação de

cargas, dentro dos limites estabelecidos e devem resistir aos esforços durante sua vida útil (HOLLAWAY, 1993).

Em relação ao comportamento mecânico dos materiais elásticos, temos que, quando submetidos a tensões, sofrem deformações de modo reversível e, também, pode-se observar planos principais, que apresentam apenas esforços normais, conhecidos como direções principais de tensão. Além disso, o modo no qual uma esfera de determinado material, após o carregamento, se comporta, determina se o material é anisotrópico ou isotrópico. A diferença entre estes é que no último, as forças axiais coincidem com o plano principal de tensão, ou seja, quando aplicado um carregamento em um cubo de material isotrópico, a extensão ocorre na direção do próprio carregamento, com uma contração no outro sentido, enquanto que para o material anisotrópico, verifica-se uma distorção angular, acompanhado do mesmo comportamento que o anterior (GAY; HOA; TSAI, 2002). Os materiais poliméricos reforçados com fibras são anisotrópicos, característica que afeta a resistência ao cisalhamento (ACI 440.1 R-15, 2015).

2.3.1 Matriz Polimérica

Os polímeros são materiais orgânicos construídos a partir da repetição de várias unidades de moléculas, chamadas de monômeros. A combinação de um grande número de monômeros advém do processo de polimerização química, que pode produzir dois tipos de materiais, polímeros termoplásticos, os quais possuem suas moléculas conectadas por ligações relativamente fracas entre si, e polímeros termofixos, os quais são formados por cadeias reticuladas (HOLLAWAY, 1993). O polímero que envolve as fibras utilizado neste trabalho é do tipo termofixo, conhecido por resina epóxi, as quais, ainda segundo Hollaway (1993), possuem uma boa adesão a muitas superfícies, baixa retração durante a polimerização e são resistentes a ataques alcalinos.

Logo, como dito anteriormente, a combinação dos polímeros com as fibras formam as barras de FRP, as quais por apresentarem boa resistência à corrosão, não necessitam do mesmo revestimento e proteção que barras de aço, quando se trata de ambientes agressivos. Porém, a resistência ao fogo é limitada pela baixa temperatura de transição vítrea dos polímeros utilizados. A matriz polimérica desempenha um papel importante no FRP, pois proporciona a união das fibras, distribui e transfere as cargas para o reforço, além de proteger as fibras de ataques ambientais e da abrasão mecânica (FIB, 2007). Enquanto que a microestrutura das fibras possui forte influência nas propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos reforçados com fibra. Logo, suas características, como o diâmetro, comprimento e fração de volume, são fatores importantes a serem considerados (HOLLAWAY, 1993).

2.3.2 Tipos de Fibras

Segundo Fib (2007) e Singh (2015), as fibras de vidro são as mais utilizadas, pois com o vidro fundido produz-se filamentos contínuos formando mechas, conhecidas como fio roving. No processo de produção, as fibras são embebidas em resina com o intuito de proporcionar uma melhor adesão entre os materiais presentes no compósito, esse processo fornece também uma camada flexível envolta do reforço, que melhora a resistência de aderência e, além disso, reduz o número de vazios no material. Ainda, os autores mencionam que a sua resistência à tração é reduzida com a corrosão química e, também em altas temperatura, porém, até atingir a faixa de temperatura de transição vítrea da matriz, esta pode ser considerada constante.

Atualmente existem vários tipos de fibras de vidro, como a *E-glass*, a qual é de uso geral e aplicações elétricas, a *S-glass*, que, em temperaturas mais elevadas, possui maior desempenho e resistência, porém mais caro que o anterior, e a *C-glass* ou *AR-glass*, a qual possui estabilidade química ao submetido em ambientes corrosivos (SINGH, 2015).

Nanni, Luca e Zadeh (2014) citam que as fibras de vidro são elásticas até a falha. Ao comparar as fibras de vidro em forma de filamentos contínuos com a forma como é encontrada em garrafas ou janelas, por exemplo, a primeira possui maior resistência, desde que estas sejam protegidas da umidade, contaminação ao ar ou de contato. Os autores acrescentam ainda que, em determinadas condições atmosféricas, as fibras de vidro podem sofrer o efeito da fluência, levando a ruptura. Além disso, o efeito corrosivo da exposição à umidade pode alterar as tensões em regiões de vazios submicroscópicos, sendo estas encontradas na superfície do material, até ocorrer a falha. Esse fato é conhecido como corrosão sob tensão.

As fibras de basalto são processadas a partir de rochas de basalto através de um processo de fusão semelhante ao usado para fibras de vidro. Apesar do seu processo de fabricação utilizar a mesma tecnologia que as fibras de vidro, este demanda menos energia, além da matéria-prima (rocha basáltica) ser amplamente encontrada em todo o mundo. As propriedades mecânicas das fibras de basalto podem ser alteradas com uma modificação na sua composição química (NANNI; LUCA; ZADEH, 2014).

Resultados de estudos feitos por Mingchao *et al.* (2008) mostram que, em relação ao comportamento a corrosão, o meio interfere devido aos diferentes mecanismos de corrosão. Para o caso de meios alcalinos, o módulo de flexão não é alterado ao ocorrer uma diminuição na resistência, porém em meios ácidos, o módulo e a resistência à flexão diminuem da mesma forma. Também, em seu estudo, os autores citam que a resistência à tração e o módulo de elasticidade da fibra de basalto são inferiores as fibras de vidro.

As fibras de Aramida podem ser utilizadas como elementos estruturais e sua estrutura é anisotrópica, com isso apresenta maior resistência na direção axial e menor

na transversal. Quando submetidas a altas temperaturas, as fibras com um elevado módulo demonstram uma diminuição linear de resistência à tração e módulo. Possui um comportamento a fluência parecido com as fibras de vidro, sendo resistente à fadiga e, também, a ruptura por fluência. Sob compressão, ocorre um enrugamento local das fibras, proporcionando uma menor resistência à compressão e flexão, com isso, estas são inadequadas em estruturas de conchas com FRP, a menos que ocorra uma hibridização com outros tipos de fibras. Essa hibridização nas estruturas leva um alto fator de amortecimento à vibração, fornecendo vantagens na aplicação em estruturas que são carregadas dinamicamente (SINGH, 2015).

Segundo Nanni, Luca e Zadeh (2014), as fibras de aramida, são orgânicas e apresentam boas propriedades mecânicas com alta tenacidade e resistência ao impacto, com uma baixa densidade. Sendo um bom isolante elétrico e térmico, além de resistente a solventes orgânicos, combustíveis e lubrificantes. Contudo, são sensíveis à luz ultravioleta (UV) e umidade. O tipo mais comum é o Kevlar, conhecido comercialmente como Kevlar 29, 49 e 149. Por apresentar um elevado custo, o seu uso para barras de FRP fica limitado.

As fibras de carbono são comercializadas em fios longos e contínuos, apresentam alta resistência, alto módulo de elasticidade e, também, como as demais citadas anteriormente, possuem ruptura frágil, com comportamento elástico até a falha, além disso, são altamente resistentes a ambientes agressivos. Contudo, em razão da matéria-prima e o processo de carbonização, possui alto custo (HOLLAWAY, 1993).

São produzidas ao submeter fibras orgânicas, como a poliacrilonitrila (PAN) por exemplo, a uma sequência de tratamentos térmicos, os quais convertem em carbono pelo processo de pirólise. A alta resistência e o alto módulo de elasticidade dependem do tratamento térmico e das fibras orgânicas que são utilizadas. Com o aumento na demanda e na capacidade de produção, o custo das fibras de carbono diminuiu (GIBSON, 2012).

As fibras de carbono podem ser classificadas em alto módulo e baixo módulo, com as seguintes propriedades: alta resistência à fadiga e ao ataque alcalino ou ácido; baixa resistência ao impacto; alta condutividade elétrica; baixo coeficiente de expansão térmica; e, ao estar em contato direto com metais, podem sofrer corrosão galvânica (NANNI; LUCA; ZADEH, 2014).

3 FENÔMENO DE ADERÊNCIA

Para Baena *et al.* (2009) a resistência à compressão do concreto, o diâmetro da barra de FRP e o tratamento da superfície, são fatores que influenciam no comportamento de aderência entre os vergalhões e o concreto. Sendo assim, a resistência do concreto e os demais aspectos descritos acima possuem um papel importante quando se trata da resistência de aderência, com isso, devem ser levados em consideração.

A fim de analisar a influência do diâmetro da barra, cobrimento, comprimento de ancoragem e outros parâmetros, frente a resistência de aderência entre o concreto de alta resistência e barras de FRPV, Islam *et al.* (2015) realizaram ensaios de arrancamento em 180 corpos de prova (CP's), utilizando seis para cada variável. O comportamento dos gráficos de aderência apresentou relação com o modo de falha do teste de arrancamento. Para falhas que ocorreram devido a ruptura por arrancamento das barras, a relação aderência-deslizamento apresenta uma suavização na tensão, enquanto que quando ocorreu a ruptura das barras, esta é caracterizada por uma queda brusca na curva tensão-deslocamento.

Mazaheripour *et al.* (2013) também realizaram ensaios de arrancamento com 36 corpos de prova para avaliar a influência do diâmetro (8 mm e 12 mm), do tratamento da superfície (nervurada e revestida com areia), da espessura do cobrimento do concreto (15 mm e 30 mm) e do comprimento de ancoragem da barras ($5d_b$, $10d_b$ e $20d_b$), na resistência de aderência. Ao observar a superfície das barras, após a execução dos ensaios, percebeu-se que a falha foi controlada, de maneira geral, pela resistência ao cisalhamento das camadas superficiais das barras.

Estudos foram realizados por Hossain, Ametrano e Lachemi (2014), com 96 corpos de prova, para determinar as características de ligação entre vergalhões de FRPV e concreto de alta resistência, com variações do diâmetro e tipo da barra, comprimento de embutimento e cobrimento do concreto, pelo método de teste de arrancamento. Os resultados dos ensaios foram comparados com as resistências de aderência obtidas por meio de equações de projeto. As barras mostraram tendências semelhantes, com um aumento contínuo da carga até atingir um pico, ocorrendo, posteriormente uma queda repentina até a falha, sendo que a predominância no modo de ruptura foi o arrancamento dos vergalhões.

A superfície das barras são submetidas a tensões de cisalhamento, quando o elemento é carregado. Logo, a transferência das forças se dá pela interface de ligação entre os materiais. Portanto, a correta análise do fenômeno de aderência, principalmente neste estudo, depende do entendimento da forma de transferência das forças de cisalhamento na interface entre a barra e o concreto e, também, as forças transversais entre as fibras dentro da barra. Logo, com o avanço dos estudos a respeito do fenômeno de aderência, percebeu-se que a tensão de cisalhamento na interface

entre o reforço e a matriz não depende apenas da propriedade do material, mas sim, de outros fatores, como a geometria, por exemplo (ISLAM *et al.*, 2015).

Existem diferentes métodos para a determinação da tensão de aderência, sendo que o ensaio de arrancamento direto é o mais utilizado por ser simples e de baixo custo. Logo, os valores encontrados por Hossain, Ametrano e Lachemi (2014) para a resistência de ligação, por meio do teste de arrancamento, foram comparados com as equações fornecidas pelas normas CSA S806-02 (2002), CAN/CSA S6-06 (2006) e ACI 440.1 R-06 (2006). Com isso, observou-se que as equações forneceram valores mais conservadores para a previsão da resistência de ligação, podendo ser utilizadas com segurança.

3.1 Efeito do Diâmetro

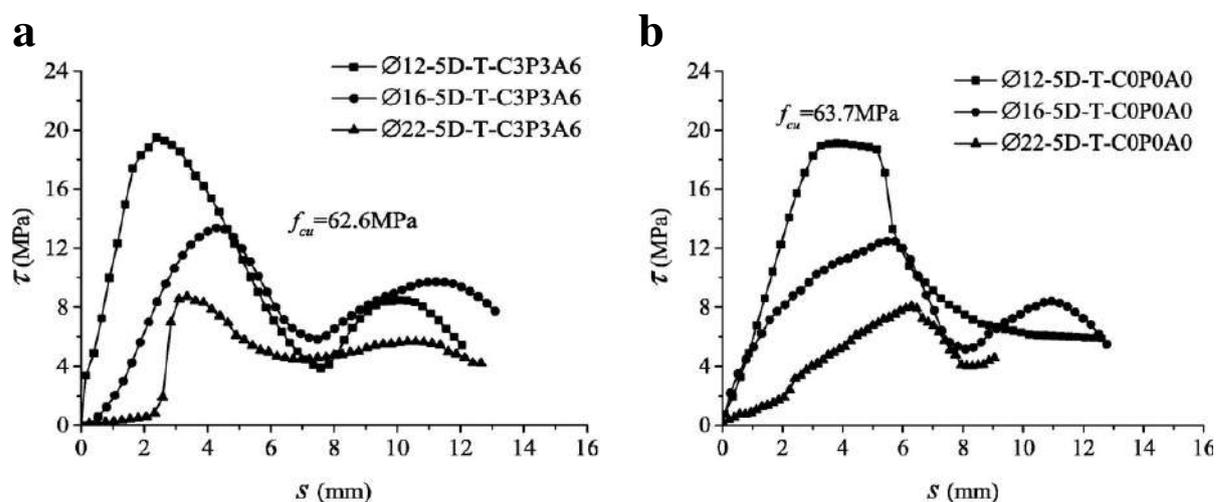
As barras de maior diâmetro apresentaram resistência de aderência menor quando comparado com as de menor diâmetro (BAENA *et al.*, 2009). Estudos feitos por Huang *et al.* (2020) também mostram que o aumento do diâmetro, tanto de 12 mm para 16 mm, quanto de 16 mm para 22 mm, dos vergalhões de FRP reduzem a resistência de aderência entre as barras e o concreto, tanto o concreto convencional, quanto o concreto híbrido reforçado com fibras (HFRC) utilizado no estudo, como apresentado na Figura 3. Os gráficos mostram também que, em ambas as matrizes, as inclinações das curvas, na fase inicial do carregamento, no deslizamento e no arrancamento, são maiores para as barras de menor diâmetro.

Nos estudos desenvolvidos por Mazaheripour *et al.* (2013), o desempenho de aderência entre barras de FRPV e o concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço (SFRSCC) foi investigado e os resultados mostraram que, ao aumentar o diâmetro da barra, a força de tração máxima torna-se limitada pela resistência ao cisalhamento do concreto, que aumenta com a espessura do cobrimento.

O esforço de fendilhamento no concreto, causados pelas tensões de tração aproximadamente perpendiculares à barra, possui maior intensidade nas barras de FRP do que nas de aço com igual diâmetro e cobrimento do concreto, fato devido a menor concentração de tensões na transferência de forças de aderência (TEPFERS, 2006).

O efeito do diâmetro é representado na Figura 3, a qual é caracterizada por curvas de tensão (τ) vs deslocamento (s), onde pode-se observar que, com o aumento do diâmetro ocorre uma diminuição na resistência de aderência, independente da resistência do concreto utilizado nos ensaios.

Figura 3 – Comparação das curvas de tensão de aderência pelo deslocamento com diferentes diâmetros de barras de FRPV inseridos no HFRC (a) e concreto normal (b)



Fonte: Huang *et al.* (2020, p. 9).

