

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

OSVALDO GARAIALDE DE MELO NETO

ESTUDO DA ADERÊNCIA ENTRE BARRAS DE PRFV E O CONCRETO

**Alegrete
2023**

OSVALDO GARAIALDE DE MELO NETO

ESTUDO DA ADERÊNCIA ENTRE BARRAS DE PRFV E O CONCRETO

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.

Orientador: Dr. Alisson Milani

**Alegrete
2023**

OSVALDO GARAIALDE DE MELO NETO

ESTUDO DA ADERÊNCIA ENTRE BARRAS DE PRFV E O CONCRETO

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: 23 de fevereiro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Dr. ALISSON SIMONETTI MILANI - UNIPAMPA - Orientador

Eng. Me. MARCELO DE JESUS DIAS DE OLIVEIRA - UNIPAMPA

Profa. Ma. RAQUEL CAROLINE ZYDECK - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **ALISSON SIMONETTI MILANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/02/2023, às 15:41, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARCELO DE JESUS DIAS DE OLIVEIRA, ENGENHEIRO-AREA**, em 24/02/2023, às 15:43, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **RAQUEL CAROLINE ZYDECK, PROFESSOR MAGISTERIO SUPERIOR - SUBSTITUTO**, em 24/02/2023, às 22:06, 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 **1063783** e o código CRC **1C4EE741**.

RESUMO

O concreto armado é amplamente empregado no mundo, e, no Brasil, é o método construtivo mais empregado. Contudo, o aço-carbono da estrutura de concreto armado pode estar sujeito à corrosão, o que leva à busca de novos materiais para substituir o aço-carbono como armadura. Nesse sentido, surgem as barras de polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV). Esses materiais compósitos são capazes de atuar em meios agressivos, possuem boa relação resistência-peso, além de bom comportamento à fadiga. Com o aumento do seu uso, surgem necessidades de maiores estudos sobre as propriedades destas barras. Por exemplo, o estudo da aderência é fundamental para compreender o comportamento mecânico e desempenho das estruturas em concreto armado. Nesse sentido, este trabalho tem por objetivo estudar a aderência entre as barras de PRFV e o concreto, através de ensaios de arrancamento, de acordo com a norma ASTM D7913/D7913M-14 (2020), com barras de PRFV de 8 mm, 10 mm e 12 mm de diâmetro, inseridas em cubos de concreto de resistência característica de 25 MPa e 35 MPa, a fim de comparar os efeitos do diâmetro da barra e da resistência característica do concreto na resistência de aderência. Os dados obtidos experimentalmente foram comparados com equações encontradas nas normas canadense CSA S806-02 (2002) e brasileira CT 303 (2021). Os resultados obtidos apresentam resistência de aderência estatisticamente semelhantes, entre as barras de PRFV e o concreto, mesmo com o aumento do diâmetro das barras, independente da 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 12 mm. Conclui-se assim 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 12 mm, em contrapartida, a mudança do diâmetro das barras de PRFV, não altera significativamente a resistência de aderência da estrutura.

.

Palavras-Chave: barras de PRFV; ensaio de arrancamento; resistência de aderência.

ABSTRACT

Reinforced concrete is widely used in the world, and in Brazil it is the most used construction method. However, the carbon steel of the reinforced concrete structure can be subject to corrosion, which leads to the search for new materials to replace carbon steel as reinforcement. In this sense, fiberglass-reinforced polymer bars (FRP) appear. These composite materials are capable of acting in aggressive media, have a good strength-to-weight ratio, in addition to good fatigue behavior. With the increase in their use, there is a need for further studies on the properties of these bars. For example, the study of adhesion is essential to understand the mechanical behavior and performance of reinforced concrete structures. In this sense, this work aims to study the adhesion between FRP bars and concrete, through pullout tests, in accordance with the ASTM D7913/D7913M-14 (2020) standard, with FRPV bars of 8 mm, 10 mm and 12 mm in diameter, inserted in concrete cubes with characteristic strengths of 25 MPa and 35 MPa, in order to compare the effects of bar diameter and characteristic strength of concrete on bond 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. The results obtained show statistically similar bond strength between the FRP 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 12 mm. It is therefore 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 adhesion stress for 12 mm bars, in contrast, the change in the diameter of the FRP bars, does not significantly change the bond strength of the structure.

Keywords: GFRP bars; pullout test; bond strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de barras de PRF e dos tipos de tratamento superficiais	15
Figura 2 – Construção de um paredão à beira mar com barras de PRFV	15
Figura 3 – Túnel no Japão sendo construído com o uso de telas de PRFV.....	16
Figura 4 – Reforço em um viaduto em Minas Gerais utilizando PRF	16
Figura 5 – Modelo de arrancamento com barras de PRFV após o ensaio.....	18
Figura 6 – Ruptura por fendilhamento do concreto	19
Figura 7 – Ruptura da barra	19
Figura 8 – Distribuição da tensão normal desenvolvida na seção transversal de uma barra de PRF sob carregamento axial.....	20
Figura 9 – Influência da resistência do concreto na resistência de aderência em barras de PRFV e PRFC.....	21
Figura 10 – Barras com envolvimento helicoidal com leve revestimento de areia. ...	23
Figura 11 – Barras com revestimento de areia.....	24
Figura 12 – Organograma	27
Figura 13 – Curva granulométrica do agregado miúdo	28
Figura 14 – Curva granulométrica do agregado graúdo	29
Figura 15 – Barras de PRFV com diâmetros de 8 mm (acima), 10 mm (no centro) e 12 mm (abaixo)	30
Figura 16 – Realização do ensaio de arrancamento direto	32
Figura 17 – Posicionamento do LVDT.....	33
Figura 18 – Dimensões das amostras e esquema de moldagem na (a) vertical e (b) horizontal.....	33
Figura 19 – Esquema de instrumentação e preparação do corpo de prova para o ensaio de arrancamento direto.....	35
Figura 20 – Mecanismo de ancoragem	36
Figura 21 – Barra com sua extremidade ancorada	36
Figura 22 – Ruptura por arrancamento	41
Figura 23 – Curvas de resistência de aderência pelo deslocamento para o concreto C25.....	43
Figura 24 – Curvas de resistência de aderência pelo deslocamento para o concreto C35.....	44

Figura 25 – Comparação das curvas de aderência entre resistências do concreto para as barras de diâmetro de 8 mm.	46
Figura 26 – Comparação das curvas de aderência entre resistências do concreto para as barras de diâmetro de 10 mm.	46
Figura 27 – Comparação das curvas de aderência entre resistências do concreto para as barras de diâmetro de 12 mm.	47
Figura 28 – Resistência de aderência média de cada CP	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Nomenclatura dos traços de concreto	30
Tabela 2 – Dosagem unitária dos traços de concreto	30
Tabela 3 – Valores médios para determinação do diâmetro efetivo (d_b) das barras. 37	
Tabela 4 – Comprimento das barras	38
Tabela 5 – Valores de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos....	40
Tabela 6 – Valores de tensão de aderência	42
Tabela 7 – Teste de Tukey.....	48
Tabela 8 – Tensão média de aderência obtida experimentalmente e previstas em códigos	50

LISTA DE ABREVIATURAS

- A – Área nominal
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ACI – American Concrete Institute
- a/c – Relação água/cimento
- C_b – Circunferência nominal das barras
- CP – Corpo de prova
- d_b – Diâmetro efetivo das barras
- F – Força de tração
- PRF – Polímeros reforçados com fibras
- PRFV – Polímeros reforçados com fibras de vidro
- PRFA – Polímeros reforçados com fibras de aramida
- PRFC – Polímeros reforçados com fibras de carbono
- l – Comprimento
- l_a – Comprimento de ancoragem da barra no concreto
- m_1 – Massa ao ar
- m_2 – Massa submersa
- NBR – Norma Brasileira

LISTA DE SIGLAS

π – Pi

ρ – Densidade da água

τ – Tensão de aderência

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Objetivos	13
1.1.1. Objetivo Geral	13
1.1.2. Objetivos Específicos	13
1.1.3. Justificativa	13
2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1. Barras de Fibras reforçadas em matrizes poliméricas	14
2.2. Aderência entre PRF e concreto	17
2.3. Estudos sobre aderência entre PRF e concreto	22
3. METODOLOGIA	26
3.1. Considerações iniciais	26
3.2. Materiais	27
3.2.1. Cimento Portland	27
3.2.2. Agregado miúdo	28
3.2.3. Agregado graúdo	28
3.2.4. Água	29
3.2.5. Aditivo	29
3.2.6. Concreto	29
3.2.7. Barras de PRFV	30
3.3. Ensaio de aderência	31
3.3.1. Ancoragem das barras	34
3.3.2. Diâmetro efetivo das barras	36
3.3.3. Comprimento das barras	38
3.3.4. Resistência de aderência	38
4. RESULTADOS	40
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
5.1. Sugestão para trabalhos futuros	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. INTRODUÇÃO

O aço e o concreto são dois dos materiais com maior aplicação no ramo da construção civil. Da associação desses materiais surge o concreto armado, material amplamente usado em estruturas ao redor do mundo, e principalmente no Brasil, onde é o método construtivo mais empregado (BASTOS 2019). Com o desenvolvimento das cidades, cada vez mais as construções necessitam maiores manutenções, o que leva à busca de novos materiais e métodos diferentes dos já encontrados (WEIBULL, 2020).

No presente, muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas a fim de encontrar novos materiais para substituir o aço-carbono da estrutura de concreto convencional, devido a ele apresentar deficiências principalmente à corrosão. Nessa procura por materiais com maior durabilidade, uma alternativa que desponta na construção civil são as barras de PRF, fibras reforçadas em matrizes poliméricas (CUNHA, 2019). Estes materiais compósitos são capazes de atuar em meios agressivos, tem uma boa relação resistência-peso, além de possuírem um bom comportamento à fadiga (TAVARES, 2008).

Estes materiais podem ser fabricados através de variados processos, entre os quais destaca-se a pultrusão, técnica onde os feixes de fibras contínuas são impregnados pela resina e o conjunto fibra/matriz polimérica é levado ao molde, fornecendo a geometria desejada (NETO e PARDINI, 2016). Os materiais compósitos poliméricos mais encontrados no mercado são as barras constituídas por fibra de vidro (PRFV), as barras constituídas por fibra de carbono (PRFC) e as barras constituídas por fibra de aramida (PRFA) (SILVA, 2014).

A aderência entre as barras de aço e o concreto é objeto de estudo há várias décadas, com uma vasta quantidade de trabalhos teóricos e experimentais publicados sobre este tema, embora com diferentes métodos de ensaios, nem sempre normatizados. Porém, as formulações usadas nas normas de projeto de estruturas em concreto armado só preveem o aço como armadura, não podendo ser usada para PRF, já que aço e PRF diferem em diferentes aspectos (COUTO, 2007). De acordo com BAKIS *et al.* (1998), a aderência entre as barras de PRF e o concreto é controlada pelas propriedades das barras, o que difere do comportamento da aderência das barras de aço nervuradas e do concreto, onde o parâmetro que controla é a resistência à compressão do concreto. Assim, com o uso de barras de PRF como armadura no

concreto, surge a necessidade do desenvolvimento de normas específicas para este material.

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento de aderência entre barras de PRFV e o concreto, através de ensaios de arrancamento.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Estudar o comportamento de aderência entre barras de PRFV e o concreto, através de ensaios de arrancamento, com duas resistências à compressão diferentes do concreto e três diâmetros diferentes de barras de PRFV.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Determinar a tensão de aderência entre a barra de PRFV e o concreto;
- Analisar a influência do diâmetro da barra e da resistência à compressão do concreto na tensão de aderência;
- Comparar os resultados obtidos com as previsões normativas CSA S806-02 (2002) e CT 303 (2021).

1.1.3. Justificativa

Nos últimos anos, nota-se um crescimento na preocupação em relação à durabilidade das estruturas. Nesse sentido, a utilização de fibras em formas de barras vem despontando como alternativa às barras de aço, devido a essas estarem suscetíveis à corrosão (VARES, 2019). Contudo, não existem muitos estudos avaliando o comportamento das barras de PRF em conjunto com o concreto. Com isso, verifica-se a necessidade de estudos para entender o comportamento de aderência entre essas barras e o concreto.

2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Barras de Fibras reforçadas em matrizes poliméricas

Materiais compósitos são feitos a partir de dois ou mais materiais distintos, que combinados resultam em um material com propriedades físicas e mecânicas desejadas. Em compósitos constituídos por dois materiais, um material é denominado reforço, enquanto o outro é denominado matriz (CT 303, 2021).

