

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS PARA
ENGENHARIA**

**Análise Comparativa da Resistência Mecânica entre Elementos Estruturais
Constituídos de Concreto/Aço e Concreto/PRFC**

Tamara Aparecida Carvalho Ribeiro

Itajubá, fevereiro de 2022

Dissertação de Mestrado	Tamara Aparecida Carvalho Ribeiro	2022
--------------------------------	--	-------------

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS PARA
ENGENHARIA**

Tamara Aparecida Carvalho Ribeiro

**Análise Comparativa da Resistência Mecânica entre Elementos Estruturais
Constituídos de Concreto/Aço e Concreto/PRFC**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em
Materiais para Engenharia como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Mestre em Materiais para Engenharia**

Área de concentração: Não metais

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Ancelotti Junior

**Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Mírian de Lourdes Noronha
Motta Melo**

**Fevereiro de 2022
Itajubá**

FICHA CATALOGRÁFICA

(As informações serão fornecidas pela Biblioteca Mauá – BIM após a provação pela banca julgadora)

FOLHA DE APROVAÇÃO

(As informações serão fornecidas pela banca julgadora)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus agradecimentos a minha família, amigos e a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a construção desta pesquisa, destaco o nome do Mudito Bhikkhu, professor de meditação no mosteiro Shuddhavari, porque seus ensinamentos de enfrentamento diante aos obstáculos da vida foram de grande valia para este feito e sem eles eu não teria condições psicológicas de seguir adiante, pois no início deste trabalho me encontrava em um profundo sofrimento mental e o sentimento de fracasso destinado a desistir de fazê-lo antes mesmo de tentar começa-lo foi vencido.

Em seguida agradeço a toda equipe da instituição UNIFEI, ao professor e orientador Antônio Carlos Ancelotti Junior, que me forneceu seu laboratório para o estudo juntamente com ideias inovadoras, a professora e coorientadora Mírian de Lourdes Noronha Motta Melo, que me instruiu a organizar mentalmente o conteúdo prático para então colocá-lo no papel de forma clara ao leitor, aos inúmeros amigos e colegas de estudos, a todos os técnicos de laboratório, ao pessoal responsável pela limpeza dos locais onde trabalhei, aos trabalhadores do setor administrativo e de finanças (CAPES), trabalhadores da segurança, enfim, sem a contribuição de toda equipe UNIFEI a elaboração deste trabalho de pesquisa não seria possível.

RESUMO

Buscando melhorias em diversas áreas, a sociedade avança em busca de inovações tecnológicas na descoberta de novos materiais, e os materiais compósitos são produtos deste avanço tecnológico, caracterizados por apresentar melhores desempenhos em suas aplicabilidades devido a combinação de materiais polímeros, metais e cerâmicos em um único material. O presente estudo visou analisar a resistência mecânica demonstrada por materiais compósitos constituídos de concreto armado com PRFC e comparar seus resultados com o concreto armado com aço, tradicionalmente utilizado nas construções. Portanto diferentes geometrias de CDPs foram confeccionadas, utilizou-se tanto o concreto convencional quanto o concreto auto adensável e as armaduras foram fabricadas em barras e também em telas. E adicionalmente estudou-se qual tipo de estribo melhor se adapta as barras de PRFC e quais características da interface concreto/PRFC proporciona a melhor resistência à aderência. As análises deste estudo foram realizadas devido a fabricação dos CDPs em 4 grupos distintos. Os resultados demonstraram que apesar da utilização de diferentes materiais para fabricação do estribo e de mudanças realizadas na interface de ligação das barras de PRFC e do concreto, como a alternância de revestimentos de superfícies utilizados nas barras de PRFC e variação do concreto com diferentes resistências, observou-se uma paridade nos valores de resistência mecânica dos materiais concreto armado com barras de PRFC e concreto armado com aço. Entretanto o uso de PRFC em telas moldadas externamente ao concreto apresentou valores de resistência mecânica com ordem de grandeza significativamente maior quando comparados com o uso de aço em telas moldadas externamente ao concreto, fazendo desta configuração de armadura a mais indicada para o aumento de resistência mecânica do material compósito concreto armado com aço para o material compósito concreto armado com PRFC.

Palavras-chave: Compósitos, concreto, PRFC, aço e resistência mecânica.

ABSTRACT

Seeking improvements in several areas, society advances in search of technological innovations in the discovery of new materials, and composite materials are products of this technological advance, characterized by presenting better performances in their applicability due to the combination of polymer, metal and ceramic materials in a single material. The present study aimed to analyze the mechanical strength demonstrated by composite materials made of reinforced concrete with CFRP and compare its results with the steel reinforced concrete, traditionally used in constructions. Therefore, different geometries of CDPs were made, both conventional and self-compacting concrete were used and the reinforcements were manufactured in bars and also in meshes. Additionally, it was studied which type of stirrup best adapts to CFRP bars and which characteristics of the concrete/CFRP interface provide the best adhesion resistance. The analyzes of this study were carried out due to the manufacture of CDPs in 4 distinct groups. The results showed that despite the use of different materials to manufacture the stirrup and the changes made in the connection interface of the CFRP bars and the concrete, such as the alternation of surface coatings used in the CFRP bars and the variation of concrete with different strengths, it was observed a parity in the values of mechanical resistance of the materials reinforced concrete with CFRP bars and concrete reinforced with steel. However, the use of CFRP in meshes molded externally to the concrete presented values of mechanical strength with an order of magnitude significantly higher when compared to the use of steel in meshes molded externally to the concrete, making this reinforcement configuration the most suitable for increasing mechanical strength. from the composite material reinforced concrete with steel to the composite material reinforced concrete with CFRP.

Keywords: Composites, concrete, CFRP, steel and mechanical strength.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DISPOSIÇÃO DOS TIPOS DE REFORÇOS PRF.	23
FIGURA 2 - ADERÊNCIA POR FORÇA DE ADESÃO.	26
FIGURA 3 - ADERÊNCIA DEVIDO A RESISTÊNCIA DE FRICÇÃO.....	26
FIGURA 4 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO PROCESSO DE PULTRUSÃO.	30
FIGURA 5 - ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO MANUAL.....	31
FIGURA 6 - ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM PROCESSO DE ENROLAMENTO FILAMENTAR, SENDO: (A) FIEIRA; (B) GUIA DE FIBRAS; (C) SISTEMA DE TENSIONAMENTO; (D) PINOS GUIAS; (E) IMPREGNADOR DE TAMBOR COM LÂMINA RASPADORA; (F) BANHO DE RESINA; (G) FEIXE DE FIBRAS IMPREGNADAS; (H) CARRO TRANSVERSAL; (I) OLHAL; E (J) MANDRIL ROTATIVO.....	33
FIGURA 7 - FLUXOGRAMA DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA.	34
FIGURA 8 - FLUXOGRAMA DAS CONFIGURAÇÕES DE ARMADURAS UTILIZADAS.	35
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA DOS PROCESSOS DE CONCRETAGEM DOS CDPs.	36
FIGURA 10 - FLUXOGRAMA DOS PROCESSOS DE RUPTURA DOS CDPs.....	37
FIGURA 11 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA DE ACORDO COM ABNT NBR 6118:2014.....	38
FIGURA 12 - ÂNCORA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO EM BARRAS DE PRFC.	38
FIGURA 13 - MOLDE DE MADEIRA.....	40
FIGURA 14 - PRODUÇÃO DE ESTRIBOS.....	41
FIGURA 15 - ARMADURA G1-BA.....	41
FIGURA 16 - BARRA UNITÁRIA DE PRFC COM REVESTIMENTO DE SILICATO DE SÓDIO.	42
FIGURA 17 - AGRUPAMENTO DE 5 BARRAS DE PRFC COM REVESTIMENTO DE SILICATO DE SÓDIO.....	43
FIGURA 18 - SISTEMA DE RESINA UTILIZADO.	43
FIGURA 19 - ARMADURA G1-BC1.....	44
FIGURA 20 - ARMADURA G1-BC5.....	44
FIGURA 21 - PREENCHIMENTO DOS MOLDES, CORRESPONDENTE A CONFIGURAÇÃO G1-BA, G1- BC1 E G1-BC5, RESPECTIVAMENTE.	46
FIGURA 22 - CAPEAMENTO DOS CDPs.....	47
FIGURA 23 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO EM 4 PONTOS.	47
FIGURA 24 - MOLDE CILÍNDRICO METÁLICO.	49
FIGURA 25 - ESTRIBOS DOBRADOS.....	50
FIGURA 26 - CONFIGURAÇÃO G2-BA.....	50
FIGURA 27 - CLASSIFICAÇÃO DA TELA DE AÇO.	51
FIGURA 28 - CORTE DAS TELAS EM AÇO.	51
FIGURA 29 - CONFIGURAÇÃO G2-TAI E G2-TAE, RESPECTIVAMENTE.	52
FIGURA 30 - IMPRESSORA 3D TEVO TORNADO GOLD.....	53
FIGURA 31 - ESTRIBO DE FUNÇÃO NÃO ESTRUTURAL.....	53
FIGURA 32 - CONECTORES USINADOS NO TORNO MECÂNICO.	54
FIGURA 33 - MÁQUINA DE ENROLAMENTO FILAMENTAR.	54
FIGURA 34 - CONFIGURAÇÃO G2-BC5.	55
FIGURA 35 - TECIDO DE PRFC.	56
FIGURA 36 - CONFECÇÃO DOS TECIDOS EM PRFC.	57
FIGURA 37 - CONFIGURAÇÃO G2-TCI E G2-TCE, RESPECTIVAMENTE.	57
FIGURA 38 - PREENCHIMENTO DOS MOLDES (GRUPO 2).	59
FIGURA 39 - APLAINAMENTO DAS SUPERFÍCIES DOS CDPs.....	59
FIGURA 40 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.	60
FIGURA 41 - MICROSCÓPIO ESTEREOSCÓPIO DA CONFIGURAÇÃO G3-BA.	62

FIGURA 42 - MICROSCÓPICO ESTEREOSCÓPIO DAS CONFIGURAÇÕES G2-BC5, G2-BC5-RA, G2-BC5-RR, RESPECTIVAMENTE.	63
FIGURA 43 - MATERIAIS CONSTITUINTES DO CAA.....	63
FIGURA 44 - BETONEIRA CSM.	64
FIGURA 45 - MÉTODO DO CONE DE ABRAMS.	65
FIGURA 46 - MÉTODO DO FUNIL V.....	65
FIGURA 47 - MÉTODO DA CAIXA L.	66
FIGURA 48 - PREENCHIMENTO DOS MOLDES (GRUPO 3).	67
FIGURA 49 - CAPEAMENTO DE SUPERFÍCIES DOS CDPs.	68
FIGURA 50 - PRENSA PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.	68
FIGURA 51- MOLDE CILÍNDRICO METÁLICO PARA ARGAMASSA.	72
FIGURA 52 - MICROSCÓPICO ESTEREOSCÓPIO DAS CONFIGURAÇÕES G2-BC5, G2-BC5-RA, G2-BC5-RR, RESPECTIVAMENTE.	73
FIGURA 53 - PREENCHIMENTO DOS MOLDES COM CAA (GRUPO 4).....	74
FIGURA 54 - MISTURADOR MECÂNICO DE ARGAMASSA.	75
FIGURA 55 - PREENCHIMENTO DOS MOLDES COM ARGAMASSA (GRUPO 4).	75
FIGURA 56 - MOLDAGEM FINAL (GRUPO 4).....	76
FIGURA 57 - CDPs PRONTOS (GRUPO 4)	76
FIGURA 58 - GARRAS CONFECCIONADAS PARA ENSAIO DE ADERÊNCIA.	77
FIGURA 59 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA.....	77
FIGURA 60 - GRÁFICO DA TENSÃO VERSUS DESLOCAMENTO (ENSAIO DE TRAÇÃO).	78
FIGURA 61 – BARRAS FRATURADAS SOB TRAÇÃO, SENDO BARRAS DE AÇO, PRFC E PRFC (UNIÃO 5 BARRAS).	80
FIGURA 62 - GRÁFICO DA TENSÃO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO EM 4 PONTOS VERSUS DESLOCAMENTO (GRUPO 1).	81
FIGURA 63 - RESULTADOS EM PORCENTAGENS DE TENSÕES SUPORTADAS NO ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO EM 4 PONTOS (GRUPO 1).	83
FIGURA 64 - CDPs FRATURADOS (GRUPO 1).	85
FIGURA 65 - FISSURAÇÃO TÍPICA EM VIGA SOLICITADA À FLEXÃO.....	86
FIGURA 66 - GRÁFICO DA TENSÃO A COMPRESSÃO VERSUS DESLOCAMENTO (GRUPO 2).	87
FIGURA 67 - GRÁFICO ADICIONAL DA TENSÃO A COMPRESSÃO VERSUS DESLOCAMENTO (GRUPO 2).	87
FIGURA 68 - RESULTADOS EM PORCENTAGENS DE TENSÕES SUPORTADAS NO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL (GRUPO 2).....	90
FIGURA 69 - CDPs DE ARMADURAS DE AÇO FRATURADOS (GRUPO 2).....	92
FIGURA 70 - CDPs DE ARMADURA DE PRFC FRATURADOS (GRUPO 2).	93
FIGURA 71 - RESULTADOS EM PORCENTAGENS DE TENSÕES SUPORTADAS NO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL (GRUPO 3).....	97
FIGURA 72 - CDPs FRATURADOS (GRUPO 3).	98
FIGURA 73 - CDPs FRATURADOS (GRUPO 4).	100
FIGURA 74 - RESULTADOS EM PORCENTAGENS DE TENSÕES SUPORTADAS NO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL (GRUPO 4).....	100

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CONFIGURAÇÕES DAS ARMADURAS DO CONCRETO ARMADO (GRUPO 1).	40
TABELA 2 - TRAÇO DO CONCRETO USINADO (GRUPO 1).	45
TABELA 3 - CONFIGURAÇÕES DAS ARMADURAS DO CONCRETO ARMADO (GRUPO 2).	48
TABELA 4 - TRAÇO DO CONCRETO USINADO (GRUPO 2).	58
TABELA 5 - CONFIGURAÇÕES DAS ARMADURAS DO CONCRETO ARMADO (GRUPO 3).	61
TABELA 6 - TRAÇO DO CONCRETO AUTO ADENSÁVEL (GRUPO 3).	64
TABELA 7 - CONFIGURAÇÕES DAS ARMADURAS DO CONCRETO ARMADO (GRUPO 4).	69
TABELA 8 - TRAÇO DO CAA (GRUPO 4).	73
TABELA 9 - TRAÇO DA ARGAMASSA.	74
TABELA 10 - RESULTADOS EM FORMA DE TABELA DO ENSAIO DE TRAÇÃO NAS BARRAS DE AÇO E BARRAS DE PRFC.	78
TABELA 11 - RESULTADOS EM FORMA DE TABELA DO ENSAIO DE TRAÇÃO NA FLEXÃO EM 4 PONTOS (GRUPO 1).	82
TABELA 12 - RESULTADOS EM FORMA DE TABELA DO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL (GRUPO 2).	89
TABELA 13 - RESULTADO DOS ENSAIOS DO CAA NO ESTADO FRESCO.	95
TABELA 14 - RESULTADOS EM FORMA DE TABELA DO ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL (GRUPO 3).	96
TABELA 15 - RESULTADOS EM FORMA DE TABELA DO ENSAIO DE ADERÊNCIA (GRUPO 4).	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABECE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA E CONSULTORIA
ESTRUTURAL
ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
ASTM - SOCIEDADE AMERICANA PARA TESTES E MATERIAIS
BA - BARRA DE AÇO
BC1 - 1 BARRA DE PRFC
BC5 - 5 BARRAS DE PRFC
CAA - CONCRETO AUTO ADENSÁVEL
CCV - CONCRETO CONVENCIONAL
CDP - CORPO DE PROVA
DOI - DEPARTAMENTO DE OBRAS
G1 - GRUPO 1
G2 - GRUPO 2
G3 - GRUPO 3
G4 - GRUPO 4
IEM - INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
IRN - INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
NBR - NORMA BRASILEIRA
PRF - POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA
PRFC - POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO
PRFC - POLÍMERO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO
PVC - CLORETO POLIVINIL
RA - REVESTIMENTO AREIA
RR - REVESTIMENTO RANHURA
SPA - SUPER PLASTIFICANTE
TAE - TELA DE AÇO EXTERNA
TAI - TELA DE AÇO INTERNA
TCE - TELA DE PRFC EXTERNA
TCI - TELA DE PRFC INTERNA
UNIFEI - UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

SUMÁRIO

1.Introdução	15
1.1. Justificativas e Motivações	18
1.2. Objetivos	19
2. Revisão Bibliográfica	20
2.1. Materiais Compósitos Comercializados no Brasil	20
2.1.1. Concreto Convencional (CCV) e Concreto Auto adensável (CAA)...	20
2.1.2. Concreto Armado com Aço.....	21
2.1.3. Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC)	23
2.2. Aderência na Interface do Concreto /Armadura	25
2.3. Resultados Literários Envolvendo o Concreto Armado com PRFC.....	27
2.4. Métodos de Processamento dos PRFC Utilizados	30
2.4.1.Pultrusão.....	30
2.4.2.Laminação Manual.....	31
2.4.3.Enrolamento Filamentar.....	32
3. Materiais e Métodos.....	33
3.1. Grupo 1	39
3.1.1.Moldes Prismáticos de Madeira.....	40
3.1.2.Configurações das armaduras	40
3.1.3.Concreto Usinado.....	45
3.1.4.Ensaio de Resistência à tração na flexão em 4 Pontos	46
3.2. Grupo 2	48
3.2.1.Moldes Cilíndricos de Metálicos	49
3.2.2.Configurações das Armaduras	49
3.2.3.Concreto Usinado.....	57
3.2.4.Ensaio de Resistência à Compressão Axial	59
3.3. Grupo 3	60
3.3.1.Moldes Cilíndricos Metálicos	61

3.3.2. Configurações das Armaduras	61
3.3.3. Concreto Auto Adensável (CAA)	63
3.3.4. Ensaio de Resistência à Compressão Axial	67
3.4. Grupo 4	69
3.4.1. Moldes Cilíndricos Metálicos	69
3.4.2. Configurações das Armaduras	72
3.4.3. Concreto Auto Adensável (CAA) e Argamassa	73
3.4.4. Ensaio de Força de Aderência	76
4. Resultados e Discussões	78
4.1. Grupo 1: Resultados de Resistência à tração na flexão em 4 Pontos.	80
4.2. Grupo 2: Resultados de Resistência à Compressão Axial	86
4.3. Grupo 3: Resultados de Resistência à Compressão Axial	94
4.4. Grupo 4: Resultados de Força de Aderência	99
5. Conclusões	101
6. Trabalhos Futuros	102
7. REFERÊNCIAS	103
ANEXO A	106
ANEXO B	108
ANEXO C	110
ANEXO D	112

1. Introdução

Os engenheiros civis buscam constantemente avanço tecnológico em diversas esferas da construção civil, seja em construções destinadas a projetos habitacionais, como em projetos de estradas, pontes, captação de água, rejeitos de esgoto, dentro outras, cuidando desde a fundação até o acabamento final da obra com o viés de amplificar positivamente a forma de viver em sociedade. E para que haja esta realização se faz necessário além de melhorias das técnicas de construções a descoberta de materiais tecnológicos capazes de elevar o desempenho final do empreendimento.

O desenvolvimento de muitas das tecnologias que tornam a nossa existência tão confortável está intimamente associado ao acesso a materiais adequados. E o avanço na compreensão de um tipo de material é com frequência o precursor de um progresso escalonado de alguma tecnologia (CALLISTER, 2012).

Atualmente o material compósito constituído de concreto armado com aço está entre os materiais mais empregados na construção civil brasileira, porém o aço utilizado como armadura requer pré-requisitos de implementação, e nem sempre sua implementação se torna possível. Por exemplo, construções civis em concreto armado com aço projetadas em ambientes propícios à corrosão comprometem a segurança estrutural da construção ao longo do tempo, pois as armaduras de aço perdem parte de seu material para o meio externo e conseqüentemente as propriedades mecânicas do material se deterioram.

Uma alternativa paliativa para corrosão no aço é o uso de revestimentos protetivos que impedem por um determinado tempo a oxidação do aço, porém não soluciona o problema em longo prazo. Outra solução que vem sendo discutida para combater a corrosão no aço é o uso de revestimentos protetivos inteligentes que se autorreparam.

Não obstante visando solucionar a problemática da corrosão em elementos de concreto armado com aço somado com a contínua busca por elementos estruturais cada vez mais esbeltos e com vão livre maior, a substituição do material compósito concreto armado com aço por concreto armado com PRFC (Polímero reforçado com fibra de carbono) também se torna uma solução tangível.

Os PRFCs ganharam espaço na construção civil, e técnicas de aplicação estão sendo desenvolvidas na América do Norte, Europa e Japão. Este material por apresentar facilidade de composição com outros tipos de materiais, estão se associando aos materiais tradicionais como madeira, concreto e aço, compondo estruturas mais resistentes e com um peso próprio menor (BAKOSS e GREENLAND, 1998).

Portanto a utilização dos PRFC tem sido utilizada nos últimos anos em outros países e quando comparado aos materiais metálicos, usualmente empregados no mercado Brasileiro, apesar de apresentar custo de aquisição mais elevado, os PRFCs apresentam desempenho superior, com a vantagem de oferecer elevada vida útil com uma resistência elevada em relação ao seu peso próprio, resistência a corrosão em ambiente agressivo e resistência à fadiga.

Outra vantagem dos PRFCs por se tratar de estruturas mais leves capazes de suportar cargas pesadas com muito menos material, facilita o transporte em longas distâncias e diminuem o tempo gasto no canteiro de obras, o que permite uma arquitetura sustentável, em que será possível projetar formas completamente diferentes e com menor dano à natureza.

Assim sendo o material PRFC vem sendo alvo de muitas pesquisas atuais devido a sua relevante importância, pois está diretamente relacionado a segurança, qualidade e desempenho. Diversos estudos também estão sendo realizados para reduzir o custo de produção do PRFC, para que sua comercialização seja ampliada e mais acessível a todas as indústrias.

Pesquisadores da Universidade Técnica de Dresden, estão construindo o primeiro edifício de concreto carbono do mundo na Alemanha. Batizado de *The Cube* (O Cubo, em português), O projeto de 5 milhões de euros teve início em 2017 e culminará em um prédio universitário composto por espaços de sala de aula e laboratórios, e visa a redução do uso de material concreto em 50% e as emissões de CO₂ em até 70%, com o uso de produção automatizada de alto volume para redes têxteis de PRFC. A malha têxtil de PRFC é feita com fibra de carbono e resina epóxi, e não enferruja como acontece com o aço, isso garante uma vida útil muito maior em comparação com o concreto convencional. Além disso, essas estruturas podem ser muito mais finas, já que boa parte da espessura do concreto armado é influenciada pela necessidade de criar sistemas de drenagem para evitar a oxidação dos vergalhões. (informação verbal) ¹

Contudo a produção elementos estruturais de PRFC combinados com concreto ainda não são normatizados no Brasil, temos referências norte americanas advindas do Instituto

¹ Notícia fornecida por Camila Santos na edição Globo Conde Nast, em agosto de 2021.

Americano que abordam esse tema, no entanto a tendência é de que o país em breve tenha sua própria norma técnica. No ano de 2015, estimulado pela ABECE (Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural), foi criado um comitê na ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) para estudar a criação de uma NBR (Norma Brasileira) de aplicação de PRFC em estruturas de concreto. (informação verbal) ²

Assim sendo, em busca de contribuir com o avanço tecnológico na construção civil, a presente pesquisa tem como principal foco de estudo comparar a resistência mecânica entre estes dois tipos de materiais, aço e PRFC, ambos utilizados como armadura de elementos estruturais de concreto armado.

² Notícia fornecida por Gustavo Pérez no VII congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, promovido pela ABECE., realizado em maio de 2015.

1.1. Justificativas e Motivações

O material compósito de PRFC se tornou um material notável em estudos e aplicações da engenharia civil, uma vez que apresenta propriedades mecânicas superiores as propriedades mecânicas do aço e massa específica tão leve como madeira ou plástico. *A densidade dos PRFCs, que representa cerca de 20% da densidade do aço.* (HOLLAWAY & LEEMING, 1999). E diferentemente das barras de aço, os materiais compósitos não sofrem deterioração proveniente da ação de agentes agressivos, químicos, físicos ou biológicos.

Os PRFCs por apresentarem baixo módulo de elasticidade apresentar pequena deformação de ruptura, geralmente menor que 3%. (HOLLAWAY & LEEMING, 1999), portanto estes materiais exibem um comportamento elástico linear até a ruptura e não apresentam patamar de escoamento ou deformações plásticas. Segundo Callister (2008), *os dados numéricos da massa específica do aço correspondem à 7,8 g/cm³, enquanto a massa específica do carbono corresponde à 1,7 g/cm³.*

O uso de PRFC também acrescenta diminuição nos custos com transporte, a grande economia acontece durante a instalação e manutenção, uma vez que se pode dispensar equipamentos pesados para seu posicionamento e escoramento, além de apresentar uma vida útil mais prolongada que o aço.

Portanto este tema de estudos foi escolhido devido as diversas vantagens que o PRFC tem sobre o aço, como elevada resistência com relação ao seu peso próprio, possibilitando a edificação de estruturas mais leves; apresentam alta resistência ao impacto, capaz de suportar abalos sísmicos; não sofrem corrosão sendo indicados para construções marítimas ou ambientes corrosivos; e apresentam vida útil prolongada, evitando gastos extras com manutenções.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos Principais

Com o principal objetivo de aumentar a resistência mecânica dos elementos estruturais da construção civil, o presente estudo investigou a interação de vigas e pilares constituídos por material compósito de concreto armado com PRFC e realizou uma análise comparativa de resistência mecânica destes elementos estruturais com o material compósito de concreto armado com aço.

1.2.2. Objetivos Secundários

Os objetivos secundários visaram estudar o tipo de estribo que melhor se adapta as barras de PRFC e analisar a região da interface concreto/PRFC, alternado as geometrias de contato, as características do concreto e as configurações de revestimento das barras de PRFC, de modo a aumentar a resistência à aderência.

As diferentes geometrias de contato formadas entre os materiais foram compostas pelo uso de armaduras em barras e em telas. Os tipos de concreto utilizados foram o concreto usinado e o concreto auto adensável. Já nos revestimentos das barras de PRFC utilizou-se 3 diferentes configurações, sendo revestimento liso, revestimento com areia e revestimento com ranhuras.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Materiais Compósitos Comercializados no Brasil

Um material compósito corresponde a uma combinação de duas ou mais fases insolúveis e distintas quimicamente, cujas propriedades e desempenho normalmente são superiores aos seus constituintes quando atuam isoladamente.

Atualmente tanto o concreto armado com aço, quanto os PRFCs, são produtos amplamente comercializados no Brasil, porém a substituição das armaduras de aço utilizada no concreto armado por armaduras de PRFC ainda se encontra em fase de estudos no Brasil, e normas que regem esta comercialização estão sendo formuladas pela ABNT.

Os tipos de concreto utilizados nas estruturas de concreto armado apresentam variações em seus constituintes e optou-se por detalhar nesta seção apenas os dois tipos utilizados nesta pesquisa, correspondendo ao concreto convencional (CCV) e o concreto auto adensável (CAA). Conseqüente relatou-se a descrição do concreto armado com aço e por fim relatou-se a descrição do polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC).

2.1.1. Concreto Convencional (CCV) e Concreto Auto adensável (CAA)

A aplicabilidade do concreto define com o melhor tipo a ser utilizado, por exemplo: o concreto convencional (CCV) como o próprio nome já diz é o concreto padrão utilizado em obras sem pré-requisitos específicos; o concreto bombeável, apresenta maior fluidez, fazendo possível sua aplicação em elevado desnível devido ao uso de bombas; o concreto pesado destina-se a aplicações em estruturas civis que exigem maior contrapeso, como muros de arrimo e gasoduto; o concreto auto adensável (CAA) é utilizado em estruturas que exige o lançamento sem o adensamento por vibração e com características de resistência mais elevadas; o concreto submerso, aplicado na presença de água, como estruturas de barragens e tubulões, dentre outros diversos tipos de concreto.