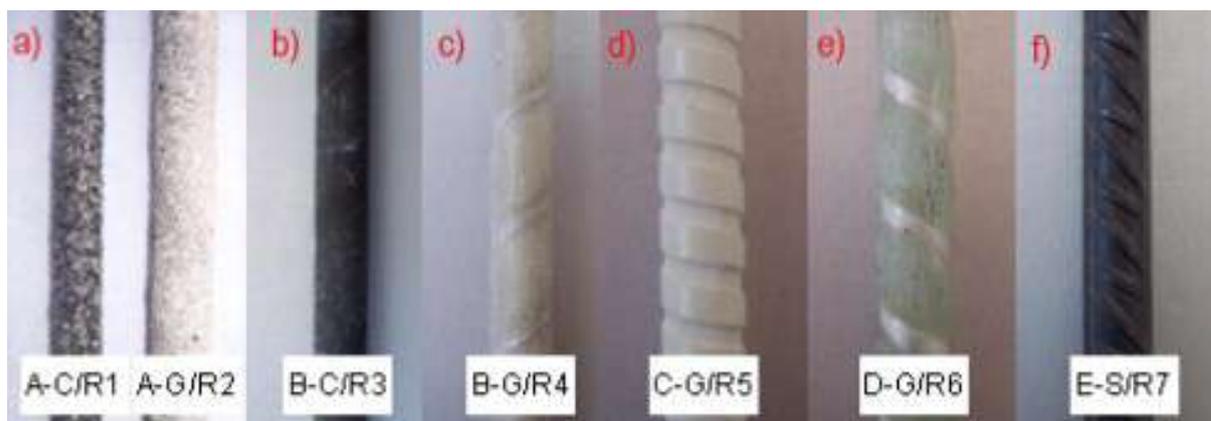
A análise realizada entre barras retas com diâmetros de 12 e 16 mm, confirma que esse aumento no diâmetro provoca uma diminuição da tensão de aderência, mesmo ocorrendo um aumento significativo na capacidade de carga das barras de 16 mm. Esse comportamento também foi observado para barras ancoradas com dispositivos mecânicos, exemplificados na Figura 8 (ISLAM *et al.*, 2015).

O efeito do diâmetro também é confirmado por Hossain, Ametrano e Lachemi (2014), pois ao comparar a tensão de aderência média das barras de FRPV de 15,9 mm e 19,1 mm, o maior diâmetro da barra produziu uma diminuição no valor da resistência. Isso pode ser atribuído a evaporação da água e formação de vazios, que, por consequência, reduz a área de contato entre o concreto e a armadura.

3.2 Efeito do Tratamento da Superfície

Atualmente existem diversos tratamentos para a superfície das barras de FRP, sendo que, no Brasil, até então, encontram-se apenas barras com fios envolvidos helicoidalmente. Dentre os tipos, pode-se observar na Figura 4 alguns exemplos como, barras com revestimento de areia (a), com superfície texturizada (b), com envolvimento helicoidal e impregnação com areia (c), com ranhuras (d), apenas com fios envolvidos helicoidalmente (e) e nervuradas (f) como é o caso de barras de aço. O CT 303 (2021) recomenda que pode-se utilizar outros tipos de revestimentos superficiais, além de barras com entalhes, com fios envolvidos helicoidalmente e impregnação com epóxi e areia, desde que sua eficiência seja comprovada por meio de ensaios de arrancamento, porém barras lisas não podem ter aplicações estruturais.

Figura 4 – Barras de FRP e diferentes revestimentos superficiais



Fonte: Baena *et al.* (2009, p. 785).

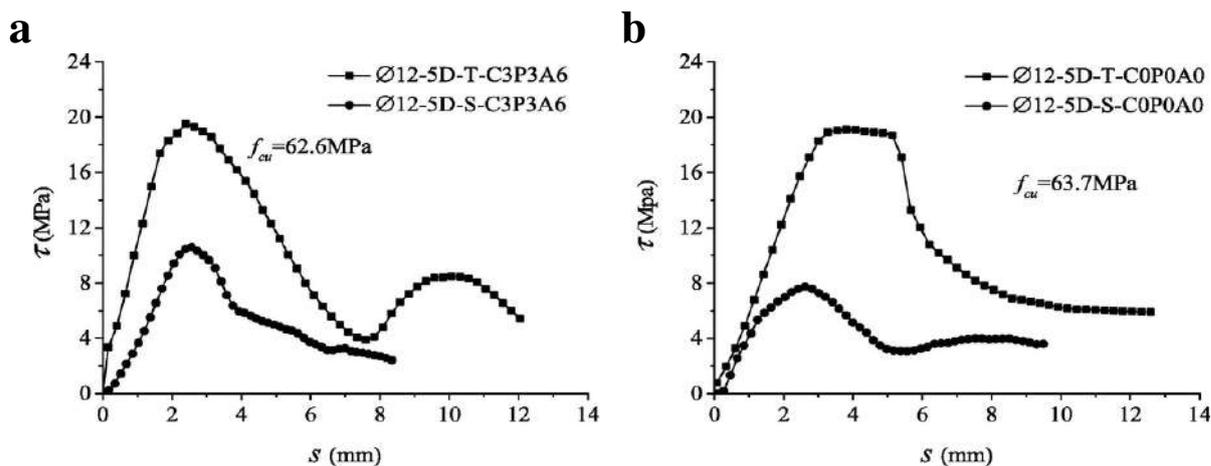
Os diferentes tipos de superfície são utilizados com o intuito de melhorar a ligação química entre o reforço e a matriz e, além disso, estão em constante estado de cisalhamento quando o compósito está carregado. Essa ligação química na interface é responsável pela adesão entre o concreto e as barras. As barras de FRP possuem maior eficiência, que seus componentes isolados, em relação a resistência mecânica, devido a interação, esta capaz de distribuir as tensões ao longo do compósito. A distribuição de tensões depende da natureza e efetividade da ligação (SINGH, 2015). Em relação a durabilidade, ao submeter estes compósitos a ambientes que degradam a resina ou a superfície entre a fibra e a resina, também pode haver uma tendência a degradação na união entre as barras.

Ao analisar barras de FRPV com dois tratamentos de superfície diferentes, Huang *et al.* (2020), de acordo com o apresentado na Figura 5, obteve os seguintes resultados: as barras com fios enrolados helicoidalmente apresentaram melhores propriedades quanto a aderência, quando comparado com as barras revestidas com areia, tanto para o HFRC, quanto para o concreto convencional. A força de intertravamento das barras revestidas com areia depende do atrito entre a superfície das barras e o concreto, conseqüentemente a tecnologia de fabricação, a rugosidade e a resistência da camada. Segundo o autor, a rugosidade superficial, das barras revestidas com areia, era relativamente baixa, explicando a diminuição da resistência de aderência.

Os resultados obtidos por Baena *et al.* (2009) mostram que, em barras revestidas com areia, ocorre um bom desempenho quanto à adesão inicial e ao atingir a resistência de aderência, ocorre uma queda brusca na curva de tensão-deslocamento, caracterizada pelo descolamento do revestimento de areia. Esse comportamento foi observado para ambas as resistências do concreto utilizadas, porém os vergalhões ensaiados com concreto de resistência à compressão igual a 28,63 MPa (C1) apresentaram uma suavização após a tensão máxima de adesão, enquanto que os ensaios com concreto de resistência de 52,19 MPa (C2), um descolamento abrupto (Figura 6). Em barras com textura superficial, como o item b, abordada na Figura 4, a re-

sistência à adesão é menor do que os citados anteriormente, por não ocorrer um descolamento da superfície, a queda de tensão não ocorre de maneira tão acentuada. A representação da extremidade carregada e a extremidade descarregada (livre) das barras são indicadas na Figura 21.

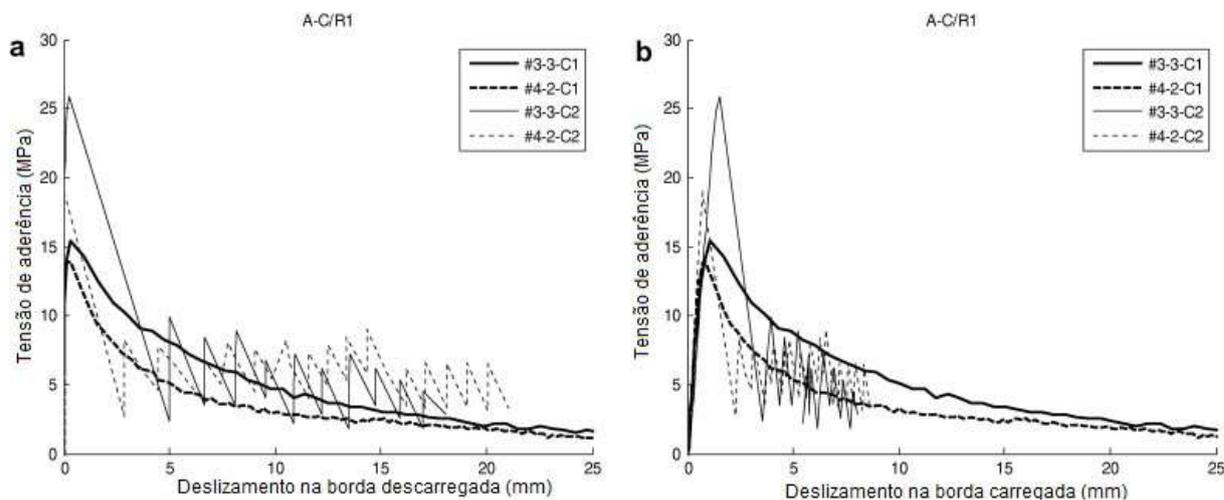
Figura 5 – Comparação das curvas de tensão de aderência pelo deslocamento com diferentes tratamentos de superfície de barras de FRPV inseridos no HFRC (a) e concreto normal (b)



Fonte: Huang *et al.* (2020, p. 10).

A superfície do vergalhão possui um impacto importante na resistência de arrancamento, pois as cargas são transferidas ao concreto por meio do atrito na interface entre o concreto e as barras. A geometria também é importante para a resposta tensão-deformação, uma vez que, barras com envolvimento helicoidal apresentam uma superfície com altura e espaçamento variáveis, sendo que sua importância aumenta com o aumento da resistência à compressão do concreto (BAENA *et al.*, 2009).

Figura 6 – Curva de aderência-deslocamento de vergalhões para a extremidade (a) descarregada e (b) carregada



Fonte: Baena *et al.* (2009, p. 788).

A tensão de aderência em barras com ancoragem mecânica, nos estudos realizados por Islam *et al.* (2015), apresentou aumentos consideráveis quando comparado com barras retas de mesma superfície e mesmo comprimento de ancoragem, isso pode ser explicado pela configuração da extremidade e a distribuição das tensões de acordo com o apresentado na Figura 8.

3.3 Efeito da Resistência do Concreto

Baena *et al.* (2009) analisam a influência da resistência do concreto no comportamento de aderência, utilizando concretos com resistência à compressão de 28,63 MPa, denominado como C1, e 52,19 MPa, denominado como C2. Observou-se que o modo de ruptura, obtido pelo ensaio de arrancamento, está relacionado com a resistência do concreto. Pois nos ensaios que utilizaram concreto C2, a ruptura de aderência ocorreu na superfície das armaduras de FRPV, sendo que utilizando o concreto C1, a ruptura ocorreu na interface barra-matriz. Logo, confirma-se que para concretos com maior valor de resistência à compressão, as características das barras, como diâmetro e tipo de superfície, por exemplo, são de suma importância na resistência de aderência. Já para concretos com menor valor de resistência, a ruptura pode ser única e exclusivamente na superfície do concreto ou com menor dano na barra e maior dano no concreto, caracterizada ainda pela falha da matriz. Observa-se que o valor da resistência de aderência é diretamente proporcional ao valor da resistência à compressão do concreto.

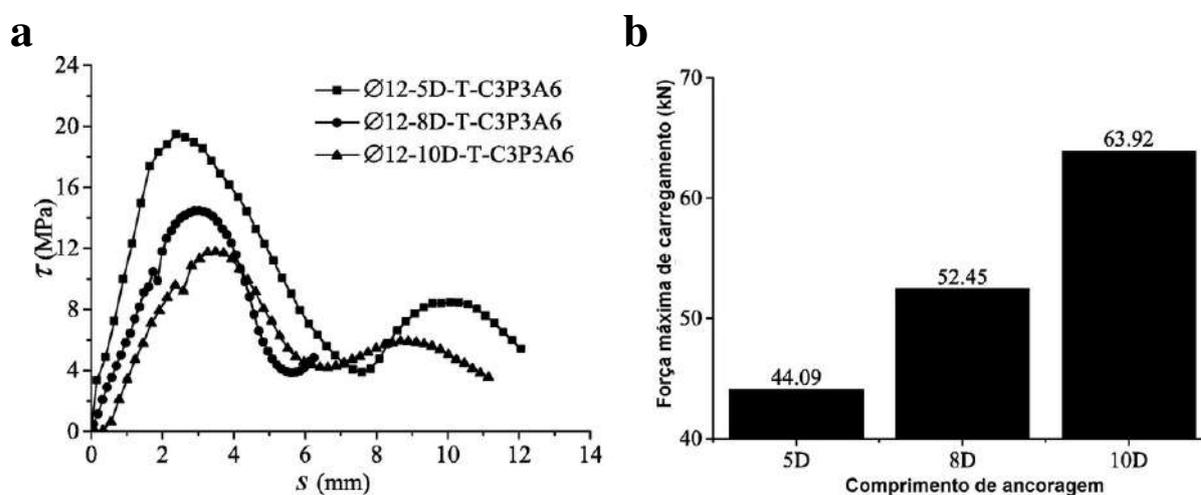
Okelo e Yuan (2005) realizaram estudos utilizando três diferentes relações de água/cimento, 0,52, 0,45 e 0,38 e barras de FRPA, FRPC e FRPV, ensaiadas pelo método de arrancamento, por fornecer uma forma simples de comparação real da ligação entre os materiais. Com isso, a resistência à compressão do concreto interfere no modo de ruptura da aderência entre as barras e o concreto. Com o intuito de assegurar a representatividade dos valores obtidos, foram moldados três CP's para cada variável.

O modo de ruptura de barras de FRPV, ancoradas em concretos com resistência à compressão superior a 30 MPa, ocorre parcialmente na superfície da barra, diferente do que acontece com barras de aço, em que a falha pode ser observada apenas no concreto. Ou seja, para resistências superiores a 30 MPa, a resistência de aderência tende a ser controlada pela resistência ao cisalhamento na barra. No entanto, para resistências inferiores a 15 MPa, a falha é controlada pela resistência ao cisalhamento no concreto (ACHILLIDES; PILAKOUTAS, 2004).

3.4 Efeito do Comprimento de Ancoragem

Resultados obtidos por Huang *et al.* (2020) mostram que, de acordo com a Figura 7 (a), à medida que o comprimento de ancoragem aumentou, a tensão de aderência diminuiu. Já a Figura 7 (b), mostra que a força de carregamento aumenta com o aumento do comprimento de ancoragem. Assim, percebe-se, de acordo com o autor, que ocorre uma distribuição desigual das tensões na seção de contato entre o concreto e as barras de FRPV.