Os polímeros reforçados com fibra (PRF), são materiais compósitos feitos de fibras reforçadas em matrizes poliméricas. A matriz tem como principal função unir as fibras e preservar sua superfície durante o manuseio, fabricação e a vida útil do compósito, além de transferir as tensões para as fibras (GONÇALVES, 2013). As barras de PRF são, de modo geral, fabricadas pelo processo de pultrusão. Tal processo produz barras com seção transversal constante. Os filamentos de fibra são sujeitos a um banho com resina, catalisador e outros aditivos. Neste banho, as fibras são embebidas e o excesso de resina é removida. Logo após, as fibras são estiradas para a formação do perfil (ACI 440 R, 1996). Para aumentar a aderência entre o concreto e a barra de PRF, tratamentos superficiais são realizados na barra antes do seu endurecimento, como superfície revestida com areia, superfície nervurada, superfície enrolada revestida com areia, entre outros tratamentos (GONÇALVES, 2013). Na Figura 1, são mostrados exemplos de barras de PRF e dos tipos de tratamentos superficiais.

Figura 1 – Exemplo de barras de PRF e dos tipos de tratamento superficiais



Fonte: ACI 440.1R-15 (2015)

Segundo o ACI 440.1R-15 (2015), o desenvolvimento do PRF ocorre na década de 1940, onde a indústria aeroespacial já reconhecia a importância do uso de materiais compósitos, que trazia vantagens como leveza e alta resistência. Contudo, o uso de barras de PRF em substituição ao aço como armadura é recente (UOMOTO *et al.*, 2002). A barra de PRF não era considerada viável e não era comercializada até a década de 1970. Na década de 1980, as vantagens do PRF começaram a ser mais conhecidas e desejadas, assim, o material passou a ser utilizado em bases de reatores de subestações, pistas de aeroportos, laboratórios eletrônicos e paredões à beira mar, como é ilustrado na Figura 2 (BROWN e BARTHOLOMEW, 1996).

Figura 2 – Construção de um paredão à beira mar com barras de PRFV



Fonte: ACI 440.1R-15 (2015)

Na Europa, a Alemanha foi pioneira, construindo uma ponte rodoviária de PRF em 1986 (MEIER, 1992). No continente asiático, até meados da década de 1990, o Japão detinha o maior número de aplicações de projeto de PRF, totalizando mais de 100 projetos de demonstração ou comerciais, como mostrado na Figura 3. Na década de 2000, a China tomou o lugar do Japão, utilizando reforços compósitos em obras subterrâneas e obras de tabuleiros de pontes (YE *et al.*, 2003).

Figura 3 – Túnel no Japão sendo construído com o uso de telas de PRFV.



Fonte: Adaptado de ACI 440 (1996)

No Brasil, há registros recentes de aplicações em pontilhões e residências, todavia, seu uso é mais comum em pavimentos rígidos e “soft eyes” de paredes de diafragma em obras de metrô e enfilagem de túneis. Um exemplo do uso de PRF no Brasil é mostrado na Figura 4, onde um viaduto foi reforçado utilizando PRF.

Figura 4 – Reforço em um viaduto em Minas Gerais utilizando PRF



Fonte: MACHADO (2007)

De acordo com o ACI 440.1R-15 (2015), as barras de PRF possuem algumas vantagens em relação ao aço. Entre essas vantagens, pode-se citar a impermeabilidade ao íon cloreto e ataques químicos; a desnecessidade de aditivos

para reduzir a corrosão; possibilidade de menor cobertura de concreto; baixo peso específico, cerca de um quarto a um quinto do peso específico da barra de aço; apresenta maior resistência à tração do que o aço; alta resistência à fadiga; vida útil superior à do aço em ambientes corrosivos; não conduz corrente magnética, elétrica e térmica (somente PRFV).

Devido às vantagens em relação ao aço, as barras de PRF tornam-se uma opção interessante para substituir o aço no concreto armado. Contudo, como o tema ainda é novo, principalmente no Brasil, mais pesquisas em relação ao tema são necessárias.

Nesse sentido, é importante a realização de um estudo entre a aderência de barras de PRF e o concreto, visto que o concreto armado só existe devido a solidariedade entre as barras de armadura e o concreto.

2.2. Aderência entre PRF e concreto

Segundo Cunha (2019), é fundamental que não haja deslizamento entre a armadura e o concreto para o bom desempenho do concreto armado. Responsável pela compatibilidade das deformações, além da transferência de tensões entre os materiais, essa propriedade é conhecida como aderência.

De acordo com Alcantara *et al.* (2004), o estudo da aderência é fundamental para a compreensão do comportamento mecânico e desempenho das estruturas em concreto armado, especialmente sob a ótica da fissuração e situações limites.

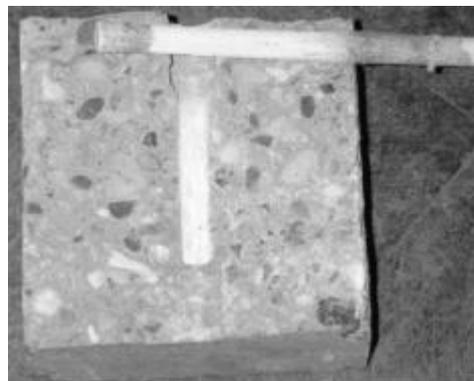
As barras de PRF possuem comportamento mecânico diferente relação ao aço, entre essas diferenças pode-se citar: o PRF é elástico linear até a falha, enquanto o aço apresenta escoamento; o aço é isotrópico, as barras de PRF são anisotrópicas; as barras de PRF possuem menor módulo de elasticidade em relação ao aço. Os fatores que influenciam nas propriedades mecânicas deste material são inúmeros. Entre eles estão o volume e tipo da fibra e da resina, orientação das fibras, controle de qualidade na fabricação e execução na obra (SOLYOM & BALÁZS, 2020).

A natureza anisotrópica das barras de PRF resulta numa complexidade na compreensão do comportamento de aderência PRF-concreto na comparação com o comportamento de aderência aço-concreto (YAN & LIN, 2016). Nas barras de PRF, a força de aderência é transmitida pela resina para as fibras.

Um método comum para análise do comportamento da aderência PRF-concreto, é o ensaio de arrancamento. Este ensaio baseia-se na extração de uma barra, posicionada no centro de um prisma de concreto, em uma barra de ensaio. De acordo com Barbosa *et al.* (2000), esse ensaio é interessante pela simplicidade do prisma, pelo seu baixo custo, pela possibilidade de se isolarem variáveis que influenciam a aderência, além de ser possível visualizar o comprimento mínimo de ancoragem. O tamanho e a forma do prisma, assim como o comprimento do trecho de aderência possuem influência significativa no resultado do ensaio.

De acordo com Cunha (2019), ao fim do ensaio, diferentes modos de ruptura podem ocorrer, influenciados pela resistência do concreto e resistência da superfície da barra. Quando ocorre o arrancamento da barra, a resistência de aderência é função do atrito entre a superfície rugosa da barra e do concreto. Neste caso, a máxima resistência de aderência será resultado da geometria das rugosidades da barra, do confinamento do concreto e da rigidez radial da barra. Na Figura 5, é ilustrado o tipo de ruptura por rompimento da barra.

Figura 5 – Modelo de arrancamento com barras de PRFV após o ensaio.



Fonte: ACHILLIDES & PILAKOUTAS (2004)

Além da ruptura por arrancamento, pode ocorrer o fendilhamento do concreto. Na ruptura por fendilhamento do concreto, a resistência de aderência depende principalmente da resistência à tração do concreto e o concreto é esmagado pelas rugosidades da superfície da barra. Este modo assemelha-se ao que acontece com as barras de aço. Na Figura 6, é mostrado um exemplo de ruptura por fendilhamento do concreto.

Figura 6 – Ruptura por fendilhamento do concreto



Fonte: XINGYU GU, BIN YU E MING WUB (2015)

Ademais, pode ocorrer a ruptura da barra, quando a tração aplicada deteriora a barra na seção fora do concreto. Um exemplo de ruptura da barra é ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Ruptura da barra

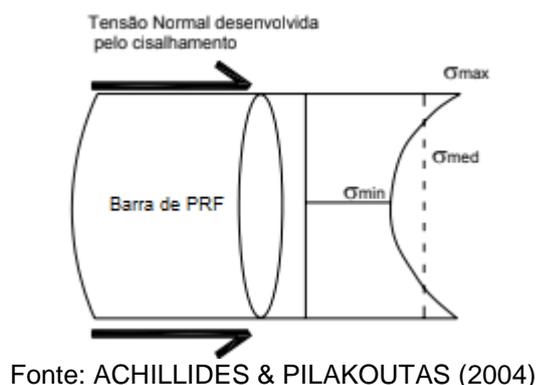


Fonte: XINGYU GU, BIN YU E MING WUB (2015)

Inúmeros fatores possuem influência na aderência entre as barras de PRF e o concreto. O diâmetro da barra atua de forma importante na aderência entre concreto e barras de PRF. Barras de pequeno diâmetro possuem resistência de aderência maiores do que barras de diâmetros maiores. A pequena rigidez ao cisalhamento na direção axial afeta a resistência de aderência em barras de PRFV. O valor da rigidez ao cisalhamento leva em conta a rigidez ao cisalhamento da resina e a resistência na ligação entre resina e fibra de vidro. Quando uma barra é exposta a uma força axial de tração, surge uma distribuição de tensão normal não uniforme na seção transversal da barra, devido a deslocamentos diferenciais entre as fibras superficiais e as fibras

situadas do centro da barra (COUTO, 2007). Na Figura 8, é ilustrado a distribuição da tensão normal desenvolvida em uma barra de PRF sob carregamento axial.

Figura 8 – Distribuição da tensão normal desenvolvida na seção transversal de uma barra de PRF sob carregamento axial.



A resistência de aderência efetiva desenvolvida entre a barra e o concreto é medida pelo valor da tensão normal atuante na superfície da barra (σ_{max}). Em contrapartida, a resistência de aderência real, é proporcional à tensão normal na seção transversal (σ_{med}). A diferença entre σ_{max} e σ_{med} aumenta com o acréscimo no diâmetro das barras, e assim, conseqüentemente a resistência de aderência real decresce (ACHILLIDES & PILAKOUTAS, 2004).

De acordo com o FIB T.G. 9.3 (2003), a forma da seção transversal da barra também influencia na aderência entre o concreto e as barras de PRF. Barras de seção quadrada aumentam o efeito de cunha devido aos ângulos da seção transversal, o que leva a uma resistência de aderência entre concreto e PRF maior do que a resistência de aderência provocada por barras de seção transversal circular. Contudo, barras de seção quadrada podem ocasionar forças de fendilhamento maiores no concreto adjacente.

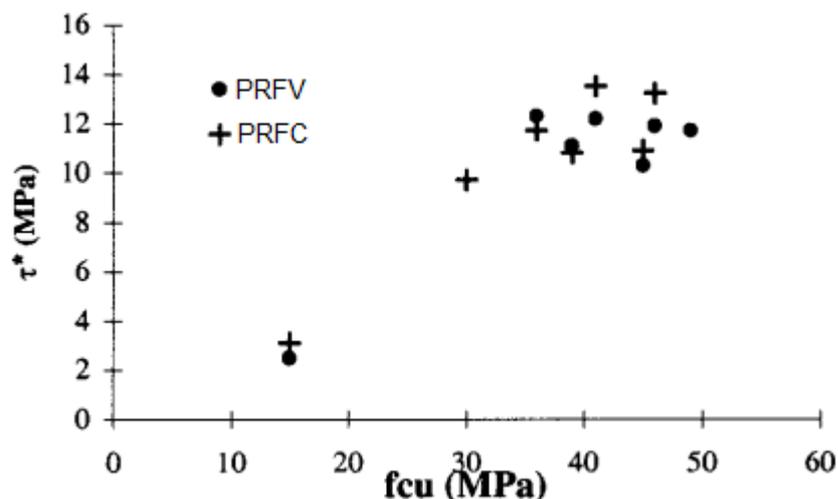
As conformações superficiais na barra da mesma forma contribuem para a aderência concreto-PRF. Como exemplo de conformações superficiais pode-se citar nervuras constituídas por um feixe de fibras enroladas helicoidalmente à barra, revestimento de areia e barras revestidas por fibras longitudinais trançadas externamente ao seu eixo (FIB Bulletin 10, 2000). A inclinação e o tamanho das nervuras estabelecem a magnitude das forças de tração responsáveis pelo fendilhamento do concreto e a intensidade da aderência mecânica. Barras com superfície lisa possuem menor tendência à ruptura por fendilhamento do concreto do

que barras com superfície rugosa. Em contrapartida, as barras com maiores rugosidades possuem maior resistência de aderência quando em confinamento adequado, em comparação às barras com superfície lisa (FIB 9.3 TG, 2003).