Contudo, os dois tipos de concreto utilizado nesta pesquisa e caracterizado como *material compósito obtido pela mistura, e dosagem conveniente, de brita, areia, cimento e água classifica-se como CCV, segundo Giondo (2007), E material constituído por brita, areia, cimento, água, fillers (como a sílica ativa) e aditivos (super plastificantes e/ou modificadores de viscosidade) classifica-se com CAA, segundo Tutikian (2004).*

Assim o CAA é composto pelos materiais existentes no CCV com adição de materiais finos (fillers) e aditivos. E segundo Okamura & Ouch (2003), os materiais *finos dão a mistura, coesão e resistência à segregação, ocupando espaços que ficariam vagos, já os aditivos, modificam quimicamente, diminuindo a quantidade de água necessária à pasta e posteriormente, dando durabilidade e resistência ao concreto.*

Para obtenção de um concreto de qualidade, devem ser efetuadas operações básicas de produção do material que influem diretamente nas suas propriedades. A primeira delas é definir a proporção de cimento, brita, areia e água, componentes da mistura, a fim de obter um concreto com características previamente estabelecidas. Posteriormente deve-se levar em conta a homogeneidade do concreto. Consequente, caso o concreto tenha sido misturado em uma usina, o transporte para o local onde será aplicado deve ser adequado, de modo que não interfira em suas propriedades. Após sua aplicação nos moldes se faz necessário o adensamento, que nada mais é do que o espalhamento e conformação do concreto, procurando eliminar o ar aprisionado, além de preencher totalmente as formas. E por fim o tempo de cura, refere-se à reação de hidratação dos constituintes da pasta de cimento, e a cura inadequada pode ocasionar fissuras de retração plástica.

2.1.2. Concreto Armado com Aço

Segundo Benevolo (1976), *o concreto passou a ser utilizado em algumas edificações em conjunto com o aço a partir de fins do século XIX, nomeado como concreto armado e constitui o repertório dos chamados “novos materiais” da arquitetura moderna.*

O concreto é um material cerâmico e quando submetido a esforços externos apresenta alta resistência às tensões de compressão, porém, apresenta baixa resistência à tração. Já o concreto armado é definido como sendo a união do concreto e de um material resistente à tração, como exemplo o aço, de tal modo que ambos resistam solidariamente aos esforços solicitantes (BASTOS, 2006).

E segundo Pinheiro (2010) *o concreto é um material estrutural amplamente empregado na construção civil. Seu consumo anual é da ordem de uma tonelada por habitante e está entre os materiais mais utilizados pelo homem.*

A ABNT NBR 6118:2014, *estabelece que os elementos estruturais que dependem da adesão entre armadura e concreto, e no qual não há aplicação de alongamentos iniciais das armaduras antes da consumação dessa aderência, são denominados de concreto armado.*

Portanto como todo tipo de estrutura, o concreto armado tem suas vantagens e desvantagens. *De acordo com suas vantagens pode se dizer que uma estrutura desse material pode ser moldada de diversas maneiras e formatos, apresenta uma boa resistência mecânica à compressão, elevada durabilidade e exige mão de obra menos qualificada para sua execução.* (CARVALHO & FIGUEIREDO FILHO, 2010).

Uma das desvantagens é o peso próprio elevado que o concreto armado possui. *Considera-se a massa específica dos concretos entre 2000 kg/m³ e 2800 kg/m³, reformas e adaptações muitas vezes são de difícil execução, geram resíduos e encarece o projeto e possui características restritivas como retração, fluência, pequena ductilidade e fissuração* (CARVALHO & FIGUEIREDO FILHO, 2010).

Ainda com relação as desvantagens do concreto armado com aço, o aço utilizado na armadura sofre perda do seu material pelo processo de corrosão, o que pode ser um fator limitando para determinadas construções civis. Portanto, o aço quando embutido no concreto íntegro, fica protegido contra corrosão por um período inicial, porém como o concreto é um material cerâmico, sua porosidade permite a passagem da umidade em pequenas escalas que ao longo do tempo permite a passagem de agentes corrosivos ao aço.

A solução utilizada no mercado para a proteção do aço, corresponde a um revestimento protetivo aplicado no aço contra a corrosão. O procedimento protetivo pode ser físico ou eletroquímico. A proteção física é conferida pelo concreto de cobrimento e a proteção eletroquímica pela formação de uma camada protetora de óxidos/hidróxidos (passivação) formados na superfície do aço em contato com o concreto alcalino.

Entretanto, como a contaminação do concreto pode provocar a quebra da camada passiva, que ocorre tanto pela diminuição do pH causada pela carbonatação do concreto, quanto por sua contaminação com íons cloreto. *Em ambiente marinho, o principal agente da quebra da camada passiva é a contaminação por cloretos que, quando atinge uma concentração superior a um nível crítico no concreto, desestabiliza localmente a camada passiva das armaduras e desencadeia um processo de corrosão* (WANG et al., 2010; NEVILLE, 2008).

Os elementos que compõem uma estrutura de concreto armado, como lajes, vigas, pilares, blocos e sapatas são dimensionados por engenheiros especializados utilizando normas regulamentadas pela ABNT, garantindo que todos os cuidados necessários sejam tomados para que a vida da população não seja colocada em risco.

2.1.3. Polímero Reforçado com Fibra de Carbono (PRFC)

O material PRFC é formado por fibras de carbono combinadas com polímeros de ligação tal como a resina epóxi. *A fase do compósito mais rígida e resistente designa-se por reforço (fase dispersa) enquanto a menos rígida e menos resistente designa-se por matriz (fase contínua).* (ISAAC & ISHARI, 2006). A fase dispersa pode ser classificada em dois grandes grupos, fibras de reforço sintéticas e fibras de reforço naturais. As principais fibras sintéticas utilizadas como reforço de materiais compósitos são as fibras de carbono, fibras de vidro, fibras de aramida, dentre outras. Já as fibras naturais dividem-se em fibras vegetais, ou seja, são fibras extraídas de zonas específicas das plantas, fibras animais e fibras minerais.

Os tipos de reforços dos PRF (Polímeros reforçados com fibra) também podem ser classificados através da geometria, sendo, reforço em particulados, reforço em fibras curtas ou descontínuas (alinhas ou desalinhas), e reforço em fibras longas (na forma de filamentos ou tecidos). A Figura 1 a seguir ilustra os tipos de reforços descritos anteriormente.

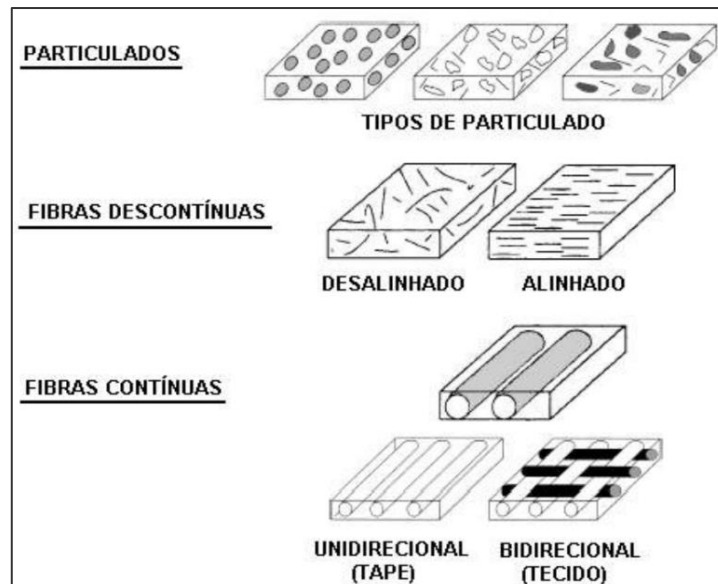


Figura 1 - Disposição dos tipos de reforços PRF.
Fonte: ISAAC & ISHARI, 2006.

No que diz respeito a fase contínua ou a matriz dos compósitos, *define-se com um dos componentes estruturais responsável por transferir as cargas para o reforço, manter a forma, posição e orientação, além de proporcionar características como ductilidade e tenacidade ao conjunto.* A matriz normalmente é polimérica, cerâmica ou metálica (CAMPOS et al, 2013). Neste trabalho, evidenciou-se apenas a descrição das matrizes poliméricas, classificadas em dois grupos, matrizes termoplásticas e matrizes termorrígidas.

As resinas termoplásticas são formadas por cadeias moleculares independentes, sem ligações cruzadas, sendo que a sua rigidez e a resistência mecânica dependem do tamanho das cadeias moleculares vizinhas, bem como da sua microestrutura (HOA, 2009). As matrizes termoplásticas têm a possibilidade de serem recicladas, reprocessadas e reparadas, uma vez que podem ser fundidas sem perda significativa de propriedades. A principal limitação é a elevada viscosidade que apresentam, obrigando a recorrer a temperaturas e pressões elevadas, o que implica um maior custo no processamento. Ao utilizar fibras naturais como material de reforço em compósitos, as elevadas temperaturas e pressões necessárias neste caso, podem danificar as fibras em questão (CASTRO, 2013).

Já as resinas termorrígidas são utilizadas numa combinação de dois ou três componentes, tradicionalmente uma resina e um catalisador e/ou acelerador. Suas cadeias são formadas por moléculas inicialmente independentes nas quais ocorre uma reação química de cura, durante a qual se criam ligações cruzadas entre cadeias vizinhas, obtendo-se uma estrutura reticulada. Em alguns casos a polimerização ocorre após a mistura dos referidos componentes à temperatura ambiente, enquanto outros tipos de termorrígidas exigem a aplicação de calor e pressão adicional para que o processo de cura se realize.

Matrizes termorrígidas têm a capacidade de suportarem temperaturas mais elevadas (comparativamente às termoplásticas), boa estabilidade térmica e dimensional, elevada rigidez, baixa densidade, boas propriedades de isolamento elétrico e térmico, boa resistência à fluência e à deformação sob cargas e permitem uma fácil impregnação de fibras para o fabrico de compósitos (FAKIROV & BHATTACHARYYA, 2007).

As matrizes termorrígidas que não podem ser curadas em temperatura ambiente têm como limitação o processo de cura não instantâneo e isso implica um aumento dos tempos de ciclo de produção, sendo por vezes necessário adicionar calor para completar a reticulação, o que conduz a custos adicionais de processamento. *Para além desta limitação, estas matrizes não podem ser recicladas, ou seja, uma vez processadas assumem uma forma permanente, degradando-se a temperaturas elevadas (BIRON, 2003).*

A resistência mecânica de um PRFC é fortemente dependente da ligação entre fibras e matriz, sendo por isso difícil de prever teoricamente. Sua resistência será máxima quando as fibras estiverem orientadas com o esforço, sendo mínima na direção perpendicular. Se não houver boa aderência da matriz à fibra, não há distribuição de esforços eficiente.

A resina utilizada neste trabalho foi a epóxi e de acordo com Athawale & Alhousami (2008), a resina epóxi é classificada como polimérica termorrígida, na qual possui excelente resistência química e à corrosão, estabilidade térmica e dimensional, propriedades mecânicas e elétricas superiores, em conjunto com a facilidade de manipulação e processabilidade, fizeram as resinas epóxi altamente úteis como 9 revestimentos de superfície e polímeros estruturais.

Segundo Peters (1998), a resina epóxi como matriz em compósitos reforçados com fibras possuem muitas vantagens em comparação com outros tipos de polímeros. As principais são:

- *Natureza polar, que confere uma excelente adesão a uma grande variedade de fibras;*
- *Relativa baixa contração após cura, fazendo com que o controle dimensional seja de fácil obtenção;*
- *Não há produtos voláteis na reação de cura, que geram bolhas e vazios indesejáveis no compósito;*
- *Estrutura de ligação cruzada que confere excelente resistência à ambientes hostis, aquoso ou não aquoso.*

2.2. Aderência na Interface do Concreto /Armadura

O desempenho da ligação do PRFC ao concreto é dependente do projeto, processo de fabricação, propriedades mecânicas da própria barra e as condições ambientais. (AL-ZHRANI et al, 1996). Portanto a aderência é a propriedade responsável pela transferência de esforços de um material para outro, neste estudo de caso sendo do material concreto para as armaduras tanto composta em material aço como em material PRFC.

Ao ancorar uma placa de reforço de aço no concreto, a aderência coexistente pode ser atribuída pela força de adesão, também conhecido como ligação química, e também pode ser atribuída por resistência de fricção da interface contra escorregar, responsável pelo intertravamento mecânico devido à irregularidade da interface.

Na aderência por adesão ocorrida em função das ligações químicas existentes entre os átomos na região da interface, são geradas durante as reações de pega do cimento. De acordo com Pinheiro & Muzardo (2003) *a força de adesão existe independente da direção da força*

aplicada. a Figura 2 elucida um cubo de concreto moldado sobre uma placa de aço. A ligação entre os dois materiais se dá por adesão se a força F_{b1} for aplicada. Se a força fosse aplicada na horizontal, não se conseguiria dissociar a aderência pela força de adesão da resistência a fricção. No entanto, a adesão existe independente da direção da força aplicada

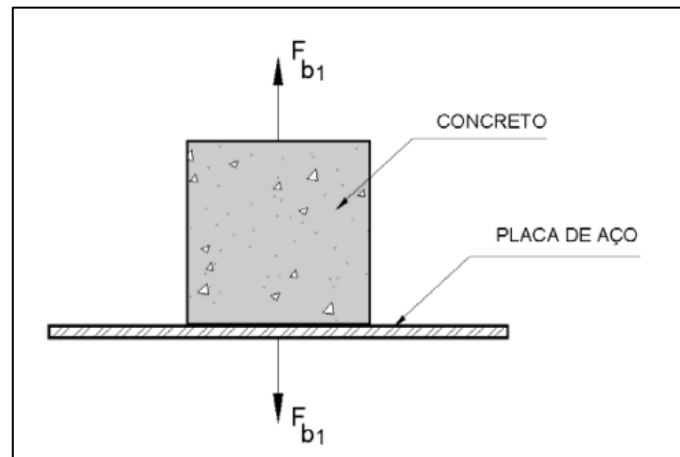


Figura 2 - Aderência por força de adesão.
Fonte: (PINHEIRO & MUZARDO, 2003)

Em barras de PRFC a força de adesão é transferida através da resina para as fibras de reforço, e uma ruptura por cisalhamento na resina também é possível. Quando uma barra deformada é submetida a uma tensão crescente, a adesão entre a barra e o concreto circundante quebra e deformações na superfície da barra causam inclinação das forças de contato entre a barra e o concreto circundante (WAMBEKE & SHIELD 2006)

Na aderência, devido a resistência de fricção na interface do concreto com a placa de aço, se manifesta quando há tendência ao deslocamento entre os materiais, dependendo da rugosidade superficial das placas de aço. Leonhardt & Mönning (1977) relatou três exemplos de amplitudes de rugosidade, que podem ser observados na barra de aço, conforme ilustrado na Figura 3.

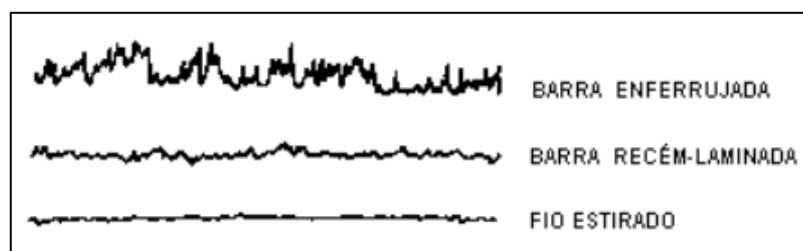


Figura 3 - Aderência devido a resistência de fricção
Fonte: (LEONHARDT & MÖNNIG, 1977).

Portanto mesmo uma placa de aço lisa pode apresentar intertravamento em função da rugosidade superficial.

A partir do exposto acima sobre a interrelação do concreto com as placas de aço, supõe-se que ao trocar as placas de aço por placas de PRFC haverá tanto a interferência da aderência devido a adesão com a fricção, entretanto a ordem de grandeza deve se distinguir devido a composição química e geométrica de cada material. E a investigação da resistência de aderência devido ao somatório das duas parcelas de aderência em questão pode ser realizada por testes de arrancamento e testes de emenda, optou-se neste estudo

2.3. Resultados Literários Envolvendo o Concreto Armado com PRFC.

A determinação da resistência é obtida pela ruptura de corpos de provas (CDPs) moldados e ensaiados em condições normalizadas. E o conhecimento da resistência pode contribuir para um melhor entendimento do material ensaiado (CREMONINI, 1994).

Segundo Leonhardt & Monnig (1978) as armaduras do concreto em barras, malhas ou telas de aço apresentam as seguintes funções sob condições de carregamento externo:

- *Absorver os esforços de tração em peças estruturais solicitadas à flexão e à tração, contribuindo para a capacidade resistente ou para a estabilidade da estrutura;*
- *Em peças comprimidas, aumentar a capacidade resistente do concreto à compressão ou a segurança de peças comprimidas esbeltas contra a flambagem;*
- *Fazer com que as fissuras no concreto, sob a ação de cargas de utilização, permaneçam na ordem de grandeza de capilares;*
- *Limitar a abertura das fissuras devido a estados de tensão produzidos por efeitos de coação, tais como o impedimento à deformação, no caso de variação de temperatura de retração, de estruturas hiperestáticas, etc.*

RASHID et al. (2020), realizou uma análise comparativa entre vigas de concreto armado com aço e vigas de concreto armado com barras de PRFC ensaiadas sob ensaio de flexão. Os CDPs de concreto armado com barras de PRFC obtiveram um ganho de 40% de resistência mecânica a flexão sob os CDPs de concreto armado com aço. Entretanto AYDIN et al (2021) realizou ensaios de flexão em vigas de concreto armado com aço e em vigas de

concreto armado com barras de PRFC e as resistências mecânicas a flexão obtida por ambas configurações de CDPs mostraram proximidade nos resultados.

No estudo de Abreu & Real (2018) foi apresentado uma comparação entre a área necessária para armaduras de aço e a área necessária para armaduras em três tipos de materiais de PRF (Polímero reforçado com fibra de vidro, polímero reforçado com fibra de aramida, polímero reforçado com fibra de carbono). Segundo este estudo constatou-se maior necessidade de área de armadura de polímero reforçado com fibra de vidro comparada ao aço; área de armadura de polímero reforçado com fibra de aramida e de armadura de aço com valores de áreas de armaduras muito próximos; e área de armadura de polímero reforçado com carbono com valores de área menores do que o aço.

O estudo de Carvalho (2017) analisou vigas de concreto armado protendido, a nomeação protendido refere-se ao fato que as barras sofrem alongamento de tração antes de ser inseridas no concreto. Portanto as barras de PRFC conseguiram aumentar a rigidez da viga em 26,8%, enquanto as barras de aço protendido conseguiu aumentar a rigidez da viga em 46,7%, controlando um pouco melhor a deformação, essa diferença se deve ao módulo de elasticidade das barras de aço ter se apresentado 30,5% maior em comparação com as barras PRFC.

OSTROWSKI et al (2020) estudou o comportamento compressivo de colunas de tubos compostos de aço polimérico reforçado com fibra de carbono preenchidas com concreto e os resultados apresentados mostraram que a energia de destruição, entendida como um campo sob as curvas tensão-deformação até atingir a capacidade máxima de carga, aumenta com o aumento do número de camadas de PRFC.

Zhang et al (2021) analisou pilares prismáticos de concreto reforçados com telas externas de PRFC, e os resultados de resistência a compressão mostraram que os pontos de ruptura frágil eram maiores nos cantos das telas de PRFC do que nos pontos centrais. Também foi verificado pelos autores que ao aumentar a espessura da tela de PRFC a tensão resistida aumentava, porém ao aumentar a altura do pilar havia um decréscimo da tensão resistida.

No estudo de Zhao et al (2021) ao verificar a resistência de compressão do concreto, concluiu que ao usar um concreto com resistência mais elevada havia um ganho proporcional de resistência à aderência entre as barras e o concreto.

Ahmad et al. (2011) analisou o concreto armado com barras de PRFC lisas e revestidas de areia sob ensaio de aderência e os resultados mostraram claramente que a resistência a aderência das barras lisas mostrou-se resultados bem próximos ao das barras revestidas de areia.

Huang et al (2020) avaliou o melhor tipo de interface concreto/PRFC dentre algumas configurações de barra: barras de PRFC com superfície composta por jateamento de areia; barras de PRFC com superfície composta por linha de PRFC depositadas em formato helicoidal; e barras de PRFC composta com superfície em recuo no formato helicoidal. A superfície da barra PRFC com jateamento de areia, obteve os menores valores de resistência a aderência, sendo 8,67 MPa; as superfícies de barras de PRFC com linha de PRFC depositadas em formato helicoidal possuíram a maior resistência a aderência, sendo 12,62 MPa; e o valor de resistência a aderência intermediário foi atingido pela configuração contendo as superfícies de barras de PRFC com recuo no formato helicoidal, sendo 11,42 MPa.

Irshidat (2020) realizou ensaios de aderência em barras de PRFC imersas parcialmente no concreto. E o resultado demonstrou que quanto maior o diâmetro das barras de PRFC, melhor é a força de ligação ou aderência entre elas e o concreto. Porém na pesquisa de Zhao et al (2021) também avaliou a resistência a aderência de barras de PRFC embutidas no concreto e verificou que as barras de PRFC que continham diâmetro de 12 mm obtiveram resistências de aderência menores que as barras de PRFC com diâmetro de 10 mm.

Qasem et al. (2020) em seu estudo notou que, devido a ensaios de resistência a aderência entre as barras de PRFC e de aço imersas no concreto, a tensão máxima necessária para arrancar as barras de aço com um diâmetro de 12 mm e 16 mm é cerca de 34,7% e 48,5% maior que para amostras semelhantes com barras de PRFC.

Notou-se uma escassez de trabalhos publicados com o foco de comparar o concreto armado com aço com o concreto armado. Assim sendo, espera-se que após a publicação da norma que valida a construção do concreto armado com PRFC no Brasil haverá maior interesse da comunidade acadêmica em estudar este tema.

2.4. Métodos de Processamento dos PRFC Utilizados

2.4.1. Pultrusão

Pultrusão é o nome atribuído ao processo automático para a produção, em contínuo, de produtos com secção constante, como exemplo produtos perfis e tubos. Este processo é de aplicação exclusiva à materiais compósitos. E este método de processamento dos PRFC utilizado neste estudo foi o único efetuado de forma indireta, pois as barras de PRFC contendo 2 mm de diâmetro foram terceirizadas.

O processo de Pultrusão consiste no arrasto de fibras contínuas, mantas e/ou tecidos contínuos. Estes são impregnados num banho de resina passando de seguida por um sistema de guiamento e controle, onde é retirado o excesso de resina e é dada a conformação às fibras, para que estas tenham a forma aproximada da secção a se produzir. Estas fibras passam em seguida por uma fieira aquecida com a forma da secção do perfil onde se efetua a cura do compósito. Os materiais são conformados e curados à medida que a secção progride ao longo da fieira aquecida. O avanço do perfil é efetuado através de um sistema de tração que permite o movimento contínuo e controla a velocidade de produção.

A velocidade de produção é controlada para que a cura seja efetuada completamente no tempo em que o produto se encontra dentro da fieira. É nesta fase que o material obtém resistência suficiente para resistir às forças exercidas durante a fase de tração. Depois de passar o sistema de tração, existe um sistema de corte onde os perfis são cortados com o comprimento pretendido.

Uma disposição esquemática de uma unidade de produção simples de pultrusão encontra-se na Figura 4

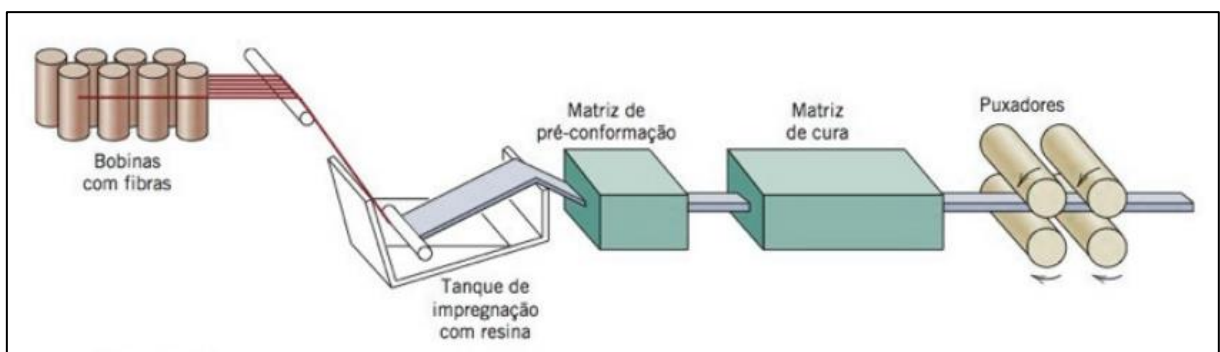


Figura 4 - Diagrama esquemático do processo de pultrusão.

Fonte: (CALLISTER, 2012).

Como a Pultrusão é um processo contínuo, beneficia-se de vantagens inerentes da eficiência e controle efetivo do processo, resultando em propriedades uniformes e com boa tolerância dimensional. Dada a continuidade do processo, podem ser produzidos perfis com qualquer comprimento, tendo como única limitação as dimensões para o transporte.

Processamentos melhorados estão sendo estudados para que propriedades dos perfis sofram melhorias. Hoje em dia existe uma variedade de perfis aplicáveis a diversas finalidades, tanto em dimensões como na composição do reforço e resina. Devido à potencialidade destes produtos compósitos, das quais se destaca a ausência de manutenção e o seu baixo peso específico, quando comparado com os materiais tradicionais de engenharia. No entanto, ainda são desconhecidos por muitos projetistas e engenheiros.

2.4.2. Laminação Manual

O processo conhecido como laminação manual ou do inglês Hand Lay up é o processo mais utilizado quando o objetivo é manufaturar grandes peças em baixa escala, principalmente no setor náutico (BELINGARDI et al, 2008).

A primeira etapa deste método consiste no corte dos tecidos de fibra na dimensão desejada, conseguinte adiciona-se determinadas camadas deste tecido, um sobre o outro, como ilustra a Figura 5, respeitando as direções desejadas de orientação das fibras. Em seguida, adiciona-se resina ao molde, com o auxílio de pincéis ou roletes, até que todas as camadas estejam umedecidas, sem a presença de bolhas de ar.

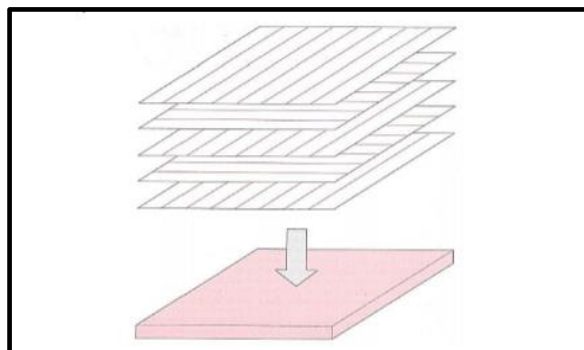


Figura 5 - Ilustração do processo de laminação manual.
Fonte: (CALLISTER, 2012).

Como o processo de banhar as fibras é normalmente feito a temperatura e pressão ambiente, matrizes poliméricas termoplásticas não são aplicáveis em tais casos. (CALLISTER, 2012). Este método também exige que o seu realizador possua certa experiência

com laminação, pois a má aplicação da resina pode ocasionar um aumento de peso desnecessário ou a fragilização de certos pontos do modelo.

Cada uma das camadas deve ser observada para que a direção das fibras se intercale e atribua maior resistência ao final do processo. O excesso de resina deve ser retirado com instrumento que pode ser uma espátula e deve ser redistribuído sobre o molde com um rolo de metal, evitando a formação de bolhas de ar que podem afetar as propriedades mecânicas do produto final. A polimerização ou processo de cura da resina se dá normalmente à temperatura ambiente.

2.4.3. Enrolamento Filamentar

O enrolamento filamentar é um tipo de processamento de compósitos, no qual quantidades controladas de resina e fibras são enroladas com a orientação desejada ao longo de um mandril rotativo e curada para produzir o compósito. *Este processo é muito utilizado para produzir compósitos estruturais de alta qualidade desde que controle a deposição das fibras contínuas com reprodutível precisão* (ABDEL-HADY, 2005).

Este processo foi inicialmente utilizado para produzir vasos de pressão, tanques de água e químicos. Hoje em dia, as aplicações incluem fuselagem de avião, seções de asa, eixos de rotores de helicópteros, tubulações de alta pressão, artigos esportivos e aplicações estruturais de todos os tipos (BALYA, 2004).

A técnica é relativamente simples, envolvendo o enrolamento de fibras contínuas, advindas de bobinas impregnadas ou imersas em banho de resina, depositadas e enroladas em um mandril girante. Para obter o enrolamento desejado, os reforços contínuos passam por uma bandeja de impregnação e são enrolados em torno de um mandril em rotação. O controle do ângulo de enrolamento e a colocação da fibra são efetuados por máquinas de enrolamento, garantindo precisão no enrolamento. O processo termina curando o laminado, gerando materiais com elevados índices de resistência e rigidez. A Figura 6 ilustra o procedimento de enrolamento filamentar utilizado.