Figura 7 – Comparação das curvas de tensão de aderência pelo deslocamento (a) e força de carga máxima com diferentes comprimentos de ancoragem de barras de FRPV (b)

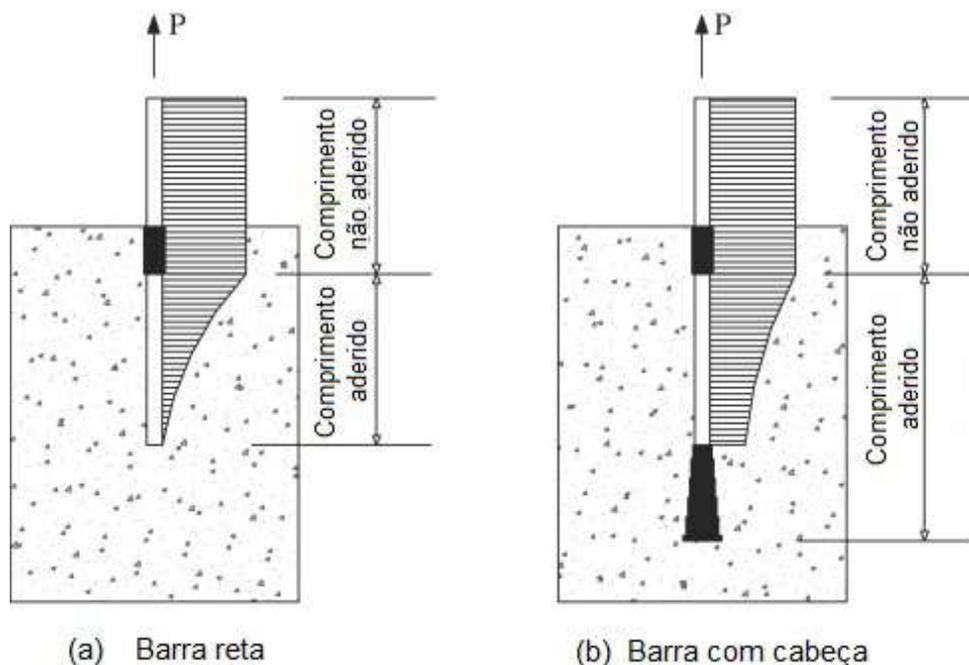


Fonte: Huang *et al.* (2020, p. 10).

Estudos realizados por Islam *et al.* (2015), utilizando diferentes comprimentos de embutimento e comparando estes entre barras com extremidades retas e barras com dispositivos mecânicos acoplados, também confirmam que com o aumento do comprimento de embutimento, a tensão de aderência diminuiu para ambos os casos. Apesar da carga última de CP's com maior comprimento de ancoragem ser superior do que aqueles com menor comprimento de ancoragem. Ainda segundo o autor, quando o comprimento de embutimento for maior que o comprimento de desenvolvimento, que é definido como a dimensão mínima necessária para distribuir totalmente a tensão de tração nas barras, como mostrado na Figura 8 (a), o deslizamento na extremidade livre é reduzido a quase zero. Logo, para o caso em que há ancoragem mecânica a distribuição de tensões pode se manifestar de acordo com o apresentado na Figura 8 (b).

O comprimento de ancoragem, no qual a força necessária para puxar as barras de FRPV é igual à resistência à tração final da barra, é denominado de comprimento de ancoragem básico l_b .

Figura 8 – Distribuição das tensões ao longo de (a) barras retas e (b) barras com cabeça



Fonte: Adaptado de Islam *et al.* (2015, p. 285).

A distribuição das tensões de aderência em barras com fios enrolados helicoidalmente de FRPV é diferente se comparado com barras nervuradas de aço, pois as de FRPV são obtidas a partir de barras lisas pelo processo de pultrusão, no qual pode resultar em barras não homogêneas. Com isso, em locais onde existe uma maior rugosidade, o embutimento do concreto é maior e, conseqüentemente, a resistência de aderência, sendo de forma contrária para superfícies que apresentam menor rugosidade. Essa alteração não ocorre em barras de aço, por se tratar de nervuras uniformes ao longo do comprimento e superfície (HUANG *et al.*, 2020). Os resultados obtidos por Okelo e Yuan (2005) também confirmam que, com o aumento do comprimento de embutimento, a resistência de aderência diminui.

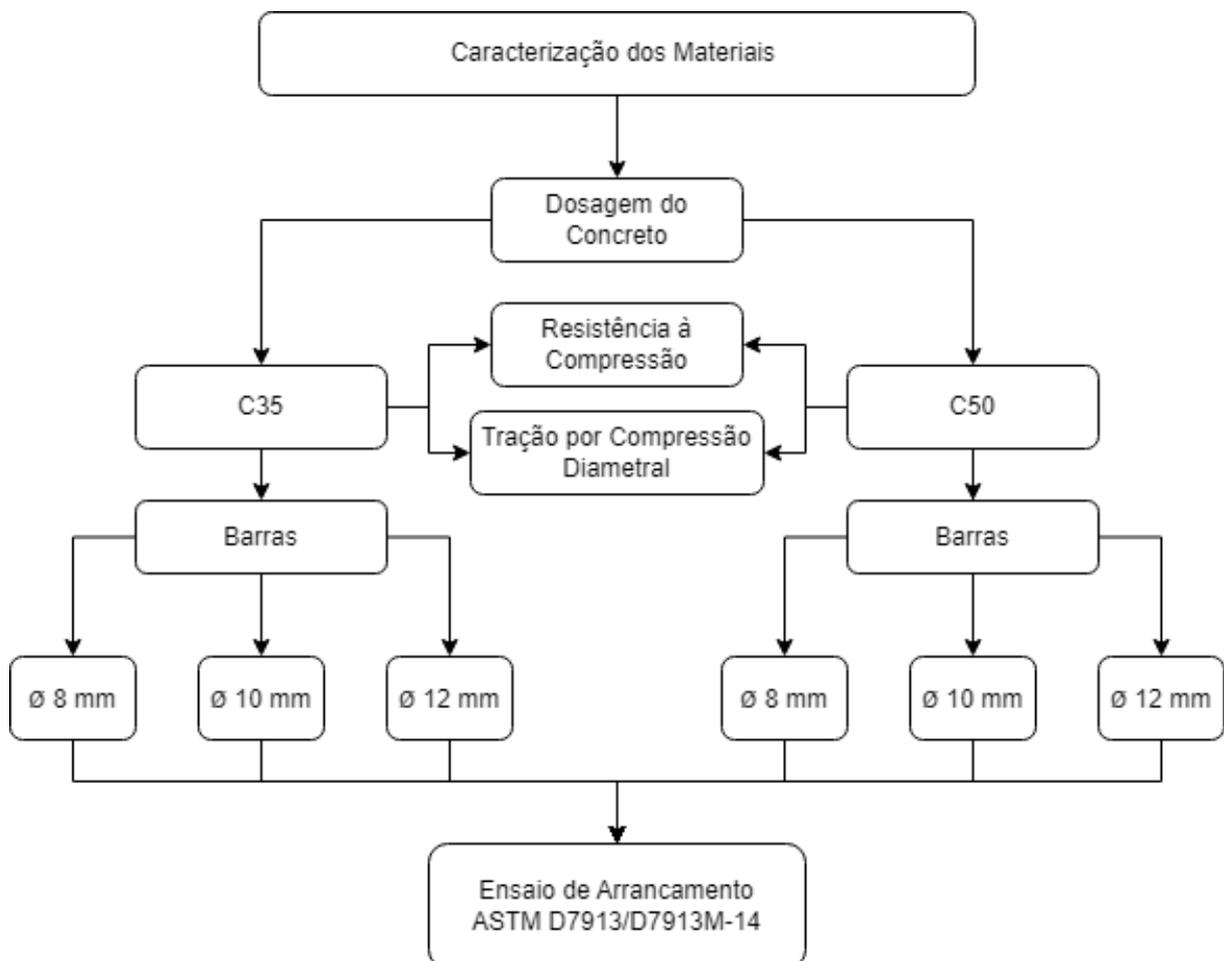
O aumento no comprimento de embutimento, nas análises do resultados obtidos por Hossain, Ametrano e Lachemi (2014), resultou em uma diminuição na resistência de aderência média, confirmando os estudos realizados por outros autores e com isso, mostrando coerência no que é apresentado.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Em conformidade com o apresentado nos objetivos propostos neste trabalho, o programa experimental foi desenvolvido para que seja possível realizar uma análise comparativa entre os diferentes diâmetros e sua influência quanto a resistência de aderência, juntamente com a variação da resistência à compressão do concreto. Consequentemente, neste capítulo encontra-se o programa experimental determinado, com informações sobre os materiais, métodos e equipamentos, além das normativas a serem utilizadas.

É apresentado, na Figura 9, o organograma que ilustra de forma simplificada o procedimento experimental estabelecido para esta pesquisa, sendo que, a caracterização dos materiais que foram utilizados no concreto foi realizada. Em seguida, as barras foram ancoradas em uma das extremidades, de acordo com a D7205/D7205M-06 (ASTM, 2016), posteriormente foram realizadas as concretagens e moldagens dos traços C35 e C50 e, por fim, os corpos de prova curados, foram ensaiados em conformidade com a D7913/D7913M-14 (ASTM, 2020).

Figura 9 – Organograma.



Fonte: Elaboração própria.

As barras de FRPV foram moldadas em prismas cúbicos de concreto na orientação horizontal e curados por 28 dias. Após a cura, os espécimes foram submetidos a um dispositivo de teste, capaz de comprimir a região ancorada no concreto e tracionar, com a utilização de garras, a região livre da barra de FRPV até a falha. Com a força máxima, obtida neste ensaio, dividida pela área de ancoragem entre a barra e o concreto, obteve-se a tensão de aderência.

4.1 Materiais

Os materiais empregados neste trabalho são apresentados a seguir. Para a produção da mistura de concreto, utiliza-se elementos como o cimento Portland de alta resistência inicial, agregado miúdo de origem natural, agregado graúdo de origem basáltica, aditivo e água.

As barras utilizadas são de polímeros reforçados com fibras de vidro, sendo essas inseridas no concreto para análise da aderência. Desta forma, busca-se utilizar três diâmetros diferentes de vergalhões, sendo eles de 8 mm, 10 mm e 12 mm, com a finalidade de avaliar o seu efeito na resistência de aderência.

4.1.1 Cimento Portland

O Cimento Portland empregado é, do fabricante InterCement Brasil S.A., de alta resistência inicial, conhecido nacionalmente como CP V-ARI RS. A sua formulação é composta basicamente de gesso mais clínquer e filler calcário, sendo o primeiro dentro da faixa de 90 a 100% e, o segundo de 0 a 10%. O motivo da utilizado deste cimento é a sua pureza, evitando a introdução de variáveis ao estudo.

4.1.2 Aditivo

O aditivo utilizado foi um superplastificante, com a finalidade de alterar a trabalhabilidade do concreto. A quantidade adicionada a mistura é apresentada na Tabela 2, dentro da faixa recomendada pelo fabricante.

4.1.3 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado na mistura do concreto é uma areia grossa, disponível no mercado local. Para a devida caracterização do agregado, utilizou-se as normas NBR NM 248 (ABNT, 2003), com o intuito de realizar o ensaio de granulometria e a NBR 16916 (ABNT, 2021), para a absorção e massa específica. A representação do material utilizado está mostrado na Figura 10.

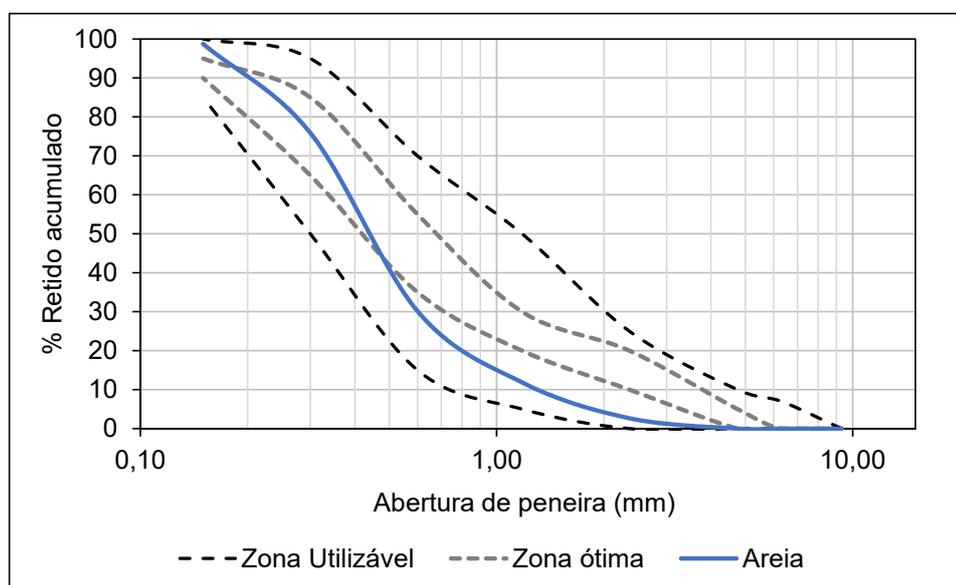
Figura 10 – Agregado miúdo utilizado na dosagem do concreto.



Fonte: Elaboração própria.

Os valores das propriedades físicas são apresentados a seguir: $2,52 \text{ g/cm}^3$ para densidade do agregado na condição seca; $2,53 \text{ g/cm}^3$ na condição saturada superfície seca e; $0,39\%$ de absorção de água. A curva granulométrica está apresentada na Figura 11, com os limites estabelecidos de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2005).

Figura 11 – Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: Elaboração própria.

4.1.4 Agregado Graúdo

O agregado graúdo para a dosagem do concreto é de origem basáltica, obtido no mercado local. De maneira análoga ao que foi realizado com o agregado miúdo, caracterizou-se os agregados graúdos de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), para a determinação da curva granulométrica e, com a NBR 16917 (ABNT, 2021) e

NBR 16972 (ABNT, 2021), para os índices físicos, como absorção e massa específica. A representação do material utilizado está mostrado na Figura 12.

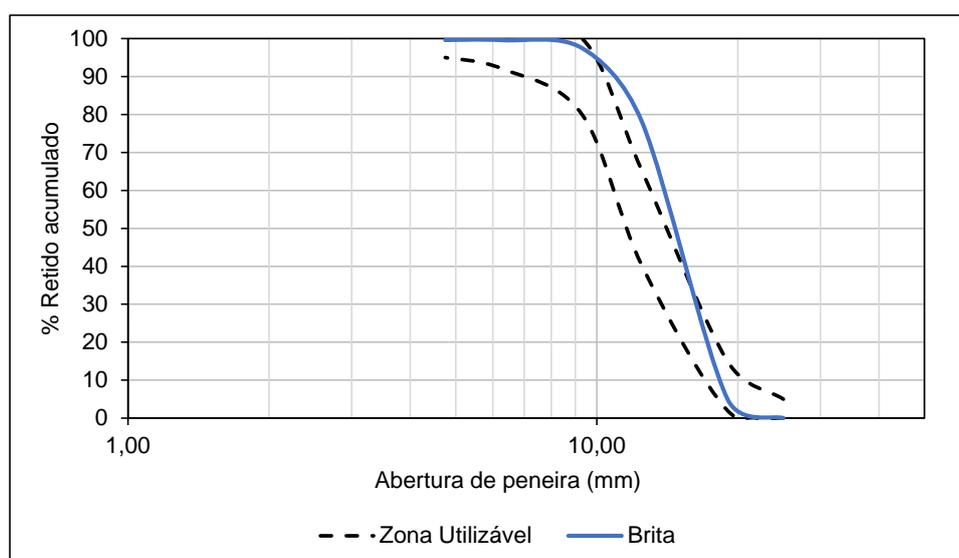
A curva granulométrica está apresentada na Figura 13, com os limites fornecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2005). Os valores das propriedades físicas são apresentado a seguir: 2,74 g/cm³ para densidade do agregado na condição seca e 2,78 g/cm³ na condição saturada superfície seca; 1,76% de absorção de água; 1422,40 kg/m³ para a massa unitária; 48,01% de índice de vazios; com módulo de finura de 3,02 e; dimensão máxima de 19 mm. Por possuir uma dimensão máxima de 19 mm, o agregado é caracterizado como Brita 1.

Figura 12 – Agregado graúdo utilizado na dosagem do concreto.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 13 – Curva granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: Elaboração própria.

4.1.5 Água

A água utilizada na dosagem é oriunda da rede pública de distribuição da cidade de Alegrete-RS. A quantidade de água, assim como os outros materiais, utilizados para um traço unitário são mostrados na Tabela 2.