A posição das barras durante a moldagem do concreto é outro fator que influencia a aderência entre os dois materiais. As barras horizontais podem ser colocadas no topo ou no fundo do molde do corpo de prova. As barras inferiores ficam no lugar onde o adensamento age de maneira mais acentuada, por isso a existência de argamassa na parte inferior das barras é mais complicada. Assim, barras concretadas na posição horizontal no fundo da fôrma apresentam melhor aderência do que barras concretadas no topo da fôrma (MACEDO, 2018).

A resistência do concreto influencia na ruptura da aderência durante o arrancamento. Segundo ACHILLIDES & PILAKOUTAS (2004), para concretos com resistência à compressão superior a 30 MPa, a resistência do concreto não possui influência direta na resistência de aderência, já que a ruptura ocorre na superfície da barra. Porém, para concretos com resistências baixas, em torno de 15 MPa, o modo de ruptura é diferente. Nesse caso, a ruptura ocorre na matriz de concreto, e com isso o comportamento da aderência é diretamente relacionado com a resistência à compressão do concreto. Na Figura 9, é mostrado o efeito da resistência do concreto na resistência de aderência de barras de PRFV e PRFC.

Figura 9 – Influência da resistência do concreto na resistência de aderência em barras de PRFV e PRFC.



Fonte: ACHILLIDES & PILAKOUTAS (2004)

O cobrimento de concreto é outro parâmetro que interfere na aderência entre as barras de PRF e o concreto. O cobrimento de concreto tem o objetivo de evitar o fendilhamento, e isso influencia na resistência de aderência devido ao grau de confinamento que proporciona à barra (FIB T.G. 9.3, 2003). Em barras de PRF, o cobrimento pode ser diminuído em relação ao cobrimento utilizado para barras de aço.

Por fim, a armadura transversal contribui para a resistência ao fendilhamento. Logo após o início da fissuração de fendilhamento, a armadura transversal tem a função de controlar a propagação da fissuração, além de impedir aberturas de fissuras futuras, o que pode aumentar a resistência ao fendilhamento do concreto ao redor da barra (FIB Bulletin 10, 2000).

2.3. Estudos sobre aderência entre PRF e concreto

Islam *et al.* (2015) realizaram 180 testes de arrancamento em barras de PRFV embutidas em blocos de concreto de alta resistência cobrindo diferentes parâmetros. Os parâmetros modificados nos ensaios foram o tamanho do diâmetro da barra (12 ou 16 mm), o comprimento de embutimento (4 ou 6 vezes o diâmetro da barra), a condição da extremidade da barra (reta e cabeçote) e cobertura de concreto (1,5, 2,5 e 5 ou 7 vezes o diâmetro da barra para barras retas e 8 ou 10,5 vezes diâmetro da barra para barras com cabeça) além de um caso sem comprimento de embutimento. No total, 30 variáveis foram estudadas. Para cada variável, 6 amostras foram feitas, com o intuito de garantir a confiabilidade dos resultados.

Com base nos resultados experimentais, Islam *et al.* (2015) concluíram que a tensão de aderência se mostrou inversamente proporcional ao comprimento de embutimento e ao diâmetro da barra. Além disso, o menor cobrimento do concreto teve um efeito significativo na tensão de aderência, levando a ruptura lateral, em vez de arrancamento da barra e fendilhamento do concreto. Ademais, a barra de PRFV com cabeçote apresentou uma resistência de arrancamento maior do que as barras retas. Por fim, comparou-se os resultados experimentais obtidos com o esperado pelas normas CSA-S806-02 (2002), CSA S6-06 (2006), ACI 440-1R-06 (2006) e JSCE-97 (1997). Islam *et al.* (2015) observaram que a norma CSA S6-06 (2006) foi a que chegou mais próxima dos resultados experimentais.

Hossain, Armetrano e Lachemi (2014) realizaram 96 testes de arrancamento em espécimes a fim de avaliar a aderência entre barras de PRFV e concreto de alta

resistência, variando os seguintes parâmetros: diâmetro da barra (15,9 mm e 19,1 mm), condição da superfície da barra (revestida de areia), tipos de barras de PRFV (padrão de baixo módulo e alto módulo) e comprimento de embutimento (3, 5, 7 e 10 vezes o diâmetro da barra). Os corpos de prova de arrancamento foram testados segundo RILEM (1994). A carga foi aplicada com base na recomendação da norma CSA S806-02 (CSA 2002) a uma taxa de 90 kN/min para as barras com 19,1 mm de diâmetro e uma taxa de 60 kN/min para as barras com 15,9 mm de diâmetro.

Através dos resultados dos ensaios, os pesquisadores concluíram que a força de aderência média diminuiu com o aumento do comprimento de embutimento, enquanto um aumento na cobertura de concreto gera um acréscimo na força de aderência média. A força de aderência média obtida através dos ensaios resultou num valor maior ao previsto nas normas CSA S806-02 (CSA 2002), CSA S6-06 (CSA 2006) e ACI440.1R-06 (ACI 2006). Com isso, as normas podem ser usadas com segurança para prever a força de aderência para barras de PRFV.

Saleh *et al.* (2019) investigaram o comportamento da aderência de barras de FPRF embutidas em concreto de alta resistência, utilizando o método de flexão. Saleh *et al.* (2019) ensaiaram 28 vigas de acordo com as especificações RILEM. Os parâmetros variados nos ensaios foram: diâmetro da barra (9,5, 12,7 e 15,9 mm), comprimento de embutimento (5 e 10 vezes o diâmetro da barra), configuração da superfície (envolvimento helicoidal com leve revestimento de areia e revestimento de areia) e localização da barra (superior e inferior). Ainda, 4 vigas reforçadas com barras de aço de 16 mm de diâmetro foram testadas a fim de comparar os resultados. Na Figura 10 e Figura 11, são mostradas respectivamente as barras com envolvimento helicoidal com leve revestimento de areia e as barras com revestimento de areia.

Figura 10 – Barras com envolvimento helicoidal com leve revestimento de areia.



Fonte: Saleh *et al.* (2019)

Figura 11 – Barras com revestimento de areia



Fonte: Saleh *et al.* (2019)

Saleh *et al.* (2019) observaram que a falha por arrancamento ocorreu na maioria dos espécimes. Em barras envolvidas helicoidalmente com leve revestimento de areia, a falha de aderência ocorreu devido a danos na camada externa nas barras de PRFV, enquanto nas barras com revestimento de areia a falha decorreu pelo desprendimento de grãos de areia na superfície do PRFV. Ainda, Saleh *et al.* (2019) concluíram que a força de aderência nas barras com revestimento de areia foi maior do que nas barras com envolvimento helicoidal. Também concluíram que a resistência de aderência diminui com o aumento do comprimento de embutimento e diâmetro da barra. Ainda, os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com a previsão nas normas ACI-440.1R (2015), CSA-S806 (2012) e CSA-S6 (2014) e notaram que as normas CSA-S806 (2012) e CSA-S6 (2014) fornecem previsões da resistência de aderência mais conservadoras em comparação à norma ACI-440.1R (2015).

Huang *et al.* (2020) estudaram as propriedades de aderência e as relações tensão-deslizamento entre barras de PRFV e concretos híbridos reforçados com fibra. As fibras utilizadas para reforço do concreto foram fibras de carbono, aramida e polipropileno. Os parâmetros variados para o ensaio de arrancamento foram: diâmetro da barra (12 mm, 16 mm e 22 mm), tipo de fibra, fração volumétrica das fibras e comprimento de ancoragem. Um total de 48 amostras foram ensaiadas, sendo 36 amostras de concretos híbridos reforçados com fibra com barras de PRFV embutidas e 12 amostras de concreto convencional com barras de PRFV embutidas.

Huang *et al.* (2020) concluíram que a aderência entre o concreto e as barras de PRFV foram melhoradas com o uso das fibras de carbono, aramida e polipropileno. O aumento da fração volumétrica das fibras de carbono e polipropileno teve um efeito positivo no comportamento da ligação entre as barras de PRFV e o concreto híbrido reforçado com fibra. Além disso Huang *et al.* (2020) observaram que o aumento do

diâmetro e do comprimento de ancoragem tiveram efeito negativo na aderência entre as barras de PRFV e o concreto.

3. METODOLOGIA

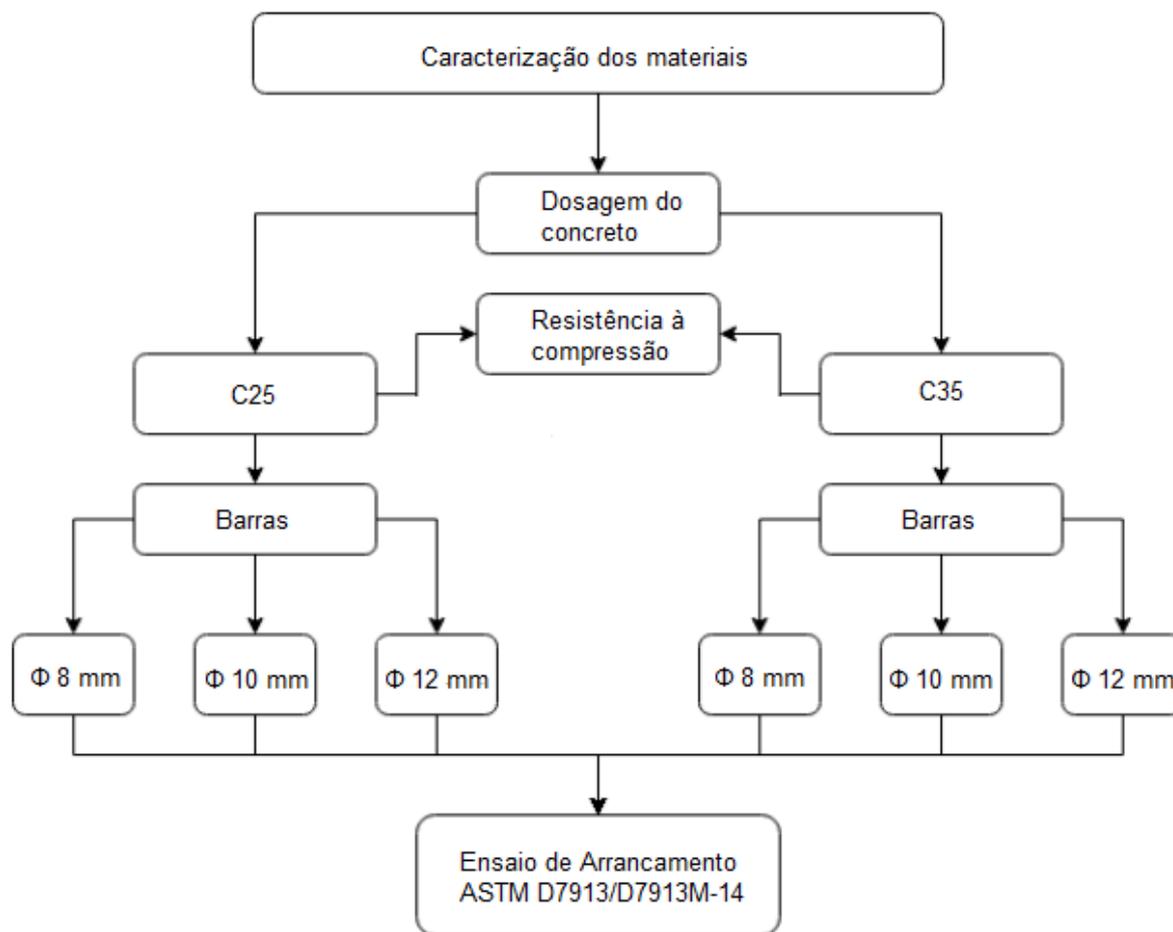
3.1. Considerações iniciais

A metodologia que foi empregada neste trabalho visa determinar a tensão de aderência entre barras de PRF e concreto. Nesse processo, foram realizadas comparações entre os resultados obtidos nos ensaios e obtidos em duas previsões normativas, CSA S806-02 (2002) e CT 303 (2021). O programa experimental foi desenvolvido para compreender os fatores que influenciam na tensão de aderência entre as barras de PRFV e o concreto. Foram ensaiadas barras com três diâmetros diferentes (8 mm, 10 mm e 12 mm), além de duas resistências diferentes do concreto, 25 MPa e 35 MPa. Primeiramente, foi feita a caracterização dos materiais que serão utilizados no concreto e a determinação do diâmetro nominal das barras. As barras foram ancoradas em uma das extremidades, e em seguida, foi realizada a concretagem e moldagem dos traços de 25 MPa e 35 MPa. Por fim, com os corpos de prova curados, foi realizado o ensaio de arrancamento.