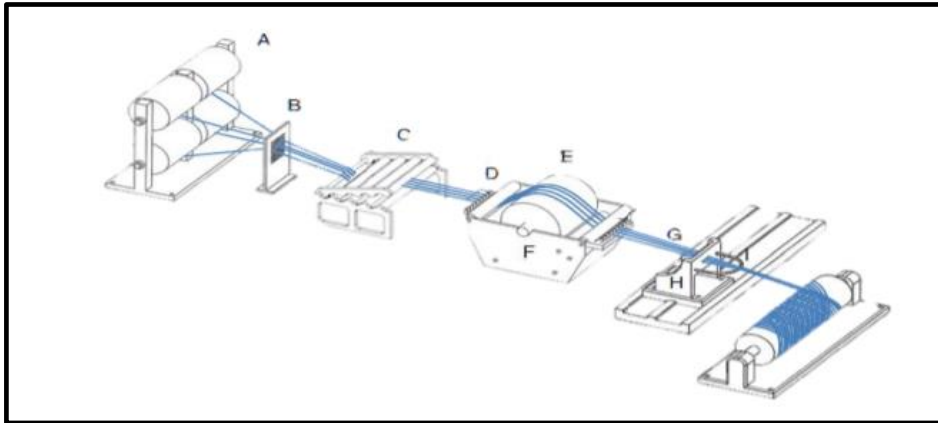


Figura 6 - Ilustração esquemática de um processo de enrolamento filamental, sendo: (A) Fieira; (B) guia de fibras; (C) sistema de tensionamento; (D) pinos guias; (E) impregnador de tambor com lâmina raspadora; (F) banho de resina; (G) feixe de fibras impregnadas; (H) carro transversal; (I) Olhal; e (J) mandril rotativo.
Fonte: (PANDITA et al., 2013).

O deslocamento do olhal e a rotação do mandril são sincronizados por um equipamento de controle numérico similar àqueles usados em tornos de usinagem (HERNÁNDEZ-MORENO et al., 2008). O ângulo de enrolamento desejado das fibras é atingido controlando-se a velocidade de deslocamento do carro transversal e a velocidade de rotação do mandril (PANDITA et al., 2013).

3. Materiais e Métodos

O fluxograma geral da linha de raciocínio utilizada na elaboração desta pesquisa foi dividido em 4 partes para melhor entendimento do leitor. Onde a primeira parte ilustrado no fluxograma da Figura 7 relatou os materiais utilizados para a confecção dos CDPs dos 4 grupos de ensaios. A segunda parte contida no fluxograma da Figura 8 demonstrou as diferentes confecções das armaduras juntamente com as nomenclaturas utilizadas para cada uma delas. Figura 9 correspondente a terceira parte da pesquisa visou relatar o tipo de processo de concretagem utilizado em cada um dos grupos. E por fim a quarta parte elucidada na Figura 10 demonstrou de forma sucinta o processo de ruptura dos CDPs realizados por ensaios e normas específicos.

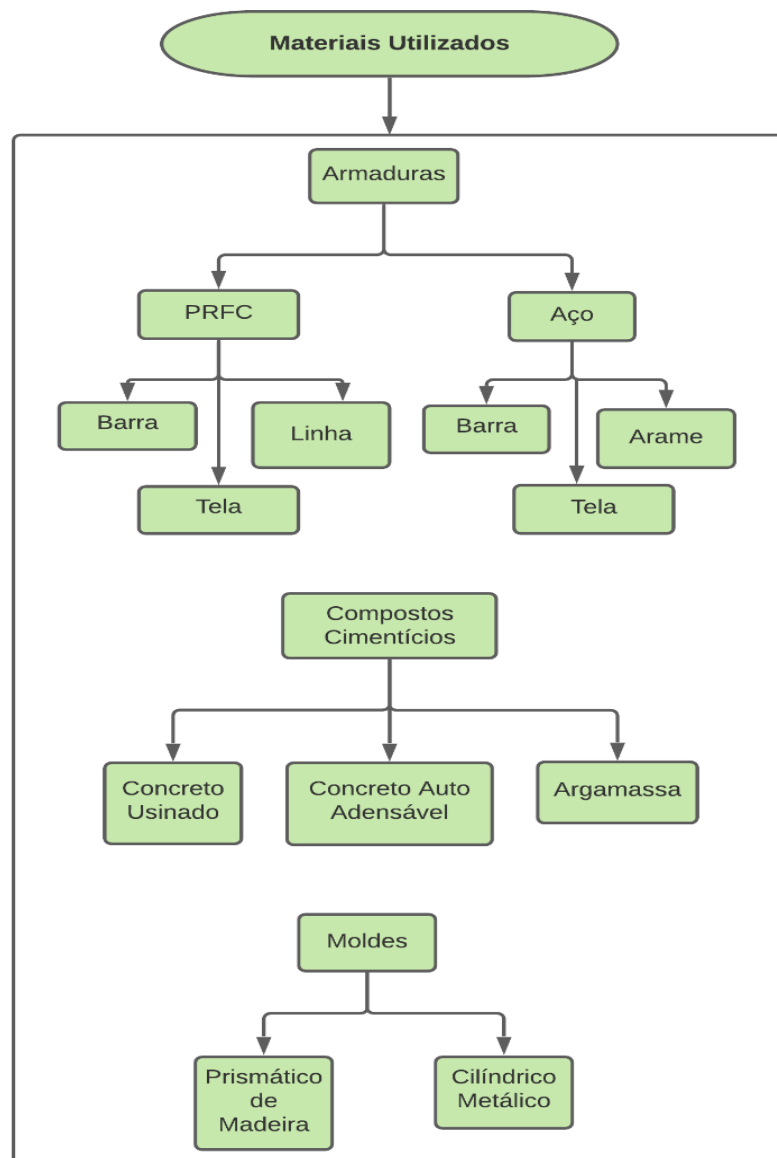


Figura 7 - Fluxograma dos materiais utilizados na pesquisa.

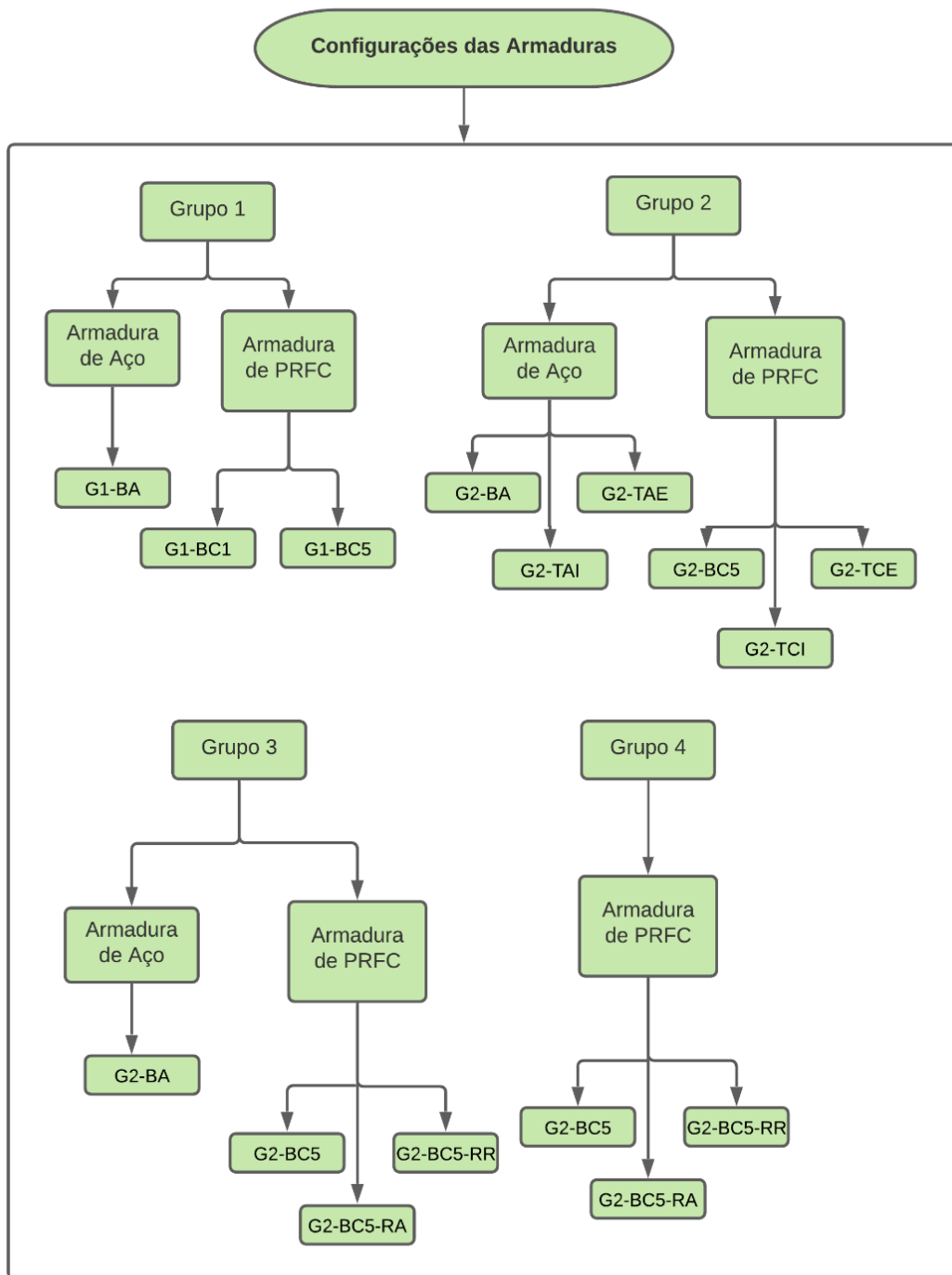


Figura 8 - Fluxograma das configurações de armaduras utilizadas.

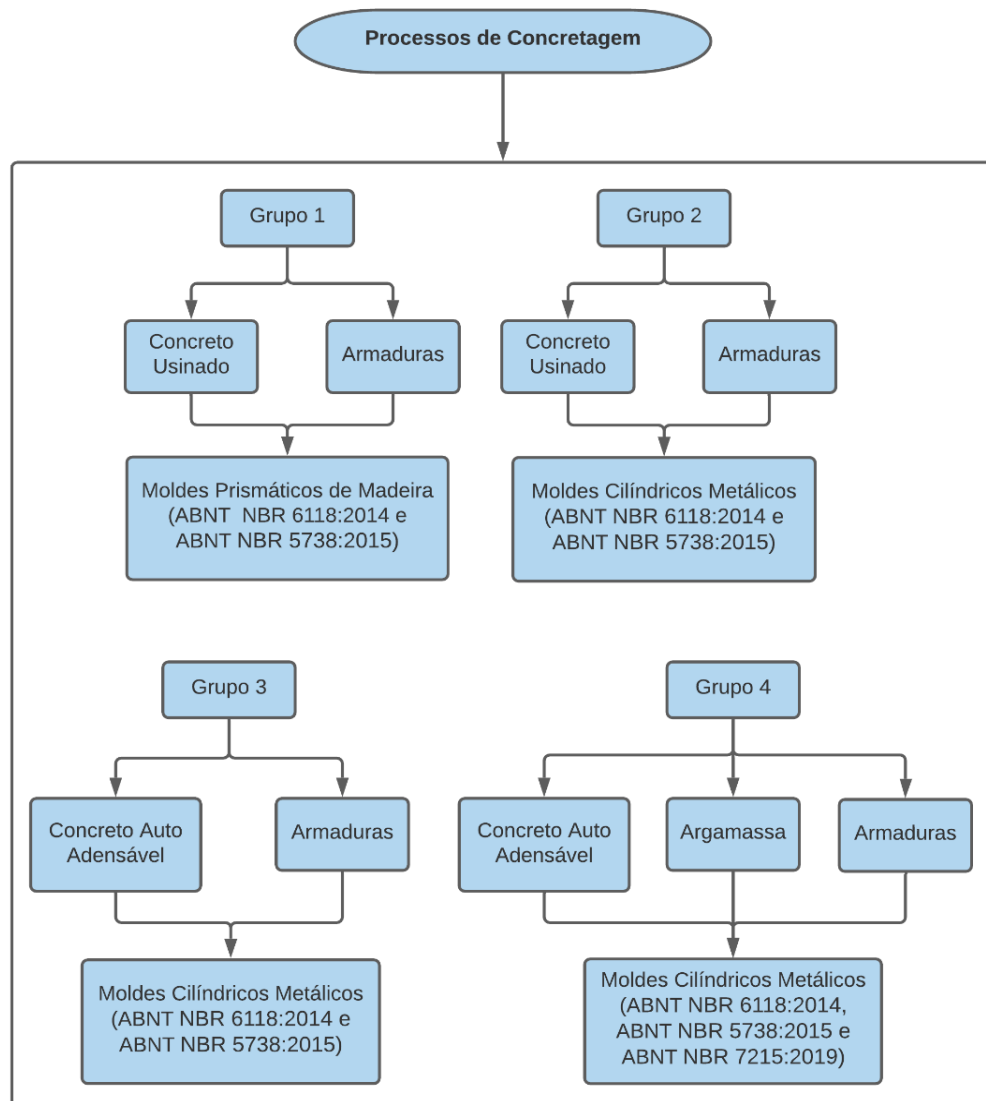


Figura 9 - Fluxograma dos processos de concretagem dos CDPs.

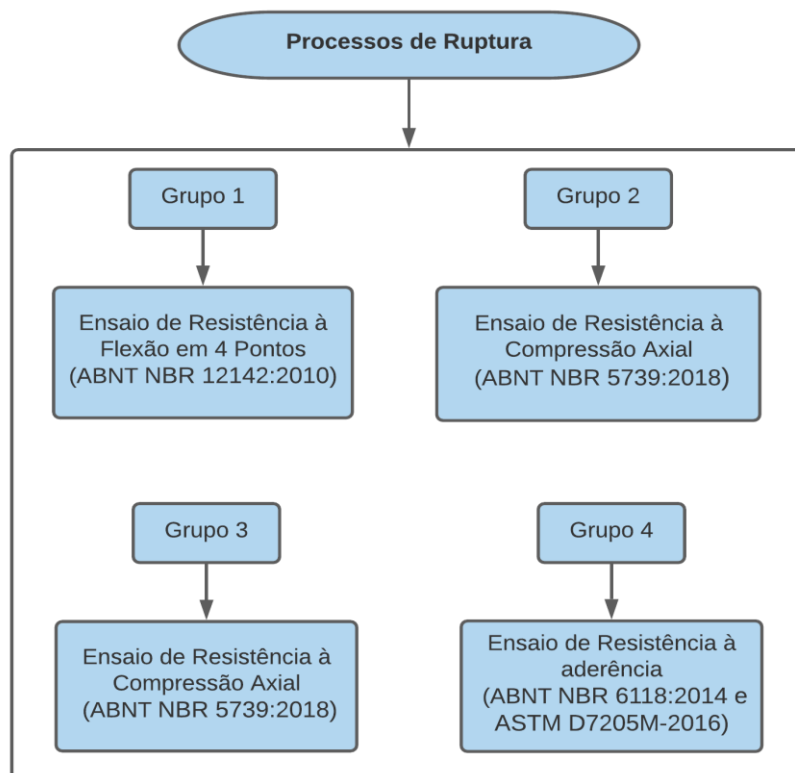


Figura 10 - Fluxograma dos processos de ruptura dos CDPs.

Após a conclusão da revisão bibliográfica que visou relatar o conteúdo teórico necessário para a construção desta pesquisa, prosseguiu-se com a elaboração da parte experimental, onde o detalhamento descritivo do passo a passo realizado em laboratório pode ser acompanhado a seguir.

Portanto, o ensaio de tração para determinar a resistência das barras baseou-se na norma da Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM) D7205/D7205M-21 - *Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars*.

Já ensaio de tração à flexão em 4 pontos, utilizado no grupo 1 de ensaios, seguiu-se as instruções da norma ABNT NBR 12142:2010 - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Nos grupos 2 e 3, realizou-se o ensaio de compressão axial, onde o uso da norma ABNT NBR 5739:2018 - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos, se fez necessário.

No ensaio de resistência a aderência, realizado no grupo 4, um modelo de ensaio foi criado de acordo com as características dos materiais ensaiados e dos ferramentais

disponíveis para uso. E para realização deste procedimento utilizou-se como guia a união da norma ABNT NBR 6118:2014 - Projeto de estruturas de concreto, conjuntamente com a norma ASTM D7205/D7205M-21.

Vale ressaltar que o ensaio de aderência referenciado na norma ABNT NBR 6118:2014, refere-se as características geométricas do CDP ilustrado na Figura 11, onde as barras eram compostas por material aço e os blocos de concreto.

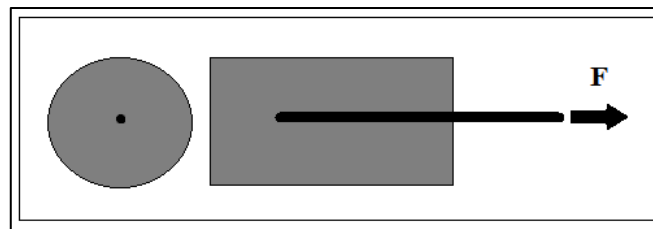


Figura 11 - Ensaio de resistência à aderência de acordo com ABNT NBR 6118:2014.

Porém com a alternância do material das barras de aço para barras de PRFC, mudanças se fizeram necessários, uma vez que a força F na Figura 11 é aplicada com o uso de uma garra exercendo uma força de esmagamento na barra e as barras de PRFC não apresentam resistência significativa a este esforço. Portanto como a norma ASTM D7205/D7205M-21 recomenda o uso de âncoras para realização do ensaio de tração nas barras de PRFC, conforme demonstrado no desenho da Figura 12, deste modo optou-se por adicionar argamassa em molde cilíndrico na extremidade das barras, onde a força F da Figura 11 seria aplicada.

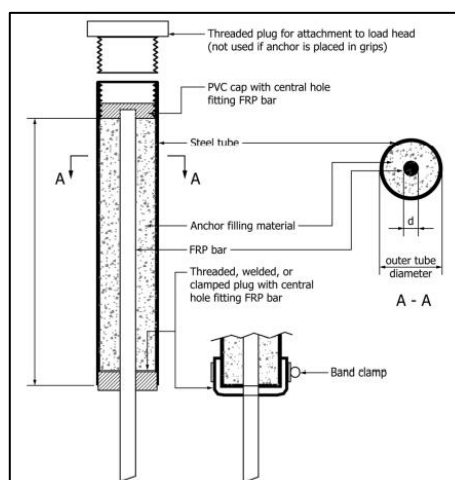


Figura 12 - Âncora para ensaio de tração em barras de PRFC.
Fonte: (ASTM D7205/D7205M-21).

Todos ensaios citados acima podem ser realizados em uma máquina universal de ensaios, que permite realizar diversos tipos de ensaios mecânicos. Estas máquinas podem ser

hidráulicas ou eletromecânicas. A máquina eletromecânica é baseada em um motor elétrico que permite maior controle sobre a variação de velocidade e deslocamento do cabeçote.

A mesa responsável pela distribuição da força aplicada, deve evitar ao máximo o efeito do atrito e da fricção na interface da peça com a mesa, portanto durante o ensaio a mesa deve ser lubrificada. Também é fundamental a perfeita centralização do eixo do corpo de prova e o eixo da mesa que aplica a força compressiva, além disso, para garantir que as tensões atuem somente axialmente, as mesas devem ser completamente paralelas.

Vale ressaltar que para os ensaios de resistência à compressão, elaborou-se, CDPs de concreto sem a presença de armaduras, para melhor interpretação dos resultados, estes CDPs estão nomeados na análise dos resultados como padrão. E com relação as armaduras em barras, utilizou-se na composição de cada uma delas 4 barras longitudinais e 3 barras transversais, tanto para o grupo 1 quanto para o grupo 2. Entretanto, para o grupo 3 as armaduras em barras foram compostas sem a presença de barras transversais, apenas com a presença de 4 barras longitudinais por armadura.

Não somente, a terminologia adotada para barras longitudinais e barras transversais equivale nesta pesquisa ao termo barras e estribos, respectivamente.

3.1. Grupo 1

Neste grupo projetou-se os CDPs destinados ao ensaio de resistência à tração na flexão em 4 pontos, sua geometria foi construída no formato prismático de acordo com a norma ABNT NBR 5738:2015, com seção geométrica de 15 x 15 x 55 cm, sendo largura versus altura versus comprimento. As armaduras utilizadas foram confeccionadas de forma híbrida, as barras foram compostas em materiais de aço e PRFC enquanto os estribos foram somente de aço, de modo a comparar a resistência mecânica entre as barras.

Com o material PRFC configurou-se dois diâmetros de barras distintos, um correspondente à barra unitária com diâmetro de 2 mm, e o outro com diâmetro formado com a junção de 5 barras de PRFC com 2 mm de diâmetro, formando um diâmetro equivalente à 6 mm. As diferentes configurações podem ser visualizadas na

Tabela 1.

Tabela 1 - Configurações das armaduras do concreto armado (grupo 1).

GRUPO I - VIGAS PRISMÁTICAS DE CONCRETO ARMADO ELABORADAS PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO EM 4 PONTOS. (15 x 15 x 55 cm)		
Configurações das Armaduras	Nomenclatura	Quantidade
Barra e estribo de aço.	G1-BA	2
Barra de PRFC e estribo de aço.	G1-BC1	2
Barra (agrupamento de 5) de PRFC e estribos de aço.	G1-BC5	2

3.1.1. Moldes Prismáticos de Madeira

O molde foi confeccionado no departamento de obras (DOI) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), utilizando apenas cerrote e martelo como ferramentas para manuseio. As dimensões internas adquiridas foram de 15 x 15 x 55 cm, como especificadas na Figura 13.

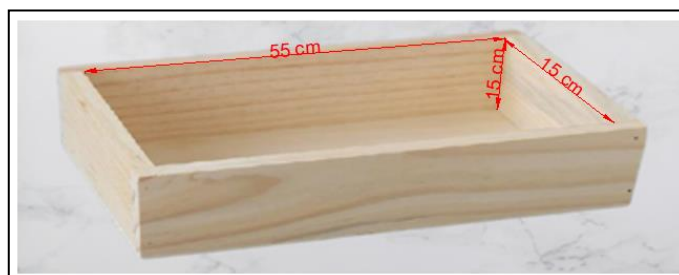


Figura 13 - Molde de madeira.

3.1.2. Configurações das armaduras

3.1.2.1. Barras e estribos de aço.

As armaduras em barras e estribos de aço foram confeccionadas pelos funcionários da empresa Aço Mais, localizada na cidade de Itajubá-MG. Primeiramente selecionou-se os vergalhões de aço CA-50 contendo diâmetro igual a 5mm, visto que a classificação CA-50 do aço é projetada para suportar uma carga de tração de 500 MPA. Após a seleção, utilizou-se para o corte dos vergalhões uma máquina hidráulica, modelo Md.g-M08c.

Concluído o corte, prosseguiu-se com a produção dos estribos, que consistiu na dobradura dos vergalhões na geometria de 10 x 10 cm, de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014 sendo largura versus altura. Este processo de dobradura consistiu em um sistema de pregos fixados na mesa de produção de estribos, e com a ajuda de uma ferramenta chamada chave que dobra estribo o operador realiza a dobra do vergalhão, como ilustrado na Figura 14.



Figura 14 - Produção de estribos.

Consequente, concluiu-se a confecção da armadura com a amarração das barras aos estribos, no qual utilizou-se um alicate universal como ferramenta de manuseio. O resultado final pode ser visualizado na Figura 15.



Figura 15 - Armadura G1-BA.

Em suma, utilizou-se nesta configuração de armadura os seguintes materiais:

- 8 barras de aço CA-50 com 5mm de diâmetro e 50 cm de comprimento;

- 6 estribos de aço CA-50 com 5mm de diâmetro, dobrados na dimensão de 10 x 10 cm, sendo largura versus altura;
- Arrames farpados.

3.1.2.2. Barras de PRFC e estribos de aço.

As barras de carbono foram confeccionadas no Laboratório Núcleo de Tecnologia em Compósito (NTC) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Não era sabido especificações detalhadas das barras antes de realizar os ensaios experimentais, pois se tratava de um material doado para o laboratório. O que se sabia era que as barras possuíam um diâmetro de aproximadamente 2 mm e comprimento de 1 m, e eram compostas por fibras de carbono agrupadas por uma fina camada de resina pelo processo de pultrusão.

Portanto confeccionou-se duas configurações de armaduras em barras de carbono, ambas utilizando estribos de aço CA-50 com diâmetro de 5 mm, dobrados na geometria de 10 x 10 cm, sendo largura versus altura, encomendados na empresa Aço Mais.

Na confecção da primeira configuração, G1-BC1, utilizou-se apenas 1 barra de PRFC, conforme ilustrado na Figura 16.



Figura 16 - Barra unitária de PRFC com revestimento de silicato de sódio.

Já na segunda configuração, G1-BC5, conforme elucidado na Figura 17, utilizou-se 5 barras de PRFC, agrupadas com resina epóxi. O número de 5 barras foi escolhido porque como cada barra de PRFC obtinha 2 mm de diâmetro, a união de 4 barras forma uma diagonal da seção transversal com o valor igual a 4 cm, inferior ao diâmetro da barra de aço correspondente à 5 mm, e com um formato semelhante à um quadrado. Já a união de 5 barras forma uma diagonal de seção transversal com o valor igual a 6 mm e com formato mais semelhante à um círculo.



Figura 17 - Agrupamento de 5 barras de PRFC com revestimento de silicato de sódio.

A quantidade da resina ou fase contínua da matriz necessária para unir as barras foi composta por 100 g de resina termorrígida epóxi AR 21 (Parte A), combinada com 33g de endurecedor A21 FAST (Parte B), de acordo com as instruções de uso recomendada pela empresa Barracuda Produtos e Materiais Compostos Ltda, apresentada na Figura 18.



Figura 18 - Sistema de resina utilizado.

Para ponderar a fase contínua utilizou-se uma balança de precisão da marca Shimadzu modelo BL3200H. Após a operação de pesagem, misturou-se ambas as partes da resina até atingir uma mistura homogênea. E com a ajuda de um pincel simples aplicou-se a resina nas barras de PRFC, com objetivo de obter o agrupamento das 5 barras. Adicionalmente revestiu-se a superfície da barra com silicato de sódio, com o intuito de melhorar a aderência mecânica entre o concreto e a armadura. Portanto, para que houvesse o mesmo tipo de revestimento com silicato de sódio na barra unitária de PRFC, se fez necessário a aplicação da resina na superfície das barras, efetivando a união entre a barra e o silicato de sódio. Na Figura 16 e na Figura 17 relatadas acima, pode-se visualizar o revestimento superficial de silicato de sódio aplicado sobre as barras.

Terminado este procedimento, fez-se necessário aguardar o tempo de cura de 24 horas à temperatura ambiente. Após concluído o tempo de cura, seguiu-se com o corte das barras, utilizando uma Serra clipper tr 201-E.

Por fim iniciou-se o processo de amarração das barras nos estribos com auxílio de um alicate universal. Em síntese, os seguintes materiais se fizeram necessários para a elaboração destas armaduras:

- 48 barras de carbono com 2 mm de diâmetro e 50 cm de comprimento. Sendo 8 barras destinadas a configuração G1-BC1 e 40 barras destinadas a configuração G1-BC5, agrupadas de 5 em 5, totalizando 8 barras com aproximadamente 5 mm de diâmetro;
- 12 estribos de aço CA-50, com 5 mm de diâmetro, dobrados na dimensão 10 x 10 cm, sendo comprimento versus largura em centímetros. No qual 6 estribos foram destinados a configuração G1-BC1 e os outros 6 estribos destinados para a configuração G1-BC5;
- Arrames farpados.

O resultado final das armaduras G1-BC1 e G1-BC5, podem ser visualizados na Figura 19 e Figura 20, respectivamente.



Figura 19 - Armadura G1-BC1.



Figura 20 - Armadura G1-BC5.

3.1.3. Concreto Usinado

O concreto utilizado neste ensaio foi o concreto usinado confeccionado na empresa Minas Tubo, localizado na cidade de Itajubá-MG. O processo de dosagem e mistura do concreto usinado é realizado pela empresa de acordo com a ABNT NBR 12655:2015 e com auxílio de um conjunto de máquinas que atua de acordo com o comando dado pelo operador. A composição dos materiais utilizados neste concreto usinado pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2 - Traço do concreto usinado (grupo 1).