4.1.6 Concreto

Neste estudo, foram avaliados dois traços distintos, os quais foram obtidos por meio da realização da dosagem do concreto na própria universidade, pelo método do IPT-EPUSP. O processo de dosagem consiste na seleção dos componentes adequados, determinando suas quantidades, com o intuito de obter um concreto capaz de atender as condições de trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade.

O primeiro traço possui uma resistência característica de 35 MPa, enquanto que o segundo possui 50 MPa. A nomenclatura adotada é mostrada na Tabela 1. O traço apresenta um teor de argamassa de 51% e trabalhabilidade de 14 ± 2 cm. A quantidade unitária dos materiais utilizados na dosagem dos traços está apresentada na Tabela 2. O consumo de cimento do traço C35 é de 288,36 kg/m³ e do traço C50 é de 411,00 kg/m³.

Tabela 1 – Nomenclatura utilizada para os traços de concreto.

Denominação	Código
Traço 35 MPa	C35
Traço 50 MPa	C50

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 2 – Dosagem unitária dos traços.

Código	Quantidade de materiais				
	Cimento	Areia	Brita	Aditivo	a/c
C35	1,00	3,16	3,84	0,20%	0,50
C50	1,00	1,95	2,73	0,20%	0,41

Fonte: Elaboração própria.

4.1.7 Barras de Polímeros Reforçadas com Fibra de Vidro

As características das barras de FRPV estão apresentadas na Tabela 3, de acordo com CT 303 (2021), porém, os ensaios foram realizados por um trabalho em paralelo, onde: barras de 8 mm, apresentaram uma resistência à tração média de

990,31 MPa, módulo de elasticidade de 49,47 GPa e deformação última de 22,73 ‰; barras de 10 mm, apresentaram uma resistência à tração média de 939,45 MPa, módulo de elasticidade de 48,56 GPa e deformação última de 21,96 ‰ e; barras de 12 mm, apresentaram uma resistência à tração média de 841,03 MPa, módulo de elasticidade de 49,74 GPa e deformação última de 16,82 ‰.

As barras foram obtidas na empresa Haizer Group, nos diâmetros de 12 mm, 10 mm e 8 mm e são mostradas na Figura 14 da esquerda para a direita. Para os ensaios de arrancamento, estas foram cortadas com uma serra manual em comprimentos distintos para cada diâmetro, comprimento este depende do diâmetro efetivo, que possui seu processo de obtenção descrito no item 4.2.2. Os dados para obtenção do comprimento total das barras estão apresentados no item 4.2.3.

Tabela 3 – Valores de referência das propriedades mecânicas de barras de FRP.

Material	Propriedade	Valor de Referência	Desvio padrão
CT 303	E_f (GPa)	50	-
	f_{fk} (MPa)	800	-
	ε_{fu} (‰)	16,0	-
8 mm	E_f (GPa)	49,47	1,357
	f_{fk} (MPa)	990,31	55,215
	ε_{fu} (‰)	22,73	0,779
10 mm	E_f (GPa)	48,56	1,742
	f_{fk} (MPa)	939,45	93,466
	ε_{fu} (‰)	21,96	1,896
12 mm	E_f (GPa)	49,74	0,190
	f_{fk} (MPa)	841,03	0,896
	ε_{fu} (‰)	16,82	0,018

Fonte: Adaptado de CT 303 (2021, p. 23).

Figura 14 – Barras de FRPV com diâmetros de 12 mm (esquerda), 10 mm (centro) e 8 mm (direita).



Fonte: Elaboração própria.

4.2 Métodos

Os procedimentos aqui utilizados possuem a finalidade de determinar as características das barras de FRPV quanto as suas propriedades mecânicas em relação à resistência de aderência ao concreto com resistência à compressão de 35 MPa e 50 MPa. Os resultados obtidos foram comparados para avaliar a influência do diâmetro e, também, a influência da resistência à compressão do concreto.

A produção dos traços de concreto foi realizada em uma betoneira de eixo central, sendo que a sequência de adição dos materiais foi da seguinte maneira: primeiro adicionou-se todo o agregado graúdo e, posteriormente, parte da água; em seguida o cimento e, mais uma parte da água e uma parte do aditivo; após, inseriu-se o agregado miúdo e o restante da água e do aditivo. De acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2020), realizou-se o ensaio de abatimento do tronco de cone, com o intuito de verificar a trabalhabilidade do concreto. A moldagem dos CP's cilíndricos foi realizada conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015), enquanto que a moldagem dos CP's cúbicos seguiu as recomendações expostas na D7913/D7913M-14 (ASTM, 2020). A cura foi feita em câmara úmida por 28 dias, como determina a NBR 5738 (ABNT, 2015).

Como mostrado na Tabela 4, foram moldados 3 corpos de prova cúbicos para cada diâmetro e para cada traço do concreto, totalizando 18 CP's, já para o ensaio de resistência à compressão do concreto, foram moldados 8 CP's cilíndricos para cada traço, totalizando 16 CP's. Também, na tabela são expostos as idades de realização dos ensaios.

Tabela 4 – Resumo da Metodologia.

Ensaio	Quantidade de amostras	Idade do ensaio
Arrancamento Direto	3	28 dias
Tração por Compressão Diametral	3	28 dias
Resistência à Compressão	5	28 dias

Fonte: Elaboração própria.

Com o intuito de obter os valores de resistência à compressão do concreto, os CP's cilíndricos possuem diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, com o lançamento do concreto em duas camadas, aplicando 12 golpes cada com a haste metálica de compactação e mantidos em câmara úmida, de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015). O rompimento foi realizado aos 28 dias, conforme NBR 5739 (ABNT, 2018).

Na Figura 15 são representadas as etapas de preparação das amostras para a concretagem, Figura 15 (a), e a amostra concretada, Figura 15 (b). Como pode-se observar, houve a necessidade de apoiar a extremidade ancorada com o tubo de aço, pois, a massa combinada da resina com o tubo, além do comprimento da barra, poderia causar uma descentralização na região onde seria concretada.

Figura 15 – Concretagem dos corpos de prova cúbicos.



(a) Preparação para concretagem

(b) CP concretado

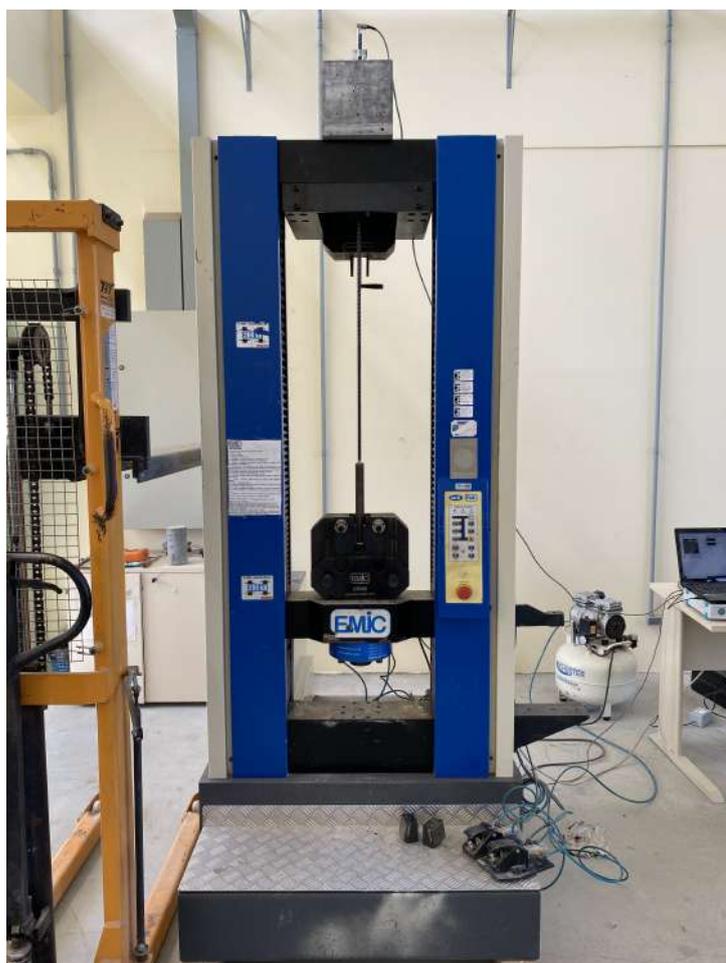
Fonte: Elaboração própria.

A concretagem foi realizada em dois dias distintos, com o intervalo de 2 dias entre elas, pois houve a necessidade de desmoldar os CP's e preparar as amostras,

Figura 15 (a), centralizando as barras e montando novamente as formas, as quais eram parafusadas. Na primeira concretagem do traço C50, as condições de umidade relativa do ar eram de 37% e temperatura de 19,6° C, obtendo slump de 16 cm. Enquanto que na segunda, traço C35, a umidade relativa do ar era de 43% e temperatura de 17,8° C, obtendo slump de 12,5 cm.

Os ensaios de arrancamento direto foram realizados na máquina universal EMIC DL 20000, sendo que as barras foram ancoradas às garras, como exposto a seguir no item 4.2.1. Além disso, foram utilizados LVDT's (transdutores de deslocamento variável linear), para medir o deslocamento da barra em relação ao concreto. O esquema da montagem dos CP's foi realizado de acordo com o apresentado na Figura 21. Para os ensaios de compressão dos corpos de prova cilíndricos, a máquina utilizada é uma EMIC PC200C. Com o corpo de prova posicionado, realizou-se a instrumentação e o ensaio, como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Realização do ensaio de arrancamento direto.



Fonte: Elaboração própria (2022).

A taxa de carregamento durante o ensaio de arrancamento não pode ser superior a 20 kN/min ou 1,3 mm/min do deslocamento do LVDT posicionado na parte superior do corpo de prova. No decorrer do carregamento, as leituras no LVDT devem ser feitas

em intervalos até que a força medida diminua e ocorra um deslizamento de pelo menos 2,5 mm na extremidade livre da barra, como recomenda a D7913/D7913M-14 (ASTM, 2020). Os LVDT's inferiores não foram utilizados, pois servem para medir, caso aja, a excentricidade do carregamento. Ao decorrer do ensaio, observou-se que o LVDT superior, de 10 mm, não era suficiente para o deslocamento até a ruptura, sendo este, na maioria das vezes abrupto, com isso, passou-se a utilizar um LVDT de 20 mm e seu posicionamento pode ser observado na Figura 17.

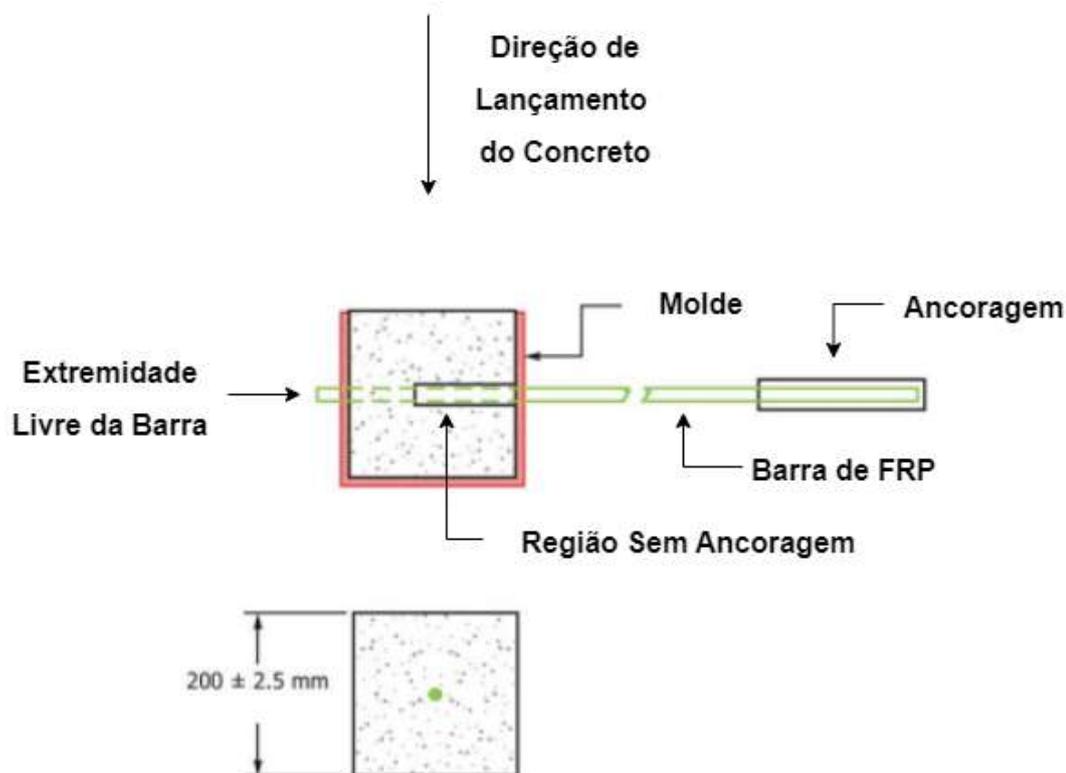
Sabe-se que a orientação da moldagem dos corpos de prova, como mostrado na Figura 18, possui influência sob a resistência de ligação entre as barras e o concreto (OKELO; YUAN, 2005; JUCÁ, 2020). Porém, por não ser o foco deste trabalho, os corpos de prova foram moldados na horizontal, em 3 camadas com 25 golpes cada. Os dimensões e o esquema da moldagem estão apresentados na Figura 18.

Figura 17 – Posicionamento do LVDT superior.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 18 – Dimensões da amostra e esquema de moldagem na horizontal.



Fonte: Adaptado de ASTM D7913/D7913M - 14 (ASTM, 2020, p. 5).

Como apresentado na Figura 18 e na Figura 21, existe uma região da barra, a qual não deve ser ancorada, para isso, foram revestidas com um tubo de policloreto de vinila (PVC). Esse valor depende do diâmetro efetivo da barra. Também, após a região ancorada, na extremidade livre das barras, estas devem sobressair do concreto um comprimento suficiente para a disposição do LVDT.

As barras de FRPV foram posicionadas, de acordo com a Figura 19, nas formas com os devidos cuidados para manter a centralização, além de manter o comprimento de ancoragem necessário de cada diâmetro. Na imagem pode-se observar o material de PVC, com cola quente nas extremidades, evitando a entrada da nata do concreto, garantindo a ancoragem apenas na região necessária.

A concretagem dos corpos de prova foi realizada de acordo com o apresentado na Figura 18 e foram curados em câmara úmida, como mostra a Figura 20. Para a cura, dos corpos de prova prismáticos, foi utilizado um sistema de aspersores, garantindo a umidade. Após a cura dos corpos de prova, estes foram ensaiados de acordo com o descrito no item 4.2.1, utilizando LVDT na parte superior, com o intuito de medir o deslocamento da barra de FRPV, Figura 17. Com isso, foi possível realizar os gráficos, como os apresentados no item 3.

Figura 19 – Posicionamento das barras.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 20 – Cura dos corpos de prova prismáticos.