As barras de PRFV foram moldadas em prismas cúbicos, com dimensões de 20 cm x 20 cm x 20 cm, na orientação horizontal e curados por 28 dias. Logo após a cura dos espécimes, eles foram sujeitos a um dispositivo de teste, que comprimiu a região ancorada no concreto e tracionou, com a utilização de garras, a região livre da barra de PRFV até a falha. Através da força máxima obtida no ensaio, calculou-se a tensão de aderência, dividindo a força pela área de ancoragem entre a barra e o concreto.

Na Figura 12, é apresentado o organograma do trabalho.

Figura 12 – Organograma



Fonte: Elaboração própria

3.2. Materiais

Neste capítulo, serão apresentados os materiais empregados neste trabalho. Para a produção do 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. Utilizou-se três diâmetros diferentes de vergalhões, 8 mm, 10 mm e 12 mm, a fim de investigar o efeito do diâmetro da barra na resistência de aderência.

3.2.1. Cimento Portland

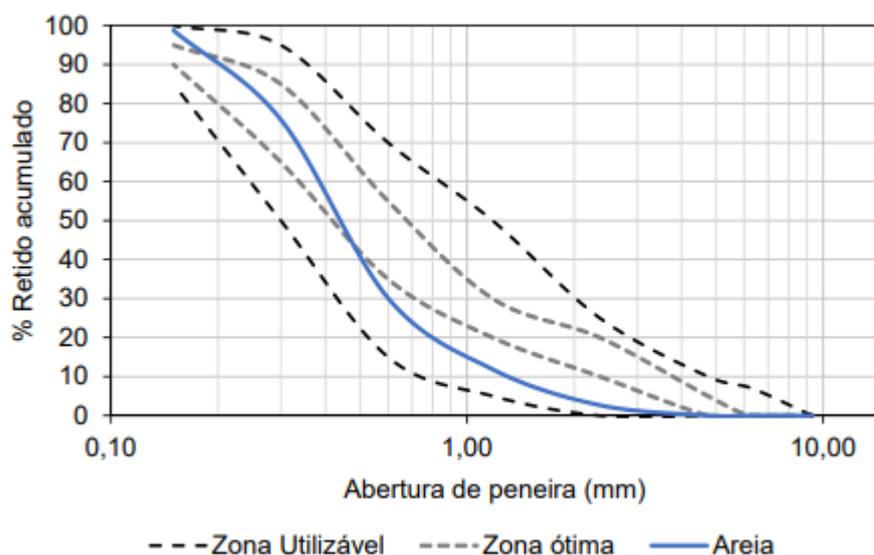
O Cimento Portland empregado foi o de alta resistência inicial, conhecido como CP V-ARI RS. O motivo da utilização deste cimento é sua pureza e alta resistência nas idades iniciais.

3.2.2. Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado no trabalho é uma areia grossa, disponível no mercado local. Para a caracterização do agregado, utilizou-se as normas NBR NM 248 (ABNT, 2003), com o objetivo de realizar o ensaio de granulometria e a NBR 16916 (ABNT, 2021), para a absorção e massa específica. Os ensaios foram realizados por um trabalho em paralelo.

Os valores das propriedades físicas são apresentados a seguir: 2,53 g/cm³ na condição saturada superfície seca; 2,52 g/cm³ para densidade do agregado na condição seca; 0,39% de absorção de água; 1538,31 kg/m³ para a massa unitária; 38,95% de índice de vazios. A curva granulométrica está apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Elaboração própria

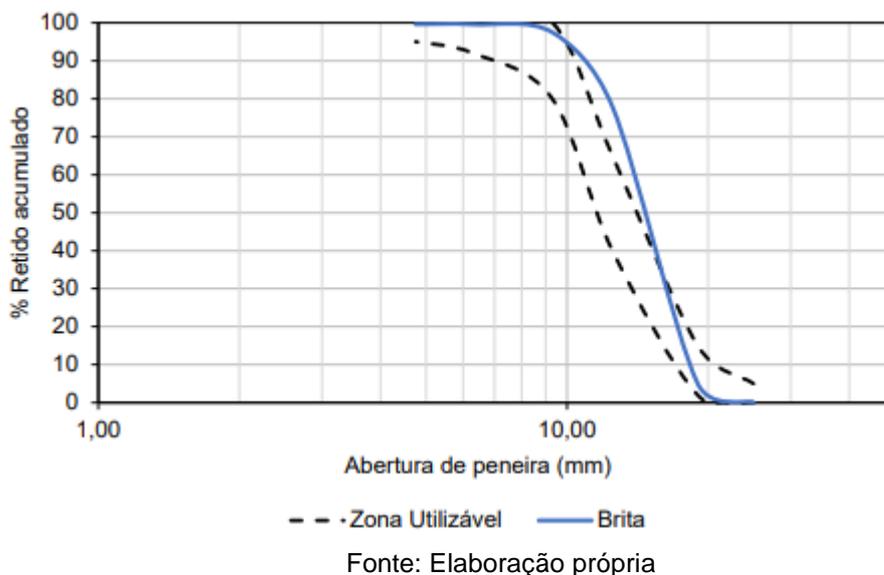
3.2.3. Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado no trabalho é de origem basáltica, disponível no mercado local. Para a caracterização do agregado graúdo, utilizou-se a NBR NM 248 (ABNT, 2003), com o objetivo de realizar o ensaio de granulometria e a NBR 16917 (ABNT, 2021) e NBR 16972 (ABNT, 2021), para os índices físicos. De maneira análoga ao agregado miúdo, os ensaios de caracterização do agregado graúdo foram feitos por um trabalho em paralelo.

O agregado é caracterizado como brita 1, e seus índices físicos são apresentados 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. A curva granulométrica do agregado graúdo é mostrada na Figura 14

Figura 14 – Curva granulométrica do agregado graúdo



3.2.4. Água

A água utilizada na concretagem é proveniente da rede de abastecimento da cidade de Alegrete-RS.

3.2.5. Aditivo

O aditivo utilizado foi um superplastificante, com o intuito de alterar a trabalhabilidade do concreto. O aditivo foi utilizado apenas no traço de 35 MPa.

3.2.6. Concreto

Neste trabalho, dois traços distintos foram analisados, os quais foram obtidos por meio da realização da dosagem do concreto na própria universidade.

O primeiro traço possui uma resistência característica de 25 MPa, e o segundo traço possui uma resistência característica de 35 MPa. A nomenclatura adotada é mostrada na Tabela 1. O traço apresenta um teor de argamassa de 51%. A quantidade unitária dos materiais utilizados na dosagem dos traços está apresentada na Tabela 2. O consumo de cimento do traço C25 é de 320 kg/m³ e do traço C35 é de 420 kg/m³.

Tabela 1 – Nomenclatura dos traços de concreto

Denominação	Código
Traço 25 MPa	C25
Traço 35 MPa	C35

Fonte: Elaboração própria

Tabela 2 – Dosagem unitária dos traços de concreto

Código	Quantidade de materiais				
	Cimento	Areia	Brita	Aditivo	a/c
C25	1,00	2,57	3,43	0,00%	0,57
C35	1,00	1,96	2,72	0,40%	0,36

Fonte: Elaboração própria

3.2.7. Barras de PRFV

As barras utilizadas neste estudo foram adquiridas na empresa Haizer Group. Os diâmetros utilizados no trabalho são 8 mm, 10 mm e 12 mm. As características das barras foram obtidas através de ensaios realizados por Bandeira (2023), em que: as barras de 8 mm de diâmetro apresentaram uma resistência à tração média de 990,31 MPa, módulo de elasticidade de 49,47 GPa e deformação última de 22,73 ‰; as barras de 10 mm de diâmetro apresentaram uma resistência à tração média de 939,45 MPa, módulo de elasticidade de 48,56 GPa e deformação última de 21,96 ‰; as barras de 12 mm de diâmetro apresentaram uma resistência à tração média de 841,03 MPa, módulo de elasticidade de 49,74 GPa e deformação última de 16,82 ‰. Na Figura 15, são mostradas as barras de PRFV utilizadas no estudo.

Figura 15 – Barras de PRFV com diâmetros de 8 mm (acima), 10 mm (no centro) e 12 mm (abaixo)



Fonte: Elaboração própria

3.3. Ensaio de aderência

Os procedimentos aqui descritos têm o objetivo de determinar as características das barras de PRFV em relação a aderência ao concreto. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados para avaliar a influência de diferentes diâmetros de barras, além da influência da resistência à compressão do concreto na aderência entre as barras de PRFV e o concreto.

A produção dos traços de concreto foi realizada em uma betoneira de eixo central. Primeiramente, foi adicionado na betoneira todo o agregado graúdo, e após, parte da água; na sequência o cimento foi adicionado, seguido por outra parte da água; por fim será adicionado o agregado miúdo e o que restar da água. Para a produção do traço de 35 MPa, ainda foi adicionado na mistura o aditivo.

Foram moldados 18 corpos de prova cúbicos, sendo três para cada diâmetro e para cada resistência à compressão do concreto, todos de acordo com as recomendações da ASTM D7913/D7913M-14 (2020). A cura foi feita em câmara úmida por 28 dias. Além disso, foram moldados 10 corpos de prova cilíndricos, sendo cinco para cada traço. A moldagem dos corpos de prova cilíndricos seguiu as recomendações da NBR 5738 (2015). Os corpos de prova cilíndricos possuem 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, 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 (2015). O rompimento foi realizado aos 28 dias, conforme a NBR 5739 (2018).

A concretagem foi feita em dois dias diferentes, espaçados em três dias, devido a necessidade de desmoldar os corpos de prova e preparar novamente as amostras, montando as formas que eram parafusadas.

Os ensaios de arrancamento direto foram efetuados na máquina universal EMIC DL 20000. Como será exposto posteriormente, as barras foram ancoradas às garras. O deslocamento da barra em relação ao concreto foi medido com o auxílio de LVDTs (transdutores de deslocamento variável linear). Já para os ensaios de compressão dos corpos de prova cilíndricos, utilizou-se a máquina EMIC PC200C. Na Figura 16, é mostrada a realização do ensaio de arrancamento direto.

Figura 16 – Realização do ensaio de arrancamento direto



Fonte: Elaboração própria

A taxa de carregamento durante o ensaio não pode ultrapassar 1,3 mm/min do deslocamento do LVDT posicionado na parte superior do corpo de prova. As leituras no LVDT devem ser feitas em intervalos até que ocorra uma diminuição na força e ocorra um deslizamento de no mínimo 2,5 mm na extremidade livre da barra, de acordo com ASTM D7913/D7913M-14 (2020). Na Figura 17, é mostrado o posicionamento do LVDT.

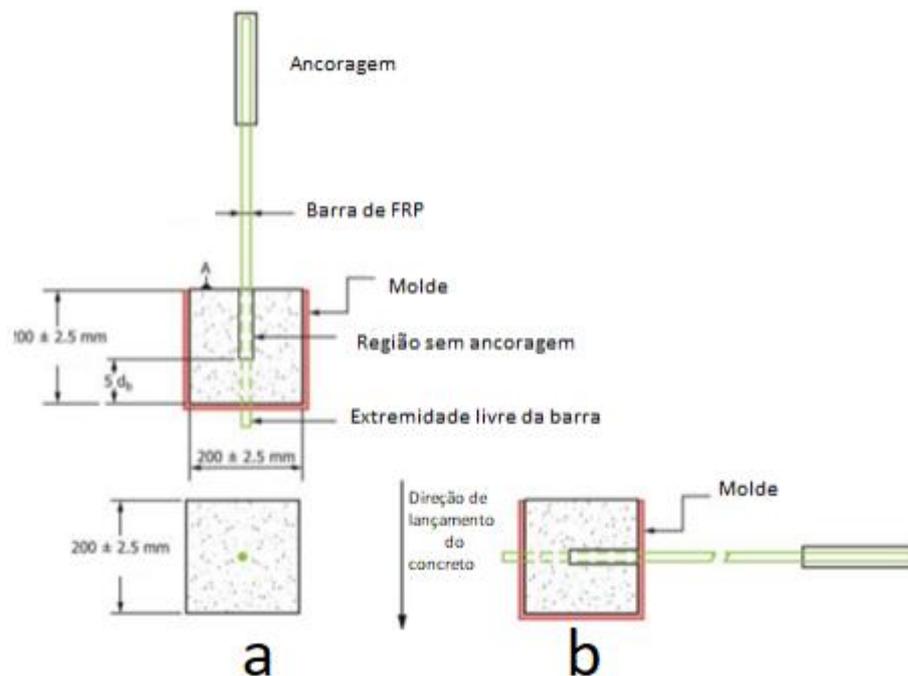
Figura 17 – Posicionamento do LVDT



Fonte: Elaboração própria

Neste estudo, os corpos de prova foram moldados na horizontal, em três camadas, com 25 golpes cada. Na Figura 18, são mostradas as dimensões das amostras e o esquema de moldagem na vertical e na horizontal.