Relatório: Máquina 1-Minas Tubo		
Data:	06/09/2019	
Hora:	11:31	
Área total do caminhão:	5 m ³	
	Programado (m³)	Real (m³)
Brita 1:	3.00	3.03
Areia:	3.25	3.26
Pó Pedra	1.05	1.04
Brita 0:	1.5	1.51
Cimento	1.4	1.396
Água	0.85	0.85

Após a operação do maquinário, conjuntamente com a operação mecânica e química do concreto, os caminhões foram abastecidos com o concreto usinado fresco, neste momento encheu-se 2 carrinhos de mão com concreto usinado e iniciou-se o enchimento das formas. De acordo a ABNT NBR 5738:2015 para garantir o correto adensamento manual do concreto na forma, as camadas depositadas nesta geometria de forma não devem exceder a espessura de 7,5 cm, e o número de golpes no concreto com uma haste de aço deve ser 75 por camada.

Portanto, adicionou-se primeiramente uma camada de 2,5 cm de concreto antes de posicionar a armadura, conforme ilustrado na Figura 21. O valor da camada de 2,5 cm corresponde ao cobrimento nominal mínimo exigido pela ABNT NBR-6118:2014. Consequente realizou o número de golpes, posteriormente adicionou uma camada de 7,5 cm e outra de 5 cm, ambas com abatimento de 75 golpes.



Figura 21 - Preenchimento dos moldes, correspondente a configuração G1-BA, G1-BC1 e G1-BC5, respectivamente.

Após a inserção das armaduras, as formas foram totalmente preenchidas por concreto e conseguinte efetivou-se o adensamento manual como descrito anteriormente.

Concluído o preenchimento das formas, alocou-se os CDPs na câmara úmida do Laboratório do Instituto de Recursos Naturais (IRN) da UNIFEI e aguardou-se o tempo de 28 dias para que fosse realizado os ensaios mecânicos, esse período de tempo é correspondente a cura total do concreto.

3.1.4. Ensaio de Resistência à tração na flexão em 4 Pontos

Este ensaio foi realizado de acordo com a ABNT NBR 12142:2010. Antes de realizar os ensaios mecânicos, foi necessário fazer o capeamento das superfícies dos CDPs, que consistiu em aplicar argamassa de acabamento liso e de elevada resistência nas superfícies dos mesmos, tornando-os retilíneos, objetivando assim reduzir as variações de ensaio devido à falta de paralelismo entre os CDPs e os roletes da máquina de ensaio. Portanto utilizou-se um aplicativo para celular chamado *iHandy Level*, no qual possibilitou verificar a geometria retilínea das superfícies.

A Figura 22 demonstra a aplicação da argamassa nos CDPs, onde jornais umedecidos foram colocados sobre uma bancada, conseguinte depositou-se sobre eles uma fina camada de

argamassa e posicionou os CDPs sobre elas. Seguiu-se com a medição do paralelismo pelo aplicativo, movimentando verticalmente as amostras até obter uma superfície plana.



Figura 22 - Capeamento dos CDPs.

Concluído o procedimento de capeamento das amostras. Seguiu-se com o ensaio de resistência à tração na flexão em quatro pontos. Este ensaio foi realizado na máquina universal de ensaios, referente ao modelo WAW1000C, pertencente ao Laboratório do IRN da UNIFEI. Os roletes utilizados na aplicação da carga possuíam diâmetro de 2,5 cm e foram posicionados de acordo com a solicitação da norma ABNT NBR 12142. A velocidade do ensaio também foi retirada desta norma, sendo correspondente a 0,5 mpa/s até atingir carga máxima de rompimento. A Figura 23 demonstra um dos CDPs posicionado na máquina de ensaio.



Figura 23 - Ensaio de resistência à tração na flexão em 4 pontos.

Portanto obteve-se um comportamento de resistência específico para cada CDP. Os dados numéricos relatados pela máquina de ensaio continham informações de tensões e deslocamento. As medidas de deformação não foram coletadas pois a máquina não possuía extensômetro. E posteriormente estes dados obtidos foram trabalhados e apresentados em forma de tabelas e gráficos na sessão de análise dos resultados deste material descritivo.

3.2. Grupo 2

Após a análise dos resultados do grupo 1, projetou-se um novo grupo de CDPs com formato do elemento estrutural em forma de pilar, de seção geométrica cilíndrica com dimensões 10 x 15 cm, sendo diâmetro versus altura em centímetros. A altura correta de acordo com a ABNT NBR 5738:2015 era de 20 cm, mas devido ao erro de corte da tela de tecido de carbono em 15 cm, optamos por confeccionar todas as amostras com a altura de 15 cm, pois como se trata de uma análise comparativa, esse parâmetro não influencia nos resultados.

As configurações de armadura foram estudadas em formato de barras e de telas. E os estribos utilizados nas barras deixaram de ser de material aço e passaram a ser de material PRFC de modo a analisar qual melhor tipo de estribo se adapta as barras de PRFC.

As configurações de armadura também foram estudadas em formato de telas na Tabela 3 pode-se visualizar as diferentes configurações de armaduras utilizadas neste grupo.

Tabela 3 - Configurações das armaduras do concreto armado (grupo 2).

GRUPO 2 - PILARES CILÍNDRICOS DE CONCRETO ARMADO ELABORADOS PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (10 x 15 cm)		
Configurações das Armaduras	Nomenclatura	Quantidade
Barras e estribos de aço	G2-BA	3
Telas de aço externas	G2-TAE	3
Telas de aço internas	G2-TAI	3
Barras e estribos de PRFC	G2-BC5	3
Telas externas de tecido de PRFC	G2-TCE	3
Telas internas de tecido de PRFC	G2-TCI	3

3.2.1. Moldes Cilíndricos de Metálicos

Utilizou-se moldes cilíndricos pertencentes ao Laboratório IRN da UNIFEI, com dimensões internas de 10 x 20 cm, conforme ilustrado na Figura 24. Antes da utilização dos moldes, os mesmos foram untados com óleo mineral, para que o concreto pudesse ser desmoldado com facilidade.

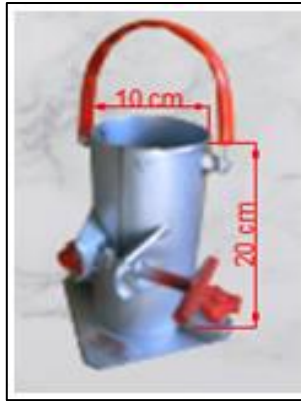


Figura 24 - Molde cilíndrico metálico.

3.2.2. Configurações das Armaduras

3.2.2.1. Barras e estribos de Aço

As armaduras compostas por barras de aço foram fabricadas na empresa Aço Mais., localizada na cidade de Itajubá-MG. Selecionou-se inicialmente barras de aço CA-50 com diâmetro de 5mm. Essa classificação de barra é projetada para suportar uma carga de tração de até 500 MPA. Após a seleção, utilizou-se a Máquina Hidráulica Md.g-M08c para fazer o corte das barras no comprimento necessário. Cortou-se 12 barras com 15 cm de comprimento cada, quantidade necessária para 3 CDPs.

Os estribos de aço CA-50, com diâmetro de 5mm, foram confeccionados no mesmo local das barras e dobrados nas dimensões de 3,5 x 3,5 cm, sendo largura versus altura em centímetros. Estas dimensões foram calculadas objetivando o comprimento de 5 cm na diagonal da dobradura do estribo, respeitando assim o cobrimento nominal de 2,5 cm, de acordo com a ABNT NBR 6118:2014. A Figura 25 demonstra alguns dos estribos prontos advindos das barras de aço.



Figura 25 - Estribos dobrados.

Concluído os passos anteriores, prosseguiu-se com a armação das barras com auxílio de um alicate universal. Para esse processo utilizou-se:

- 12 barras de aço CA-50 com 5 mm de diâmetro e 15 cm de comprimento;
- 9 estribos de aço CA-50 com 5 mm, dobrados nas dimensões 3,5 x 3,5 cm;
- Arrames farpados.

A Figura 26 ilustra o resultado final desse procedimento.



Figura 26 - Configuração G2-BA.

3.2.2.2. Telas de Aço

As telas ou malhas de aço foram fabricadas pela empresa Camtubi, localizada na cidade de São Paulo-SP. As telas eram constituídas por um tecido metálico de aço inox com a largura padrão de 1 m. Sua especificação de acordo com a classificação da empresa consta na Figura 27.

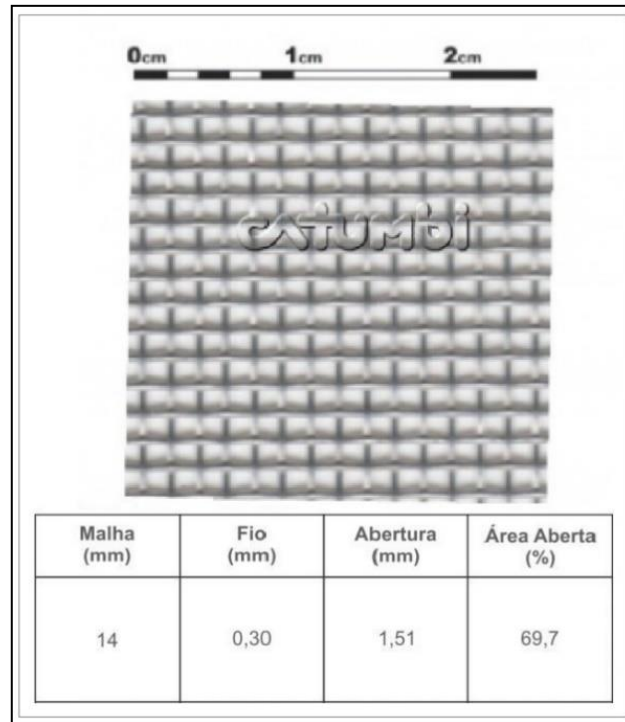


Figura 27 - Classificação da tela de aço.
Fonte: Empresa Cantubi.

Com as telas em mãos iniciou-se os cortes. Foram feitos 6 cortes no total, conforme ilustrado na Figura 28. O total de 3 cortes foram destinados para a tela externa e 3 cortes destinados para a tela interna, no qual utilizou-se como ferramenta de manuseio uma tesoura simples. As geometrias dos cortes foram calculadas totalizando o comprimento relativo de uma volta em torno do diâmetro em questão e mais 5 cm de comprimento de ancoragem para ambas as telas. Com relação à altura da tela, sua dimensão foi equivalente à altura dos CDPs, equivalente à 15 cm.



Figura 28 - Corte das telas em aço.

Portanto os cortes para as telas externas obtinham dimensões de 37 x 15 cm, sendo comprimento versus altura, posicionadas fora do elemento de concreto, acompanhando o

diâmetro de 10 cm do molde cilíndrico, em uma espécie de acinturamento. Já os cortes realizados para as telas internas foram realizados nas dimensões de 21 x 15 cm, sendo largura versus altura, posicionadas dentro do elemento de concreto formando uma geometria cilíndrica com diâmetro de 5 cm, diâmetro calculado de modo a respeitar o cobrimento nominal exigido pela ABNT NBR 6118:2014.

Após terminado o procedimento de corte houve a costura das telas de aço com arame, dando forma cilíndrica ao tecido metálico. A Figura 29 demonstra o resultado final de ambas as telas, 5 e 10 cm de diâmetro, respectivamente.

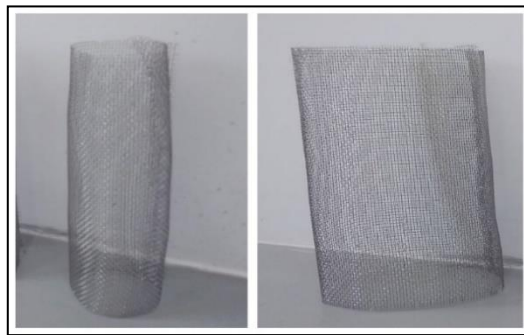


Figura 29 - Configuração G2-TAI e G2-TAE, respectivamente.

3.2.2.3. Armadura em barras e estribos de PRFC

As armaduras compostas por PRFC foram confeccionadas no Laboratório NTC da UNIFEI. As barras de PRFC selecionadas para compor parte da armadura deste grupo foram semelhantes a configuração G1-BC5 do grupo 1, porém sem o cobrimento superficial de silicato de sódio, para que pudéssemos analisar o comportamento de aderência do material devido a alternância do tipo de superfície das barras.

Outra diferença do grupo 1 foi que o estribo deste grupo foi confeccionado com linha de PRFC banhada em resina pelo processo filamental, e não mais com aço, devido ao suposto parecer de que o estribo confeccionado com aço possa ter danificado fisicamente as barras de PRFC e assim alterado sua resistência final. Portanto para confeccionar este estribo de linha de PRFC foi necessário construir um outro estribo com a função não estrutural, apenas para fixar as barras na máquina de enrolamento filamental, para que então fosse depositado as camadas de linha de PRFC nas posições adequadas.

Os estribos não estruturais foram constituídos de poliácido láctico, suas dimensões foram calculadas e desenhadas no *software solidworks*, de modo a atender os espaçamentos

mínimos exigidos pela ABNT NBR 6118:2014, juntamente com as características geométricas da máquina de enrolamento filamentar. Concluído o desenho técnico dos estribos de função não estrutural, iniciou-se as impressões dos mesmos na impressora 3D da marca Tevo Tornado Gold, ilustrada na Figura 30.

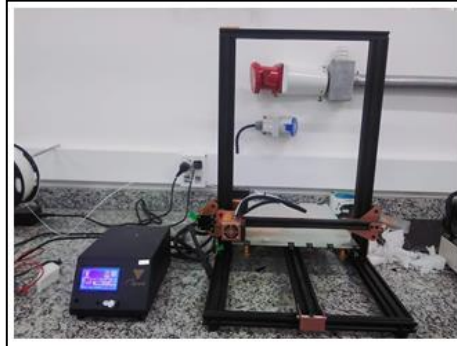


Figura 30 - Impressora 3D Tevo Tornado Gold.

O estribo de função não estrutural produzido pela impressora 3D pode ser visualizado na Figura 31. Já o desenho detalhado do mesmo pode ser visto no ANEXO A.

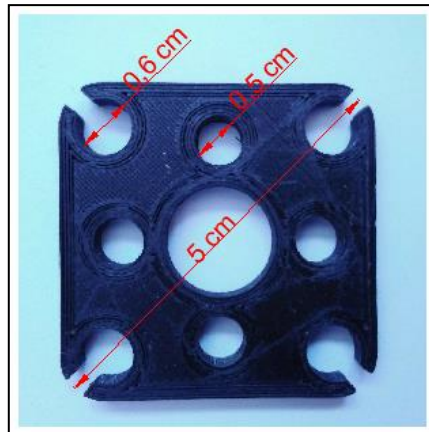


Figura 31 - Estribo de função não estrutural.

Estes estribos não estruturais obtiveram furos externos com 0,6 cm de diâmetro, projetados para encaixar as barras de PRFC, e furos internos com 0,5 cm de diâmetro, projetados para encaixar as barras de aço inox roscadas, necessárias para o processo de fixação dos CDPs na máquina de enrolamento filamentar. As barras de aço inox roscadas foram adquiridas na loja Gil Parafusos em Itajubá-MG.

Um outro elemento necessário para completar a fixação das barras de aço inox roscadas na máquina de enrolamento filamentar, tratou-se de 2 conectores compostos por um material de sucata (aço 1045, 1040 ou 1020) usinados no torno mecânico da marca Nardine, modelo ND-325, e perfurado pela furadeira e fresadora da marca Mar-Cirius Continental,

ambas máquinas pertencente ao Laboratório do Instituto de Engenharia Mecânica (IEM) da UNIFEI. A Figura 32 ilustra o processo de fabricação destes conectores, e o desenho detalhado do mesmo pode ser visto no ANEXO B.

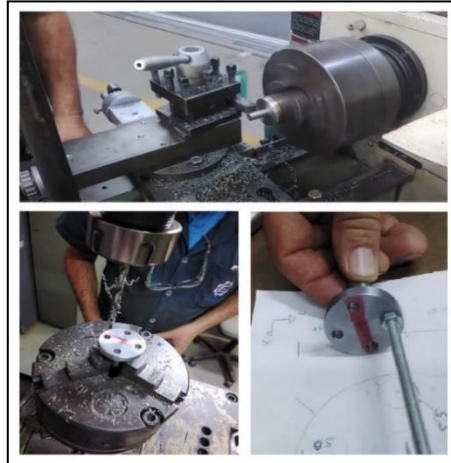


Figura 32 - Conectores usinados no torno mecânico.

Para a confecção dos estribos com função estrutural utilizou-se fibras de carbono AS4, fornecidas pela Hexcel Composites, e aplicadas nas armaduras por meio do processo automatizado da máquina de enrolamento filamentar. Primeiramente, encaixou-se os estribos não estruturais no conjunto de barras e rosqueou-se as barras nos conectores, na sequência fixou-se os conectores nos mandris localizados nas extremidades da máquina. Após a fixação iniciou-se o procedimento de disposição das fibras de carbono AS4 ao lado dos estribos não estruturais. Cada estribo estrutural obteve um total de 4 camadas de linhas de PRFC, banhada no sistema de resina e endurecedor na mesma composição descrito no grupo 1. Finalizado a confecção das armaduras, aguardou-se o tempo de cura de 24 horas. A Figura 33 ilustra o modo de produção das armaduras na máquina de enrolamento filamentar.

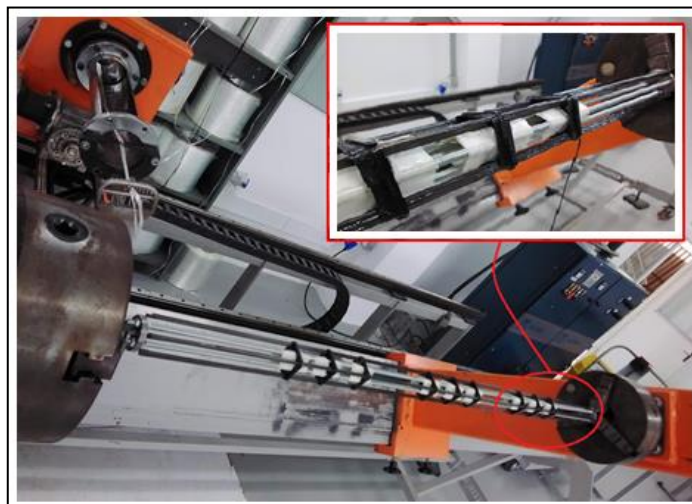


Figura 33 - Máquina de enrolamento filamentar.

Em suma o processo de amarração utilizou-se os seguintes materiais:

- 4 barras de PRFC com 100 cm de comprimento, correspondente à configuração G1-BC5;
- 9 estribos de poliácido láctico, com 5mm de espessura;
- 4 barras roscadas de aço inox;
- 2 conectores de aço 1045, 1040 ou 1020;
- Linhas de fibra de Carbono AS4;
- Sistema de resina AR 21 + endurecedor A 21 FAST.

O processo foi finalizado com o corte das barras, no qual utilizou-se a Serra clipper tr 201-E e obteve o comprimento de 15 cm para cada conjunto de armadura. A Figura 34 demonstra o resultado de uma armadura de barras de PRFC pronta.



Figura 34 - Configuração G2-BC5.

3.2.2.4. Armaduras em telas de tecido de PRFC

Os CDPs em telas de tecido de PRFC foram confeccionados no Laboratório NTC da UNIFEI. Primeiramente selecionou-se o tecido de fibra e carbono traçado em camadas horizontais e verticais, classificados como tecido bidimensional, e deu-se prosseguimento com o corte, utilizando uma tesoura simples e luvas para proteger a fibra contra a umidade das mãos, conforme ilustrado na Figura 35.



Figura 35 - Tecido de PRFC.

Foram feitos 2 cortes, um na dimensão de 37 x 50 x 50 cm, sendo largura versus altura versus comprimento, para tela de PRFC interna, posicionada dentro do elemento de concreto, com diâmetro de 5 cm. E outro corte de 68 x 50 x 50 cm para a tela externa, posicionada fora do elemento de concreto, com diâmetro de 10 cm. A largura foi calculada de modo a totalizar um comprimento de ancoragem equivalente a 5 cm para ambas as telas mais o comprimento de duas camadas de laminado de PRFC ao redor de cada uma das telas. Já a altura do corte de 50 cm foi determinada com a objetivo de extrair 3 CDPs com 15 cm de altura cada, havendo uma sobra de 5 cm. Com relação ao tecido de PRFC correspondente ao diâmetro de 5 cm, respeitou-se o cobrimento nominal exigido pela ABNT NBR-6118: 2014 para armaduras internas.

Terminado o corte, iniciou-se o processo de laminação manual dos tecidos com auxílio de tubos de PVC como moldes, utilizando a resina termorrígida epoxi AR 21 com endurecedor A21 FAST, na mesma proporção indicada no grupo 1. Portanto, aplicou-se com um pincel a resina no tecido e posteriormente encapou-se a superfície com plástico filme e aguardou-se o tempo de cura de 24 horas para desmontagem. Antes da confecção um corte transversal foi feito no tubo de PVC para facilitar a desmoldagem, então terminado o tempo de cura retirou-se o tubo de PVC, restando somente o material laminado de PRFC. A Figura 36 ilustra a realização do processo de laminação manual realizado para o tecido de fibra de carbono conjuntamente com a resina, formando o laminado de PRFC.



Figura 36 - Confecção dos tecidos em PRFC.

A última etapa foi concluída com o corte das telas utilizando a Serra Clipper Tr 201-E. A altura obtida para cada CDP foi de 15 cm. A Figura 37 demonstra a armadura G2-TAI com 5 cm de diâmetro e a armadura G2-TAE, com 10 cm de diâmetro, respectivamente.



Figura 37 - Configuração G2-TCI e G2-TCE, respectivamente.

3.2.3. Concreto Usinado

O concreto utilizado nesta classe de ensaio se assemelha ao concreto usinado utilizado no grupo 1, porém houve mudança de lote, acarretando uma pequena diferença na composição real dos constituintes utilizados. Portanto a composição dos materiais constituintes do concreto usinado utilizado neste grupo pode ser verificada na tabela abaixo. Tais mudanças podem ser observadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Traço do concreto usinado (grupo 2).

Relatório: Máquina 1-Minas Tubo		
Data:	03/04/2020	
Hora:	16:50	
Área total do caminhão:	5 m ³	
	Programado (m³)	Real (m³)
Brita 1:	3.00	3.01
Areia:	3.25	3.27
Pó Pedra	1.05	1.04
Brita 0:	1.5	1.52
Cimento	1.4	1.416
Água	0.85	0.85

Após a preparação do concreto usinado pelo maquinário, o mesmo foi depositado nos moldes juntamente com as armaduras, de acordo a ABNT NBR 5738:2015 para garantir o correto adensamento manual do concreto na forma, as camadas depositadas nesta geometria de forma não devem exceder a espessura de 5cm e o número de golpes no concreto com uma haste de aço deve ser 12 para cada camada.

Portanto, adicionou-se primeiramente uma camada de 2,5 cm de concreto antes de posicionar a armadura, esse valor corresponde ao cobrimento nominal mínimo exigido pela ABNT NBR-6118:2014. Concluído o número de golpes nesta camada inicial de concreto, posicionou-se a armadura e mais 3 camadas de 2,5 cm, 5 cm e 5cm foram depositadas nos moldes e adensadas com 12 golpes cada. Na Figura 38 observa-se que os moldes cilíndricos metálicos disponíveis no laboratório não eram suficientes para a quantidade de CDPs fabricados, portanto utilizou-se tubos de PVC com as mesmas dimensões para este fim, todavia a configuração G2-TAE não necessitou de molde, pois a própria armadura também desempenhou a função de modelamento.



Figura 38 - Preenchimento dos moldes (grupo 2).

Concluído o preenchimento das formas, aguardou 24 horas para desmoldar os CDPs e posteriormente alocou-se os mesmos em câmara úmida pertencente ao Laboratório IRN da UNIFEI e aguardou-se o tempo de cura relativo a 28 dias para que o concreto atingisse cura total e, portanto, fosse realizado os ensaios mecânicos.

3.2.4. Ensaio de Resistência à Compressão Axial

O ensaio de compressão axial foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 5739:2018. E antes de realizar o ensaio mecânico dos CDPs foi necessário tornar as superfícies retilíneas, reduzindo as variações de ensaio devido à falta de paralelismo. Portanto ao invés do capeamento das superfícies utilizado no grupo 1, optou-se pelo corte das superfícies, pois os moldes obtinham a altura maior que a altura definida para os CDPs, devido ao erro de corte da tela de PRFC. Todavia ambas as técnicas, quanto o capeamento, tanto o corte, apresentam a mesma eficácia, deixando o CDPs com superfícies retilíneas. Para o corte utilizou a Serra Industrial para Granito e Mármore, modelo SS, pertencente a Marmoraria São Gabriel localizada na cidade de Itajubá-MG. Este procedimento consistiu-se na retirada do material na extremidade superior do concreto até que a altura de 15 cm fosse atingida. A Figura 39 relata o procedimento descrito.



Figura 39 - Aplainamento das superfícies dos CDPs.

Concluído o procedimento descrito acima seguiu-se com o ensaio de compressão. Este ensaio foi realizado na máquina universal de ensaios com servo motor hidráulico referente ao modelo WAW1000C, pertencente ao Laboratório do IRN da UNIFEI. A máquina aplicou nos CDPs uma carga uniformemente variada, com velocidade constante de 0,5 mpa/s, até atingir a carga máxima de rompimento. A Figura 40 demonstra um dos CDPs posicionado na máquina de ensaio.

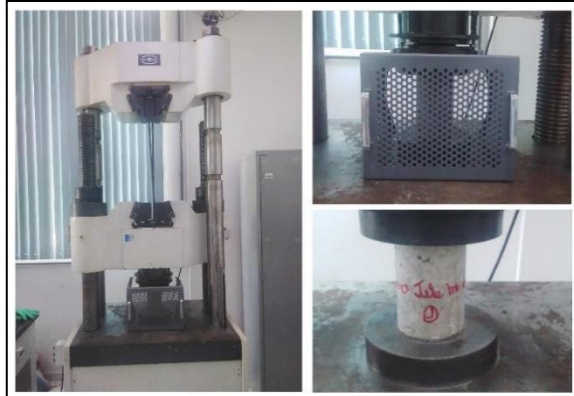


Figura 40 - Ensaio de resistência à compressão axial.

Os dados do comportamento de resistência de cada CDP rompido foram emitidos pela máquina de ensaio em forma de planilhas, que posteriormente foram trabalhadas e apresentadas em forma de tabelas e gráficos na análise dos resultados deste material descritivo.

3.3. Grupo 3

Desenvolveu-se um terceiro grupo de ensaio, onde os CDPs foram construídos em formato do elemento pilar, com seção geométrica cilíndrica de dimensão 10 x 20 cm, sendo diâmetro versus altura em centímetros, de acordo com a ABNT NBR 5738:2015.

Neste grupo, o concreto utilizado deixou de ser o concreto convencional (CCV) obtido pela usina Minas Tubo e passou a ser o concreto auto adensável (CAA) confeccionado em laboratório, pois segundo Zhao et al (2021) ao verificar a resistência de compressão do concreto, concluiu que ao usar um concreto com resistência mais elevada havia um ganho proporcional de resistência à aderência entre as barras e o concreto.

E de modo a solucionar qualquer dúvida que possa ter ficado com relação aos estribos, as armaduras foram fabricadas sem estribos, apenas com barras longitudinais contendo revestimentos de superfície variados para que a aderência pudesse ser verificada. Na Tabela 5, as diferentes configurações de armaduras podem ser visualizadas.

Tabela 5 - Configurações das armaduras do concreto armado (grupo 3).

GRUPO 3 - PILARES CILÍNDRICOS DE CAA ARMADO ELABORADOS PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL (10 x 20 cm)		
Configurações das Armaduras	Nomenclatura	Quantidade
Barra de Aço CA-50	G3-BA	5
Barras de PRFC sem revestimento	G3-BC5	5
Barras de PRFC com revestimento de areia	G3-BC5-RA	5
Barras de PRFC com revestimento em formato espiral com linha de PRFC	G3-BC5-RR	5

3.3.1. Moldes Cilíndricos Metálicos

Utilizou-se neste grupo de ensaios moldes cilíndricos pertencentes ao Laboratório IRN da UNIFEI, com dimensões internas de 10 x 20 cm, mesmo utilizado no grupo 1. Antes de sua utilização os moldes foram untados com óleo mineral, para que os CDPs pudessem ser desmoldados com facilidade.