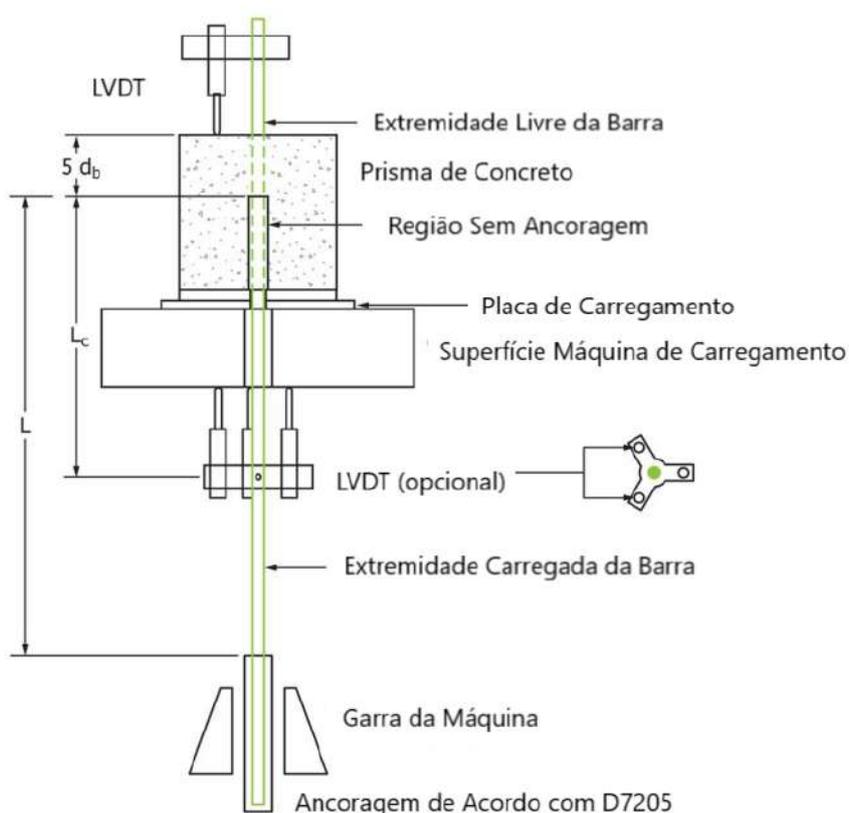


Fonte: Elaboração própria (2022).

4.2.1 Ancoragem das Barras

As barras de FRP possuem uma baixa resistência transversal, com isso, não podem ser testadas à tração de maneira semelhante ao método de realização dos testes com vergalhões de aço. Ao carregar um vergalhão de FRP, utilizando garras de atrito tradicionais, a combinação de altas tensões de compressão e danos mecânicos causados pelo atrito na superfície levará à falha prematura na região da garra (OKELO; YUAN, 2005). Logo, necessitou-se ancorar a extremidade das barras, para que seja possível submetê-los à tração.

Figura 21 – Esquema da montagem e preparação do corpo de prova para o ensaio de arrancamento direto.

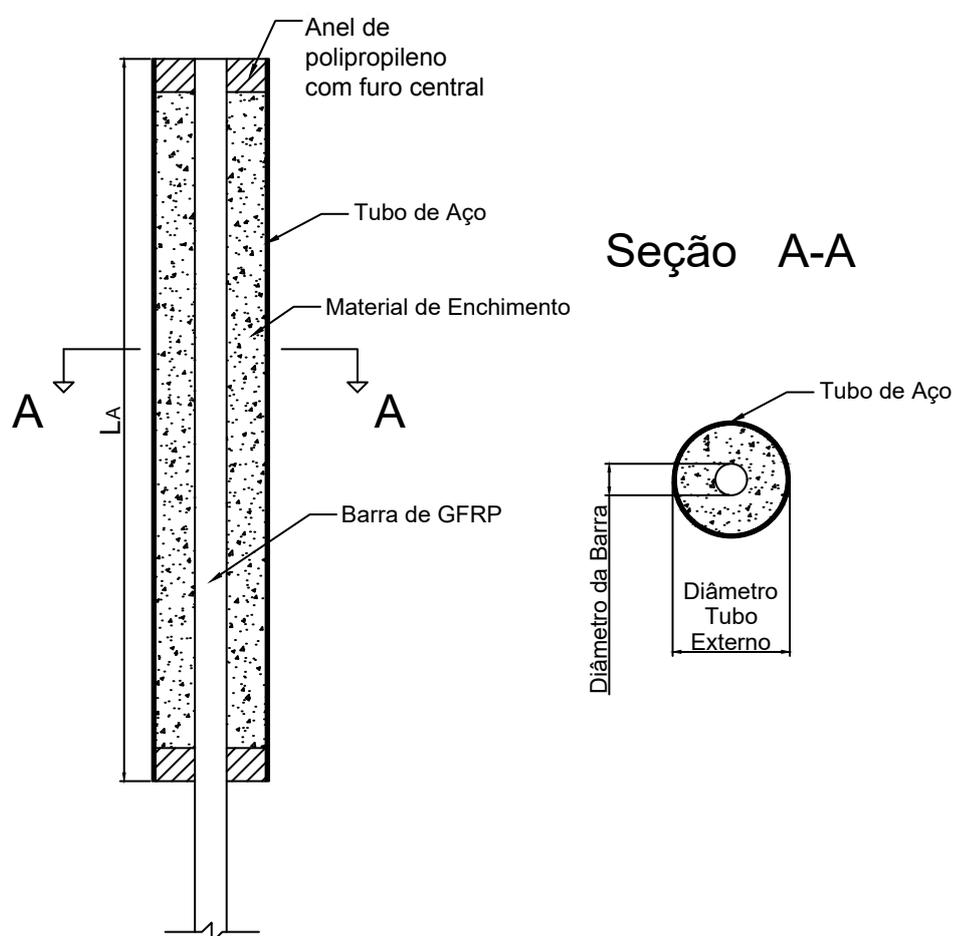


Fonte: Adaptado de ASTM D7913/D7913M - 14 (ASTM, 2020, p. 3).

A ancoragem da extremidade livre carregada das barras foi realizada de acordo com a D7205/D7205M-06 (ASTM, 2016), procedimento descrito no Anexo A da mesma. Desta forma, realizou-se a ancoragem com uma resina Epóxi, da marca comercial Vedacit, de média fluidez, em uma proporção de 1/1. Essa resina atua como um adesivo estrutural garantindo a aderência entre o tubo de aço e a barra de FRPV com cura de 7 dias. Os anéis, confeccionados em polipropileno, permitiram a centralização das barras no tubo de aço e, também, serviram como material de vedação para a resina que, foi adicionada por uma extremidade sem o anel, o qual foi posicionado após o enchimento total do tubo. Vale ressaltar que o objetivo da ancoragem é evitar o dano nas barras causado pelas garras da máquina que executa o teste de tração.

Apesar de utilizar uma resina Epóxi, a D7205/D7205M-06 (ASTM, 2016) propõe outros materiais que podem ser utilizados e, para o caso de resinas, pode-se misturar essas a uma mesma quantidade de areia, tomando uma proporção de 1/1, ou seja, uma parte de resina, para uma parte de areia. A utilização de resina Epóxi, como material de enchimento, é para garantir a ancoragem da barra para com o tubo de aço, permitindo a transmissão dos esforços. O esquema de ancoragem está exposto na Figura 22, onde o comprimento L_A , que é utilizado, se manterá constante para todos os diâmetros. Apesar da norma recomendar valores de acordo com o diâmetro, foi adotado, de maneira empírica, um comprimento igual a 25 cm para todas as barras, no intuito de padronizar o ensaio. De acordo com testes previamente realizados, este comprimento foi capaz de garantir a aderência entre a barra de FRPV e o tubo de aço.

Figura 22 – Esquema da ancoragem da extremidade livre da barra.



Fonte: Adaptado de ASTM D7205/D7205M - 06 (ASTM, 2016, p. 8).

4.2.2 Diâmetro Efetivo

O diâmetro efetivo das barras (d_b), é obtido de acordo com a D7205/D7205M-06 (ASTM, 2016), por meio da Equação 4.1, sendo A a área nominal da seção transversal da barra, calculada pela média de 5 amostras representativas das barras. O procedi-

mento para determinação da área nominal, consiste na medição do volume, de forma indireta, de 5 barras de comprimento de 100 mm, pela diferença de massa da amostra no estado seco e totalmente imerso.

$$d_b = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (4.1)$$

Isolando o volume na fórmula da densidade e substituindo a densidade pela gravidade específica vezes a densidade da água, na temperatura no dia em que foram realizadas as medições, sabendo que o volume consiste na área vezes o comprimento, temos, com as devidas substituições, a Equação 4.2. Sendo m_1 a massa do estado seco e m_2 a massa totalmente submersa. A obtenção da massa específica e densidade é realizado em conformidade com a D792-20 (ASTM, 2020).

$$d_b = 2\sqrt{\frac{m_1 - m_2}{\rho \cdot \pi \cdot l}} \quad (4.2)$$

Na Equação 4.2, l é dado em mm, as massas em mg e a densidade da água é dada como 1 mg/mm^3 . Com os valores desses parâmetros, obteve-se a diâmetro efetivo médio das 5 barras e estão expostos na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores médios para determinação do diâmetro efetivo (d_b) das barras.

Diâmetro (mm)	m_1 (mg)	m_2 (mg)	l (mm)	d_b (mm)
8	9040	4700	100	7,41
10	17440	8920	100	10,42
12	22400	11400	100	11,86

Fonte: Elaboração própria.

4.2.3 Comprimento das Barras

Após a obtenção do diâmetro efetivo, calculou-se o comprimento de ancoragem no concreto ($5 \cdot d_b$), como representado na Figura 21 e o comprimento total das barras (L_T), adotando um valor de 100 mm para a instrumentação do LVDT na extremidade livre. Os valores estão dispostos na Tabela 6, sendo que a representação do comprimento L é exposto na Figura 21.

Tabela 6 – Dados do comprimento das barras.

ϕ (mm)	L (mm)	5. d_b (mm)	L_A (mm)	LVDT (mm)	L_T
8	1200	37	250	100	1587
10	1200	52	250	100	1602
12	1200	59	250	100	1609

Fonte: Elaboração própria.

4.2.4 Resistência à Aderência

A determinação do valor de resistência de aderência dos ensaios de arrancamento se dá pela Equação 4.3. Vale ressaltar que o diâmetro efetivo é utilizado na determinação do perímetro efetivo das barras (C_b) que compõe a Equação 4.3 aplicada para definir a tensão de aderência em (MPa). Nesta equação, a força de tração (F) é dada em Newton e obtida diretamente na prensa pelo ensaio de arrancamento direto, já o comprimento de aderência (l_a), neste caso igual a 5 vezes o d_b , e o C_b são dados em mm.

$$\tau = \frac{F}{C_b \cdot l_a} \quad (4.3)$$

Para a devida validação dos dados, deve-se desconsiderar os casos, nos quais os corpos de prova se separam em duas partes na seção de ancoragem ou ao longo do comprimento livre, também ao deslizar na seção de ancoragem ou na garra e, onde a força é reduzida devido a existência de rachaduras ou fissuras do concreto.

De acordo com os resultados, obtidos por meio da Equação 4.3 e dos valores de deslocamento obtidos pelo LVDT, foram plotados gráficos da tensão pelo deslocamento para analisar a influência dos parâmetros estudados e comportamento dos corpos de prova frente ao ensaio de arrancamento.

Ao final, após obtenção das carregamentos e deslocamentos, os valores obtidos experimentalmente foram comparados com os valores obtidos pelas equações das normas para uma correta interpretação e análise. As equações encontradas na ACI 440.1 R-15 (2015), na CSA S806-02 (2002) e na CT 303 (2021) levam em consideração a resistência do concreto, aspectos geométricos da barra e comprimento de ancoragem, como citado no item 3, devido a esse fato, serão utilizadas para comparação.

A Equação 4.4, como recomenda a ACI 440.1 R-15 (2015), permite estimar o cálculo da tensão de aderência média (μ), sendo que, os parâmetros são os seguintes: C , é o cobrimento do centro da barra até a extremidade mais próxima da face do concreto; d_b , como dito anteriormente no item 4.2.2, é o diâmetro efetivo das

barras, apresentados na Tabela 5; l_e , é o comprimento de ancoragem, ou seja, $5.d_b$, apresentado na Tabela 6 e; f'_c é a resistência à compressão do concreto, mostrada na Tabela 7. O limite para a relação C/d_b estipulado pela norma é de 3,5, logo, o C foi calculado em função desse limite.

$$\frac{\mu}{0,083.\sqrt{f'_c}} = 4 + 0,3\frac{C}{d_b} + 100\frac{d_b}{l_e} \quad (4.4)$$

A equação 4.5, de acordo com a CT 303 (2021) e semelhante aos procedimento de cálculo para a resistência de aderência de barras de aço, de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), onde os parâmetros são descritos a seguir, sendo: f_{bk} , a resistência de aderência característica, igual a f'_c , da equação anterior; η_1 , sendo 1,15 para barras com fios envolvidos helicoidalmente; η_2 , sendo 1 para regiões de boa aderência, como determina as definições da NBR 6118 (ABNT, 2014); η_3 , igual a 1 para barras com diâmetro inferior a 20 mm; η_4 , sendo igual a 1 para barras de FRPV e; $f_{ctk,inf}$, a resistência à tração característica inferior do concreto, obtida de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014).

$$f_{bk} = \eta_1\eta_2\eta_3\eta_4 f_{ctk,inf} \quad (4.5)$$

A equação 4.6, rearranjada das recomendações da CSA S806-02 (2002), e isolando a tensão de aderência (μ), onde os parâmetros são os seguintes: d_{cs} é igual ao C, citado anteriormente; k_1 é fator de localização da barra, sendo 1 para armadura horizontal com menos de 300 mm acima do concreto; k_2 é o fator de densidade do concreto, sendo 1 para concreto de densidade normal; k_3 é o coeficiente de tamanho da barra, sendo 0,8, pois a área da seção transversal das barras é menor que 300 mm²; k_4 é o fator do tipo da fibra da barra, sendo 1 para FRPV; k_5 é o fator que leva em consideração o tratamento superficial da barra, sendo 1,05 para barras com fios envolvidos helicoidalmente; f'_c é a resistência à compressão do concreto e; d_b é o diâmetro efetivo. Também, há um limite para a relação d_{cs}/d_b estipulado pela norma, de 2,5, logo, o d_{cs} foi calculado em função desse limite.

$$\mu = \frac{d_{cs}\sqrt{f'_c}}{1,15.k_1k_2k_3k_4k_5\pi d_b} \quad (4.6)$$

5 RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados encontrados nos ensaios experimentais realizados nessa pesquisa. Os gráficos e a manipulação dos dados, obtidos experimentalmente, além dos cálculos baseados nas normas, foram elaborados utilizando o software Excel.

Os valores da resistência à compressão do concreto para os traços C35 e C50 são expostos na Tabela 7, bem como a resistência à tração por compressão diametral. Com a média de 3 CP's cilíndricos, obteve-se, também, o desvio padrão para ambos os ensaios, com o intuito de melhorar a confiabilidade dos resultados. O concreto de classe C50 não atingiu a resistência à compressão esperada, tornando o intervalo de comparação mais próximo do que esperado, porém ainda possui relevância, frente aos estudos sobre as barras de FRPV.

Tabela 7 – Média das resistências dos corpos de prova cilíndricos.

Traço	Resistência à compressão	Desvio padrão	Resistência à tração por compressão diametral	Desvio padrão
C35	35,88 MPa	1,876	3,26 MPa	0,048
C50	47,28 MPa	2,801	4,45 MPa	0,184

Fonte: Elaboração própria.

Foram realizados ensaios com o esclerômetro para verificar se ocorreram diferenças significativas na resistência à compressão dos CP's, devido o sentido de lançamento do concreto, onde, os CP's rompidos à compressão possuem o sentido de lançamento diferente dos CP's cúbicos, sendo que seus esforços atuantes se distribuem também em sentido diferentes. Conclui-se que, de acordo com os resultados encontrados, não houveram diferenças expressivas, portanto, a direção de lançamento do concreto não deve ser uma fator relevante na resistência de aderência para as condições consideradas neste trabalho.