Figura 18 – Dimensões das amostras e esquema de moldagem na (a) vertical e (b) horizontal



Fonte: Adaptado de ASTM D7913/D7913M-14 (2020)

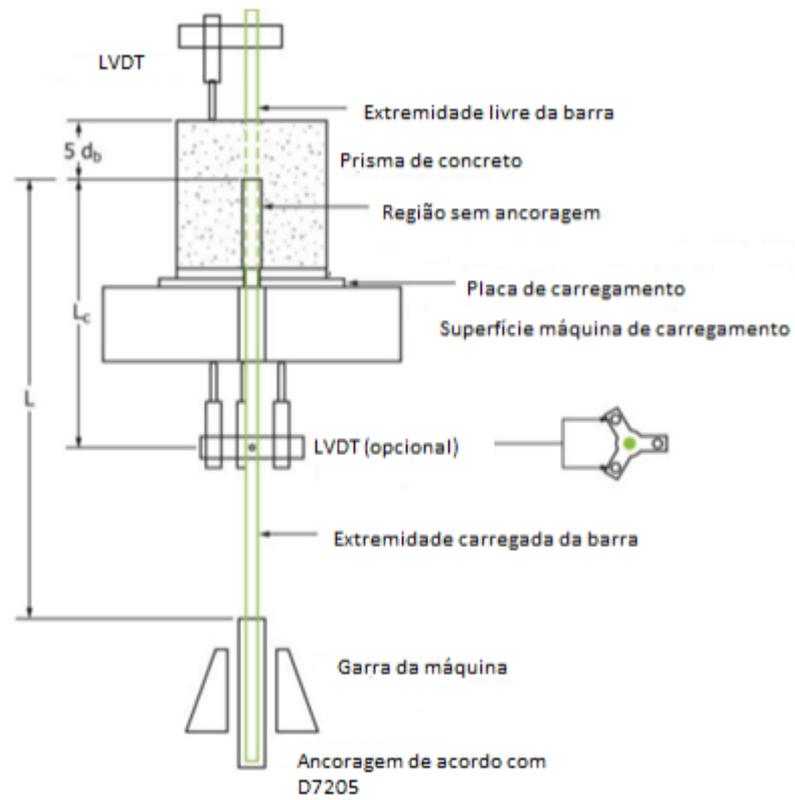
Como mostrado na Figura 18, há uma região da barra que não deve ser ancorada. Com esse propósito, as barras foram revestidas com um tubo de PVC antes da concretagem. Este valor é dependente do diâmetro efetivo das barras. Além disso, as barras devem exceder o concreto comprimento suficiente para a disposição do LVDT.

A concretagem dos corpos de prova foi feita de acordo com a Figura 18. Após isso, foram curados em câmara úmida por 28 dias. Na sequência da cura, os corpos de prova foram ensaiadas, com o LVDT na parte superior para medir o deslocamento da barra de PRFV.

3.3.1. Ancoragem das barras

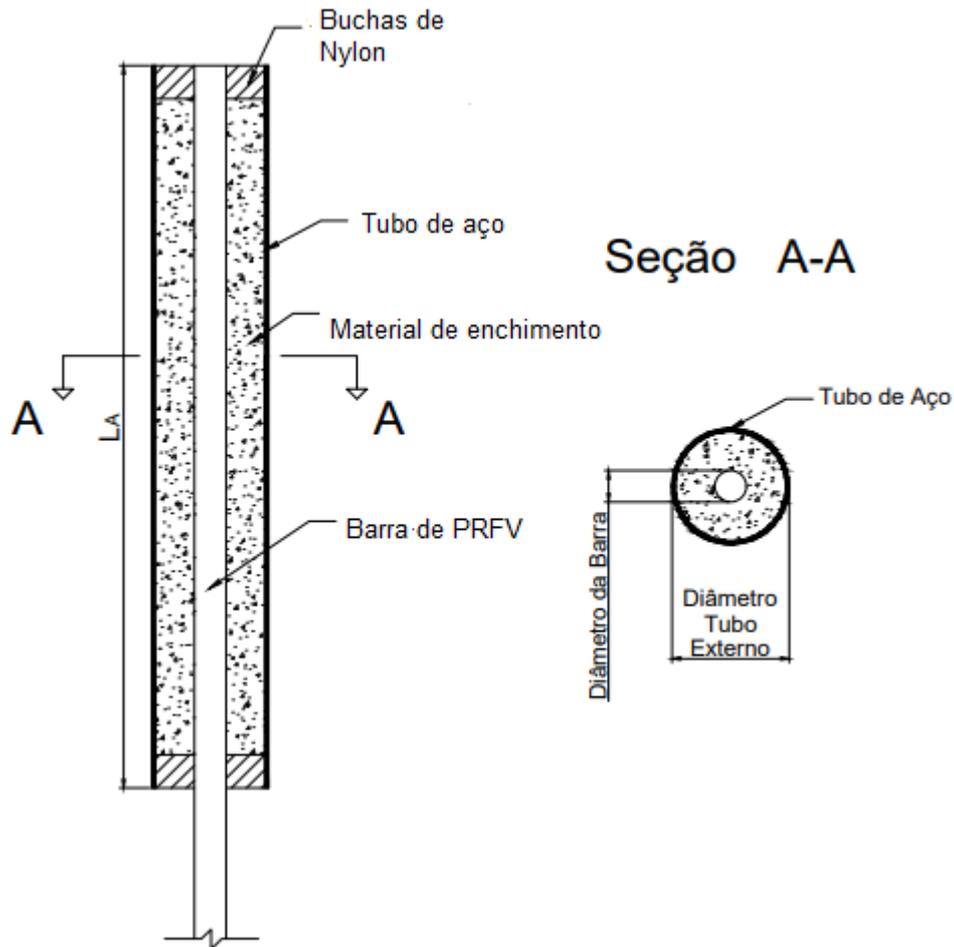
Conforme é ilustrado na Figura 18, a extremidade da barra deve ser ancorada para evitar danificar o corpo de prova pelas garras da máquina. A ancoragem da extremidade livre da barra foi feita seguindo as recomendações da ASTM D7205/D7205M-06 (2016). A ancoragem foi feita usando tubos de aço *schedule* diâmetro externo 22 mm para as barras de 8 mm e 32 mm para as barras de 10 e 12 mm, com ambos os tubos tendo os 250 mm de comprimento. Para o preenchimento, utilizou-se uma resina epóxi da marca Vedacit, de média fluidez, em uma proporção de 1/1. Essa resina atuou como adesivo estrutural, garantindo a aderência entre a barra de PRFV e o tubo de aço. As extremidades dos tubos foram tampadas com buchas torneadas de nylon, que além de servir como material de vedação para a resina, também permitiram a centralização da barra de PRFV no tubo de aço. Na Figura 19, é ilustrado o esquema de instrumentação e preparação do corpo de prova para o ensaio de arrancamento direto, na Figura 20 é mostrado o mecanismo de ancoragem e na Figura 21 é mostrado um exemplo de barra com sua extremidade ancorada.

Figura 19 – Esquema de instrumentação e preparação do corpo de prova para o ensaio de arrancamento direto



Fonte: Adaptado de ASTM D7913/D7913M-14 (2020)

Figura 20 – Mecanismo de ancoragem



Fonte: ASTM D7205/D7205M – 06 (2016)

Figura 21 – Barra com sua extremidade ancorada



Fonte: Elaboração própria

3.3.2. Diâmetro efetivo das barras

O diâmetro efetivo das barras foi obtido seguindo as recomendações da ASTM D7205/D7205M – 06 (2016). Primeiramente, foram retiradas cinco barras com 100 mm de comprimento para cada diâmetro, totalizando 15 barras. A amostra teve seu comprimento medido três vezes, em diferentes pontos, girando a barra em um ângulo

de 120° após cada medição. Em seguida, foi feita uma média destas três medições, com arredondamento de 0,1 mm.

Após a medição do comprimento das barras, foi realizada a pesagem hidrostática. O recipiente para a pesagem foi preenchido com água destilada e foi feita a tara do sistema composto por este recipiente e pelo mecanismo de fixação imerso no recipiente com água. Em seguida, a barra e o sistema de fixação foram imersos na água e a leitura foi realizada. O volume de cada corpo de prova deve ser medido indiretamente pela diferença de massa do corpo de prova nos estados seco e totalmente saturado. O volume do corpo de prova foi calculado como sendo a sua massa dividida pela sua densidade. A área nominal foi então encontrada dividindo-se o volume pelo comprimento médio do corpo de prova. Assim, o diâmetro foi calculado com o auxílio da Equação 1.

$$d_b = 2 \sqrt{\frac{m_1 - m_2}{\rho \cdot \pi \cdot l}} \quad (1)$$

Onde:

m_1 = Peso de uma amostra no ar em mg;

m_2 = Peso de uma amostra na água em mg;

ρ = Densidade da água em mg/mm³ (considerado como $\rho = 1$);

l = Comprimento da amostra em mm;

Os resultados do diâmetro efetivo das barras, encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – 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

3.3.3. Comprimento das barras

Após o cálculo do diâmetro efetivo, foi calculado o comprimento de ancoragem no concreto ($5.d_b$) e o comprimento total das barras (L_T). Os valores são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Comprimento das barras

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

Fonte: Elaboração própria

3.3.4. Resistência de aderência

Com o resultado do ensaio de arrancamento, pode-se calcular a resistência de aderência. A resistência de aderência é calculada através da Equação 2.

$$\tau = \frac{F}{C_b \cdot l_a} \quad (2)$$

Onde:

F = Valor da força aplicada, em N;

C_b = Comprimento do perímetro da barra, $c = \pi d_b$, em mm;

l_a = Comprimento da inserção da barra no concreto, ou seja, $5.d_b$ em mm;

Os diagramas de tensão *versus* deslocamento foram construídos para analisar a influência da resistência a compressão do concreto e do diâmetro das barras na resistência de aderência.

Após a obtenção dos deslocamentos e carregamentos, os dados experimentais foram comparados com os valores previstos em diferentes normas. Foram comparadas as normas CSA S806-02 (2002) e CT 303 (2021).

A Equação 3, é referente ao CT 303 (2021). Seu procedimento de cálculo se assemelha ao cálculo da resistência de aderência para as barras de aço, de acordo com a NBR 6118 (2014).

$$f_{bk} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 f_{ctk,inf} \quad (3)$$

Onde:

f_{bk} = Resistência de aderência característica;

$\eta_1 = 1,15$, para barras envolvidas com fio helicoidalmente;

$\eta_2 = 1$, para regiões de boa aderência;

$\eta_3 = 1$, para barras com diâmetro inferior a 20 mm;

$\eta_4 = 1$, para barras de PRFV;

$f_{ctk,inf}$ = Resistência à tração característica inferior do concreto;

Por fim, a Equação 4, é rearranjada das recomendações da CSA S806-02 (2002). A relação d_{cs}/d_b , é limitada em 2,5 pela norma, assim, o d_{cs} foi calculado em função desse limite.

$$\mu = \frac{d_{cs} \sqrt{f'_c}}{1,15 k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 \pi d_b} \quad (4)$$

Onde:

μ = Tensão de aderência;

$k_1 = 1$, para armadura horizontal com menos de 300 mm acima do concreto;

$k_2 = 1$, concreto com densidade normal;

$k_3 = 0,8$, para barras com área de seção transversal menor que 300 mm²;

$k_4 = 1$, para barras de PRFV;

$k_5 = 1,05$ para barras envolvidas com fio helicoidalmente;

d_b = Diâmetro efetivo das barras;

f'_c = Resistência a compressão do concreto;

d_{cs} = Cobrimento do centro da barra até a extremidade mais próxima da face de concreto;

4. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos experimentalmente neste estudo. Os cálculos baseados nas normas, bem como os gráficos e a manipulação dos dados, foram desenvolvidos através do uso do software Excel.

Na Tabela 5, são mostrados os valores de resistência à compressão do concreto para cada corpo de prova, assim como a média da resistência à compressão e o desvio padrão. Como pode ser visto, o concreto de classe C25 não atingiu a resistência à compressão esperada.

Tabela 5 – Valores de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos.

Traço	Espécime	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à compressão média (MPa)	dp (MPa)
C25	CP1	24,04	23,37	0,43
	CP2	23,54		
	CP3	22,97		
	CP4	23,17		
	CP5	23,13		
C35	CP1	36,59	35,12	1,10
	CP2	33,92		
	CP3	34,97		
	CP4	34,28		
	CP5	35,84		

Fonte: Elaboração própria

Adotou-se como nomenclatura nos resultados, por exemplo C25-12 mm, onde C25 corresponde à resistência à compressão do traço de concreto, enquanto 12 mm corresponde ao diâmetro da barra de PRF. Portanto, C25- 12 mm equivale a um corpo de prova em que uma barra de PRF com 12 mm de diâmetro é introduzida em um cubo de concreto com resistência à compressão de 25 MPa.

Em todos os gráficos tensão *versus* deslocamento elaborados Figura 23, Figura 24, Figura 25, Figura 26 e Figura 27, o comportamento mostrou semelhança, independentemente do diâmetro da barra de PRFV ou da resistência à compressão do concreto, com um aumento da tensão de aderência e um pequeno deslocamento. Tal comportamento é característico dos compósitos reforçados com barras de PRFV e também foi observado em outros estudos, como o de Huang *et al.* (2020) e Liao *et al.* (2022). Além disso, inicialmente ocorre um comportamento linear-elástico, seguido

pelo escoamento e após a tensão máxima ser atingida, ocorre uma suavização da curva tensão pelo deslocamento.

Através do deslocamento medido pelo LVDT, e calculando a tensão de aderência de acordo com a Equação 2, os gráficos de tensão por deslocamento foram plotados.

Todos os corpos de prova tiveram o seu modo de ruptura por arrancamento (pullout). Na Figura 22, é mostrado um exemplo da ruptura por arrancamento. Na Tabela 6, são mostrados os valores de resistência de aderência obtidos para cada corpo de prova, assim como a média da resistência de aderência e o desvio padrão. Onde: $\tau_{m\acute{a}x}$ é a resistência de aderência máxima; $\tau_{m\acute{e}d}$ é a resistência de aderência média entre os corpos de prova; e d_p é o desvio padrão amostral.

Figura 22 – Ruptura por arrancamento



Fonte: Elaboração própria

Tabela 6 – Valores de tensão de aderência

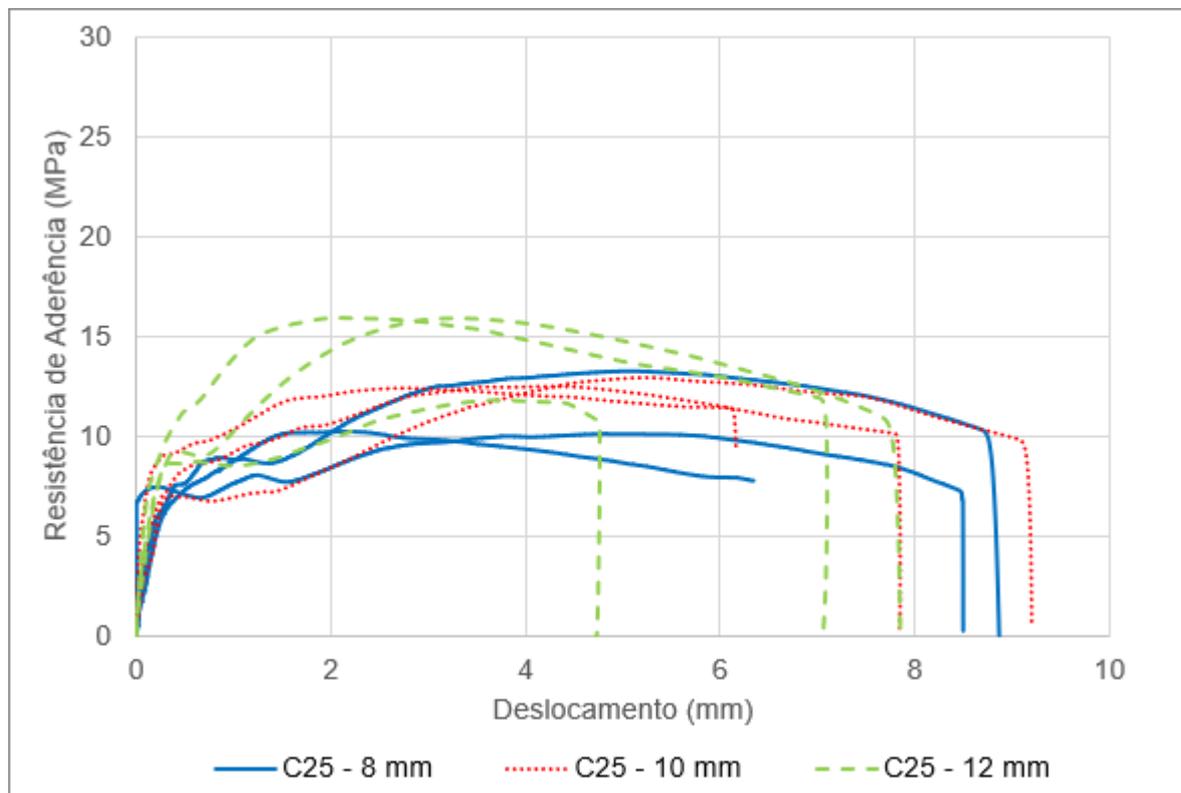
Amostra	Espécime	τ máx (MPa)	τ med (MPa)	d_p (MPa)
C25 - 8 mm	CP1	10,12	11,21	1,78
	CP2	13,26		
	CP3	10,23		
C25 - 10 mm	CP1	12,42	12,62	0,28
	CP2	12,50		
	CP3	12,93		
C25 - 12 mm	CP1	15,92	14,55	2,37
	CP2	11,80		
	CP3	15,91		
C35 - 8 mm	CP1	20,29	17,03	5,96
	CP2	10,15		
	CP3	20,66		
C35 - 10 mm	CP1	12,75	16,75	4,94
	CP2	22,27		
	CP3	15,22		
C35 - 12 mm	CP1	25,27	24,23	1,35
	CP2	22,70		
	CP3	24,71		

Fonte: Elaboração própria

Na sequência, é apresentada a comparação entre os resultados do mesmo traço de concreto, porém com diferentes diâmetros.

Na Figura 23, são mostradas as curvas de resistência de aderência pelo deslocamento para o concreto C25.

Figura 23 – Curvas de resistência de aderência pelo deslocamento para o concreto C25

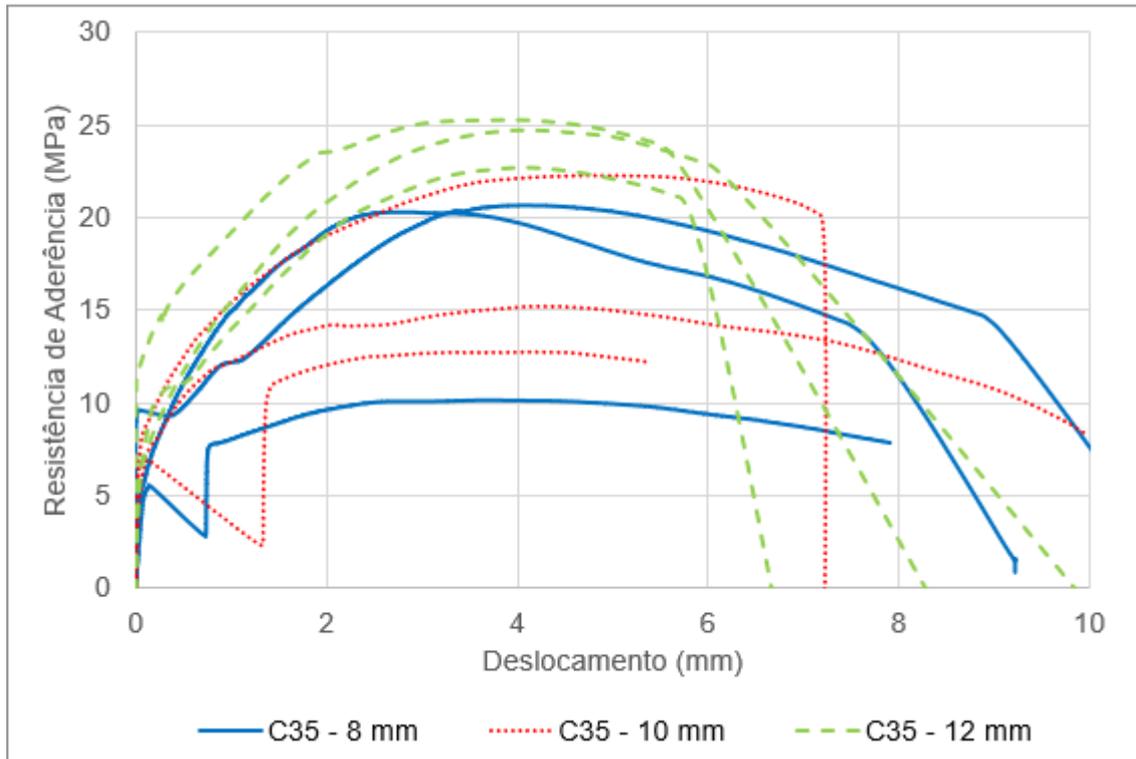


Fonte: Elaboração própria

Na Figura 23, pode-se notar um comportamento semelhante das curvas das barras, com resistências de aderência com valores próximos entre si. A média de resistência de aderência ficou compreendida entre 11,21 MPa e 14,55 MPa, onde o maior valor refere-se às barras de 12 mm de diâmetro, enquanto o menor valor diz respeito às barras de 8 mm de diâmetro. As barras de 10 mm de diâmetro tiveram sua média de resistência de aderência no valor de 12,62 MPa. Porém, de acordo com o teste de Tukey, Tabela 7, a variação no diâmetro das barras não proporcionou resultados significativamente diferentes. Este resultado vai ao encontro do resultado obtido por Brazeiro (2023) no seu estudo, onde barras de 8 mm, 10 mm e 12 mm, inseridas em concretos com resistência à compressão de 35 MPa e 50 MPa, foram submetidas a ensaios de arrancamento. Brazeiro (2023) observou que a variação no diâmetro das barras não influenciou na resistência de aderência. Todavia, Cunha (2007) em seus estudos observou que as barras de PRFV com menores diâmetros possuem resistência de aderência maiores do que as barras com diâmetros superiores. Também, as barras de 12 mm tiveram maior rigidez do que as demais, com sua ruptura com deslocamentos menores do que os outros diâmetros. Na Figura

24, são mostradas as curvas de resistência de aderência pelo deslocamento para o concreto C35.

Figura 24 – Curvas de resistência de aderência pelo deslocamento para o concreto C35



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 24, pode-se verificar uma maior variabilidade nos valores de resistência de aderência entre as curvas, embora elas apresentem comportamento semelhante. Um vergalhão de 10 mm teve seu ensaio interrompido, não medindo totalmente seu deslocamento, todavia, a ASTM D7913/D7913M-14 (2020) recomenda que o ensaio pode ser paralisado após o deslocamento atingir 2,5 mm, com isso, mesmo o ensaio tendo sido interrompido as recomendações da norma foram seguidas.

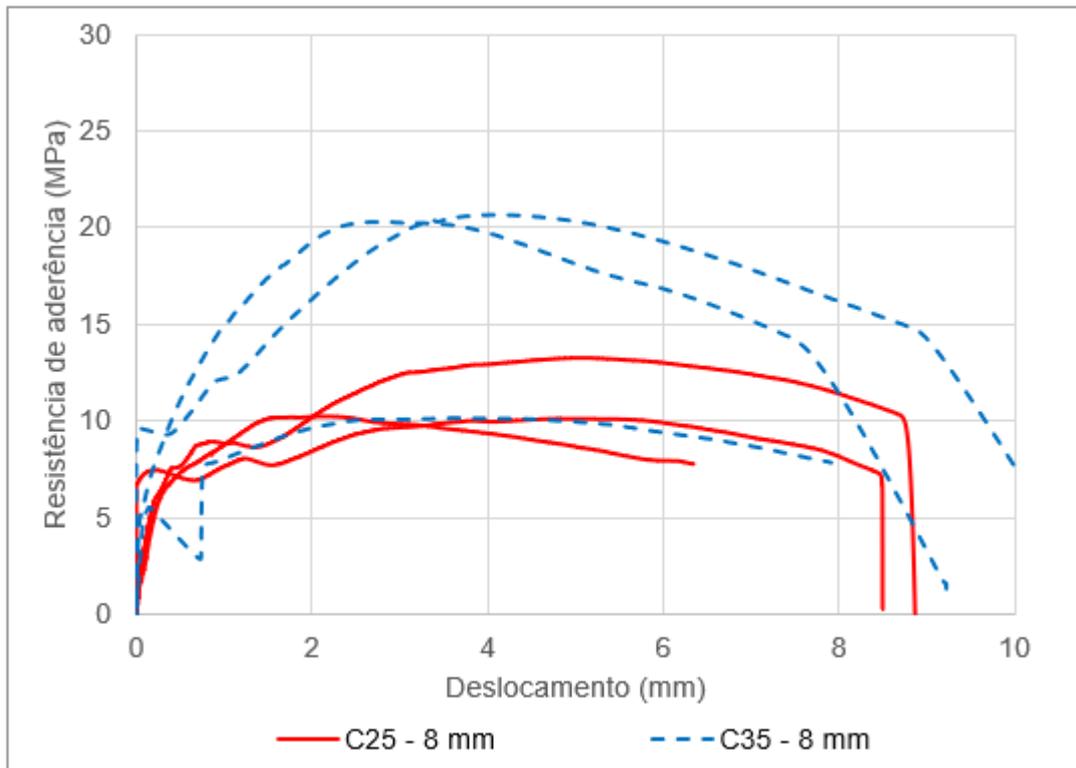
A média das resistências de aderência são de 17,03 MPa, 16,75 MPa e 24,23 MPa, para as barras de 8 mm, 10 mm e 12 mm, respectivamente. Porém, como pode ser visto, diferentemente do ocorrido com o concreto C25, o desvio padrão mostrou-se maior, principalmente para os diâmetros de 8 mm e 10 mm. Assim como observado no concreto C25, as barras com 12 mm de diâmetro apresentaram sua ruptura com um menor deslocamento.

Assim como no concreto C25, de acordo com o teste de Tukey, Tabela 7, não houve resultados significativamente diferentes com a alteração do diâmetro das barras.

Como pode ser observado, houve uma queda abrupta na resistência de aderência em um CP com barras de 8 mm e em um CP com barras de 10 mm. Essa queda ocorreu provavelmente 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. Entretanto, esse comportamento não foi constatado na literatura, apenas uma queda brusca, com diminuição da resistência até a falha. Este comportamento pode estar relacionado às propriedades e características da barra.

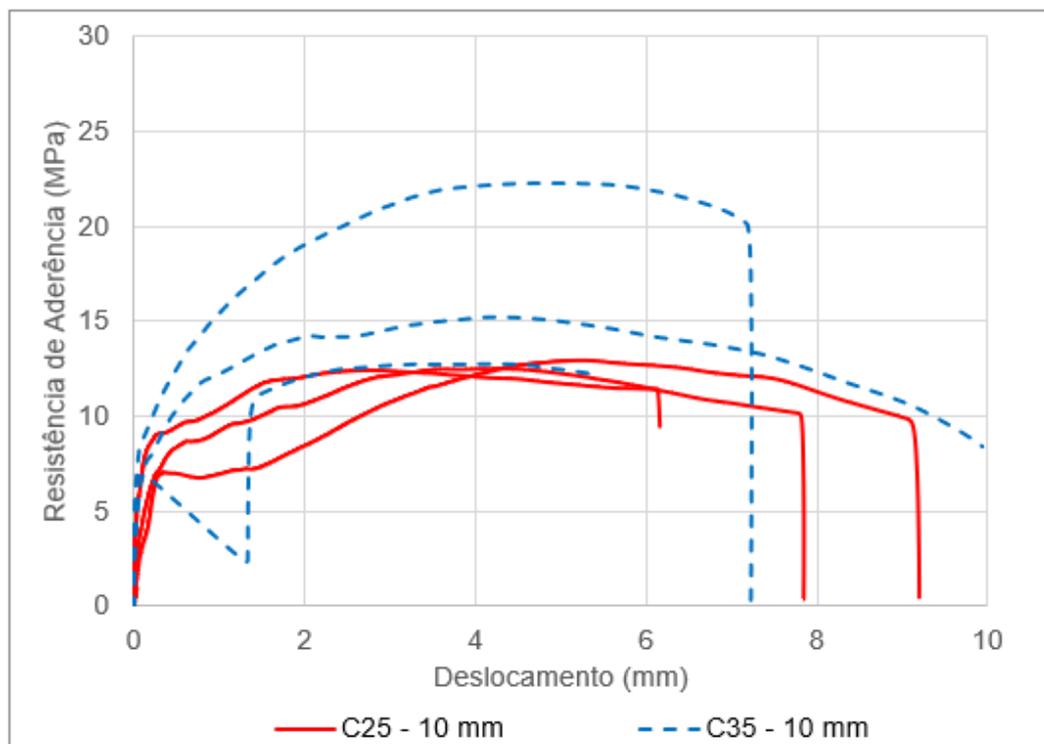
As curvas apresentadas na Figura 25, na Figura 26 e na Figura 27 apresentam a comparação entre os diâmetros e as resistências à compressão do concreto.

Figura 25 – Comparação das curvas de aderência entre resistências do concreto para as barras de diâmetro de 8 mm.



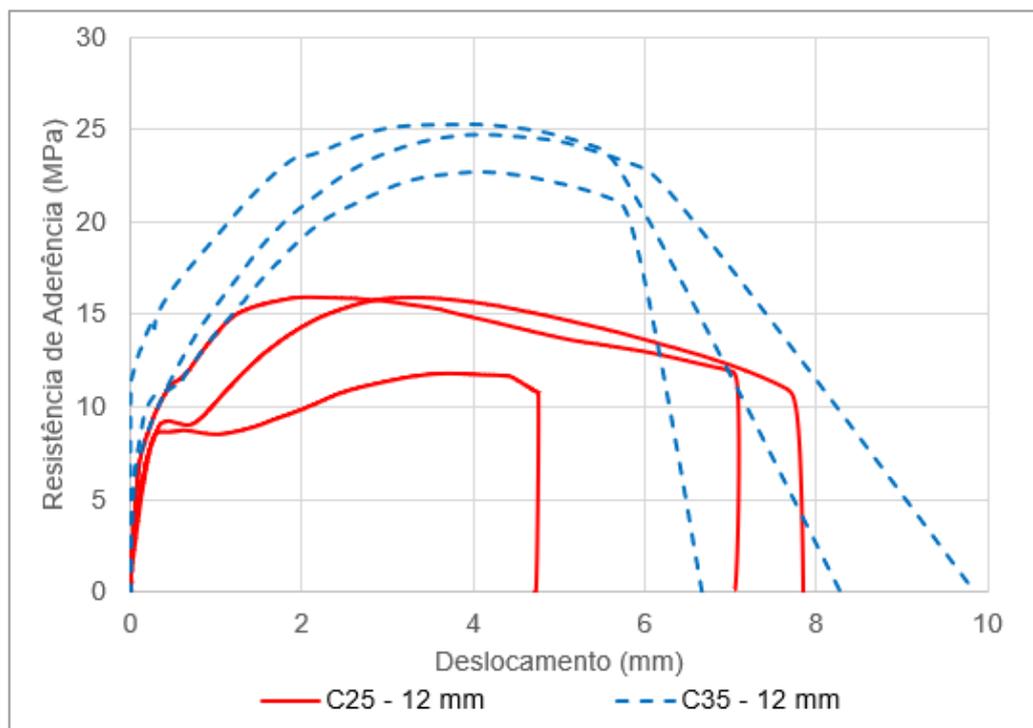
Fonte: Elaboração própria

Figura 26 – Comparação das curvas de aderência entre resistências do concreto para as barras de diâmetro de 10 mm.



Fonte: Elaboração própria

Figura 27 – Comparação das curvas de aderência entre resistências do concreto para as barras de diâmetro de 12 mm.



Fonte: Elaboração própria

Na Figura 25, referente às barras de 8 mm, novamente as barras inseridas no concreto C35 apresentaram resistências de aderências maiores do que as barras inseridas no concreto C25. Porém, assim como para as barras de 10 mm, o teste de Tukey, Tabela 7, mostrou que a diferença entre a tensão de aderência não foi significativa. A média de resistência de aderência dos corpos de prova C35 – 8 mm foi de 17,03 MPa, enquanto para os corpos de prova C25 – 8 mm a resistência de aderência teve uma média de 11,21 MPa. Uma vez mais, um corpo de prova do concreto C35 apresentou uma queda abrupta de resistência de aderência, outra vez presumivelmente devido a uma falha no tratamento superficial da barra, que causou o descolamento de um fio helicoidal.

Na Figura 26, referente às barras de 10 mm, também notou-se uma tendência das barras inseridas no concreto C35 apresentarem resistência de aderência maiores do que as barras inseridas no concreto C25. Porém, o teste de Tukey, Tabela 7 mostrou que a diferença entre a tensão de aderência não foi significativa. A média de resistência de aderência dos corpos de prova C35 – 10 mm foi de 16,75 MPa, enquanto para os corpos de prova C25 – 10 mm a resistência de aderência teve uma média de 12,62 MPa. Também pode-se perceber uma queda abrupta da resistência

de aderência em um dos corpos de prova do concreto C35, provavelmente devido ao descolamento de um fio helicoidal, responsável por grande parte da aderência, apresentando uma falha no tratamento superficial da barra.

Pode-se notar na Figura 27, referente às barras de 12 mm, que as barras inseridas no concreto C35 apresentam resistência de aderência significativamente maiores do que as barras inseridas no concreto C25. Isso é validado pelo teste de Tukey, Tabela 7. A média de resistência de aderência dos corpos de prova C35 – 12 mm foi de 24,23 MPa, enquanto para os corpos de prova C25 – 12 mm a resistência de aderência teve uma média de 14,55 MPa.

Na Tabela 7, é observada a análise estatística realizada, o teste de Tukey, que leva em consideração a significância dos dados amostrais, para o nível de confiabilidade de 95%, utilizado nesse estudo. Para uma amostra ser considerada significativamente diferente, o valor de Prob. deve ser inferior a 0,05. Como é possível notar, apenas as amostras C25 - 12 mm e C35 - 12 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 7 – Teste de Tukey

Parâmetro	Combinações	Prob.	Alpha	Sig.
8 mm	C25 x C35	0,1801	0,05	Não
10 mm	C25 x C35	0,2218	0,05	Não
12 mm	C25 x C35	0,0035	0,05	Sim
C25	8 mm x 10 mm	0,6005	0,05	Não
	8 mm x 12 mm	0,1196	0,05	Não
	10 mm x 12 mm	0,4121	0,05	Não
C35	8 mm x 10 mm	0,9967	0,05	Não
	8 mm x 12 mm	0,2078	0,05	Não
	10 mm x 12 mm	0,1885	0,05	Não