3.3.2. Configurações das Armaduras

3.3.2.1. Armadura em Barras de aço

As armaduras compostas neste grupo também foram fabricadas na empresa Aço Mais. Entretanto as armaduras desta configuração foram formadas somente por barras, sem a presença de estribos. Primeiramente selecionou-se vergalhões de aço CA-50 com diâmetro de 5mm. Após a seleção, utilizou-se a Máquina Hidráulica Md.g-M08c para fazer o corte das 20 barras com comprimento de 20 cm, totalizando 4 barras para cada CDP.

A imagem da superfície da barra de aço CA-50, correspondente a configuração G3-BA, pode ser visualizada na Figura 41, o registro foi **Erro! Fonte de referência não encontrada.** realizado pelo microscópico estereoscópio, marca Olympus SZ61.

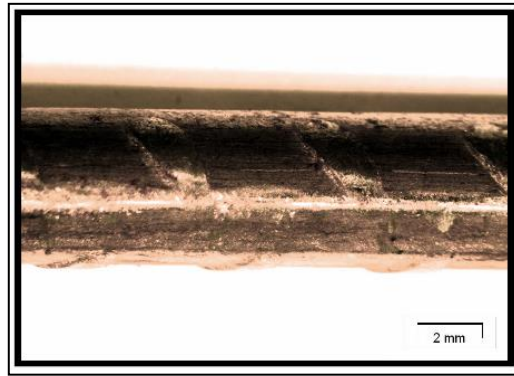


Figura 41 - Microscópio estereoscópico da configuração G3-BA.

3.3.2.2. Armadura em Barras de PRFC

As armaduras compostas por barras de PRFC foram confeccionadas no Laboratório NTC da UNIFEI. De forma semelhante ao procedimento de confecção das barras de PRFC descrito no grupo 2 para a configuração G2-BC5, portanto, confeccionou-se 60 barras de PRFC com o comprimento equivalente a 20 cm. Porém, adicionalmente ao modo de fabricação descrito no grupo 2, as barras neste grupo foram revestidas por diferentes camadas de superfície, para que a influência da aderência entre o concreto e armadura fosse estudado.

Portanto escolheu-se dois tipos de cobrimento de superfície além da configuração da barra lisa, o primeiro foi composto por areia e o segundo foi composto por uma camada de linha de PRFC depositada na barra em formato de espiral, assemelhando-se as ranhuras existentes nas barras de aço. Portanto após a confecção das barras, aguardou-se o tempo de cura de 2 horas para adicionar os revestimentos nas barras, e posteriormente aguardou-se mais 22 horas para que o processo de cura fosse efetivado.

O revestimento de areia foi aplicado com o rolamento das barras dentro de um recipiente contendo areia. E o revestimento de linha de PRFC em espiral prosseguiu-se com a deposição da linha de carbono umedecida na resina epóxi rotacionando a superfície das barras. A Figura 42 relata as barras de PRFC sem revestimento, revestidas com areia e revestidas com linha de PRFC em espiral, respectivamente. As imagens foram retiradas do microscópico estereoscópico, marca Olympus SZ61 para que as variações nos tipos de revestimentos utilizados em cada configuração de armadura pudessem ser demonstradas com maior nitidez.

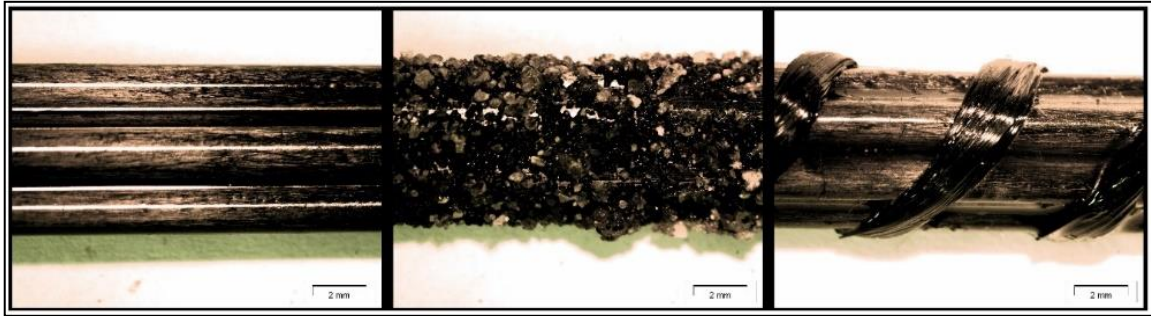


Figura 42 - Microscópico estereoscópio das configurações G2-BC5, G2-BC5-RA, G2-BC5-RR, respectivamente.

3.3.3. Concreto Auto Adensável (CAA)

Neste grupo utilizou-se o CAA, e os materiais constituintes para sua formação foram listados na Figura 43. E na Tabela 6, pode-se observar o consumo necessário para cada um dos materiais listados, e este consumo foi calculado de acordo com o traço ótimo encontrado por Roque-Silva, 2020 em sua dissertação de mestrado.



Figura 43 - Materiais Constituintes do CAA.

Tabela 6 - Traço do concreto auto adensável (grupo 3).

TRAÇO UTILIZADO NA COMPOSIÇÃO DO CAA					
Cimento	Sílica Ativa	Areia Média	Brita 0	a/c	SAP
1,0	0,1	1,6	1,4	0,30	1,5%

CONSUMO DE MATERIAIS				
Material	Massa específica aproximada	Unidade	Massa	Unidade
Cimento	3,14	g/cm ³	22005,4	g
Sílica Ativa	2,2	g/cm ³	2200,5	g
Areia média	2,63	g/cm ³	35208,6	g
Brita 0	2,75	g/cm ³	30807,5	g
Água	1,00	g/cm ³	6601,6	g
SAP	1,08	g/cm ³	330,1	g

Para o sistema de pesagem utilizou-se uma balança de precisão da marca Shimadzu modelo UX6200H. Terminado a quantificação dos materiais necessários para elaborar o CAA, iniciou-se o processo de mistura dos materiais, no qual utilizou-se uma betoneira da marca CSM 145 litros, modelo CS 145 com rotação em eixo inclinado, como demonstrada na Figura 44.



Figura 44 - Betoneira CSM.

Adicionou-se primeiramente na betoneira os agregados finos, cimento, sílica ativa, areia média, SPA e metade da quantidade de água, para melhor homogeneização de todo conjunto. E posteriormente adicionou-se brita e a outra metade da quantidade de água, obtendo assim a combinação total dos materiais.

Após a preparação do CAA, fez-se necessário efetivar os ensaios listados abaixo de modo a garantir sua efetiva qualidade no estado fresco.

- Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual, conforme ilustrado na Figura 45, utilizando o método do cone de Abrams, utilizando a norma ABNT NBR 15823-2:2017, capaz de determinar a capacidade de vazão, fluidez, resistência à segregação e à exsudação.



Figura 45 - Método do cone de Abrams.

- Determinação da viscosidade pelo método do funil V, conforme ilustrado na Figura 46, a norma utilizada refere-se a ABNT NBR 15823-5:2017.



Figura 46 - Método do funil V.

- Determinação da habilidade passante, medindo a coesão e fluidez, conforme ilustrado na Figura 47, portanto fez-se necessário o uso do método da caixa L (ABNT NBR 15823-4:2017).



Figura 47 - Método da caixa L.

Após realizar os ensaios acima ter comprovado a eficácia do CAA, o mesmo foi depositado nos moldes de acordo com a ABNT NBR 5738:2015 para garantir o correto adensamento manual do concreto na forma, as camadas depositadas nesta geometria de forma não devem exceder a espessura de 5cm e o número de golpes no concreto com uma haste de aço deve ser 12 para cada camada.

Portanto, adicionou-se primeiramente uma camada de 5 cm, concluído o número de golpes nesta camada inicial de concreto, mais 3 camadas de 5cm foram depositadas e adensadas com o mesmo número de golpes. Aguardou-se um tempo de cura de aproximadamente 3 horas para inserir as armaduras nos moldes, pois havendo passado 3 horas observou-se rigidez no fluido de CAA suficiente para que pudesse sustentar as armaduras nas posições predeterminadas.

Ao inserir as armaduras no CAA, manteve-se, portanto, o mesmo espaçamento entre barras utilizado no grupo 2, exigido pela ABNT NBR 6118:2014, no qual a inserção das 4 barras formou um quadrado de lado igual a 3,5 cm. A Figura 48 visou demonstrar os CDPs moldados, juntamente com o distanciamento entre as barras.



Figura 48 - Preenchimento dos moldes (grupo 3).

Concluído o preenchimento das formas, aguardou 24 horas para desmoldar os CDPs e posteriormente alocou-se os mesmos em câmara úmida pertencente ao Laboratório IRN da UNIFEI e aguardou-se o tempo de cura relativo a 28 dias para que o concreto atingisse cura total e, portanto, fosse realizado os ensaios mecânicos.

3.3.4. Ensaio de Resistência à Compressão Axial

Antes de realizar o ensaio mecânico dos CDPs de acordo com a norma ABNT NBR 5739:2018, fez-se necessário tornar as superfícies dos mesmos retilíneas, para que não ocorresse variações de ensaio devido à falta de paralelismo. Portanto, realizou-se o capeamento das superfícies, também utilizado no grupo 1. O capeamento de superfície consistiu em aplicar argamassa de acabamento liso e de elevada resistência nas superfícies dos mesmos, tornando-os retilíneos, objetivando assim reduzir as variações de ensaio devido à falta de paralelismo entre os CDPs e os roletes da máquina de ensaio.

A Figura 49 demonstra a aplicação da argamassa nos CDPs, onde jornais umedecidos foram colocados sobre uma bancada, conseguindo depositou-se sobre eles uma fina camada de argamassa e posicionou os CDPs sobre elas. Seguiu-se com a medição do paralelismo pelo aplicativo *iHandy Level*, movimentando verticalmente as amostras até obter uma superfície plana.



Figura 49 - Capeamento de superfícies dos CDPs.

Concluído o procedimento descrito acima seguiu-se com o ensaio de compressão, realizado na prensa para teste de compressão PCM 100C, de conceito hidráulico com acionamento manual, pertencente ao Laboratório do IRN da UNIFEI. A máquina aplicou nos CDPs uma carga uniformemente variada com velocidade constante de 0,5 mpa/s, até atingir a carga máxima de rompimento. A Figura 50 demonstra um CDP posicionado na máquina de ensaio.



Figura 50 - Prensa para ensaio de resistência à compressão axial.

O painel de controle da prensa emitiu somente os resultados de resistência máxima à compressão axial de cada um dos CDPs, que posteriormente foram trabalhados e apresentados em forma de tabelas na análise dos resultados deste material descritivo.

3.4. Grupo 4

Desenvolveu-se um quarto grupo de ensaio, onde se tornou possível o estudo direcionado para resultados de aderência. Os CDPs foram construídos com a junção da norma ABNT NBR 6118:2014 e a norma ASTM D7205/D7205M-21.

Os CDPs deste grupo de ensaios foram fabricados conjuntamente com os CDPs do grupo 3, portanto a confecção do CAA e das armaduras utilizadas foram confeccionadas no mesmo roteiro já citado no grupo 3. Portanto, optou-se por relatar os passos a passos da confecção destes materiais de forma sucinta, de modo a não tornar o texto repetitivo.

As nomenclaturas utilizadas nas diferentes configurações de armaduras e a quantidade de CDPs de cada uma delas para ensaio de resistência à aderência podem ser visualizadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Configurações das armaduras do concreto armado (grupo 4).

GRUPO 4 – CDPs ELABORADOS PARA ENSAIO DE RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA		
Configurações das Armaduras	Nomenclatura	Quantidade
Barras de PRFC sem revestimento	G4-BC5	4
Barras de PRFC com revestimento de areia	G4-BC5-RA	4
Barras de PRFC com revestimento em formato espiral com linha de PRFC	G4-BC5-RR	4

3.4.1. Moldes Cilíndricos Metálicos

Utilizou-se neste grupo de ensaios moldes cilíndricos metálicos pertencentes ao Laboratório IRN da UNIFEI, com dimensões internas de 10 x 20 cm, sendo diâmetro versus altura, o mesmo ilustrado no grupo 2. E moldes cilíndricos metálicos com dimensões internas de 5 x 10 cm, sendo diâmetro versus altura, conforme ilustrado na Figura 51. Antes de sua utilização os moldes foram untados com óleo mineral, para que os CDPs pudessem ser desmoldados com facilidade.



Figura 51- Molde cilíndrico metálico para argamassa.

3.4.2. Configurações das Armaduras

3.4.2.1. Armadura em Barras de PRFC

As armaduras compostas por barras de PRFC foram confeccionadas no Laboratório NTC da UNIFEI. De forma semelhante ao procedimento de confecção das barras de PRFC descrito no grupo 3, porém com comprimento equivalente a 25. Confeccionou-se 12 barras de PRFC, sendo 4 para cada configuração de armadura. No total confeccionou-se 3 configurações de barras revestidas por diferentes camadas de superfície, para que a influência da aderência entre o concreto e armadura fosse estudado.

Portanto escolheu-se dois tipos de revestimento de superfície além da configuração da barra lisa, o primeiro foi composto por areia e o segundo foi composto por uma camada de linha de PRFC depositada na barra em formato de espiral, assemelhando-se as ranhuras existentes nas barras de aço. Portanto após a confecção das barras, aguardou-se o tempo de cura de 2 horas para adicionar os revestimentos nas barras, e posteriormente aguardou-se mais 22 horas para que o processo de cura fosse efetivado.

A Figura 52 relata as imagens que foram retiradas do microscópio estereoscópio, marca Olympus SZ61 para que as variações nos tipos de revestimentos utilizados em cada configuração de armadura pudessem ser demonstradas com maior nitidez.

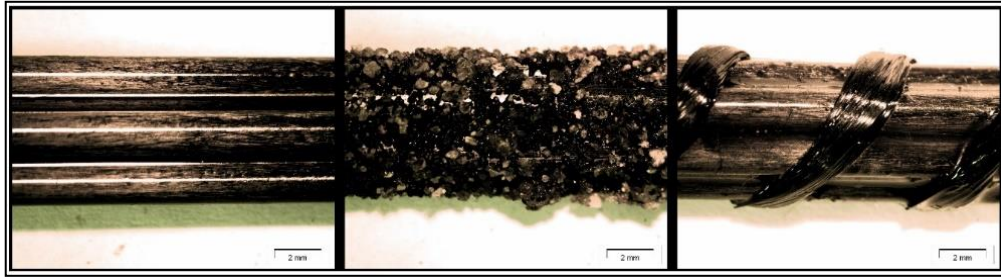


Figura 52 - Microscópico estereoscópio das configurações G2-BC5, G2-BC5-RA, G2-BC5-RR, respectivamente.

3.4.3. Concreto Auto Adensável (CAA) e Argamassa

Neste grupo utilizou-se o CAA, o mesmo confeccionado no grupo 3, e os materiais constituintes para sua formação foram listados na Tabela 8.

Tabela 8 - Traço do CAA (grupo 4).

TRAÇO UTILIZADO NA COMPOSIÇÃO DO CAA					
Cimento	Sílica Ativa	Areia Média	Brita 0	a/c	SAP
1.0	0.1	1.6	1.4	0.30	1.5%
CONSUMO DE MATERIAIS					
Material	Massa específica aproximada	Unidade	Massa	Unidade	
Cimento	3.14	g/cm ³	13203.2	g	
Sílica Ativa	2.,2	g/cm ³	1320.3	g	
Areia média	2.63	g/cm ³	21125.2	g	
Brita 0	2.75	g/cm ³	18484.5	g	
Água	1.00	g/cm ³	3960.9	g	
SAP	1.08	g/cm ³	198.1	g	

Após realizado a mistura dos constituintes do CAA em uma betoneira e ter realizado os ensaios para comprovar a eficácia do CAA no estado fresco, realizou o preenchimento dos moldes 10 x 20 cm, sendo diâmetro versus altura, de acordo com a ABNT NBR 5738:2015, e aguardou-se o tempo de cura de aproximadamente 3 horas para inserir as armaduras nos moldes, pois havendo passado 3 horas observou-se rigidez no fluido de CAA suficiente para que sustentar a armadura posicionada no centro do CDP, com o cobrimento de ancoragem das barras correspondente à 12,5 cm conforme solicitado pela norma ABNT NBR 6118:2014. Porém algumas barras não se mantinham estaticamente imersas nos CDPs de CAA, então com auxílio

de um barbante, amarrou-se as barras na posição adequada, correspondente ao cobrimento de ancoragem solicitado. A Figura 53 visou relatar este procedimento citado acima.



Figura 53 - Preenchimento dos moldes com CAA (grupo 4).

Após aguardar o tempo de 24 horas para desmoldagem dos CDPs, os mesmos foram adicionados em câmara úmida pertencente ao Laboratório IRN da UNIFEI e aguardou-se 28 dias, tempo necessário para que o concreto atingisse cura total. Após este período de tempo houve a modelagem da argamassa na outra extremidade das barras, e os seguintes materiais e suas respectivas quantidades, relatados na Tabela 9, se fizeram necessários para esta etapa.

Tabela 9 - Traço da argamassa.

TRAÇO UTILIZADO NA COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA				
Cimento	Cal	Areia Média	a/c	SAP
1	2	8	0.3	1.5% do volume de água
CONSUMO DE MATERIAIS				
Material	Massa específica aproximada	Unidade	Massa	Unidade
Cimento	3.14	g/cm ³	65.44695	g
Cal	1.1	g/cm ³	45.85455	g
Areia média	2.63	g/cm ³	438.5363	g
Água	1	g/cm ³	6.252894	g
SAP	1.08	g/cm ³	0.101297	g

Os materiais constituintes da argamassa foram misturados no misturador mecânico de argamassa da marca Noema, ilustrado na Figura 54, pertencente ao laboratório IRN da UNIFEI.



Figura 54 - Misturador mecânico de argamassa.

O tempo de mistura se concluiu quando a massa da argamassa apresentou homogeneidade, e conseguinte iniciou-se o preenchimento dos moldes de dimensões 5 x 10, sendo diâmetro versus altura.

A colocação da argamassa nos moldes, ilustrada na Figura 55, foi realizada de acordo com a ABNT NBR 7215:2019 - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Segundo a norma a transferência da massa deve ser realizada com o auxílio da espátula, e a quantidade necessária deve ser dividida em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo cada camada 30 golpes uniformes com o soquete de aço. Portanto adicionou-se 4 camadas de 2,5 cm, ambas recebendo o mesmo número de golpes.



Figura 55 - Preenchimento dos moldes com argamassa (grupo 4).

Terminado o preenchimento dos moldes com argamassa, posicionou-se os CDPs semiprontos sob os moldes de argamassa, respeitando o cobrimento de ancoragem exigido pela

norma ABNT NBR 6118: 2014 de 6,25 cm. Para este procedimento fez-se o uso de uma tela de aço em conjunto com blocos de tijolos, conforme ilustrado na Figura 56.



Figura 56 - Moldagem final (grupo 4).

Após 24 horas, os CDPs foram desmoldados e alocados em câmara úmida pertencente ao Laboratório IRN da UNIFEI. E após o período de tempo relativo a 28 dias, suficiente para a cura total, realizou-se os ensaios mecânicos. O resultado final dos CDPs elaborados para este grupo 4, pode ser visualizado na Figura 57.



Figura 57 - CDPs prontos (grupo 4)

3.4.4. Ensaio de Força de Aderência

Concluído o procedimento descrito acima seguiu-se com o ensaio de força de aderência de acordo com a ABNT NBR 6118:2014 e ASTM D7205/D7205M-21. Para a realização do ensaio, duas garras foram projetadas, e a ilustração de ambas se encontram na Figura 58, e o detalhamento das mesmas podem ser visualizadas no ANEXO C.



Figura 58 - Garras confeccionadas para ensaio de aderência.

O ensaio em questão foi realizado na máquina universal de ensaio EMIC, modelo DL-3000 pertencente ao IEM da UNIFEI. A máquina aplicou nos CDPs uma força de tração entre os blocos de CCA e argamassa uniformemente variada com velocidade constante de 5 mm/s, até atingir a carga máxima de rompimento. A Figura 59 demonstra um CDP posicionado na máquina de ensaio.



Figura 59 - Ensaio de resistência à aderência.

O painel de controle da máquina de ensaios emitiu dados de força de tração e deslocamento, que posteriormente foram trabalhados e apresentados em forma de tabelas na análise dos resultados deste material descritivo.

4. Resultados e Discussões

Antes de apresentar os resultados obtidos por cada um dos grupos, optou-se por relatar os resultados obtidos no ensaio de tração das barras utilizadas nas armaduras dos CDPs, realizado de acordo com a ASTM D7205/D7205M-21. As barras ensaiadas eram de duas modalidades uma composta pelo material aço com 5 mm de diâmetro e a outra composta pelo material PRFC com 2 mm de diâmetro. Os dados relatados pela máquina de ensaio foram obtidos em termos de tensão versus deslocamento e seus resultados em forma de gráfico foram demonstrados na Figura 60, enquanto os dados numéricos contendo tensão e desvio padrão dos CDPs foram demonstrados na Tabela 10.

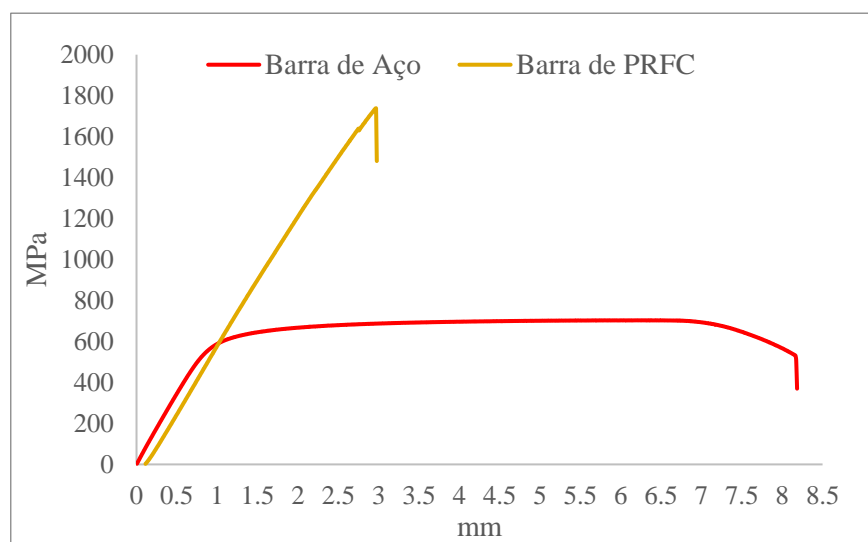


Figura 60 - Gráfico da tensão versus deslocamento (Ensaio de tração).

Tabela 10 - Resultados em forma de tabela do ensaio de tração nas barras de aço e barras de PRFC.

Ensaio de Tração das Barras			
Amostra	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio Padrão
Barras de Aço	708.3	706.51	2.36
	707.38		
	703.84		
Barras de PRFC	1897.84	1785.58	111.83
	1674.18		
	1784.71		

O comportamento dos traçados no gráfico está diretamente ligado as propriedades constituintes dos materiais, observa-se que o traçado das barras de PRFC atingiram picos mais altos pois se mostraram capazes de resistir a maiores tensões e após atingem sua carga máxima romperam abruptamente. Diferentemente do traçado das barras de aço que atingiram picos de rupturas mais baixos e quando atingem sua carga máxima não decai abruptamente, demonstrando suportar maiores deslocamento após sua carga máxima de resistência. Ao considerar que o gráfico de tensão versus deslocamento apresenta proximidade de semelhança ao gráfico de tensão versus deformação, podemos classificar a ruptura das barras de PRFC como frágil devido à falta de deformação plástica e a ruptura das barras de aço como dúctil devido à presença de deformação plástica.

Observa-se que os valores demonstrado na Tabela 10 demostram que as barra de PRFC suportaram cargas 2,53 vezes maiores que as cargas suportadas pela barra de aço, porém seu desvio padrão apresenta-se relativamente alto devido ao intervalo existente entre as tensões resistidas por cada barra de PRFC e este tipo de comportamento pode estar ligado a anisotropia das barras de PRFC que corresponde a variações da propriedades do material em planos distinto e/ou a heterogeneidade das barras de PRFC devido a variação de volume de fibra e resina utilizado na composição da barras e/ou outros fatores de produção e armazenagem. Entretanto com o processo de pultrusão foi realizado por terceiros, as devidas causas que influenciaram no elevado resultado do desvio padrão não pode ser evidenciada com clareza.

Na Figura 61 abaixo se verifica primeiramente as barras fraturadas de aço com 5 mm de diâmetro, seguidas das barras fraturadas de PRFC com 2 mm de diâmetro e posteriormente das barras fraturadas de PRFC com 6 mm de diâmetro. Ambas as barras com 25 cm de comprimento, dimensão necessária para adaptação na máquina. O ensaio de tração foi uma adaptação da norma ASTM D7205/D7205M-21 com as ferramentas disponíveis no laboratório.

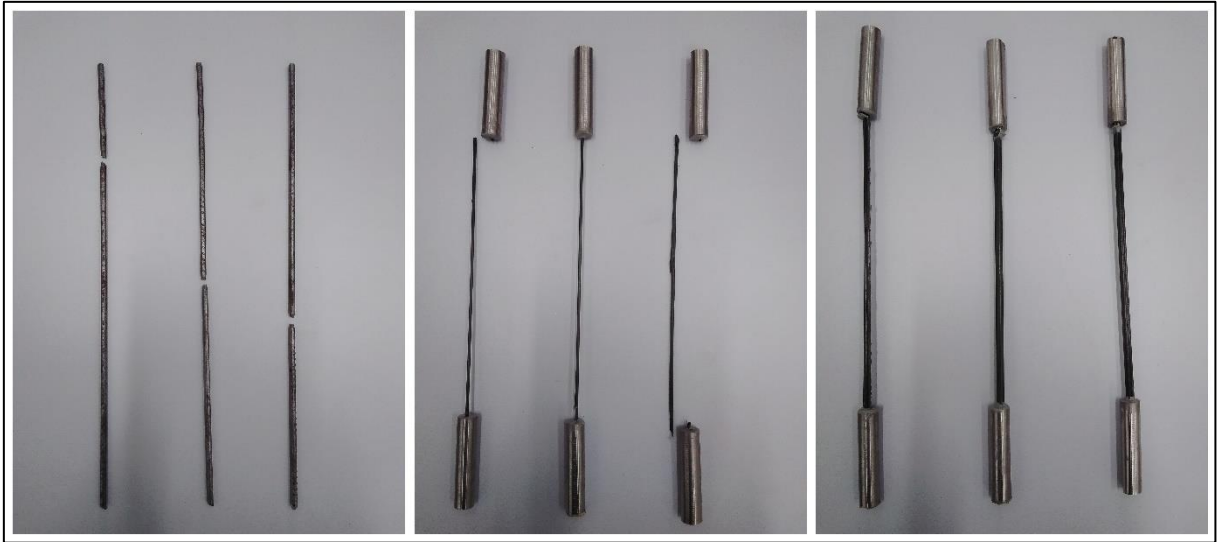


Figura 61 – Barras fraturadas sob tração, sendo barras de aço, PRFC e PRFC (união 5 barras).

Na Figura 61 as trincas ocasionadas nas barras unitárias de PRFC ocorreram próximas ao tubo de ancoragem devido a presença da força de esmagamento ou cortante atuante nesta região da amostra. Já as barras contendo agrupamento de 5 barras de PRFC com 2 mm de diâmetro cada, totalizando em torno de 6 mm de diâmetro não puderam ser ensaiadas com eficácia pois houve escorregamento do tubo de ancoragem para a garra de ensaio.

4.1. Grupo 1: Resultados de Resistência à tração na flexão em 4 Pontos.

O principal objetivo dos ensaios do grupo 1 constitui-se em avaliar vigas prismáticas de concreto armado mediante ao ensaio de tração na flexão em 4 pontos, onde se fez possível obter e comparar o padrão do comportamento mecânico entre os dois tipos de materiais (aço e PRFC) utilizados na armadura do concreto. O gráfico exposto na Figura 7Figura 62 demonstra os resultados da tensão de tração na flexão em 4 pontos obtidos neste ensaio.