A nomenclatura utilizada nos resultados é descrita como C50-8 mm, por exemplo, onde a primeira parcela, C50 e C35, caracterizam a resistência à compressão do concreto nos traços utilizados, enquanto que o 8 mm, 10 mm e 12 mm representam o diâmetro da barra. Logo, C50- 8 mm, significa um corpo de prova, inserido no traço C50 de concreto com barra de FRPV de 8 mm de diâmetro.

O comportamento observado em todos os gráficos, independente do diâmetro da barra e resistência à compressão do concreto, mostraram-se semelhantes, com um aumento da tensão de aderência e um pequeno deslocamento, característica dos compósitos reforçados com barras de FRPV, também observada por Huang *et al.* (2020), Mazaheripour *et al.* (2013), Liao *et al.* (2022). Além disso, trata-se de um

comportamento linear-elástico inicialmente, seguido pelo escoamento e após a tensão máxima ser atingida, ocorre uma suavização da curva de tensão pelo deslocamento, isso pode variar de acordo com o tratamento superficial das barras, porém neste trabalho o comportamento mostrou-se semelhante em todo o desenvolvimento da curva. A ruptura ocorreu em momentos distintos, sendo de forma brusca, confirmando a característica de materiais frágeis observada no Fib (2007).

Com a tensão de aderência calculada de acordo com a equação 4.3 e o deslocamento medido pelo LVDT foram plotados os gráficos de tensão pelo deslocamento. Como recomenda o CT 303 (2021), abordado no item 4.2.4, os dados que apresentaram inconsistência, como o deslizamento no tubo de aço, devem ser desconsiderados, porém nesse estudo, não foram obtidos tais dados, apenas a queda brusca da resistência de aderência, nas barras de 10 mm e 8 mm inseridas no concreto de classe C35 e C50.

Os valores das resistências de aderência obtidos para cada corpo de prova, bem como a média e o desvio padrão, são expostos na Tabela 8, onde: $\tau_{\text{máx}}$ é a resistência de aderência máxima; $\tau_{\text{méd}}$ é a resistência média entre os CP's e; d_p é o desvio padrão amostral. Também, o modo de ruptura apresentado por todos os corpos foi por arrancamento (pullout).

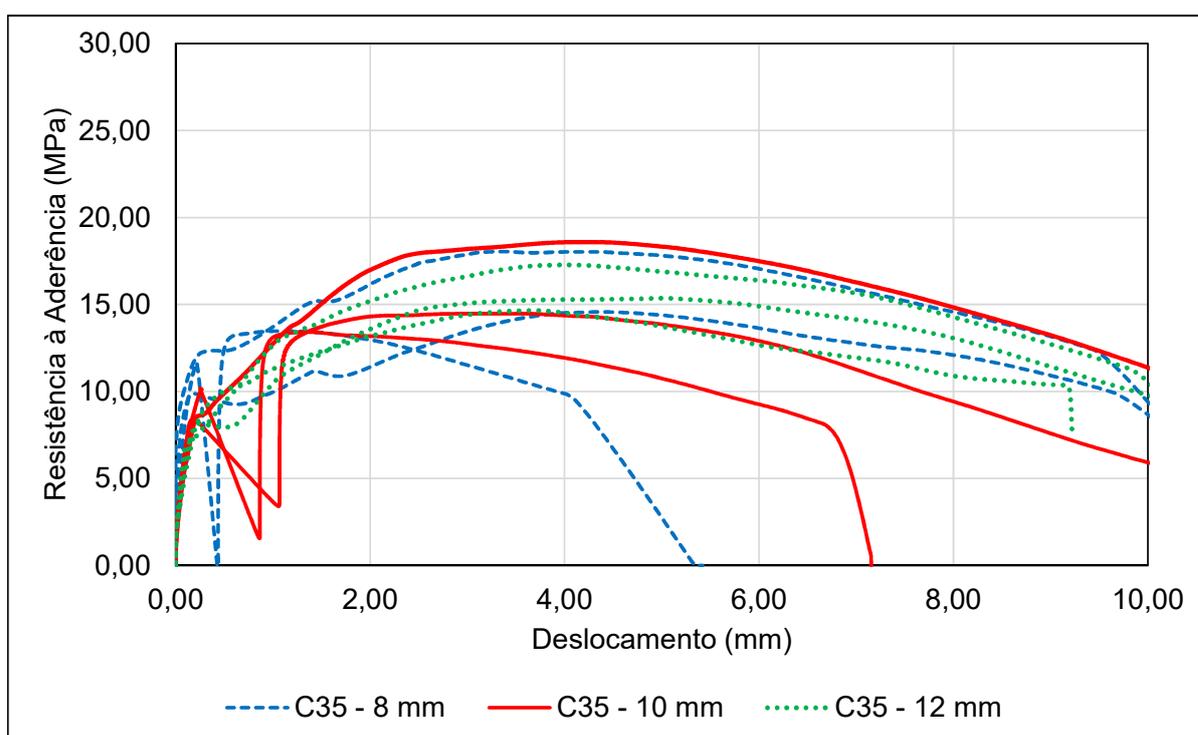
Tabela 8 – Valores obtidos de tensão de aderência.

Amostra	Espécime	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{méd}}$ (MPa)	d_p (MPa)
C35-8 mm	CP01	13,47	15,36	2,38
	CP02	18,04		
	CP03	14,57		
C35-10 mm	CP01	13,42	15,50	2,73
	CP02	18,59		
	CP03	14,48		
C35-12 mm	CP01	17,27	15,76	1,35
	CP02	14,65		
	CP03	15,36		
C50-8 mm	CP01	24,72	23,71	3,36
	CP02	26,44		
	CP03	19,95		
C50-10 mm	CP01	15,69	17,96	5,15
	CP02	23,86		
	CP03	14,33		
C50-12 mm	CP01	18,91	18,97	3,11
	CP02	22,11		
	CP03	15,89		

Fonte: Elaboração própria.

A comparação entre os resultados dos diferentes diâmetros e a mesma classe do concreto são apresentados a seguir, sendo que, o C35 e o C50 são analisados na Figura 23 e na Figura 24, respectivamente. Na Figura 23 pode-se observar um comportamento semelhante das curvas das barras, com resistências de aderência próximas entre si, com a média entre 16,31 MPa e 15,50 MPa, onde o maior valor compreende a barra de 8 mm e o menor a barra de 10 mm, sendo que as barras 12 mm apresentaram uma média maior que as barras de 10mm, esta de 15,76 MPa. Contudo, de acordo com o teste de Tukey apresentado na Tabela 9, não há diferença significativa entre as resultados obtidos. Baena *et al.* (2009), no entanto, observou em seus estudos que as barras de FRPV com menor diâmetro apresentam maior resistência de aderência em relação as barras de maior diâmetro, de acordo com o autor a resistência diminui com o aumento do diâmetro da barra.

Figura 23 – Curvas de resistência de aderência pelo deslocamento para o concreto C35.

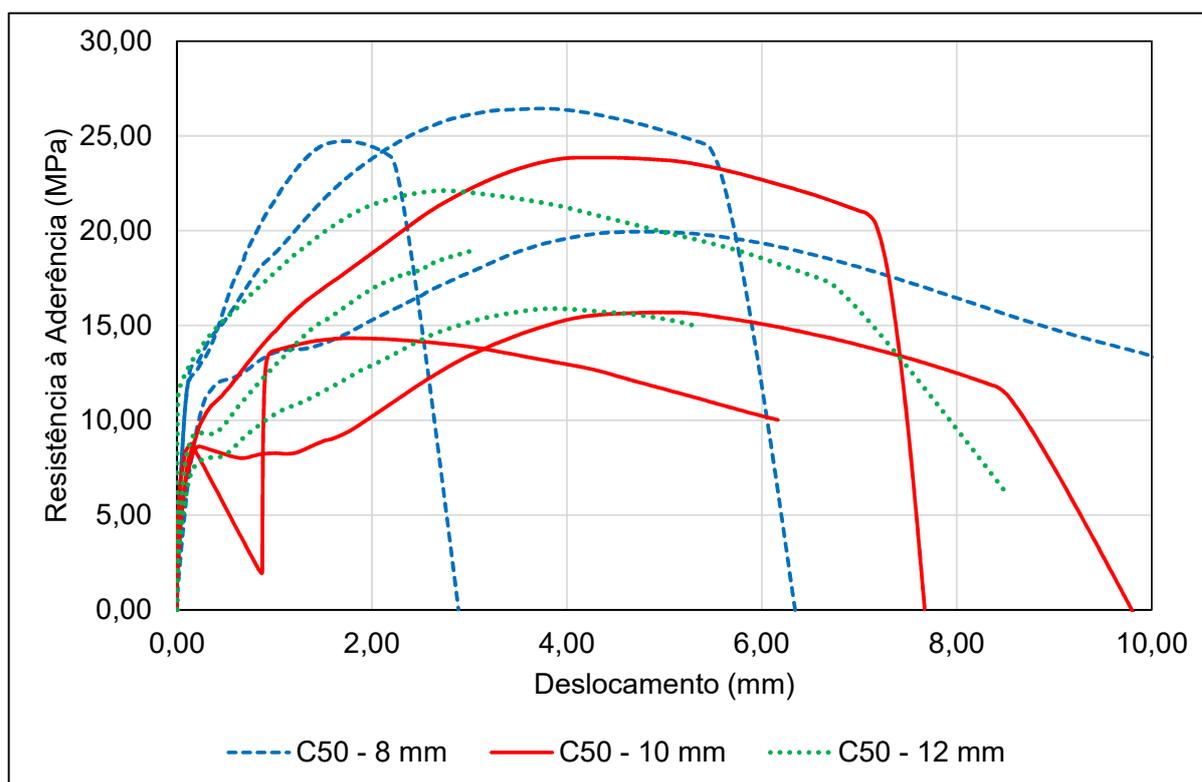


Fonte: Elaboração própria.

As barras de 8 mm, inseridas no concreto C35, apresentaram uma maior rigidez inicial, seguido por um escoamento, este que também ocorreu nas demais barras. Como as barras são do mesmo fabricante e mesmo lote, foram fabricados sob semelhantes condições, não sendo um fator determinante para a diferença observada, porém existe uma variação da seção transversal ao longo da barra, como pode ser observado na Figura 14, logo essa diferença inicial, pode-se estar relacionada a isso, possuindo influência em relação o módulo de elasticidade. Após atingir a tensão máxima, houve uma suavização da curva e posterior ruptura. Mesmo utilizando um LVDT de 20 mm,

não foi possível medir todo o deslocamento, pois com a ruptura, poderia danificar o equipamento, como ele estava fixado na parte superior da barra. Também, segundo recomendações da D7913/D7913M-14 (ASTM, 2020), o ensaio pode ser interrompido com deslocamentos maiores que 2,5 mm.

Figura 24 – Curvas de resistência de aderência pelo deslocamento para o concreto C50.



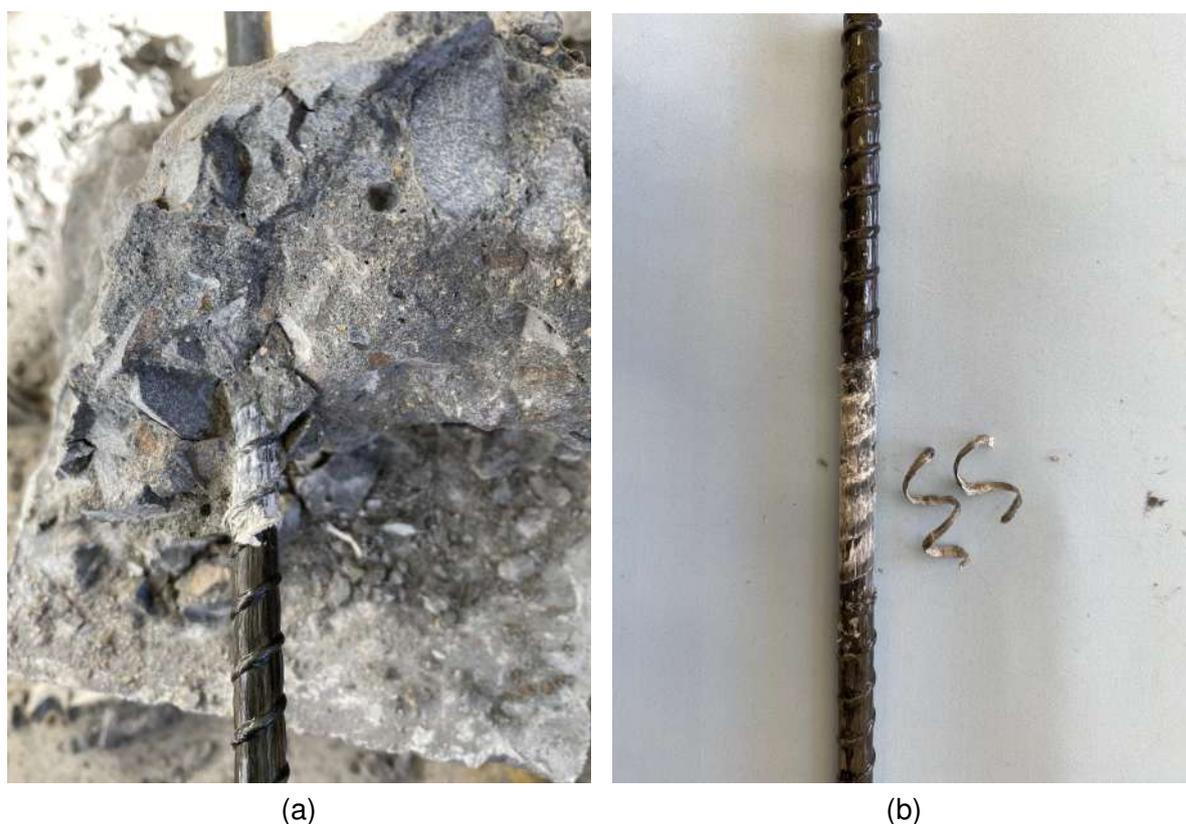
Fonte: Elaboração própria.

Ao comparar as curvas obtidas pelas barras de diâmetro de 8mm, 10mm e 12mm, inseridas no concreto de resistência de 50 MPa, Figura 24, pode-se observar uma variação maior nos valores de resistência de aderência entre as curvas, mas seu comportamento é semelhante. Dois vergalhões de 12mm, apresentados na Figura 24, tiveram seu ensaio interrompido, pois inicialmente utilizou-se um LVDT de 10mm, não medindo totalmente o deslocamento, mas ainda sim respeitando as recomendações de 2,5 mm de deslocamento, expostas na D7913/D7913M-14 (ASTM, 2020). Em relação ao resultados da Figura 23, nota-se que a ruptura dos CP's, inseridos no concreto com maior resistência, ocorreu mais prematuramente, para todos o diâmetros analisados. Isso pode ser explicado, devido a maior tensão de aderência resistida pela CP's, permitindo um menor deslocamento até a ruptura.

A média das resistências são de 23,44 MPa, 19,78 MPa e 18,97 MPa, das barras de 8mm, 10mm e 12 mm, respectivamente. Porém, diferente do que pode-se observar com o concreto C35, o desvio padrão mostrou-se maior para o concreto C50. Também,

as barras de 8mm apresentaram uma rigidez inicial maior que as demais, com sua ruptura sem um grande deslocamento, como o que foi observado na Figura 23. Ainda, como já citado, para resistências à compressão do concreto maiores que 30 MPa, a ruptura ocorre na superfície da barra, isso pode ser observado pela Figura 25, que constata o modo de ruptura por arrancamento. Logo, os resultados encontrados nesse estudo estão de acordo com o indicado por Achillides e Pilakoutas (2004), Baena *et al.* (2009), Tepfers (2006).

Figura 25 – Representação da região de ancoragem da barra de FRPV.



A queda das resistências de aderência nas curvas dos gráficos, pode ser devido ao escorregamento da barra na região de ancoragem, pois o deslocamento ainda foi medido, sendo que o LVDT estava posicionado na parte superior dos corpos de prova, não sendo do descolamento do tubo de aço, na extremidade carregada. Esse comportamento, no qual a resistência continua a subir, ultrapassando a resistência última de aderência, não foi observado na literatura, apenas uma queda brusca, com diminuição da resistência até a falha.

A queda abrupta na resistência de aderência, observada nas curvas da Figura 24, possivelmente é devido ao escorregamento da barra na região de aderência. Como a queda na resistência ocorreu no final do regime linear elástico e o LVDT continuou medindo as deformações, acredita-se que apenas alguns pontos do fio helicoidal, responsável por grande parte da aderência, tenha se rompido, levando

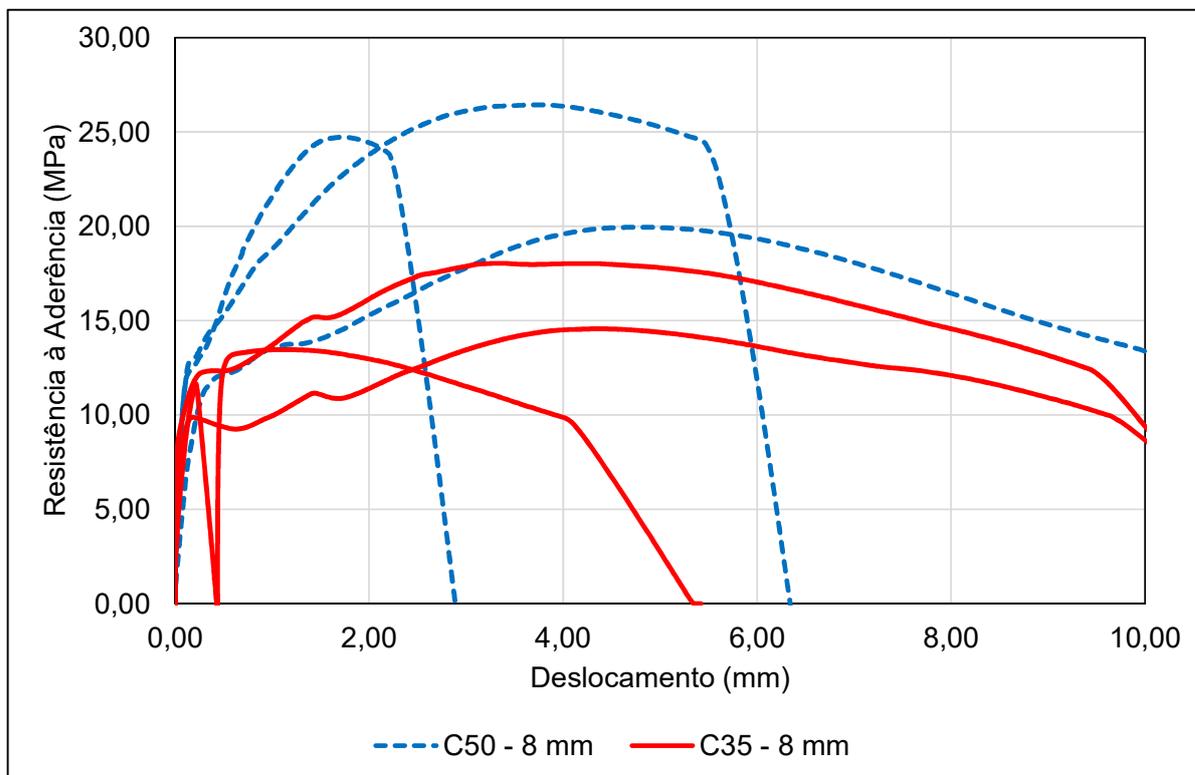
a um deslocamento brusco da barra. O fato da resistência de aderência continuar aumentando até atingir a sua capacidade máxima, corrobora com a hipótese que houve apenas um escorregamento da barra e não uma ruptura ou perda total da capacidade resistente. Contudo, esse comportamento não foi observado na literatura, apenas uma queda brusca, com diminuição da resistência até a falha, tal comportamento pode estar associado as propriedades e características da barra.

A característica foi observada em três CP's com barras de 10mm e apenas um, com barra de 8mm, desses, apenas uma barra de 10mm inserida no concreto de classe C50. Como pode-se observar na Figura 25(b), ocorreu um deslocamento do fio envolvido helicoidalmente na região de ancoragem, dito isso, esse comportamento pode ter acontecido nesses corpos de prova também, não provocando um total descolamento do fio, mas o suficiente para causar um deslocamento da região livre da barra e, ancorando novamente, proporcionando um leve aumento na resistência. O comportamento das barras de 10 mm, Figura 27, ocorre de maneira semelhante, com um deslizamento em ordens de grandeza e resistências de aderência últimas próximas, independente da resistência à compressão do concreto. Partindo da premissa de que as condições de ensaio, moldagem e montagem dos CP's foram a mesma e, como pode-se observar, a resistência do concreto não teve influência, supõe-se que a barra não possui um adequado tratamento superficial, ou aderência deste, capaz de permitir uma resistência eficaz.

As curvas apresentadas nas Figuras 26, 27, 28, apresentam a comparação entre os diâmetros e as resistências à compressão do concreto, fato de relevância para este estudo. Pode-se observar, na Figura 26, referente as barras de 8 mm, onde a resistência do concreto possui influência, que os CP's C50 apresentam uma maior resistência de aderência em relação as que são inseridas no concreto C35. Também, a ruptura destes, ocorreu de forma mais abrupta, com um menor deslocamento após alcançar a tensão de aderência última, enquanto que os CP's C35 - 8mm, com exceção ao que possui um deslizamento inicial, apresentaram uma suavização da curva. Logo,

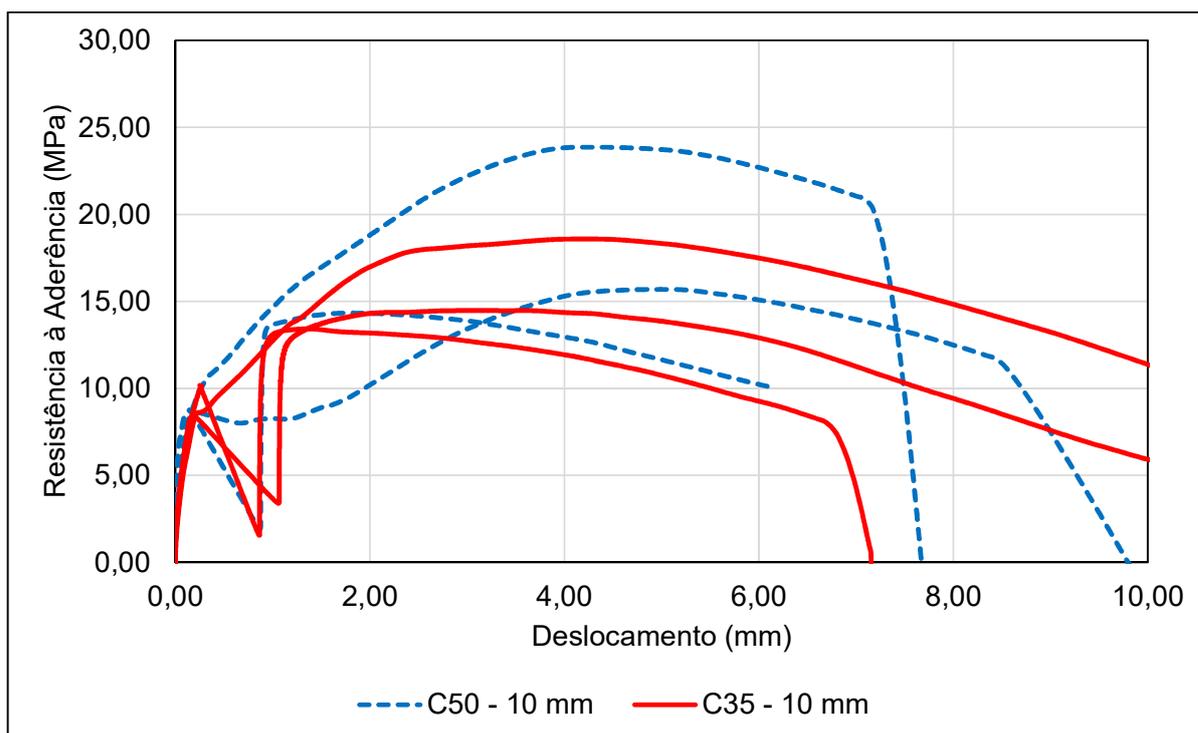
Os corpos de prova com barras de diâmetro de 10 mm, apresentados na Figura 27, onde 3 barras de 6, apresentaram um comportamento atípico, não encontrado na literatura. É possível que tenha ocorrido o descolamento do fio que envolve, de forma helicoidal, a barra, apresentando uma falha no tratamento superficial. Ao analisar a Figura 28, juntamente com os dados fornecidos na Tabela 8, pode-se observar que, mesmo não sendo significativo, uma tendência de aumento na tensão de aderência, com o aumento da resistência à compressão do concreto, sendo que, o concreto de classe C50 apresentou 18,97 MPa de resistência média de aderência, enquanto que o C35, 15,76 MPa. Com isso, confirma-se os resultados obtidos por Okelo e Yuan (2005), Baena *et al.* (2009).

Figura 26 – Comparação das curvas de aderência entre resistências do concreto para as barras de diâmetro de 8 mm.



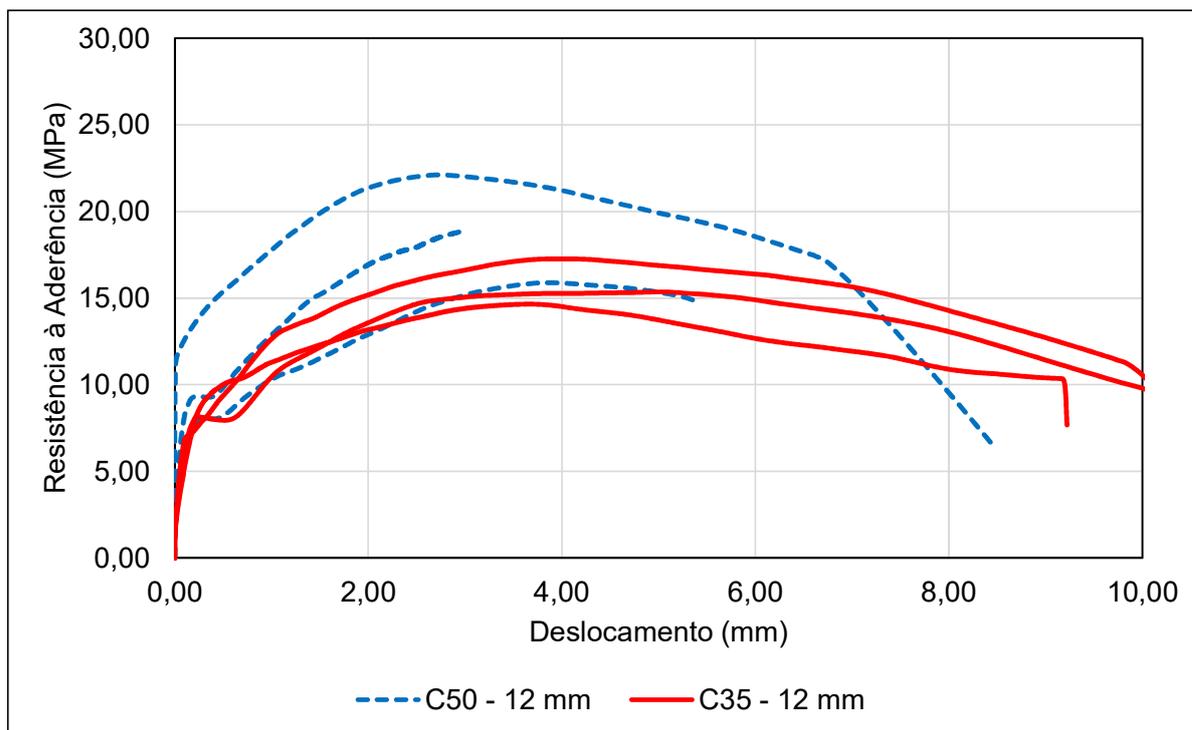
Fonte: Elaboração própria.

Figura 27 – Comparação das curvas de aderência entre resistências do concreto para as barras de diâmetro de 10 mm.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 28 – Comparação das curvas de aderência entre resistências do concreto para as barras de diâmetro de 12 mm.



Fonte: Elaboração própria.

Com a análise estatística realizada, teste de Tukey, que leva em consideração a significância dos dados amostrais, estes apresentados na Tabela 9, para o nível de confiabilidade de 95%, utilizado neste estudo. Como é possível observar, apenas as amostras C50-8 mm e C35-8 mm apresentam diferenças significativas entre os resultados obtidos, com um nível de confiabilidade de 95%, os demais resultados não demonstram, estatisticamente, diferenças entre os valores de resistência de aderência.

Tabela 9 – Teste de Tukey.

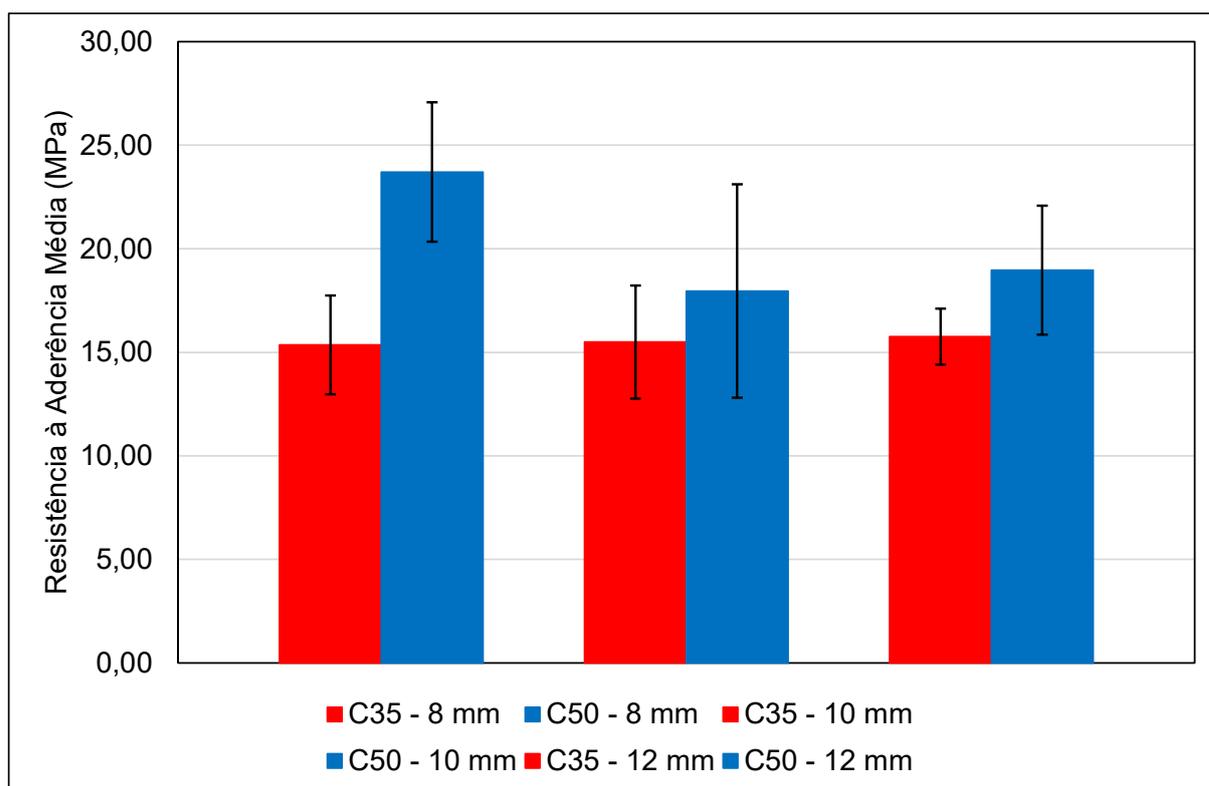
Parâmetro	Combinações	Prob.	Alpha	Sig
8 mm	C35 x C50	0,0248	0,05	Sim
10 mm	C35 x C50	0,5044	0,05	Não
12 mm	C35 x C50	0,1765	0,05	Não
C35	10 mm x 12 mm	0,9885	0,05	Não
	8 mm x 12 mm	0,9739	0,05	Não
	8 mm x 10 mm	0,9969	0,05	Não
C50	10 mm x 12 mm	0,9487	0,05	Não
	8 mm x 12 mm	0,3738	0,05	Não
	8 mm x 10 mm	0,2581	0,05	Não

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com o teste de Tukey, Tabela 9, apenas as barras de 8 mm apresentaram variação significativa para diferentes resistências do concreto, isso também pode ser observado na Figura 29, a qual ilustra os valores da resistência máxima média obtidas pelo ensaio de arrancamento, onde as barras do desvio padrão estão em conformidade com os resultados estatísticos. Ainda, as médias máximas dos CP's C35 - 8 mm, C35 - 10 mm e C35 - 12 mm, mostram-se com uma tendência de crescimento, enquanto o diâmetro da barra aumenta, mesmo não sendo estatisticamente diferentes. Enquanto que os CP's C50 - 8 mm, C50 - 10 mm e C50 - 12 mm, apresentaram uma diminuição na resistência máxima, com o aumento do diâmetro, novamente, não apresentando diferenças estatísticas.

Logo, a resistência do concreto não apresentou, neste estudo, grande influência, sendo que os resultados não mostraram-se estatisticamente diferentes entre si, fato este, apresentado nos estudos realizados por Baena *et al.* (2009), Okelo e Yuan (2005), Achillides e Pilakoutas (2004), Huang *et al.* (2020), Hossain, Ametrano e Lachemi (2014), Islam *et al.* (2015).

Figura 29 – Média da máxima resistência de aderência.



Fonte: Elaboração própria.

A ruptura ilustrada na Figura 25 está de acordo com os resultados obtidos por Baena *et al.* (2009), pois, esta é constatada na barra, não havendo grandes danos, ou danos visíveis no concreto. Também, isso confirma os resultados obtidos por Achillides e Pilakoutas (2004), com resistências do concreto maiores que 30 MPa, sendo que

o tratamento superficial das barras é um fator determinante para a resistência de aderência, apesar das diferenças significativas, sendo que as barras inseridas no concreto de classe C50 apresentaram melhores resultados.

A aderência mecânica é garantida graças às saliências existentes na superfície das barras de FRP, criando pontos de apoio no concreto, dificultando o escorregamento. Como pode-se observar na Figura 25, o fio envolvido helicoidalmente aderido a barra inicialmente, antes da realização do ensaio, foi totalmente descolado, contribuindo para o arrancamento da barra do cubo de concreto. Além disso, ao longo de todo o comprimento de ancoragem o concreto não apresentava falhas de concretagem, sendo que o arrancamento do fio aconteceu em toda essa região. Apesar do ensaio, o cubo de concreto permaneceu intacto em sua essência, não apresentando fissuras devido os esforços nas bielas de compressão.

A comparação dos valores de tensão de aderência obtidos pelas normas CT 303 (2021), CSA S806-02 (2002) e ACI 440.1 R-15 (2015) são apresentados, na Tabela 10, também estes valores podem ser comparados com os valores expostos na Figura 29. Com isso, pode-se observar a variação dos resultados, onde as normas se mostraram, de maneira geral mais conservadoras, em relação ao dados obtidos experimentalmente. Em suma, os dados obtidos pelas normas, são coerentes e semelhantes entre si. Como as normas, que limitam o cobrimento, fornecendo as relações C/d_b e d_{cs}/d_b , de 3,5 e de 2,5, respectivamente, temos que, segundo a ACI 440.1 R-15 (2015), com o aumento do cobrimento do concreto, também ocorre um aumento da resistência de aderência, como pode ser observado nos resultados aqui analisados.

Ao comparar as normas CSA S806-02 (2002) e ACI 440.1 R-15 (2015), pode-se observar que, a primeira tende a ser mais conservadora que a segunda, apesar de apresentarem pouca diferença entre os valores. Já os valores obtidos pela norma CT 303 (2021), mostraram-se mais conservadores que ambas citadas anteriormente. Isso pode estar relacionado com a utilização de uma metodologia de cálculo baseada nos experimentos realizados com estruturas, as quais possuem o aço como reforço, não sendo exclusivamente elaboradas para barras de FRPV, devido a sua recente implementação no mercado nacional, enquanto que as demais normas citadas, são adaptadas de ensaios e experimentos já realizados.

Neste estudo, o diâmetro da barra e o cobrimento, não apresentaram influência sob a resistência de aderência calculada de acordo com as normas, como pode-se observar na Tabela 10. Resultados semelhantes foram encontrados por Hossain, Ametrano e Lachemi (2014), ao comparar os resultados obtidos experimentalmente com os códigos CAN/CSA S6-06 (2006), CSA S806-02 (2002) e ACI 440.1 R-15 (2015). Em relação aos valores de resistência de aderência obtidos experimentalmente, apresentados como Exp. na Tabela 10, estes mostraram-se superiores aos encontrados nas normas, determinando que a previsão das normas são conservadoras. O código

CT 303 (2021), ainda cita que a resistência de aderência pode ser determinada como 30% da resistência de aderência obtida experimentalmente, sendo que os valores encontram-se próximos as outras normas aqui comparadas, mas como nem sempre é possível realizar o ensaio, em questões de dimensionamento e projetos, por exemplo, esse estudo, avalia os dados em relação a equação fornecida.

Tabela 10 – Tensão média de aderência obtidas experimentalmente e baseadas em códigos.

Amostra	d_b (mm)	f_{ck} (MPa)	Exp.	ACI 440.1R	CSA S806	CT 303
			μ (MPa)	μ (MPa)	μ (MPa)	f_{bk} (MPa)
C35-8 mm	7,41	35,88	15,36	5,50	4,93	2,63
C35-10 mm	10,42	35,88	15,50	5,50	4,93	2,63
C35-12 mm	11,86	35,88	15,76	5,50	4,93	2,63
C50-8 mm	7,41	47,28	23,71	6,31	5,66	3,16
C50-10 mm	10,42	47,28	17,96	6,31	5,66	3,16
C50-12 mm	11,86	47,28	18,97	6,31	5,66	3,16

Fonte: Elaboração própria.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho, bem como as sugestões para pesquisas futuras, visando, como principal objetivo, um melhor entendimento do comportamento mecânico das barras de FRPV, principalmente em relação a resistência de aderência com diferentes diâmetros e resistências à compressão do concreto, em que estão inseridas.

O comportamento frente ao modo de ruptura dos corpos de prova analisados neste estudo mostraram-se coerentes com o que é apresentado na literatura, onde a ruptura ocorreu na interface entre o concreto e a barra, para todos os corpos de prova. Isso, possivelmente devido ao fato de que, as resistências à compressão do concreto terem sido maiores que 30 MPa.

Os fios envolvidos helicoidalmente não apresentaram uma colagem efetiva com a barra, soltando em grande parte dos corpos de prova analisados neste estudo, sendo que, como dito, o tratamento de superfície das barras é um fator determinante para concretos com resistências à compressão maiores que 30 MPa.

O aumento da resistência à compressão do concreto não proporcionou um aumento significativo na resistência de aderência, com exceção dos CP's com as barras de diâmetro de 8 mm, mostrando influência sobre o comportamento à aderência encontrado na literatura.

As resistências de ligação derivadas dos testes de arrancamento são maiores do que as fornecidas pelas normas CT 303 (2021), CSA S806-02 (2002) e ACI 440.1 R-15 (2015). Os códigos de projeto fornecem uma previsão conservadora da resistência de ligação, e as equações baseadas nas normas podem ser usadas com segurança para a previsão da resistência de aderência de barras de FRPV.

REFERÊNCIAS

ACHILLIDES, Z.; PILAKOUTAS, K. Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions. **Journal of Composites for construction**, American Society of Civil Engineers, v. 8, n. 2, p. 173–181, 2004. Citado 3 vezes, nas páginas 29, 53 e 57.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.1 R-06: Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars**. Farmington Hills, Michigan, 2006. Citado na página 25.

_____. **ACI 440.1 R-15: Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars**. Farmington Hills, Michigan, 2015. Citado 7 vezes, nas páginas 16, 18, 20, 21, 47, 58 e 60.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7205/D7205M-06: Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars**. United States, ASTM, 2016. Citado 3 vezes, nas páginas 32, 44 e 45.

_____. **ASTM D7913/D7913M-14: Standard Test Method for Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pullout Testing**. United States, ASTM, 2020. Citado 6 vezes, nas páginas 32, 38, 41, 42, 44 e 52.

_____. **ASTM D792-20: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**. United States, ASTM, 2020. Citado na página 46.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, ABNT, 2003. Citado 2 vezes, nas páginas 33 e 34.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, ABNT, 2005. Citado 2 vezes, nas páginas 34 e 35.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, ABNT, 2014. Citado na página 48.

_____. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, ABNT, 2015. Citado 2 vezes, nas páginas 38 e 39.

_____. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2018. Citado na página 39.

_____. **NBR 16889: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, ABNT, 2020. Citado na página 38.

_____. **NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, ABNT, 2021. Citado na página 33.

_____. **NBR 16917: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, ABNT, 2021. Citado na página 34.

_____. **NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro, ABNT, 2021. Citado na página 35.

BAENA, M. *et al.* Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test. **Composites Part B: Engineering**, Elsevier, v. 40, n. 8, p. 784–797, 2009. Citado 9 vezes, nas páginas 24, 25, 27, 28, 29, 51, 53, 54 e 57.

BROWN, V.; BARTHOLOMEW, C. Long-term deflections of GFRP-reinforced concrete beams. **First International Conference on Composites in Infrastructure National Science Foundation National Science Foundation**, 1996. Citado na página 18.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CSA S806-02: Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers**. Rexdale, Ontario., 2002. Citado 6 vezes, nas páginas 16, 25, 47, 48, 58 e 60.

_____. **CAN/CSA S6-06: Canadian Highway Bridge Design Code**. Rexdale, Ontario, 2006. Citado 2 vezes, nas páginas 25 e 58.

CARNEIRO, L. A. V.; TEIXEIRA, A. Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na engenharia de construção. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. 25, p. 1–13, 2008. Citado na página 18.

FIB, B. FRP reinforcement in RC structures. **Technical Report**, 2007. Citado 5 vezes, nas páginas 19, 20, 21, 22 e 50.

GAY, D.; HOA, S. V.; TSAI, S. W. **Composite Materials: Design and Applications**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2002. 552 p. Citado 3 vezes, nas páginas 19, 20 e 21.

GIBSON, R. F. **Principles of composite material mechanics**. 3. ed. Boca Raton: CRC press, 2012. 683 p. Citado na página 23.

GOORANORIMI, O. *et al.* Microstructural investigation of glass fiber reinforced polymer bars. **Composites Part B: Engineering**, Elsevier, v. 110, p. 388–395, 2017. Citado 2 vezes, nas páginas 19 e 20.

HOLLAWAY, L. **Polymer composites for civil and structural engineering**. 1. ed. Surrey: Springer Science & Business Media, 1993. 259 p. Citado 2 vezes, nas páginas 21 e 23.

HOSSAIN, K. M. A.; AMETRANO, D.; LACHEMI, M. Bond strength of standard and high-modulus gfrp bars in high-strength concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 3, p. 449–456, 2014. Citado 6 vezes, nas páginas 24, 25, 26, 31, 57 e 58.

HUANG, H. *et al.* Bond properties between GFRP bars and hybrid fiber-reinforced concrete containing three types of artificial fibers. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 250, p. 118857, 2020. Citado 8 vezes, nas páginas 25, 26, 27, 28, 30, 31, 49 e 57.

ISLAM, S. *et al.* Bond characteristics of straight-and headed-end, ribbed-surface, GFRP bars embedded in high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 83, p. 283–298, 2015. Citado 7 vezes, nas páginas 24, 25, 26, 29, 30, 31 e 57.

JUCÁ, P. H. d. O. **Avaliação do mecanismo de transferência de tensões e formação de fissuras no concreto autoadensável com reforço híbrido**. Dissertação (Mestrado em Engenharias) — Alegrete: Universidade Federal do Pampa, 2020. Citado na página 41.

LIAO, J. *et al.* Bond strength of gfrp bars to high strength and ultra-high strength fiber reinforced seawater sea-sand concrete (ssc). **Composite Structures**, v. 281, p. 115013, 2022. ISSN 0263-8223. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822321014367>>. Citado na página 49.

MAZAHERIPOUR, H. *et al.* Experimental study on bond performance of gfrp bars in self-compacting steel fiber reinforced concrete. **Composite Structures**, v. 95, p. 202–212, 2013. ISSN 0263-8223. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382231200325X>>. Citado 3 vezes, nas páginas 24, 25 e 49.

MINGCHAO, W. *et al.* Chemical durability and mechanical properties of alkali-proof basalt fiber and its reinforced epoxy composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 27, n. 4, p. 393–407, 2008. Citado na página 22.

MOREIRA, A. M. Materiais compósitos. **Área de construção**, 2009. Citado na página 18.

NANNI, A.; LUCA, A. D.; ZADEH, H. **Reinforced concrete with FRP bars: Mechanics and design**. 1. ed. London: CRC Press, 2014. 418 p. Citado 4 vezes, nas páginas 19, 20, 22 e 23.

OKELO, R.; YUAN, R. L. Bond strength of fiber reinforced polymer rebars in normal strength concrete. **Journal of composites for construction**, American Society of Civil Engineers, v. 9, n. 3, p. 203–213, 2005. Citado 6 vezes, nas páginas 29, 31, 41, 44, 54 e 57.

Prática Recomendada IBRACON/ABECE. **CT 303 - Projeto de estruturas de concreto armado com barras de polímero reforçado com fibras (FRP)**. São Paulo, IBRACON/ABECE, 2021. Citado 10 vezes, nas páginas 16, 26, 36, 37, 47, 48, 50, 58, 59 e 60.

SINGH, S. B. **Analysis and design of FRP reinforced concrete structures**. 1. ed. New Delhi: McGraw Hill Professional, 2015. 352 p. Citado 3 vezes, nas páginas 22, 23 e 27.

STRATUS, C. E. L. **Catálogo de especificações técnicas de vergalhões e estribos de fibra de vidro**. São José dos Campos, 2014. Catálogo de produtos. Citado na página 19.

TEIXEIRA, B. d. A. C. *et al.* **Avaliação do comportamento de vigas de concreto armadas com barras de fibra de vidro— um estudo experimental**. Dissertação (Mestrado em Engenharias) — Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2018. Citado na página 19.

TEPFERS, R. Bond clause proposals for FRP bars/rods in concrete based on CEB/FIP Model Code 90. Part 1: Design bond stress for FRP reinforcing bars. **Structural concrete**, Thomas Telford Ltd, v. 7, n. 2, p. 47–55, 2006. Citado 2 vezes, nas páginas 25 e 53.