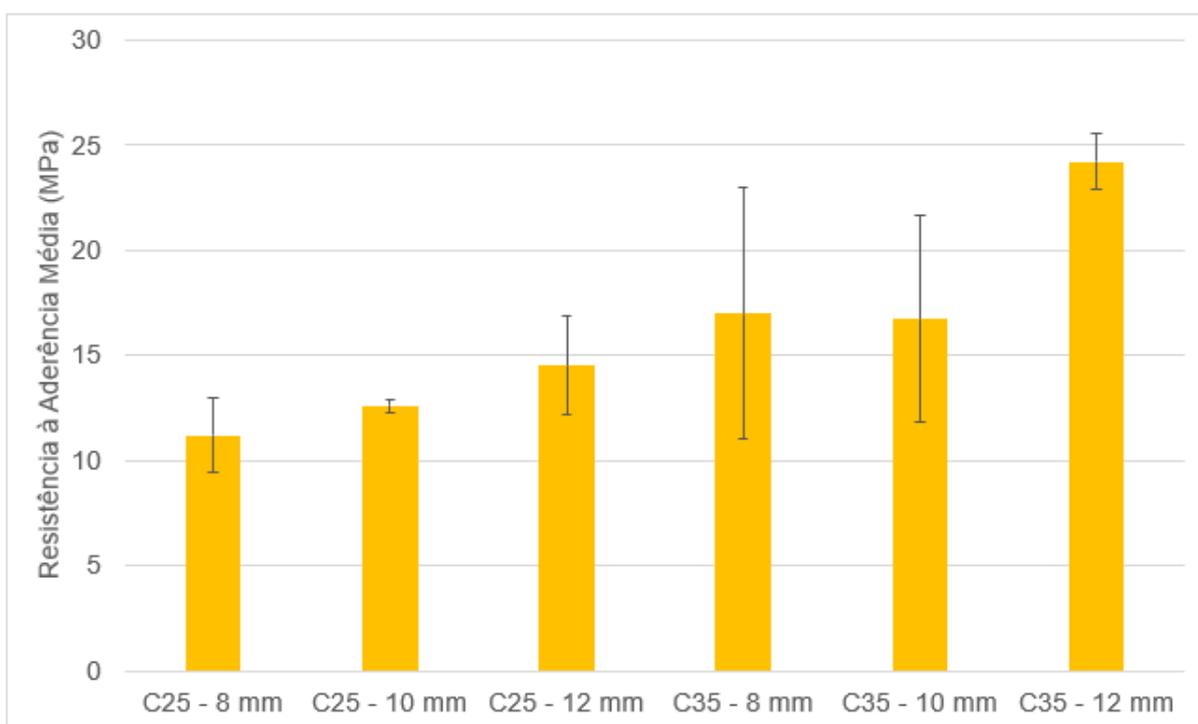
Fonte: Elaboração própria

De acordo com o teste de Tukey, somente as barras de 12 mm apresentaram variação significativa para diferentes resistências do concreto. Isso também é mostrado na Figura 28, onde é ilustrado os valores da resistência de aderência média de cada CP, obtidas pelo ensaio de arrancamento, onde as barras do desvio padrão estão em conformidade com os resultados estatísticos. A resistência de aderência

médias dos corpos de prova C25 – 8 mm, C25 – 10 mm e C25 – 12 mm, mostram-se com uma tendência de crescimento, enquanto o diâmetro da barra aumenta, mesmo não sendo estatisticamente diferentes. Enquanto isso, os corpos de prova C35 – 8 mm, C35 – 10 mm e C35 – 12 mm não seguem um padrão com o aumento do diâmetro da barra, não sendo estatisticamente diferentes.

Portanto, a resistência à compressão do concreto, neste estudo, não teve influência significativa na resistência de aderência entre as barras de PRFV e o concreto, visto que os resultados não são estatisticamente diferentes. Este resultado também vai ao encontro do resultado obtido no estudo de Brazeiro (2023), bem como vai ao encontro dos estudos de ACHILLIDES & PILAKOUTAS (2004), Huang *et al.* (2020) e Islam *et al.* (2015).

Figura 28 – Resistência de aderência média de cada CP



Fonte: Elaboração própria

Na Tabela 8, é ilustrada a comparação entre os valores de resistência de aderência obtidos experimentalmente e os valores previstos nas normas CT 303 (2021) e CSA S806-02 (2002).

Tabela 8 – Tensão média de aderência obtida experimentalmente e previstas em códigos

Amostra	d_b (mm)	f_{ck} (MPa)	Exp.	CSA S806	CT 303
			μ (MPa)	μ (MPa)	f_{bk} (MPa)
C25 - 8 mm	7,41	23,37	11,21	3,98	1,97
C25 - 10 mm	10,42	23,37	12,62	3,98	1,97
C25 - 12 mm	11,86	23,37	14,55	3,98	1,97
C35 - 8 mm	7,41	35,12	17,03	4,88	2,59
C35 - 10 mm	10,42	35,12	16,75	4,88	2,59
C35 - 12 mm	11,86	35,12	24,23	4,88	2,59

Fonte: Elaboração própria

Analisando a tabela, nota-se que ambos os códigos são mais conservadores do que os resultados experimentais. Ao comparar as normas CSA S806-02 (2002) e CT 303 (2021), observa-se que a segunda é ainda mais conservadora do que a primeira. Isso pode estar relacionado com o uso de uma metodologia de cálculo fundamentada nos experimentos realizados com estruturas que possuem o aço como reforço, não sendo exclusivamente desenvolvida para barras de PRFV, devido a sua recente implementação no Brasil, enquanto que CSA S806-02 (2002) é adaptada de ensaios e experimentos já realizados.

Nesse estudo, o diâmetro da barra e o cobrimento não influenciaram a resistência de aderência calculada de acordo com os códigos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal avaliar a aderência entre barras de PRFV e o concreto, variando o diâmetro das barras e a resistência à compressão do concreto, para entender a influência desses parâmetros na resistência de aderência, com o intuito de contribuir nos estudos para melhor e maior utilização deste tipo de material dentro da engenharia civil.

O aumento da resistência à compressão do concreto não desempenhou um papel significativo na resistência de aderência, exceção feita aos corpos de prova com as barras de 12 mm de diâmetro, onde o concreto com resistência à compressão de 35 MPa teve uma resistência de aderência significativamente superior, demonstrada pelo teste de Tukey.

A variação do diâmetro das barras também não influenciou significativamente na resistência de aderência, como foi mostrado pelo teste de Tukey.

As resistências de aderência obtidas experimentalmente apresentaram valores superiores às resistências calculadas por ambos os códigos, CSA S806-02 (2002) e CT 303 (2021). Assim sendo, as normas proporcionam uma previsão mais conservadora da resistência de ligação, podendo ser usadas seguramente para a previsão da resistência de aderência das barras de PRFV.

5.1. Sugestão para trabalhos futuros

- Avaliar a resistência de aderência das barras de PRF através do ensaio de aderência em vigas, o *beam test*;
- Variar a conformação superficial das barras de PRF, e comparar os resultados obtidos;
- Realizar o ensaio de arrancamento com os mesmos diâmetros e resistência à compressão do concreto, porém mudando o fabricante das barras e comparar os resultados;
- Realizar o ensaio de arrancamento em concretos com alta resistência;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16889**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, ABNT, 2020.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16916**: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, ABNT, 2021.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16917**: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, ABNT, 2021.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16972**: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, ABNT, 2021.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, ABNT, 2015.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, ABNT, 2018.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, ABNT, 2003.

ACHILLIDES, Z.; PILAKOUTAS, K. Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions. **Journal of Composites for Construction**, v. 8, n. 2, 2004.

ACI. 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.

ACI. American Concrete Institute. **ACI 440.1R-15**: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. Farmington Hills, 2015.

ACI. American Concrete Institute. **ACI 440R-1996**: State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. Detroit, 1996.

ALCANTARA, M. A. M.; LORRAIN, M. S.; BARBOSA, M. P. Avaliação da influência da posição da armadura no desenvolvimento das tensões de aderência na interface entre o concreto auto-adensável e a armadura. **46º IBRACON**, v.5, p.76-90, 2004.

ASTM D7205/D7205M-06:2016, **Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars**, 2016.

ASTM D7913/D7913M-14:2020, **Standard Test Method for Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pullout Testing**, 2020.

BAKIS, C. E.; UPPULURI, V. S.; NANNI, A.; BOOTHBY, T. E. Analysis of bonding mechanisms of smooth and lugged FRP rods embedded in concrete. **Composites Science and Technology**, v. 58, p.1307-1319, 1998.

BARBOSA, M. T. G. et al. Estudo da influência do diâmetro da barra e da resistência à compressão do concreto no ensaio de pull-out para determinação da tensão última de aderência. In: **IV Congresso de Engenharia Civil**, v. 1, p. 435-464, Juiz de Fora, MG, Brasil, 2000.

BASTOS, P. S. **Fundamentos do concreto armado**. Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2019.

BANDEIRA, P. H. V. **Caracterização à tração de barras de polímero reforçados com fibra de vidro (GFRP)**. Monografia de conclusão de curso. Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2023.

BRAZEIRO, G. D. **Estudo da aderência entre o concreto e barras de polímero reforçados com fibra de vidro (FRPV)**. Monografia de conclusão de curso. Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2023.

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

COUTO, I. A. **Análise Teórica e Experimental do Comportamento da Aderência entre o Concreto e Barras de Fibra de Vidro Impregnadas por Polímeros**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CSA. Canadian Standards Association. **CAN/CSA S6-06**: Canadian Highway Bridge Design Code. Rexdale, Ontario, 2006.

CSA. Canadian Standards Association. **CAN/CSA-S6**: Canadian Highway Bridge Design Code. 2014.

CSA. Canadian Standards Association. **CAN/CSA-S806**: Design and construction of building structures with fiber-reinforced polymers. Mississauga, Ontario, 2012.

CSA. Canadian Standards Association. **CSA S806-02**: Design and Construction of Building Components with Fiber-Reinforced Polymers. Rexdale, Ontario, 2002.

Cunha, D. R. D. **Estudo da aderência de barras poliméricas reforçadas com fibras de vidro (GFRP) ao concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

FIB. Federation Internationale Du Beton. **FIB 9.3 TG- FRP as reinforcement in concrete**. 2003.

FIB. Federation Internationale Du Beton. **FIB Bulletin 10**. Bond of Reinforcement in Concrete. State-of-the-art Report. 2000.

FIB. Federation Internationale Du Beton. **Technical Report**. FRP reinforcement in RC structures. 2007

GONÇALVES, J. F. G. **Aderência de varões GFRP no betão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade da Madeira. Funchal, 2013.

GU, Xingyu; YU, Bin; WU, Ming. Experimental study of the bond performance and mechanical response of GFRP reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 407-415, 2016.

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.

HUANG, H; YUAN, Y; ZHANG, W; HAO, R, ZENG, J. Bond properties between GFRP bars and hybrid fiber-reinforced concrete containing three types of artificial fibers. **Construction and Building Materials**, v. 250, p. 118857, 2020.

ISLAM, S; AFEFY, H. M; SENNAH, K; AZIMI, H. Bond characteristics of straight-and headed-end, ribbed-surface, GFRP bars embedded in high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 83, p. 283-298, 2015.

LIAO, J. et al. Bond strength of grfp bars to high strength and ultra-high strength fiber reinforced seawater sea-sand concrete (ssc). **Composite Structures**, v. 281, p. 115013, 2022.

MACEDO, B. N. T. **Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras para o uso em concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

MACHADO, A. P. **Reforço de Estruturas de Concreto Armado com Fibras de Carbono**. v. 25, editora PINI, 2007.

MEIER, U. Carbon Fiber Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering. **Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering**, v. 2, n. 1, p. 7-12, 1992.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais – Ciência e Tecnologia**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgar Blucher, 2016.

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

SALEH, N; ASHOUR, A; LAM, D; SHEEHAN, T. Experimental investigation of bond behaviour of two common GFRP bar types in high–Strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 610-622, 2019.

SILVA, R. C. B. **Comportamento de Vigas de Concreto Armadas Com Barras de CFRP e GFRP Para Infraestrutura de Transportes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

SOLYOM, S; BALÁZS, G. L. Bond of FRP bars with different surface characteristics. **Construction and Building Materials**, v. 264, p. 119839, 2020.

TAVARES, D. H.; GIONGO, J. S.; PAULTRE, P. Behaviour of reinforced concrete beams reinforced with GFRP bars. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 1, n. 3, p. 285-295. 2008.

UOMOTO, T.; MUTSUYOSHI, H.; KATSUKI, F.; MISRA, S. Use of Fiber Reinforced Polymer Composites as Reinforcing Material for Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.14, n. 3, p. 191-209, 2002.

VARES, R. S. **Estudo do reforço à flexão de vigas biapoiadas em concreto armado com barras de fibra de vidro**. Monografia de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

WEIBULL, J. K.; BASTOS, C.C.D.O.; OLIVEIRA, L. O. S. B. DIMENSIONAMENTO DE UMA PASSARELA UTILIZANDO CONCRETO COM ARMADURA NÃO METÁLICA. **Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula**, v. 3, n. 3, p. 16-37, 2020.

YAN, F; LIN, Z; YANG, M. Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: A review. **Composites Part B: Engineering**, v. 98, p. 56-69, 2016.

YE, L. P.; FENG, P.; ZHANG, K.; LIN, L.; HONG, W. H.; YUE, Q. R.; ZHANG, N.; YANG, T. FRP in Civil Engineering in China: Research and Applications. In: **Proceedings of the Sixth International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures, FRPRCS-6**, Singapura, 2003.