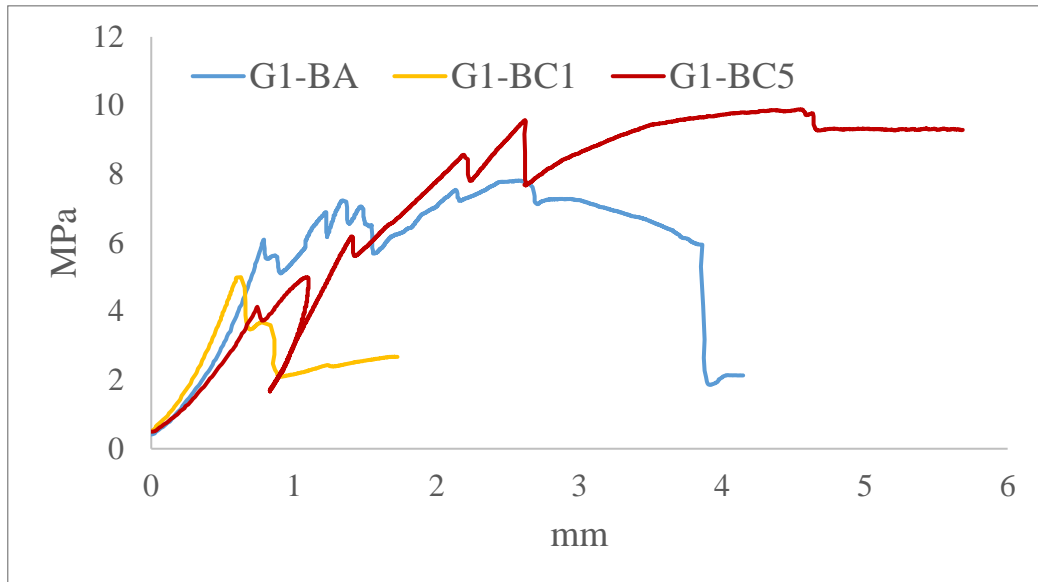


Figura 62 - Gráfico da tensão de tração na flexão em 4 pontos versus deslocamento (Grupo 1).

Nota-se no gráfico acima que os traçados das configurações G1-BA e G1-BC5 apresentam serrilhados até a carga máxima de ruptura, e estes serrilhados relatam que houve formações de trincas no material durante a aplicação de carga, assim sendo esse fator é considerado positivo em uma estrutura civil pois as trincas aparentes são indicativos que o material precisa de reparo de modo a não ser levado a ruína total. Entretanto a configuração G1-BC1 não demonstrou o mesmo comportamento, apresentando ruptura sem a presença de serrilhados.

E supondo que os valores de deslocamento no gráfico são equivalentes aos valores de deformação, observamos que os compósitos de concreto armado com barras de PRFC (G1-BC1 e G1-BC5) apresentaram comportamento dúctil, com deformação plástica após a ruptura, assim como os compósitos de concreto armados com barras de aço (G1-BA). Todavia como as configurações G1-BC1 e G1-BC5 apresentaram uma taxa de decaimento menos acentuada na deformação plástica quando comparados a configuração G1-BA, em uma situação crítica real de excesso de carga sob a estrutura civil projetada, o tempo de emergência para isolamento do local seria maior com o uso de armadura em barras de PRFC.

A Tabela 11 demonstrada abaixo, relata os dados numéricos de tensão em tração na flexão dos CDPs do grupo 1, juntamente com o desvio padrão obtido.

Tabela 11 - Resultados em forma de tabela do ensaio de tração na flexão em 4 pontos (grupo 1).

Ensaio de tração na flexão em 4 Pontos (Grupo 1)			
Configuração	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	Desvio Padrão
G1-BA	8.92	10.10	1.67
	11.28		
G1-BC1	4.99	5.41	0.60
	5.84		
G1-BC5	10.79	11.21	0.58
	11.62		

É importante destacar que a tensão média apresentada na tabela acima, corresponde a soma das tensões máximas dividido pelo número de CDPs. E ao analisar o gráfico nota-se que nem sempre a tensão média corresponde ao ponto máximo do traçado entre deslocamento de tensão, uma vez que os deslocamentos dos CDPs não apresentaram resultados com valores uniformes.

Diante dos resultados, observou-se que o concreto armado com barras unitárias de PRFC com 2 mm de diâmetro (G1-BC1) obtiveram valores de resistência em tração na flexão inferiores aos valores de resistência em tração na flexão do concreto armado com barras de aço com 5 mm de diâmetro (G1-BA). Já a configuração correspondente ao concreto armado com barras de PRFC agrupadas em 5 com 6 mm de diâmetro (G1-BC5) suportou na média um valor de resistência à tração na flexão superior ao valor de resistência à tração na flexão suportadas pelas barras de aço (G1-BA), relatando que o diâmetro da barra de PRFC impacta na tensão em tração na flexão do concreto armado.

Ao comparar esses resultados com a literatura temos que Irshidat (2020) realizou ensaios de aderência em barras de PRFC imersas parcialmente no concreto e o resultado demonstrou que quanto maior o diâmetro das barras de PRFC, melhor é a força de ligação ou aderência entre elas e o concreto. Este estudo apesar de ter sido realizado com o ensaio de aderência, mostraram semelhança com os dados obtidos neste estudo, no qual o concreto armado com barras de PRFC de 2 mm de diâmetro resistiram a uma tensão à tração na flexão menor que a tensão à tração na flexão suportada pelo concreto armado com 5 barras de 2mm de PRFC, somando o total de 6 mm de diâmetro.

AYDIN e col. (2021) realizou ensaios de flexão em vigas de concreto armado com aço e em vigas de concreto armado com barras de PRFC e as tensões resistidas por ambos quase se igualaram. Semelhante ao estudo deste autor, observou-se que as configurações G1-BA e G1-BC5 também obtiveram valores próximos de resistência à flexão. Entretanto RASHID et al. (2020), realizou uma análise comparativa entre vigas de concreto armado com aço e vigas de concreto armado com barras de PRFC ensaiadas sob ensaio de flexão. Os CDPs de concreto armado com barras de PRFC obtiveram um ganho de 40% de resistência mecânica a flexão sob os CDPs de concreto armado com aço, o que não foi verificado nos resultados desta presente pesquisa.

E com relação a confiabilidade que o desvio padrão calcula sob as amostras, evidenciado na Tabela 11, quanto mais próximo seu resultado for de zero, mais confiável se demonstra o ensaio, portanto os desvios encontrados nas diferentes configurações foram relativamente baixos.

O gráfico elucidado na Figura 63 visou demonstrar um comparativo de relação em porcentagens das tensões suportadas pelas diferentes configurações.

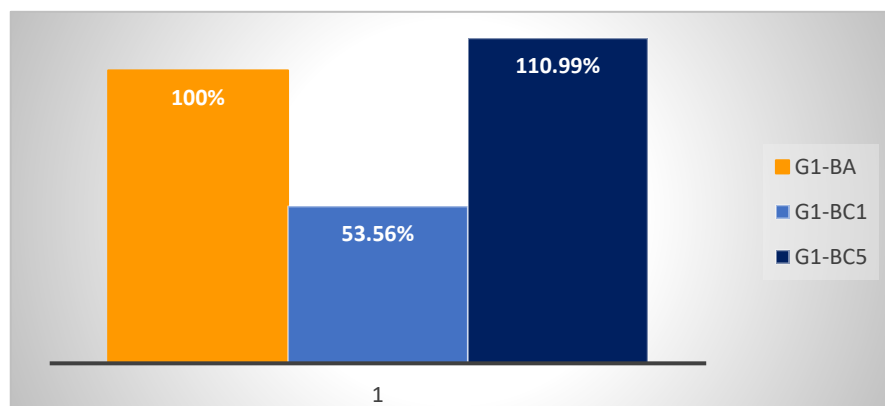


Figura 63 - Resultados em porcentagens de tensões suportadas no ensaio de tração na flexão em 4 pontos (grupo 1).

Portanto como as barras de PRFC apresentaram valores de resistência à tração 2.53 vezes maiores que as barras de aço, quando combinadas com o concreto sob o ensaio de tração na flexão, onde as barras também são submetidas a esforços de tração, não se observou o mesmo resultado, nota-se que a configuração G1-BC5, composta por armadura de PRFC, é capaz de suportar apenas 1.11 vezes mais tensões sob tração na flexão que a configuração G1-BA, composta por armadura de aço.

Após analisar os resultados presume-se que um dos fatores que possam vir a ter influenciado no não aproveitamento da carga máxima suportada pelas barras de PRFC possa ser a força de aderência entre o material concreto e o material PRFC, já que nos estudos de Qasem et al. (2020) foi concluído que a força de aderência nas barras de aço era superior do que nas barras de PRFC.

Além do pressuposto acima questionou-se uso dos estribos de aço utilizados em conjunto com as barras de PRFC possa ter causado algum dano, uma vez que os estribos são amarrados na ortogonal da barra e estes apresentam ductibilidade maior que as barras de PRFC, a ligação de ambos pode ter gerado um esforço cisalhante na região de contato interferindo nas propriedades mecânicas das barras de PRFC.

Outros parâmetros como porosidade no concreto devido ao adensamento incorreto, cura inadequada dos CDPs ocasionando trincas precoces, dentre outros fatores, podem ter contribuído para que o concreto armado com PRFC não atingisse seu potencial máximo, apesar de que todos os cuidados necessários foram tomados para que não houvesse falta de inadequação com a norma e conseqüentemente moldagem e cura incorreta, entretanto erros podem ter ocorrido e novos ensaios para reavaliação foram realizados nos grupos que se sucedem.

Na Figura 64, demonstrou-se os CDPs fraturados, observa-se que as trincas foram mais espessas nas configurações G1-BA e G1-BC5 do que na configuração G1-BC1, o que reafirma os maiores deslocamentos resistidos pelas configurações G1-BA e G1-BC5 no gráfico da Figura 62



Figura 64 - CDPs fraturados (Grupo 1).

De acordo com Thomaz (1989) as fissuras decorrentes em elementos rompidos pelo ensaio de flexão ocorrem perpendicularmente às trajetórias dos esforços principais de tração. São praticamente verticais no terço médio do vão e apresentam aberturas maiores em direção à face inferior da viga onde estão as fibras mais tracionadas. Junto aos apoios as fissuras inclinam-se aproximadamente com a horizontal, devido a influência dos esforços cortantes, como mostra na Figura 65

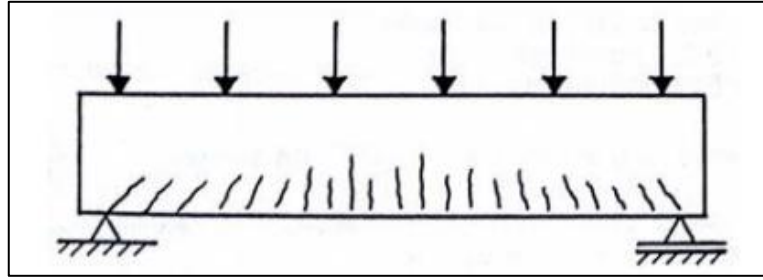


Figura 65 - Fissuração típica em viga solicitada à flexão
Fonte: Thomaz (1989)

Portanto devido aos esforços combinados de compressão, tração e cisalhamento atuantes em elementos de concreto armado submetidos ao ensaio de flexão, observa-se trincas formadas nos CDPs da Figura 64 por tração devido as trincas verticais, ocorridas principalmente no terço médio; por cisalhamento correspondente as trincas inclinadas à 45°, com maior ocorrência próximo aos apoios; e por compressão, pois as trincas atingem as faces superiores da viga e estas trincas geralmente não são aparentes, portanto, a análise do modo de ruptura reafirma o pressuposto de que o fator limitante do potencial máximo de resistência das barras de PRFC pode ter sido a resistência de compressão do concreto.

4.2. Grupo 2: Resultados de Resistência à Compressão Axial.

Com a análise dos resultados no grupo 1, prosseguiu-se com o grupo 2 de ensaios, onde o foco de estudo do material PRFC foi direcionado para a configuração G1-BC5, que apresentou dados de resistência à tração na flexão maiores do que a configuração G2-BC1. Entretanto algumas modificações foram feitas, os estribos que eram de aço no grupo 1 passou a ser de PRFC no grupo 2 de modo a estudar qual material de estribo melhor se adapta as barras de PRFC. Além disso novas configurações foram elaboradas e ensaiadas neste grupo, passamos a analisar e comparar não somente armaduras em barras, mas também em telas.

Deste modo novos resultados foram coletados com o grupo 2 de ensaios e o gráfico de tensão versus deslocamento pode ser visualizado na Figura 66. Adicionou-se na sequência a Figura 67 com a exibição do gráfico sem os dados da configuração G2-TCE, pois como o resultado desta configuração apresentou disparidade, eliminá-lo da exibição do gráfico tornou os outros resultados mais legíveis.

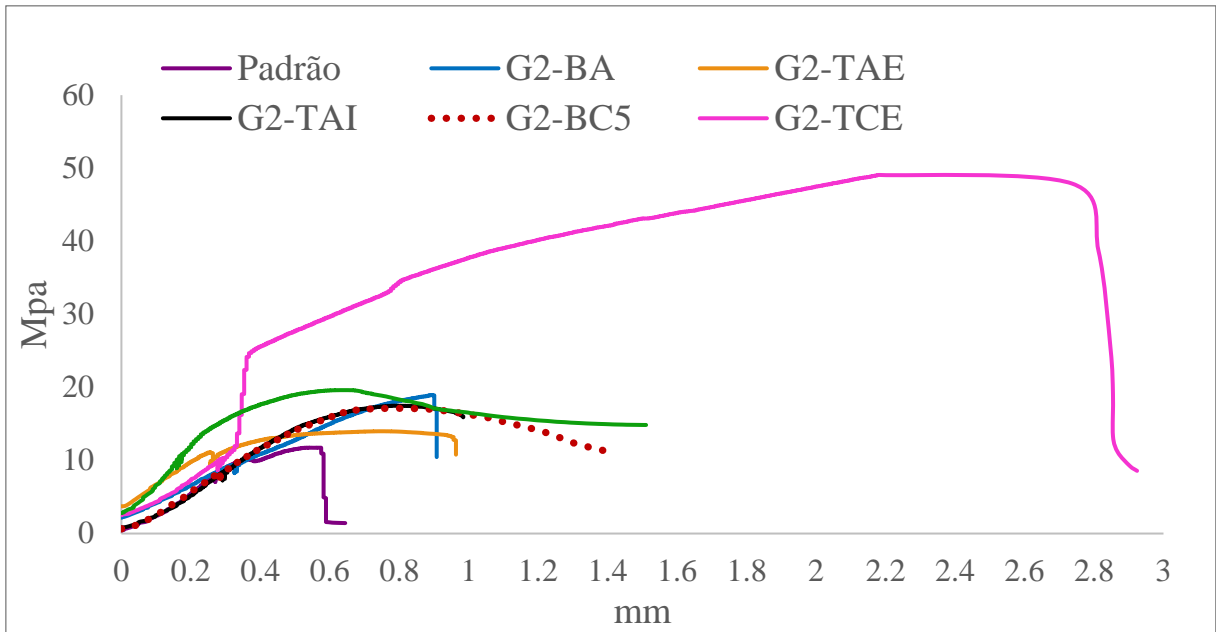


Figura 66 - Gráfico da tensão a compressão versus deslocamento (Grupo 2).

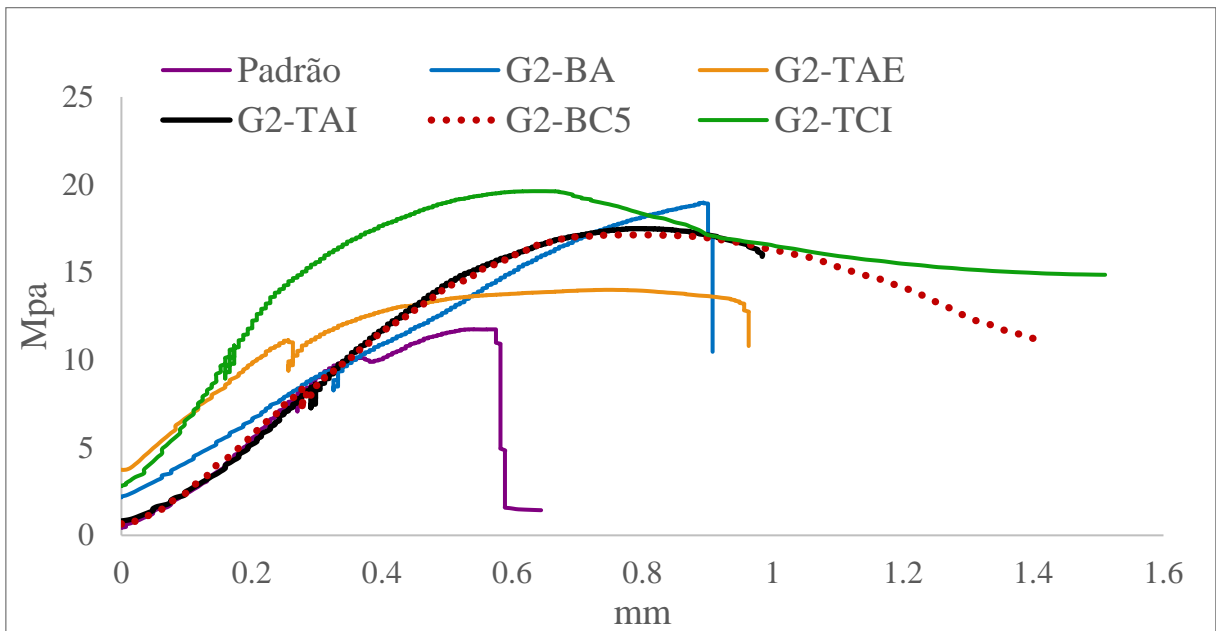


Figura 67 - Gráfico adicional da tensão a compressão versus deslocamento (Grupo 2).

Observa-se nos traçados dos gráficos acima que houve a ocorrência de serrilhados em todas configurações, havendo trincas no CDPs durante o carregamento, entretanto a proporção de serrilhados apresentados neste grupo de ensaio de compressão axial foi menor quando comparado com o grupo 1 no qual realizou-se o ensaio de tração na flexão nas amostras. Esta diferença pode ter sido causada devido ao comportamento do concreto armado sob diferentes esforços solicitantes.

Ao considerar que os valores de deslocamento nos gráficos são equivalentes aos valores de deformação, observamos que as configurações, G2-BA, G2-TAE e G2-TCE apresentaram comportamento frágil, sem a presença de deformação plástica, portanto após o rompimento frágil do concreto observado no CDP Padrão, as armaduras destas configurações também entraram em colapso, demonstrando o mesmo tipo de comportamento do concreto.

Enquanto as configurações G2-TAI, G2-BC5 E G2-TCI apresentaram comportamento dúctil, assim sendo, como a ruptura isolada do concreto se apresenta como frágil, após a ruptura máxima dos CDPs de concreto armado, as armaduras destas configurações ainda se mostraram capazes de suportar esforços solicitantes, uma vez que houve deformação plástica no traçado do gráfico desta configuração.

As tensões médias obtidas pelas distintas configurações e os desvios padrões das mesmas foram expostas na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados em forma de tabela do ensaio de compressão axial (grupo 2).

Ensaio de Compressão Axial (Grupo 2)			
Configuração	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio Padrão
Padrão	11.75	10.18	1.72
	7.60		
	11.19		
G2-BA	18.97	17.54	1.55
	15.22		
	18.44		
G2-TAE	13.48	14.04	0.40
	14.65		
	14.00		
G2-TAI	17.49	16.62	0.77
	15.46		
	16.91		
G2-BC5	14.34	16.08	1.16
	16.76		
	17.14		
G2-TCE	45.74	47.38	1.13
	47.31		
	49.08		
G2-TCI	19.21	18.27	0.76
	18.47		
	17.14		

Com relação aos desvios padrões, todas as configurações obtiveram números relativamente baixos, reverberando de forma positiva, não apresentando anomalias

As telas de aço utilizadas no concreto armado nas configurações G2-TAE e G2-TAI apesar de ter apresentado ganho de resistência em relação ao CDP padrão, quando comparadas com as barras de aço utilizadas no concreto armado na configuração G2-BA, tradicionalmente utilizada na construção civil, apresentam resistências de compressão inferiores, não se mostrando uma solução mais atrativa.

Já as armaduras em telas de PRFC utilizadas no concreto armado, configurações G2-TCI e G2-TCE, apresentaram resistências superiores perante as armaduras em barras de PRFC no concreto armado, configuração G2-BC5, o que torna o uso de armadura de telas de PRFC no concreto a opção mais atrativa em termos de resistência mecânica à compressão. Este ganho de resistência mecânica à compressão pode ser justificado porque as telas de PRFC são projetadas para suportar esforços em duas direções (laminados bidimensionais) devido a união da resina e fibras de carbono depositadas na direção 0° e 90°, enquanto as barras são projetadas apenas na direção 0°, por se tratar de um elemento unidimensional. Deste modo a configuração G2-TCE foi capaz de suportar cargas mecânicas relativamente altas quando comparada com as outras configurações ensaiadas neste grupo.

De acordo com estudo de Zhang et al (2021) pilares prismáticos de concreto reforçados com telas externas de PRFC foram analisados, e os resultados de resistência à compressão mostraram que os pontos de ruptura eram maiores nos cantos das telas de PRFC do que nos pontos centrais. Portanto a geometria cilíndrica utilizadas nas configurações G2-TCI e G2-TCE otimizou os resultados, uma vez que a geometria prismática demonstra por Zhang et al (2021) mostrou que regiões de inclinação ortogonal da tela de PRFC estão mais propensas a ruptura.

O gráfico ilustrado na Figura 68 visou demonstrar um comparativo de resistência a compressão em termos de porcentagens das diferentes configurações ensaiadas neste grupo.

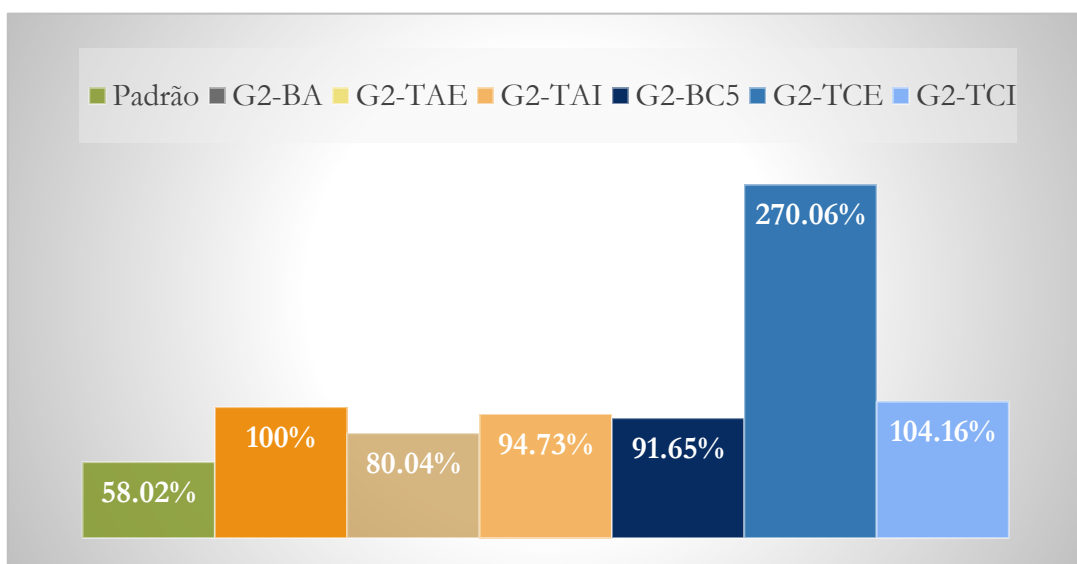


Figura 68 - Resultados em porcentagens de tensões suportadas no ensaio de compressão axial (grupo 2).

Comparando-se a configuração G2-BA com a configuração G2-BC5, nota-se que houve uma perda de resistência, evidenciando o fato que a mudança do material do estribo de aço para o estribo de PRFC na configuração G2-BC5 não trouxe melhorias significativas.

Entretanto outros parâmetros podem ter afetado a diminuição da resistência da configuração G2-BC5 do grupo 2 quando comparado com a configuração G1-BC5 do grupo 1, como a mudança do esforço solicitante sob os CDPs, assim como a mudança do estribo de aço para estribo de PRFC em conjunto com o estribo de poliácido láctico, pois este material por apresentar baixa resistência mecânica pode ter criado uma região propensa à fratura,

Nas Figura 69 e Figura 70, demonstrou-se os CDPs fraturados deste grupo.

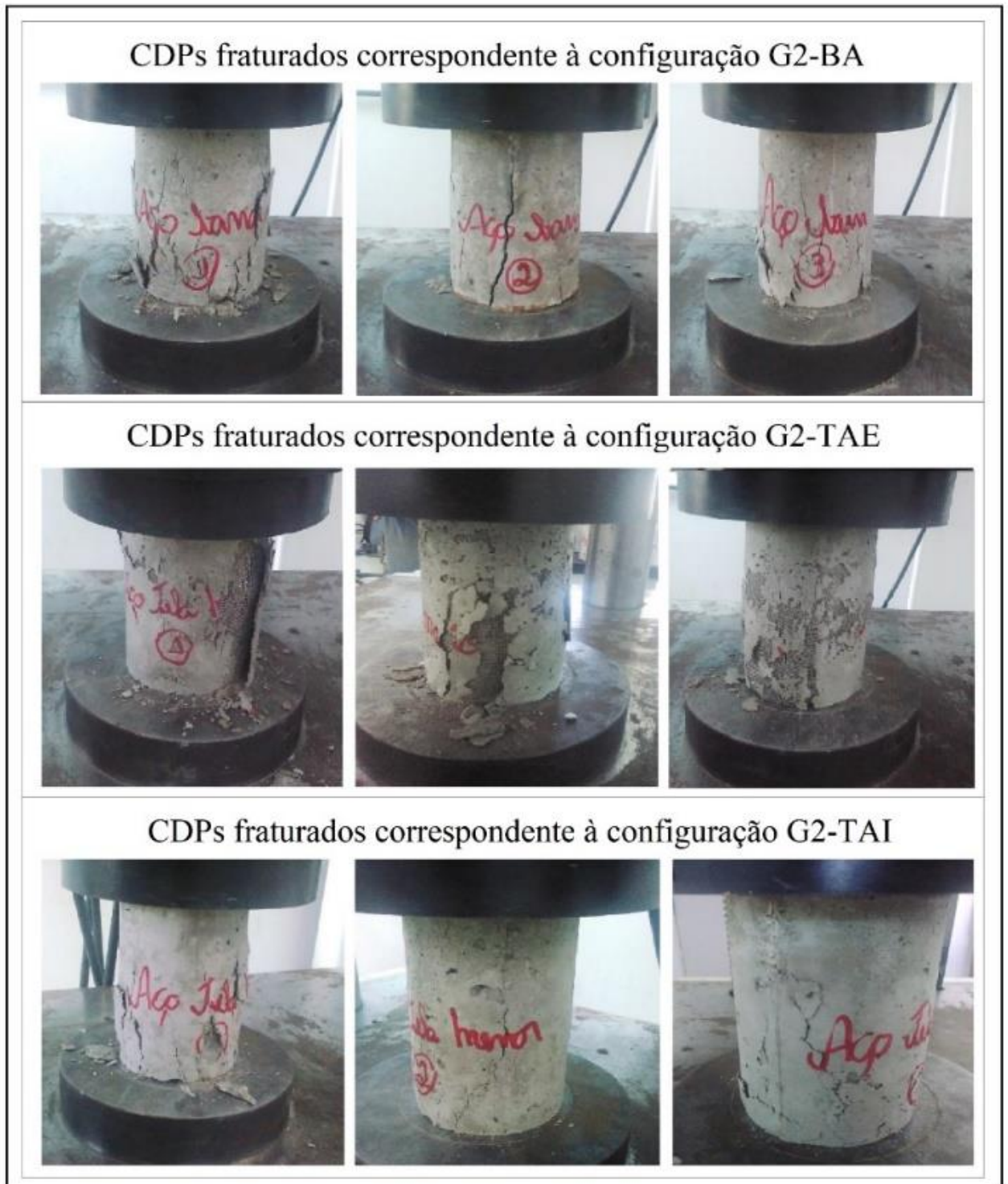


Figura 69 - CDPs de armaduras de aço fraturados (Grupo 2).

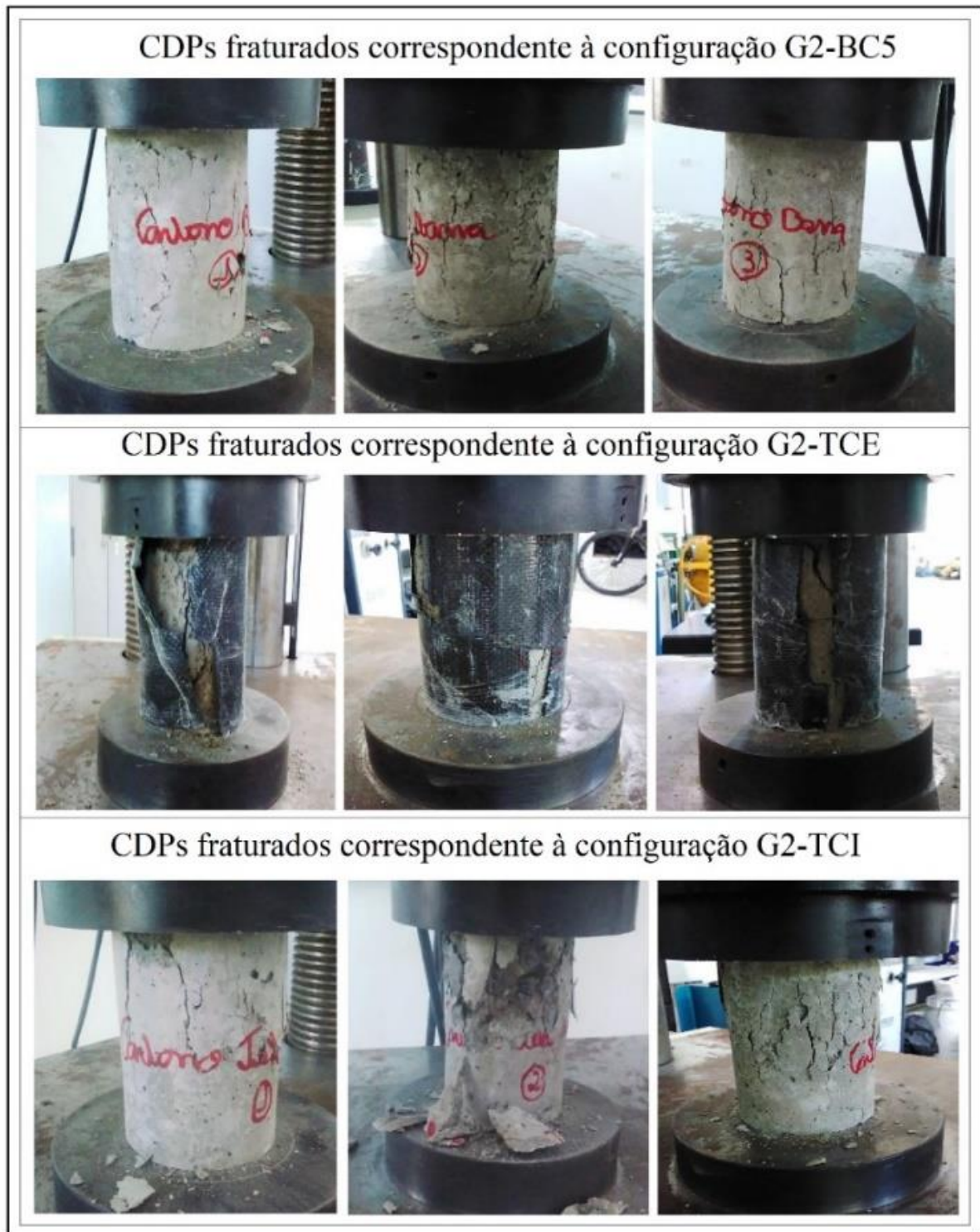


Figura 70 - CDPs de armadura de PRFC fraturados (Grupo 2).

A ruptura final sob ação de uma compressão uniaxial é uma ruptura por tração de grãos de cimento ou uma ruptura da aderência em uma direção perpendicular à carga aplicada, ou, ainda, a ruína causada pelo surgimento de planos inclinados de cisalhamento. Por esse motivo explica-se a ruptura em forma de cone e com planos cisalhantes a 45° em corpos de prova de concreto de formato cilíndricos. (NEVILLE, 1997).

Notou-se que trincas verticais e inclinadas em 45° foram formadas em diversas regiões dos compósitos de concreto armado. E observa-se que na configuração G2-TAE, que além destas trincas, formou-se uma fenda unitária de ruptura na tela de PRFC.

4.3. Grupo 3: Resultados de Resistência à Compressão Axial.

Concluído as análises dos grupos anteriores, novas configurações de CDPs com concreto armado foram confeccionadas. Optou-se por continuar a investigar a interação do concreto com armaduras em barras de aço e PRFC sem a presença de estribos, com a finalidade de estudar se retirada do estribo da armadura interfere de forma significativa na resistência do conjunto. E adicionalmente modificou-se as características de resistência do concreto, utilizando um concreto de resistência mais elevada, CAA ao invés do CCV, de modo a analisar se a aderência entre o concreto e as barras se modificam com a mudança do tipo de material do concreto.

Além de verificar a questão dos estribos e a mudança do concreto utilizado nos CDPs, adicionou-se variados tipos de revestimentos sobre a superfície das barras de PRFC, possibilitando a oportunidade de estudar qual tipo de interface entre o concreto e as barras de PRFC é a mais adequada para a aderência ao concreto, uma vez que quanto maior a força de aderência entre os materiais, melhor será a transferência dos esforços solicitantes.

Antes de apresentar os resultados correspondente diretamente ao grupo 3 de ensaio, optou-se por demonstrar primeiramente na Tabela 13 os resultados obtidos nos ensaios de caracterização da qualidade do CAA no seu estado fresco, juntamente com dados obtidos por outras pesquisas literárias.

Tabela 13 - Resultado dos ensaios do CAA no estado fresco.

Ensaio	Resultado do CAA da presente pesquisa	Resultado do CAA dos respectivos autores	
		Al-Hadithi e Hilal (2016)	Angelin (2018)
Espalhamento (mm)	678	650 a 780	550 a 560
Funil V (s)	10	9 a 12	5 a 7
Caixa L (H2/H1)	0.85	0.75 a 1.00	0.80 a 0.85

Os resultados obtidos na tabela acima mostraram-se próximos aos resultados obtidos por outros autores, portanto foi esperado que sua qualidade de resistência após o período de cura atingisse sua totalidade.

Consequente, na Tabela 14 relatou-se os valores de tensões em compressão resistidas por cada configuração do grupo 3. A construção de gráficos não foi possível neste grupo pois a máquina utilizada na realização dos grupos anteriores se encontrava estragada, então fez-se o uso de uma prensa de compressão axial mais simples, capaz de expressar somente a carga máxima de ruptura.

Tabela 14 - Resultados em forma de tabela do ensaio de compressão axial (grupo 3).

Ensaio de Compressão Axial (Grupo 3)			
Configuração	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio Padrão
Padrão	53,06	53.04	0.99
	52.83		
	55.01		
	52.44		
	51.87		
G3-BA	82.74	79.08	4.37
	82.48		
	76.46		
	82.95		
	70.76		
G3-BC5	80.52	78.15	4.75
	76.89		
	81.19		
	67.53		
	84.64		
G3-BC5-RA	90.81	82.33	6.08
	77.19		
	77.21		
	77.39		
	89.05		
G3-BC5-RR	85.3	75.83	5.58
	65.84		
	80.04		
	71.84		
	76.11		

Comparando os resultados das armaduras compostas por PRFC (G3-BC5, G3-BC5-RA, G3-BC5-RR) com a configuração G3-BA, observa-se que os valores obtidos nos resultados não se distanciaram entre si. E o desvio padrão obtido deste grupo de ensaios quando comparado com os grupos de ensaios anteriores, observa-se que houve um aumento nos valores, o que pode ser explicado pela não utilização dos estribos na armadura, aumentando o intervalo nos valores de resistências obtidas pelas barras e distanciando assim o valor do desvio padrão de zero.

Observou-se nos resultados que a configurações G3-BC-RA apresentou os melhores resultados de resistência mecânica à compressão, indicando que o revestimento de areia é o mais indicado, porém os resultados obtidos pelas configurações G3-BC5 e G3-BC5-RR não se distanciaram dos resultados da configuração G3-BC5-RA.

Ao comparar esses resultados com a literatura temos que Ahmad et al. (2011) analisou o concreto armado com barras de PRFC lisas e revestidas de areia sob ensaio de aderência e os resultados mostraram claramente que a resistência de união de barras lisas é próxima das barras revestidas de areia, o que também foi verificado neste presente estudo.

Entretanto Huang et al (2020) avaliou o melhor tipo de interface concreto/PRFC e verificou que barras de PRFC com linha de PRFC depositadas em formato helicoidal possuíram a maior resistência de ligação, apesar de se tratar de ensaios diferente, a resistência de ligação entre o concreto e as barras está diretamente relacionada com o potencial de resistência mecânica aos esforços solicitantes e conseguinte os resultados encontrados por Huang et al (2020) se difere dos resultados encontrados neste estudo.

O gráfico elucidado na Figura 71 mostra um comparativo em relação as porcentagens de tensões suportadas pelas diferentes configurações.

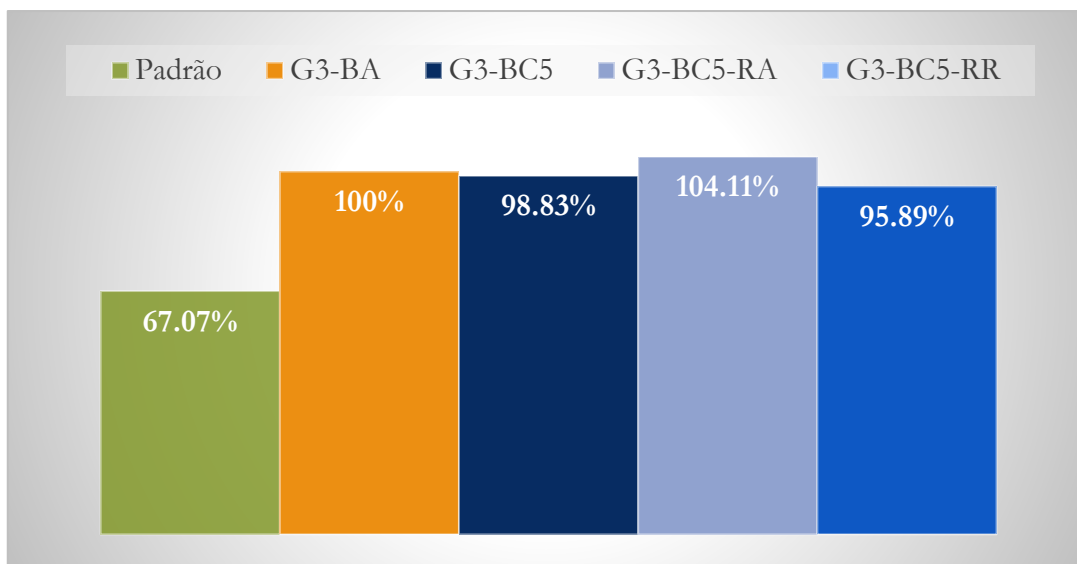


Figura 71 - Resultados em porcentagens de tensões suportadas no ensaio de compressão axial (grupo 3).

Observa-se que houve um ganho de resistência de 9.05% do grupo 2 para o grupo 3 ao comparar os resultados obtidos pelos CDPs Padrão, no qual alternou-se o uso do CCV para o uso do CAA. Entretanto apesar do ganho de resistência à compressão observada no CDPs compostos apenas de concreto, quando se analisa o concreto armado as tensões absorvidas pelas

diferentes configurações G3-BA, G3-BC5, G3-BC5-RA e G3-BC5-RR obtiveram valores muito próximos entre si. E apesar da pouca diferença da resistência à compressão entre as configurações de armaduras de PRFC contendo diferentes revestimentos, a configuração G3-BC5-RA correspondente ao revestimento de areia demonstrou desempenho um pouco melhor do que as outras configurações. E na pesquisa de Zhao et al (2021) concluiu que ao usar um concreto com resistência mais elevada havia um ganho proporcional de resistência à aderência entre as barras e o concreto, o que não foi verificado ao comparar deste grupo com os resultados do grupo 2.

As imagens dos CDPs fraturados podem ser visualizadas na Figura 72.

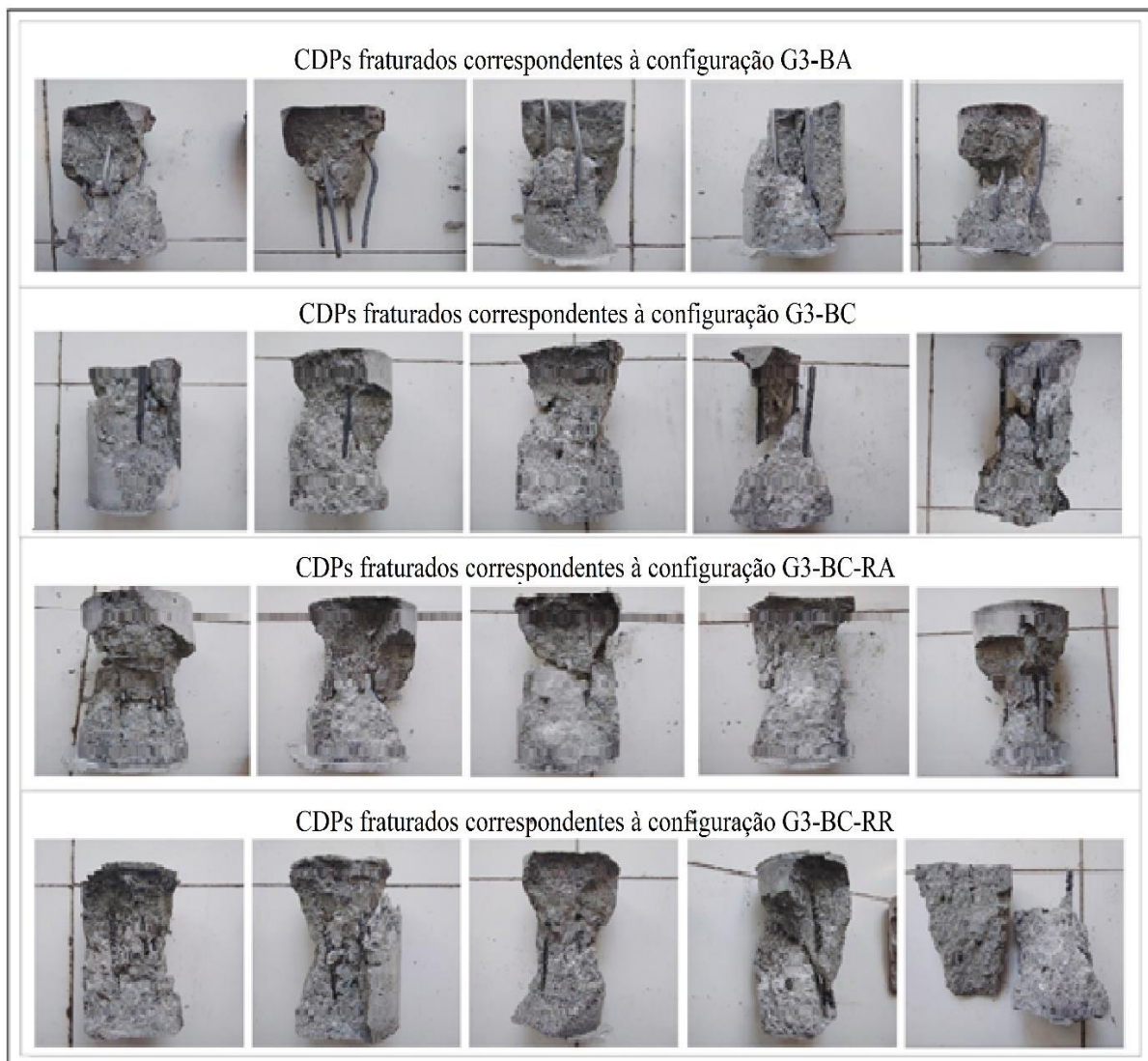


Figura 72 - CDPs fraturados (Grupo 3).

Nas imagens da Figura 72 observou-se o mesmo comportamento de ruptura do grupo 2 que também tiveram os CDPs submetidos aos esforços de compressão, entretanto na

fotografia revelada acima aparenta ter havido maior segregação dos materiais, mas o motivo foi porque o registro dos CDPs foi realizado fora da máquina de ensaio e ao retirar os CDPs fraturados, os mesmos segregaram. Diferente do grupo 2, que o registro fotográfico dos CDPs após a ruptura foi realizado na máquina de ensaio. Portanto notou-se que trincas verticais e inclinadas em 45° foram formadas em diversas regiões dos compósitos de concreto armado, e este modo de ruptura é característico do rompimento de compressão do concreto. Para uma observação mais nítida dos CDPs fraturados, foi inserido no ANEXO D, fotos individuais de cada um deles.

4.4. Grupo 4: Resultados de Força de Aderência.

O respectivo grupo visou analisar a região de interface do concreto/PRFC através do ensaio de aderência. Os resultados obtidos neste grupo de ensaio não foram totalmente satisfatórios, uma vez que houve escorregamento da âncora projetada com argamassa, porém os dados obtidos foram expostos na Tabela 15 e apesar do ocorrido, pode-se ter uma ideia de qual tipo de revestimento utilizado suportou maior carga de aderência

Tabela 15 - Resultados em forma de tabela do ensaio de aderência (grupo 4).

Ensaio de Resistência à Aderência (Grupo 4)			
Configuração	Força (N)	Força Média (N)	Desvio Padrão
G4-BC5	4579.67	4506.70	919.06
	3427.8		
	3747.47		
	6271.85		
G4-BC5-RA	6751.36	6251	697.55
	5474.4		
	7145.74		
	5632.5		
G4-BC5-RR	5578.65	4575.33	944.26
	4101.89		
	3160.25		
	5460.51		

Devido ao escorregamento das barras dos blocos de argamassa, conforme demonstrado na Figura 73, os desvios padrões obtiveram valores elevados, não sendo possível uma análise confiável dos resultados.



Figura 73 - CDPs fraturados (Grupo 4).

Entretanto a configuração G4-BC5-RA, composta por revestimento de areia, foi capaz de resistir as maiores forças de aderência, seguida da configuração G4-BC5-RR, revestimento de linha PRFC em formato espiral. E suportando menor carga temos a configuração G4-BC5, sem revestimento, conforme ilustrado na Figura 74

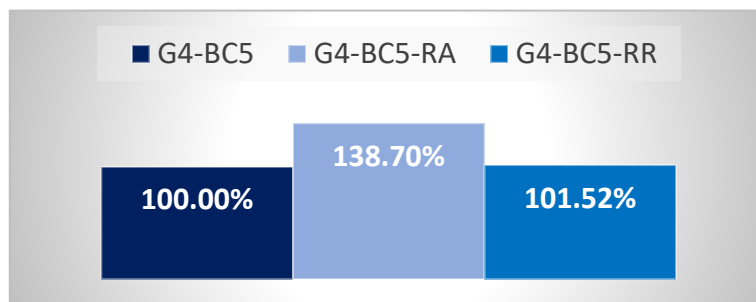


Figura 74 - Resultados em porcentagens de tensões suportadas no ensaio de compressão axial (grupo 4).

Ao comparar estes resultados com o grupo 3, onde foi confeccionado configurações de armaduras equivalentes ao deste grupo, temos as configurações G4-BC5-RA e G3-BC5-RA, ambas compostas com revestimento de areia demonstraram os melhores resultados.

5. Conclusões

Posterior aos ensaios constatou-se que os valores de resistência obtidos entre as armaduras do concreto em barras de PRFC e armaduras do concreto em barras de aço obtiveram resultados de resistência muito próximos apesar das barras de PRFC suportam uma carga de tração 2.53 vezes maior que as barras de aço.

Portanto as alterações realizadas nas armaduras de PRFC como a utilização de diferentes materiais (aço e PRFC) para a composição do estribo e também sem a presença de estribos, variação do revestimento das barras utilizando areia e ranhura em espiral de PRFC e a alternância do CCV para o CAA não alteraram de forma significativa a resistência mecânica à tração na flexão em 4 pontos e à compressão axial de elementos estruturais de concreto armados com aço e concreto armado com PRFC. Entretanto em uma situação crítica real onde possa vir a ter o desabamento de uma estrutura civil de concreto armado em barras de PRFC o uso deste material com elevada resistência mecânica é capaz de gerar maior tempo de evacuação para que as pessoas que se encontram no local possam deixar a área com segurança.

Todavia verificou-se que o uso da armadura em telas de PRFC moldadas externamente ao concreto apresentou resultados ótimos de resistência mecânica à compressão axial quando comparados com as armaduras do concreto em barras de PRFC e com armaduras em telas e barras de aço, fazendo da configuração G2-TCE a mais indicada para o aumento de resistência à compressão axial do compósito concreto armado com PRFC.

Perante ao exposto como os resultados das armaduras em barras utilizadas no concreto não se comportaram mecanicamente como o esperado e as causas podem estar ligadas a falta de aderência entre a barras de PRFC e o concreto, baixo módulo de elasticidade das barras de PRFC, porosidade do concreto, dentre outros fatores. A análise das devidas causalidades citadas começou a ser estudada com os ensaios de força de aderência, entretanto não se obteve sucesso nos resultados. Portanto como o tempo determinado para a conclusão desta pesquisa se esgotou a continuação deste estudo foi proposta em trabalhos futuros.

6. Trabalhos Futuros

Visando abranger o maior número de informações possíveis sobre a correlação dos materiais concreto e PRFC construiu-se uma lista de possíveis trabalhos futuros que prosseguirá o tema de pesquisa abordado neste presente trabalho.

- Estudo da aderência entre barras de PRFC e o concreto;
- Estudo do módulo de elasticidade das barras de PRFC.
- Estudo do índice de porosidade no concreto, interferindo diretamente na aderência entre o concreto e a barra;
- Análise do número ótimo de camadas de PRFC utilizada na composição da tela destinada para a armadura do concreto;
- Investigação da armadura em telas de PRFC para o concreto armado envolvendo outros ensaios de resistência;
- Ensaios mecânicos para análise da resistência das telas de PRFC e telas de aço;
- Análise da possível redução no volume de concreto utilizando telas de PRFC;
- Estudo de formas de ligação entre vigas e pilares de concreto armado, utilizando telas em PRFC.
- Estudo de custos envolvendo a produção, aplicação e manutenção do material PRFC comparado o material aço.

7. REFERÊNCIAS

ABDEL-HADY, F. **Filament winding of revolution structures**. Journal of reinforced plastics and composites, vol. 24(8), p. 855-868, 2005.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas **Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento: NBR 12655**. São Paulo, 2015.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos: NBR 5739**. São Paulo, 2018.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto: NBR 5738**. São Paulo, 1994.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **Projeto de estruturas de concreto: NBR 6118**. São Paulo, 2014.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos: NBR 7215**. São Paulo, 2019.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos: NBR 12142**. São Paulo, 2010.

ABREU, E. S.; REAL, M. V. **Estudo comparativo entre vigas de concreto armadas com barras de aço e com barras de PRF**. RETEC, Ourinhos, vol. 11, 2018.

AHMAD Firas Sayed; FORET Gilles; ROY Robert Le. **Bond between carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) bars and ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPRFC): Experimental study**. Construction and Building Materials, vol. 25, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.006>>. Acesso: 16 de agosto 2019.

AL-HADITHI, A. I.; HILAL, N. N. **The Possibility of Enhancing Some Properties of Self-Compacting Concrete by Adding Waste Plastic Fibers**. Dams and Water Resources Engineering Department, College of Engineering, University of Anabr, Ramadi, ANBAR , IRAQ. 2016.

AL-ZAHRANI, M.; NANNI, A.; AL-DULAIJAN, S.; BAKIS, C. **"Ligação de FRP ao concreto para hastes com Axisymmetric Deformations,"** Proceedings of the Second Conferência Internacional sobre Advanced Composite Materiais em pontes e estruturas (ACMBS-II), Montreal, QC, Canadá, 1996.

ANGELIN, A. F. **Análise dos desempenhos físicos, mecânicos, termo acústicos e microestruturais do concreto leve autoadensável emborrachado (CLAE)**. Tese de Doutorado – FT/UNICAMP. Limeira, 2018.

ASMT - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars: D7205/D7205M**, West Conshohocken, PA, 2021.

ATHAWALE, A. A.; ALHOUSAMI, M. H. **"Epoxy Resin-modified, Ureaformaldehyde/Silicon Networks for High Impact Strength and Thermal Stability."** Journal of Reinforced Plastics and Composites, vol. 28, p. 2231-2239, 2008.

AYDIN, E.; BORU, E.; AYDIN, F. **Effects of FRP bar type and fiber reinforced concrete on the flexural behavior of hybrid beams.** Construction and Building Materials, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122407>>. Acesso: 29 de agosto de 2021.

BAKOSS, S.; GREENLAND, A.; CREWS, K. **Aplication of Advanced FibreReinforced Plastic Composites to Structural Timber.** In: WORLD, 1998.

BALYA, B. **Design And Analysis Of Filament Wound Composite Tubes.** Dissertação de mestrado, Middle East Technical University, Ankara, Turquia, 2004.

BASTOS, P. S. C. **Fundamentos do concreto armado.** P. 92, Bauru, 2006.

BELINGARDI, G.; CAVATORTA, M. P.; SALVATORE PAOLINO, D. **Repeated impact response of hand lay-up and vaccun infusion thick glass reinforced laminates.** International Journal of Impact Engineering, vol. 35, n. 7, p. 609-619, 2008.

BENEVOLO, Leonardo. **História da Arquitetura Moderna.** São Paulo, 1976.

BIRON, M. **Thermosets and Composites: Technical Information for Plastics Users.** Elsevier Science, 2003.

CALLISTER, W. D. J. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma Introdução.** 8ªed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CAMPOS R, J.; SILVA, L.; LEITE, W., PANZERA, T.; RIBEIRO F, S.; DAVIM, J. J. P. **Composites, Part B Eng**, vol.55 p. 338, 2013.

CARVALHO, L. M. P. **Reforzamiento de trabes de concreto pretensadas com barras de PRFC externas postensadas desviadas.** Tese de doutorado da Universidade Autónoma Metropolitana, Cidade do México, 2017.

CARVALHO, Roberto Chust; FIGUEIREDO FILHO, Jasson Rodrigues de. **Cálculo e detalhamento de estruturas de concreto armado: segundo a NBR 6118:2003**, 3ª ed, p. 368 São Carlos: EdUFSCar, 2007.

CASTRO, B. **Estudo e Caracterização Mecânica de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais.** Dissertação de mestrado. ISEP: 2013

CREMONINI, Ruy Alberto. **Análise de estruturas acabadas: contribuição para a determinação da relação entre as resistências potencial e efetiva do concreto.** Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1994.

FAKIROV, S.; BHATTACHARYYA, D. **Handbook of Engineering Biopolymers: Homopolymers, Blends and Composites.** Hanser, 2007.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE BÉTON. **FIB: Bond of reinforcement concrete**, State-of-art report. Bulletin N° 10. Lausanne, Switzerland: FIB, 2000.

GIONGO, J. S. Concreto armado: **Projeto estrutural de edifícios**. Apostila da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2007. Disponível em: Acessado dia 29/10/2021.

HERNÁNDEZ-MORENO, H., DOUCHIN, B.; COLLOMBET, F.; CHOQUEUSE, D.; DAVIES, P. "**Influence of winding pattern on the mechanical behavior of filament wound composite cylinders under external pressure.**" *Composites Science and Technology*, vol 68, p. 1015-1024, 2008.

HOLLAWAY, L. C.; LEEMING, M. B. **Strengthening of reinforced concrete structures using externally bonded FRP composites in structural and civil engineering**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, p. 327, 1999.

HUANG I.; CHEN J.; QU J. DAI Q. **Modeling for bond-constitutive relationships of PRF rebars to concrete matrix**. *Constructions and Building Materials*, Elsevier Science, China, 2020.

IRSHIDAT, M. R. **Improved bond behavior between FRP reinforcing bars and concrete with carbon nanotubes**. Department of Civil Engineering, Jordan University of Science and Technology, Jordan, 2020.

ISAAC, M.; ISHARI, O. **Engineering of Composite Material**. Oxford University Press, 2006.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**. Interciência, v.1. Rio de Janeiro, 1977.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. 4th ed. Harlow: Pearson Education, 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução de Salvador E. Giammusso. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997. 828 p.

OKAMURA Hajime; OUCHI Masahiro. **Self-Compacting Concrete**. *Journal of Advanced Concrete Technology*. Japan Concrete Institute, Japão. v. 1, n 1, p. 5- 15, abr. 2003.

OSTROWSKI, K.; DUDEK M.; SADOWSKI L. **Compressive behaviour of concrete-filled carbon fiber-reinforced polymer steel composite tube columns made of high performance concrete**, *Composite Structures*, Volume 234, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822319327084>>. Acesso em: 16 outubro 2021.

PANDITA, S.; IRFAN, M.; MACHAVARAM, V.; SHOTTON-GALE, N.; MAHENDRAN, R.; WAIT, C; PAGET, M.; HARRIS, D.; LEEK, C.; FERNANDO, G. **Clean wet-filament winding – Part 1: design concept and simulations**. *Journal of Composite Materials* vol. 47, p. 379-390, 2013.

PETERS, S. **Handbook of Composites**, 2ª ed. Chapman&Hall, London, p. 1118, 1998.

PINHEIRO, Libânio. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. USP, São Paulo, 2010.

PINHEIRO, Libânio; MUZARDO, Cassiane D. **Aderência e Ancoragem**. Departamento de Engenharia de Estruturas. USP, São Paulo, 2003.

QASEM, A.; SALLAM, Yassin S.; ELDIEN, Hany Hossam E.; AHANGARN, Beta H. **Bond-slip behavior between ultra-high-performance concrete and carbon fiber reinforced polymer bars using a pull-out test and numerical modelling**, *Construction and Building Materials*, vol. 260, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119857>>. Acesso: 05 de junho 2021.

QASEM, A.; SALLAM, Yassin S.; ELDIEN, Hany Hossam E.; AHANGARN, Beta H. **Bond-slip behavior between ultra-high-performance concrete and carbon fiber reinforced polymer bars using a pull-out test and numerical modelling**, *Construction and Building Materials*, vol. 260, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119857>>. Acesso: 05 de junho 2021.

RASHID, K.; LI, X.; XIE, Y.; DENG, J.; ZHANG, F. **Cracking behavior of geopolymer concrete beams reinforced with steel and fiber reinforced polymer bars under flexural load**, *Composites Part B* 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107777>>. Acesso: 05 de junho 2021.

ROQUE-SILVA L. R. **Análise de propriedade do concreto autoadensável com resíduo polimérico**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Itajubá, 2020.

THOMAZ, Ercio. **Trincas em Edifícios: causas, prevenção e recuperação**. São Paulo: Pini, 1989.

TUTIKIAN, B. F. **Método para a dosagem de concretos auto adensáveis**. Porto Alegre, 2004. 149 p. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós- Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

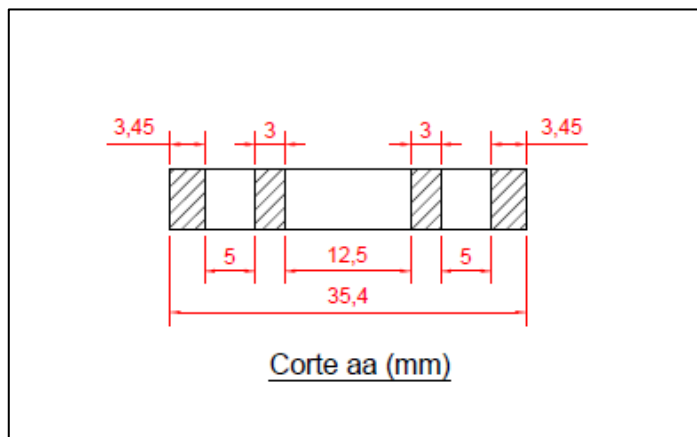
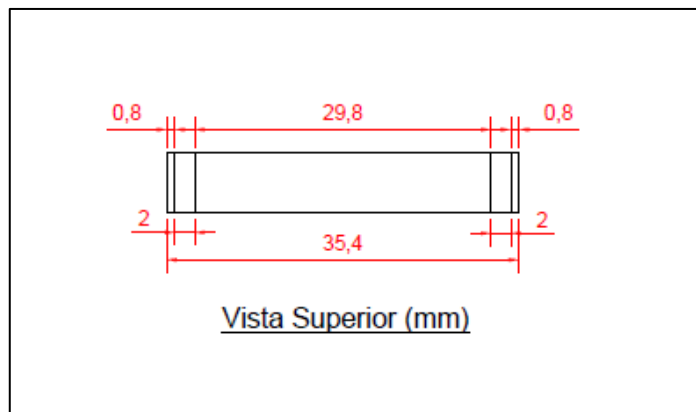
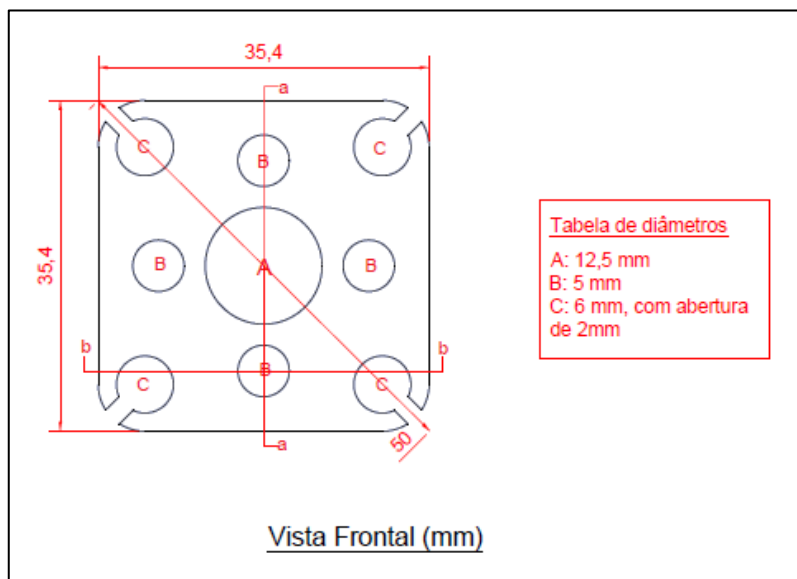
WAMBEKE, B., and SHIELD, C., “**Comprimento do Desenvolvimento de barras de polímero reforçadas com fibra de vidro em concreto**”, *ACI Structural Journal*, vol. 103, 2006.

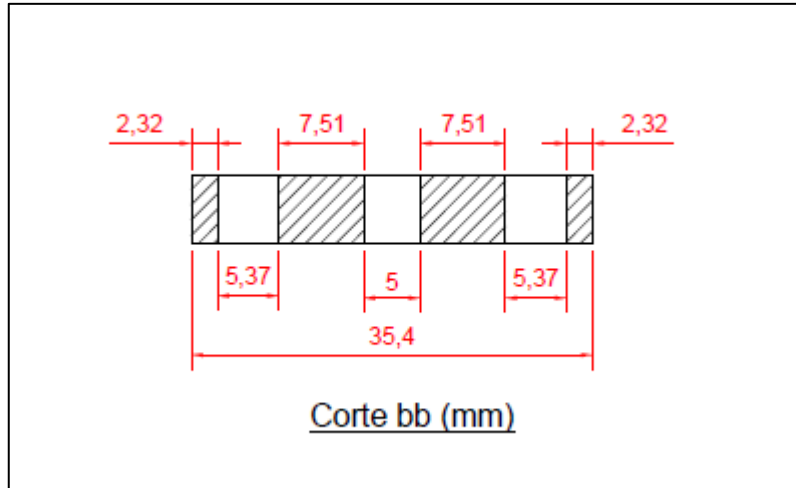
WANG, X. et al. **Analysis of climate change impacts on the deterioration of concrete infrastructure – part 1: mechanisms, practices, modeling and simulations – a review**. Canberra: CSIRO, 2010.

ZHANG X.; CHEN Y.; YE M. **Research on square concrete filled GFRP tube columns strengthened with CFRP sheet**, *Composite Structures*, vol. 275, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114407>>. Acesso em 04 de outubro de 2021.

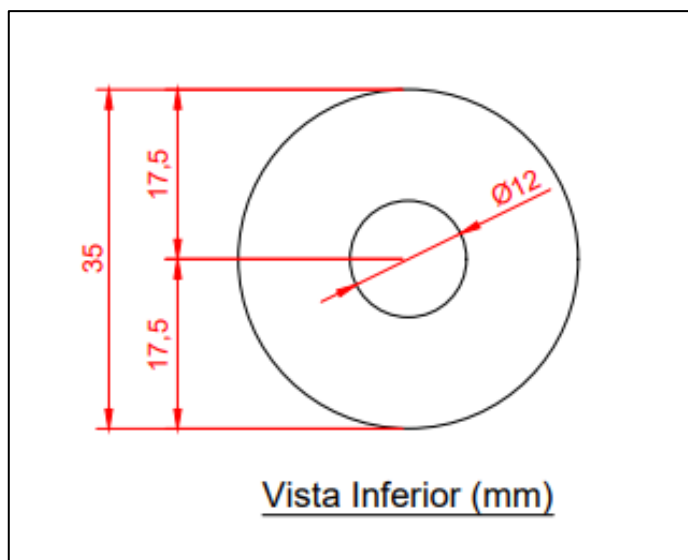
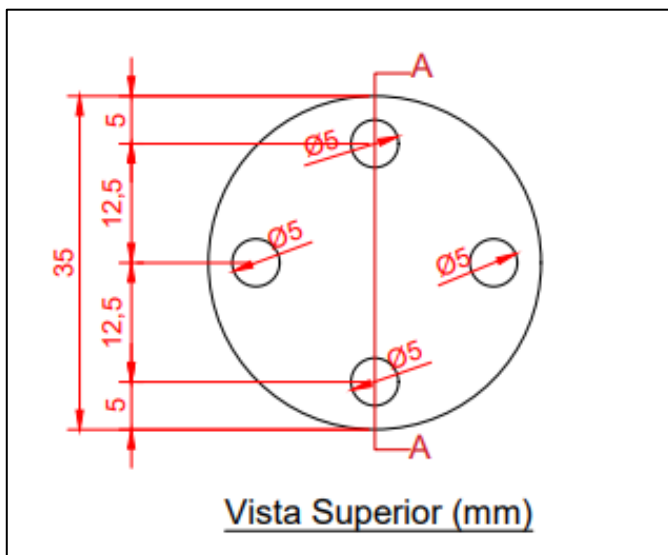
ZHAO J.; LI X.; ZHANG X. **Experimental and theoretical research on bond performance between CFRP bar and concrete under monotonic and reversed cyclic loading**, *Engineering Structures*, vol. 246, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112994>>. Acesso em 04 de outubro de 2021.

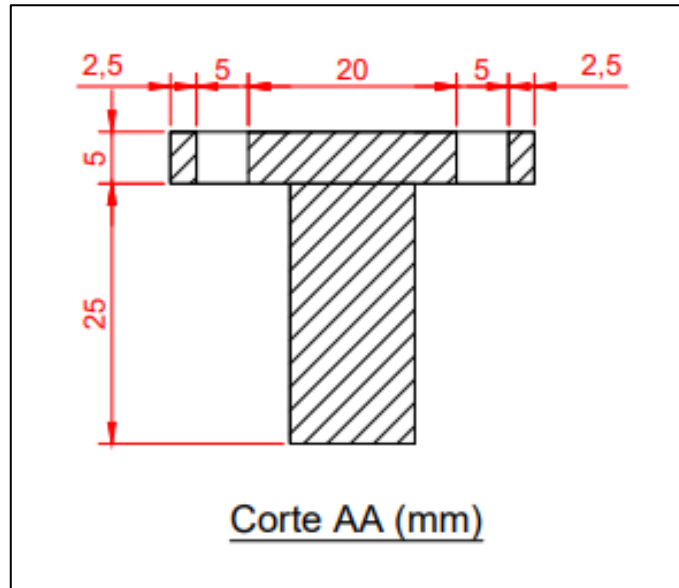
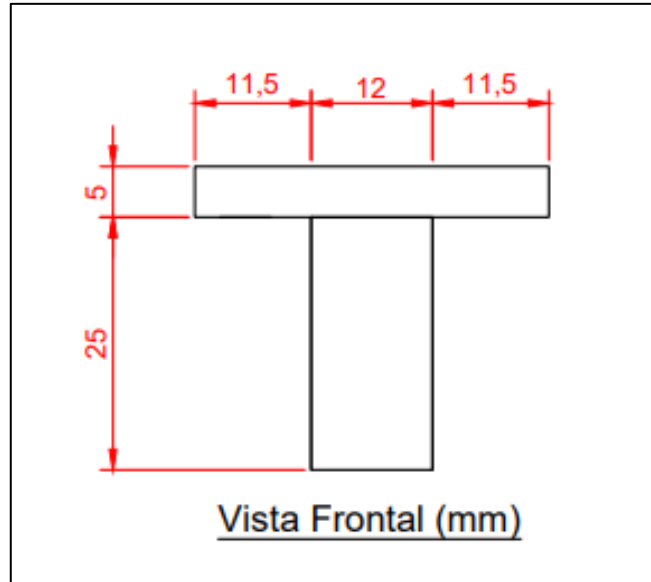
ANEXO A - DESENHO DO ESTRIBO DE FUNÇÃO NÃO ESTRUTURAL PARA BARRA DE PRFC.





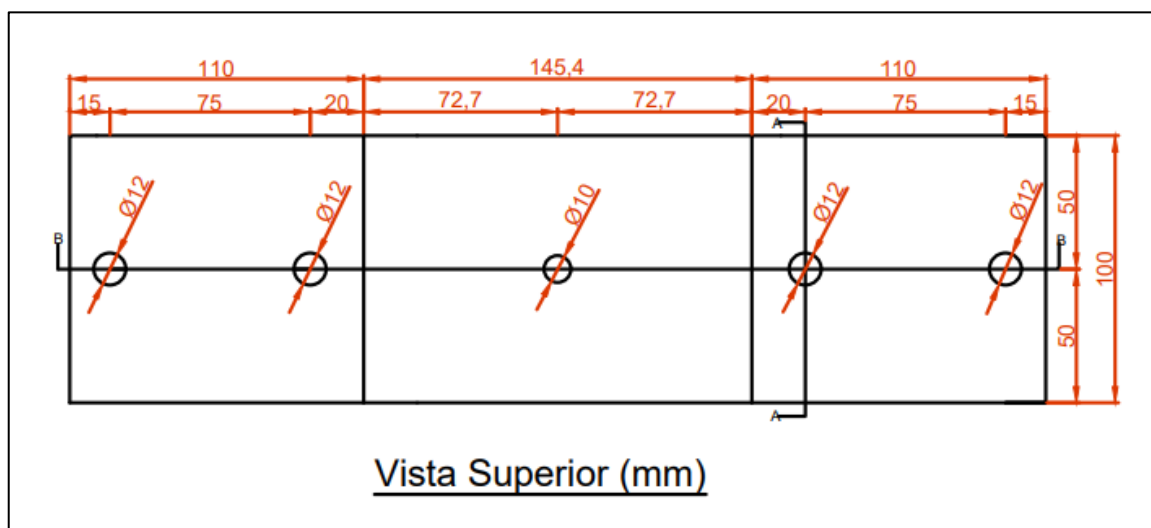
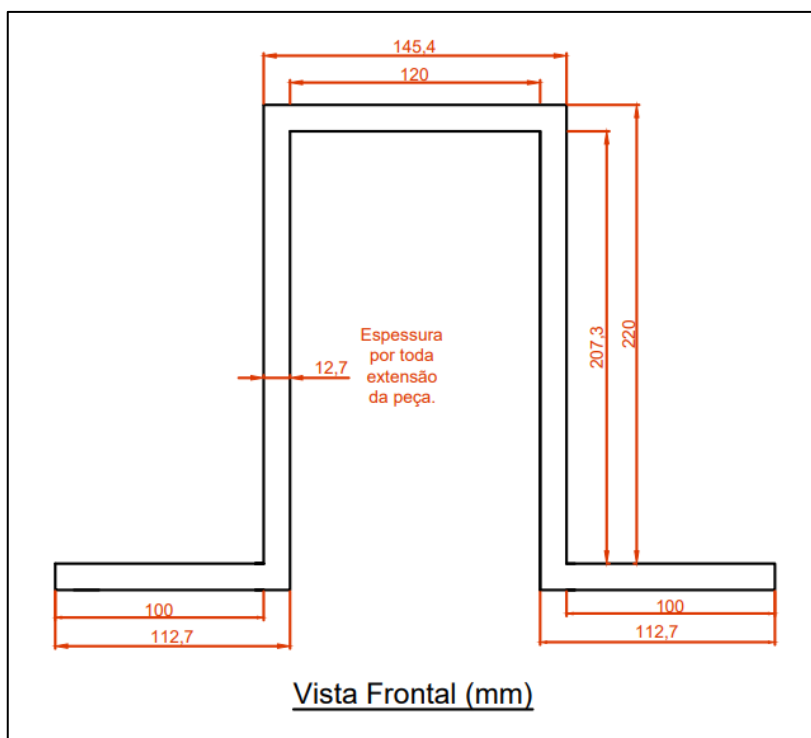
ANEXO B - DESENHO DO CONECTOR PARA MÁQUINA ENROLAMENTO FILAMENTAR.

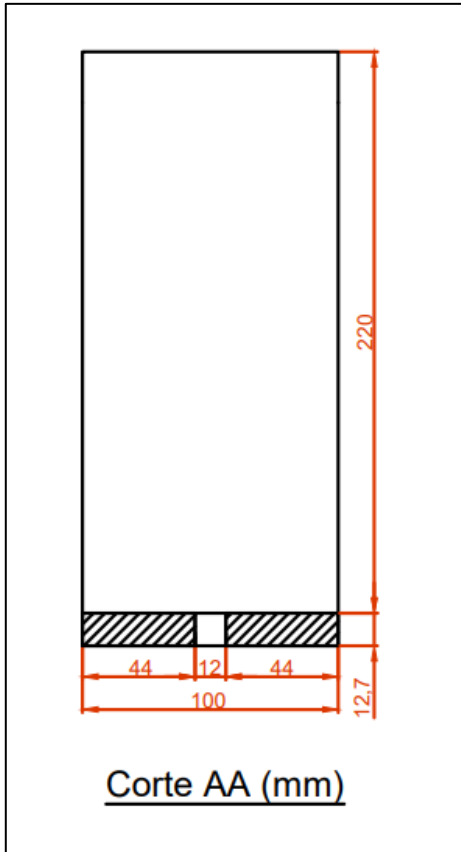




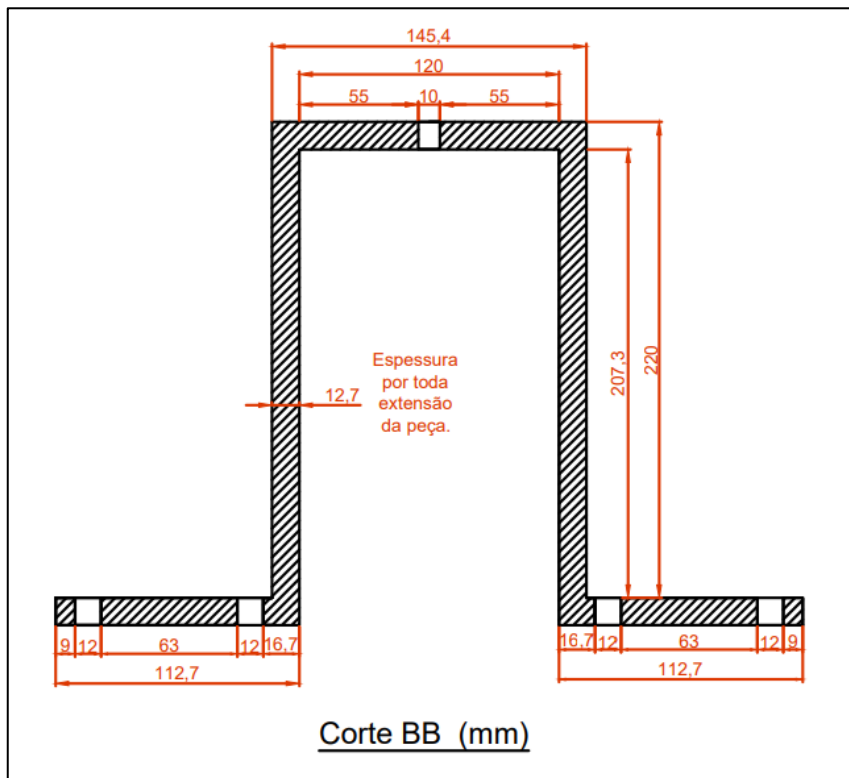
ANEXO C - DESENHOS DAS GARRAS UTILIZADAS NO ENSAIO DE ADERÊNCIA.

Garra 1:



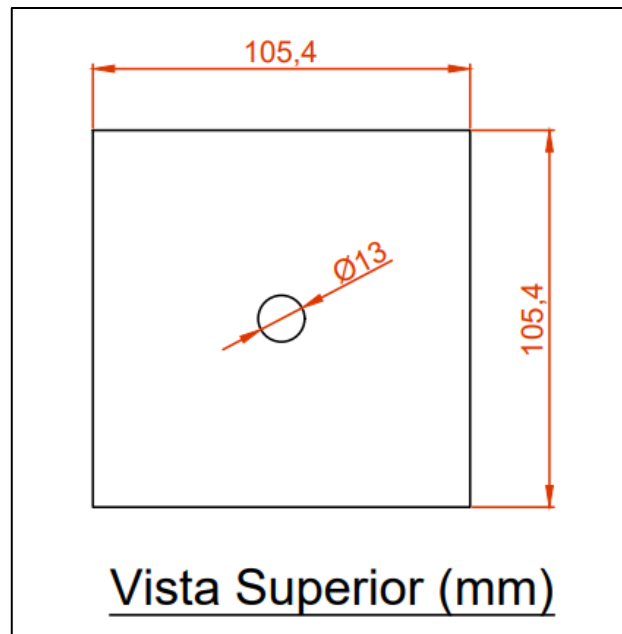
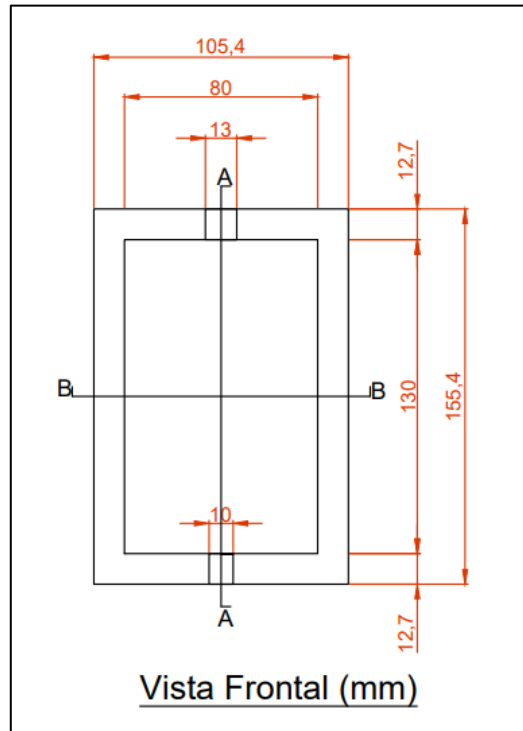


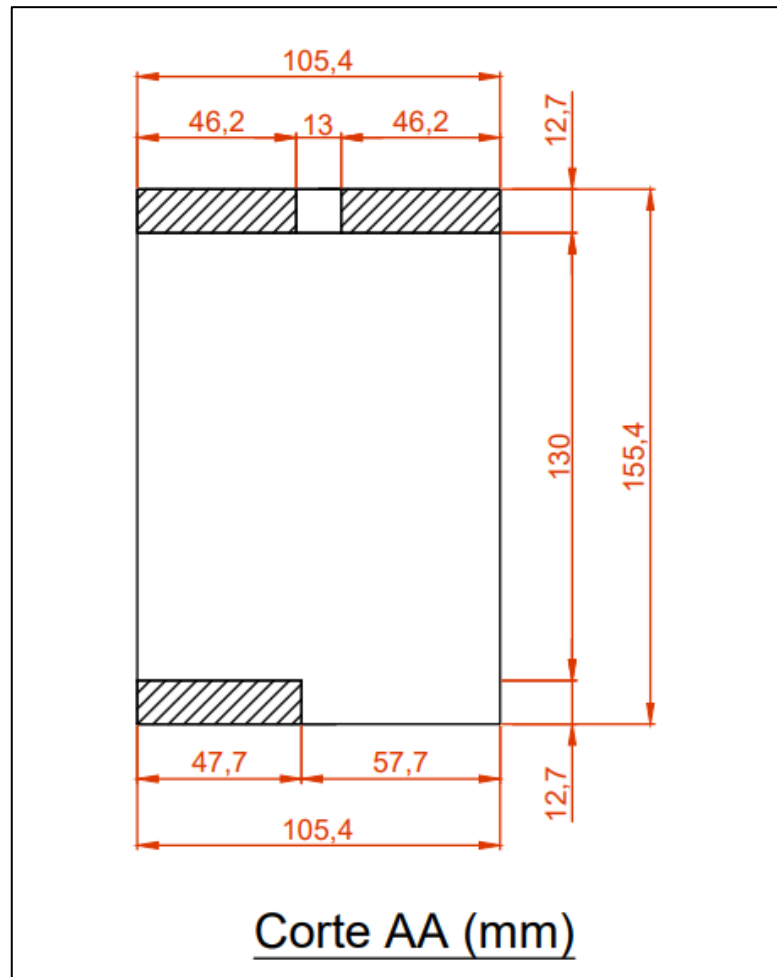
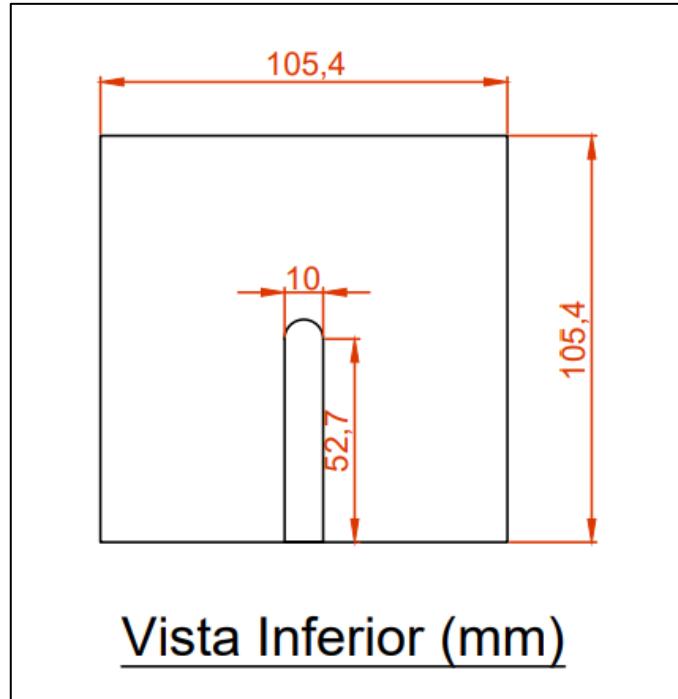
Corte AA (mm)

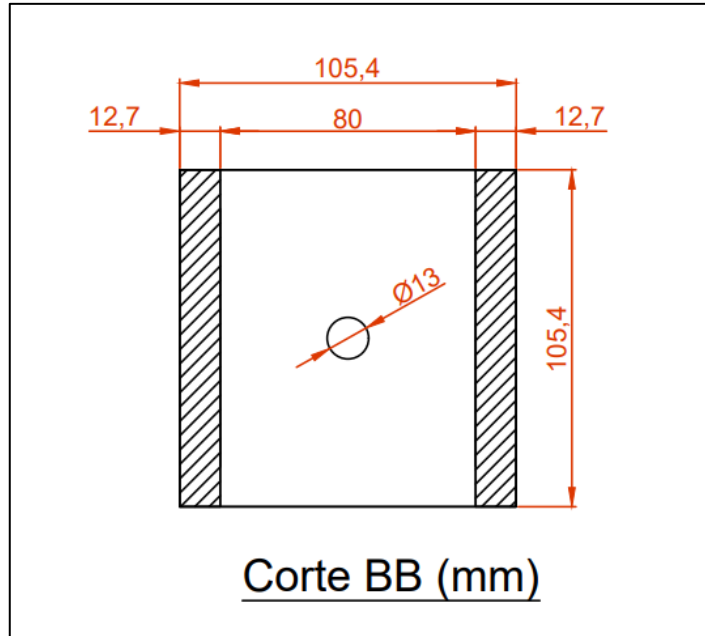


Corte BB (mm)

Garra 2:







ANEXO D - CDPS FRATURADOS DO GRUPO 3.

CDPs fraturados correspondentes à configuração G3-BA:





CDPs fraturados correspondentes à configuração G3-BC5:





CDPs fraturados correspondentes à configuração G3-BC5-RR:





CDPs fraturados correspondentes à configuração G3-BC5-RA:



