



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

Bruna de Almeida Carvalho Teixeira

**Avaliação do comportamento de vigas de concreto armadas
com barras de fibra de vidro – um estudo experimental**

Rio de Janeiro
2018

Bruna de Almeida Carvalho Teixeira

**Avaliação do comportamento de vigas de concreto armadas com barras de
fibra de vidro – um estudo experimental**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Orientadores: Profa. Dra. Regina Helena Ferreira de Souza
Profa. Dra. Ana Maria Abreu Jorge Teixeira

Rio de Janeiro
2018

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

T266 Teixeira, Bruna de Almeida Carvalho.
Avaliação do comportamento de vigas de concreto armadas com barras de fibra de vidro - um estudo experimental / Bruna de Almeida Carvalho Teixeira. – 2018.
179f.

Orientadores: Regina Helena Ferreira de Souza, Ana Maria Abreu Jorge Teixeira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Concreto armado - Teses. 3. Vigas de concreto - Teses. 4. Fibras de vidro - Teses. 5. Análise estrutural (Engenharia) - Teses. I. Souza, Regina Helena Ferreira de. II. Teixeira, Ana Maria Abreu Jorge. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 624.012.45

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Bruna de Almeida Carvalho Teixeira

Avaliação do comportamento de vigas de concreto armadas com barras de fibra de vidro – um estudo experimental

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Estruturas.

Aprovada em: 17 de abril de 2018.

Banca Examinadora:



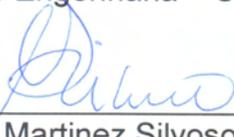
Profa. Regina Helena Ferreira de Souza – Presidente / Orientadora
Faculdade de Engenharia – UERJ



Profa. Ana Maria Abreu Jorge Teixeira – Coorientadora
Instituto Militar de Engenharia - IME



Prof. Wilson Freitas Rebello da Silva Junior
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Marcos Martinez Silvano
Faculdade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Rio de Janeiro

2018

DEDICATÓRIA

A Deus, por permitir mais esta vitória. Aos meus pais e irmã, que sempre foram meus maiores incentivadores. Ao meu marido, pela compreensão e por me encorajar a nunca desistir.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Júlio e Márcia, pelo amor, carinho, cumplicidade, ajuda nos ensaios e incentivo em todas as horas, mesmo quando desistir parecia ser a única saída.

À minha irmã, Letícia, pela amizade e por ser uma ótima auxiliar de laboratório sempre me lembrando dos equipamentos de segurança mais adequados para os ensaios.

Ao meu marido, Gabriel, pelo amor e companheirismo de todas as horas, sempre me ajudando a vencer os obstáculos e me incentivando a progredir cada vez mais.

À minha orientadora, Prof^a. Regina Helena, por toda a demonstração de carinho e união durante esta trajetória; pela excelente orientação, apontando os melhores caminhos e dando estímulo para o sucesso do desenvolvimento deste trabalho.

Ao mestre e amigo Luiz Octavio, pelos ensinamentos, solicitude e companheirismo, sendo incansável em fazer o melhor possível não só para o triunfo desta pesquisa como também para o meu crescimento pessoal.

À orientadora Ana Maria pelos conhecimentos e pela ajuda dispensada.

Aos professores, em especial ao prof. Antônio Inácio e profa. Maria Elizabeth, pelos ensinamentos, ajuda prestada e pelo tempo dedicado, dentro e fora do laboratório.

Aos meus colegas de mestrado pelo companheirismo e pelo inegável apoio quando necessário, em especial aos amigos Paulo Barreto, Keylla Letícia e Beatriz Bravin e Beatriz Macedo.

À UERJ, em especial ao programa PGECIV, por me acolher como aluna do curso de Mestrado em Engenharia.

Ao IME pela parceria e disponibilidade em apoiar esta pesquisa.

À FAPERJ pelo apoio financeiro.

À Stratus pela parceria e pelo incentivo na realização de novas pesquisas com materiais GFRP.

À todos aqueles, que embora não citados nominalmente, contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

Nunca saberemos o quão forte somos até que ser forte seja a única escolha.

Autor desconhecido

RESUMO

TEIXEIRA, Bruna de Almeida Carvalho. *Avaliação do comportamento de vigas de concreto armadas com barras de fibra de vidro* – um estudo experimental. 2018. 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

Motivados pelo alcance de maior durabilidade em estruturas de concreto, a utilização de polímeros reforçados com fibra, FRP, se destaca como uma alternativa viável na construção civil. Dentre os produtos feitos com esta tecnologia, destacam-se as barras para armadura de estruturas de concreto. No âmbito mundial, estas barras são produzidas com fibras de vidro, carbono, aramida e, mais recentemente, basalto. Esta tecnologia é de certa forma nova no Brasil, e como consta na literatura técnica, o processo de fabricação das barras interfere diretamente no seu comportamento estrutural. Na revisão bibliográfica observou-se carência de estudos no Brasil voltados para a análise do comportamento ao cisalhamento de vigas fletidas totalmente armadas com barras de GFRP. Assim, este trabalho é considerado pioneiro na análise deste aspecto e utilizando material de fabricação nacional. Para tal, foram variadas a quantidade de armaduras longitudinais e transversais e os resultados comparados a uma viga com armadura ordinária de aço. São apresentados os comportamentos quanto à relação momento-curvatura, momento-deformação, carga-flecha e carga-deformação nos estribos. Como já descrito na literatura, os ensaios mostram que o desempenho das armaduras de GFRP é afetado pelo seu baixo módulo de elasticidade, pela configuração superficial da barra e pela aderência ao concreto. Mas que ainda assim, os resultados exibidos mostraram homogeneidade e correspondência à previsão teórica. Mais além, observa-se que o aumento das taxas de armadura melhora o desempenho à flexão e ao cisalhamento dos elementos em relação a diversos aspectos. De uma maneira geral, pode-se dizer que o uso de armaduras de GFRP em vigas de concreto armado é viável, desde que os requisitos oriundos das características mecânicas dessas armaduras sejam levadas em consideração em projeto.

Palavras-chave: Armadura não metálica; Fibra de vidro; Concreto armado; GFRP; Análise experimental.

ABSTRACT

TEIXEIRA, Bruna de Almeida Carvalho. Evaluation of concrete beams reinforced with glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars – an experimental study. 2018. 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

Composites made of Fiber Reinforced Polymers (FRP) are a viable alternative in civil construction industry, due its excellent durability. Among several products made with this technology, non-metallic bars, made from glass, aramid, carbon and basalt fibers, for reinforcing concrete structures has being successfully worldwide used for over twenty years. This technology is somewhat new in Brazil. As seen in the technical literature, its fabrication process is mandatory in the further mechanical behaviour. Besides the bibliography research, this work focuses on the experimental analysis of four isostatic beams totally reinforced (longitudinal and transversally) with glass FRP bars. As a result of an extensive bibliographic review it was observed that in Brazil there is a lack of studies aimed at the analysis of shear behaviour of fully reinforced beams with GFRP bars. Thus, this work is considered pioneer in the analysis of this aspect and using material of national manufacture. In the specimens tested, the longitudinal and transversal ratios of GFRP reinforcement are the main assessed parameters. The experimental results achieved are compared to theoretical predictions and to the experimental results of an ordinary-steel reinforced concrete beam. Moment–curvature, load–deflection, moment–deformation, and stirrups load–deformation curves are presented. As seen in the literature, the experiments show that the performance of GFRP reinforced concrete beams are influenced by the relatively low elastic modulus of the reinforcement, the shape of the bars and the adhesion to concrete characteristics. The results shows, also, that the increase of reinforcement ratios improves the flexural and transverse behaviour. As a general remark, one can say that the use of GFRP reinforcement in concrete beams is a viable way to replace steel reinforcement, as long as its special characteristics are taken in to account in engineering projects.

Keywords: Non-metallic reinforcement; Glass fiber; Reinforced concrete; GFRP; Experimental analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração esquemática da interface dos compósitos, adaptada de [7].	26
Figura 2 - Curva tensão x deformação comparativa entre matriz, fibra e compósitos, adaptada de [10].	27
Figura 3 - Vários tipos e formas de compósitos de FRP usados na indústria da construção [10].	27
Figura 4 - Curva tensão x deformação de diversas fibras FRP [6].	32
Figura 5 - Processo de pultrusão [17]	33
Figura 6 – Processo de impregnação da resina nas fibras – Foto feita durante visita técnica à Stratus em 07/03/18.	33
Figura 7 – (a) defeitos encontrados nas bordas de barras GFRP; (b) detalhe em zoom da figura 7a [18].	34
Figura 8 - (a) defeitos descontínuos e; (b) defeitos contínuos encontrados nas seções de barras GFRP [18].	34
Figura 9 – Superfícies de barras GFRP [6].	35
Figura 10 – Diagrama tensão x deformação comparativo das barras e cordoalhas de aço disponíveis no mercado em relação às barras de FRP [19].	38
Figura 11 – barra de fibra de vidro após o teste de arrancamento [20].	41
Figura 12 – Ruptura por cisalhamento nas camadas superficiais das barras GFRP [20].	42
Figura 13 – Detalhe de posicionamento e dimensionamento das vigas de projeto.	49
Figura 14 – Rupturas características de flexão.	51
Figura 15 – Rupturas características de cisalhamento.	52
Figura 16 – Detalhamento das barras nas vigas: (a) seção longitudinal; (b) seção transversal.	55
Figura 17 - Comparação entre os dados experimentais e calculados por diversos códigos para diferentes carregamentos (a) para $0,3.M_n$ (b) para $0,67.M_n$	56
Figura 18 – Detalhes dos estribos: (a) de GFRP; (b) de aço.	58
Figura 19 – Detalhe geométrico do projeto.	59
Figura 20 – Ruptura das vigas ensaiadas.	60
Figura 21 – Padrões de fissuras e ângulos de inclinação das vigas ensaiadas.	61
Figura 22 - Configuração do ensaio e localização dos extensômetros	63

Figura 23 – Rigidez axial da barra VS rigidez à flexão da viga após fissuração.	65
Figura 24 – Ruptura equilibrada.	68
Figura 25 – Ruptura no concreto.	69
Figura 26 – Detalhamento das vigas e localização das barras instrumentadas para os ensaios à flexão.	80
Figura 27 – Modelo de carregamento para ensaio de flexão em quatro pontos.	85
Figura 28 – Detalhamento ensaio de flexão em quatro pontos.	85
Figura 29 - Tipos de estribos utilizados: (a) enrolado com Ø 6,3 mm; (b) enrolado com Ø 8,2 mm; (c) trançado com Ø 9,6 mm; e (d) trançado com Ø 7,4 mm.	88
Figura 30 – Detalhamento das vigas V1A e V1B.	89
Figura 31 – Armadura da viga V1A.	89
Figura 32 – Detalhamento das vigas V2A e V2B.	90
Figura 33 – Armadura da viga V2A.	90
Figura 34 – Detalhamento da viga VR1.	91
Figura 35 – Armadura da viga VR1.	91
Figura 36 – Espaçadores de plástico.	92
Figura 37 – Adensamento da mistura com vibrador.	93
Figura 38 – Câmara úmida.	95
Figura 39 – Detalhe de comprimento de fixação dos tubos nas barras de GFRP.	97
Figura 40 – Protótipos de barras de GFRP preparados para ensaio tração.	97
Figura 41 – Máquina universal para ensaio de tração.	98
Figura 42 – Detalhes do escorregamento das barras de GFRP no ensaio de tração.	99
Figura 43 – Forma executada com dimensões iniciais.	100
Figura 44– Alterações nas formas: (a) aumento do comprimento, (b) aumento da largura e (c) aumento da altura.	101
Figura 45 – Esquema de instrumentação da viga V1A.	102
Figura 46 – Esquema de instrumentação da viga V1B.	103
Figura 47 – Esquema de instrumentação da viga V2A.	104
Figura 48 – Esquema de instrumentação da viga V2B.	105
Figura 49 – Esquema de instrumentação da viga VR1.	106
Figura 50 – Esquema de instrumentação da viga V1B.	107
Figura 51 – Materiais para instrumentação das barras.	108
Figura 53 – Barras desbastadas: (a) de aço, (b) de GFRP.	108

Figura 53 – Etapa de soldagem dos extensômetros.	109
Figura 54 – Deflectômetros e relógio analógico instalados.	110
Figura 55 – Detalhe das cargas aplicadas.	111
Figura 56 – Instrumentação de cisalhamento da viga V1A (ef = extensômetro no estribo de GFRP; ec = extensômetro no concreto)	123
Figura 57 – Instrumentação de cisalhamento da viga V1B (ef = extensômetro no estribo de GFRP; ec = extensômetro no concreto).	124
Figura 58 – Instrumentação de cisalhamento da viga V2A (ef = extensômetro no estribo de GFRP; ec = extensômetro no concreto).	125
Figura 59 – Instrumentação de cisalhamento da viga V2B (ef = extensômetro no estribo de GFRP; ec = extensômetro no concreto)	126
Figura 60 – Instrumentação de cisalhamento da viga VR1 (ef = extensômetro no estribo de GFRP; ec = extensômetro no concreto)	128
Figura 61 – Padrão de fissuração na ruptura - V1A.	130
Figura 62 - Padrão de fissuração na ruptura - V1B.	131
Figura 63 – Padrão de fissuração na ruptura – V2A.	131
Figura 64 – Padrão de fissuração na ruptura – V2B.	132
Figura 65 – Padrão de fissuração na ruptura – VR1.	132
Figura 66 - Ruptura da armadura longitudinal de compressão (esquerda) e ruptura dos estribos (direita) da viga V1B.	134
Figura 67 – Armadura aparentemente íntegra após a ruptura.	134
Figura 68 – Detalhe do deslocamento vertical das armaduras longitudinais superiores (V2A à esquerda e V1B à direita).	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedade das resinas termorrígidas, adaptado.....	29
Tabela 2 – Propriedade das fibras de compósitos FRP – adaptado.	32
Tabela 3 – Densidade típica das barras GFRP comparadas com as de aço (kg/m^3) – adaptado.	37
Tabela 4 – Comparação de propriedades mecânicas entre barras de GFRP e de aço.	38
Tabela 5 – Resistência à tração das barras FRP de acordo com o diâmetro.....	39
Tabela 6 – Propriedades físicas das barras de GFRP x Aço.	45
Tabela 7 – Detalhe dos resultados dos ensaios.	50
Tabela 8 – Programa experimental	55
Tabela 9 – Característica das vigas ensaiadas – adaptado.....	64
Tabela 10 – Propriedade das barras utilizadas – adaptado.	64
Tabela 11 – Resultados dos ensaios – adaptado.....	66
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de tração das barras de GFRP, adaptado.....	67
Tabela 13 – Detalhes do ensaio – adaptado.....	68
Tabela 14 – Resultado dos ensaios – adaptado.	70
Tabela 15 – Determinação da parcela V_c da resistência ao cisalhamento por diversas normas.....	77
Tabela 16 – Determinação da parcela V_f da resistência ao cisalhamento por diversas normas.	78
Tabela 17 – Características dos protótipos do ensaio.....	82
Tabela 18 – Comparativo das taxas de armadura referente às vigas ensaiadas.....	92
Tabela 19 – Informações técnicas do aditivo.	94
Tabela 20 - Resumo dos resultados de caracterização do concreto.....	95
Tabela 21 – Resultado dos ensaios de tração do aço.....	96
Tabela 22 – Propriedades das barras GFRP fornecidos pelo fabricante.	96
Tabela 23 – Resultados dos ensaios de queima.....	100
Tabela 24 – Informações dos extensômetros utilizados.....	107
Tabela 25 – Comparação das previsões analíticas à flexão com os resultados experimentais.	112
Tabela 26 – Deformações máximas.....	119

Tabela 27 – Deformações máximas das armaduras longitudinais nos apoios das vigas.....	122
Tabela 28 – Deformação máxima nos estribos das vigas.	129
Tabela 29 – Carga x abertura máxima de fissuras na flexão das vigas.	133

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1–Comparação entre ao esforços cortante resistente obtido pelas normas e os resultados experimentais.....	113
Gráfico 2 – Carga x flecha no meio do vão da viga V1A.....	114
Gráfico 3 – Carga x flecha no meio do vão da viga V1B.....	114
Gráfico 4 – Carga x flecha no meio do vão da viga V2A.....	115
Gráfico 5 – Carga x flecha no meio do vão da viga V2B.....	115
Gráfico 6 – Carga x flecha no meio do vão da viga VR1.....	116
Gráfico 7 – Momento x deformação no meio do vão da viga V1A.....	117
Gráfico 8 – Momento x deformação no meio do vão da viga V1B.....	117
Gráfico 9 – Momento x deformação no meio do vão da vigaV2A.....	118
Gráfico 10 – Momento x deformação no meio do vão da viga V2B.....	118
Gráfico 11 – Momento x deformação no meio do vão da viga VR1.	119
Gráfico 12 –Momento fletor no meio do vão x deformação no apoio da viga V1A.	120
Gráfico 13 - Momento fletor no meio do vão x deformação nos apoios da viga V1B.	120
Gráfico 14 - Momento fletor no meio do vão x deformação nos apoios da viga V2A.	121
Gráfico 15 - Momento fletor no meio do vão x deformação nos apoios da viga V2B.	121
Gráfico 16 –Momento fletor no meio do vão x deformação nos apoios da viga VR1.	122
Gráfico 17 - Deformação dos estribos x esforço cortante na viga V1A.	123
Gráfico 18 - Deformação dos estribos x esforço cortante na viga V1B.	124
Gráfico 19 - Deformação dos estribos x esforço cortante,dir na viga V2A.	125
Gráfico 20 - Deformação dos estribos x esforço cortante,esq na viga V2A.	126
Gráfico 21 - Deformação dos estribos x esforço cortante,dir na viga V2B.	127
Gráfico 22 - Deformação dos estribos x esforço cortante,esq na viga V2B.	127
Gráfico 23 – Deformação dos estribos x esforço cortante,esq na viga VR1.	128
Gráfico 24 - Deformação dos estribos x esforço cortante,dir na viga VR1.....	129
Gráfico 25- Comparação da curva carga x deslocamento entre os grupos 1 e 2....	136

Gráfico 26 – Comparação da curva carga x deslocamento entre as vigas do grupo 2 com a VR1.....	137
Gráfico 27 - Comparação da curva momento x deformação de tração no meio do vão entre as vigas do grupo 1 e 2.....	138
Gráfico 28 - Comparação da curva momento x deformação de compressão no meio do vão entre as vigas do grupo 1 e 2.....	138
Gráfico 29 - Comparação da curva momento x deformação de tração no apoio entre as vigas do grupo 1 e 2.....	139
Gráfico 30 - Comparação da curva momento x deformação de tração no apoio entre as vigas do grupo 2 e a VR1.....	140
Gráfico 31 - Comparação da curva deformação x cortante entre as vigas do grupo 1 e 2.....	141
Gráfico 32 - Comparação da curva deformação x cortante entre as vigas do grupo 2 e a VR1.....	142
Gráfico 33 – Comparação da curva carga x deslocamento entre os resultados teóricos e experimentais dos grupos 1 e 2.....	143
Gráfico 34 - Comparação da curva momento x curvatura entre os resultados teóricos e experimentais dos grupos 1 e 2.....	144

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AFRP	<i>Aramid Fiber Reinforced Polymer</i> (Polímero Reforçado com Fibra de Aramida)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono)
CNR	Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction
CP	Cimento Portland
CSA	The Canadian Standards Associations
Vidro - E	<i>Eletrical Glass</i>
Vidro - S	<i>Structural Glass</i>
Vidro - AR	<i>Alkali Resistant Glass</i>
EUA	Estados Unidos das Américas
FIB	<i>Fédération Internationale du Béton</i>
FRP	<i>Fiber Reinforced Polymer</i>
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Polymer</i> (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro)
HM	<i>High Modulus</i> (Alto Módulo)
HS	<i>High Strength</i> (Alta Resistência)
IME	Instituto Militar de Engenharia
LEC	Laboratório de Engenharia Civil da UERJ
NBR	Norma Brasileira
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UV	Ultra Violeta

LISTA DE SÍMBOLOS

A_f	Área da armadura de fibra
A_s	Área de armadura de aço
b	Largura
b_w	Largura de alma
c	Distância da extremidade mais comprimida até a linha neutra
d	Altura útil da viga
Δ	Deflexão; flecha.
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
E_f	Módulo de elasticidade característicos do FRP
E_{fk}	Módulo de elasticidade característicos do FRP
h	Altura da viga
I_{cr}	Momento de inércia fissurado
I_e	Momento de inércia efetivo
I_g	Momento de inércia da seção bruta
L	Comprimento do vão da viga
M_a	Momento da carga de serviço na seção crítica
M_{cr}	Momento de fissuração
\emptyset	Diâmetro
$2 Pr$	<i>Leitura da carga aplicada na máquina no início da fissuração</i>
$2 Pu$	<i>Leitura da carga aplicada na máquina no momento da ruptura</i>
pH	Potencial Hidrogeniônico
s	Espaçamento entre estribos
T_g	Temperatura de transição vítrea
V	Esforço cortante
V_c	Resistência ao cisalhamento devida aos mecanismos complementares de treliça
V_f	Volume de fibra
V_f	Resistência ao cisalhamento devida à contribuição da armadura de fibra
V_m	Volume de matriz polimérica
V_s	Resistência ao cisalhamento devida a contribuição da armadura de aço
w	Abertura de fissuras

α_c	<i>Parâmetro de redução da resistência do concreto na compressão</i>
β_1	<i>fator considerado como 0,85 para a resistência do concreto $f_c \geq 28$ MPa. Para resistências acima de 28MPa, este fator é reduzido gradativamente a uma razão de 0,05 para cada 7 MPa. Não deve ser menor que 0,65.</i>
ρ_f	Taxa geométrica da armadura longitudinal - GFRP
ρ_{fb}	Taxa geométrica balanceada de armadura - GFRP
ρ_{fw}	Taxa geométrica da armadura transversal - GFRP
ϵ_{cu}	Deformação última no concreto
ϵ_{fu}	Deformação última na barra de GFRP
ϵ_u	Deformação última na barra de aço
f_c	Resistência à compressão do concreto
f_{ck}	<i>Resistência característica à compressão do concreto</i>
f_{ct}	Resistência à tração do concreto
f_{fu}	Resistência à tração da barra de GFRP
f_{fk}	<i>Resistência característica à tração da barra de GFRP</i>
γ_c	Massa específica do compósito (GFRP)
γ_f	Massa específica da fibra
γ_m	Massa específica da matriz polimérica
λ	Índice de esbeltez

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	21
1 GENERALIDADES	24
1.1 Breve Histórico	24
1.2 Características dos Materiais	25
1.2.1 Materiais Compósitos	25
1.2.2 Barras de GFRP	27
1.2.2.1 Matriz Polimérica	28
1.2.2.2 Fibra	31
1.2.2.3 Processo de fabricação	32
1.3 Propriedades das barras GFRP	35
1.3.1 Geometria	35
1.3.2 Densidade	36
1.3.3 Condutividade eletromagnética	37
1.3.4 Comportamento à tração	37
1.3.5 Comportamento ao cisalhamento	39
1.3.6 Comportamento à compressão	40
1.3.7 Aderência ao concreto	40
1.3.8 Fluência	42
1.3.9 Fadiga	44
1.3.10 Resistência à umidade	44
1.3.11 Resistência ao fogo e variações de temperatura	44
1.3.12 Álcalis e carbonatação	46
1.3.13 Radiação ultravioleta	46
1.3.14 Durabilidade	47
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	48
2.1 Trabalhos internacionais	48
2.1.1 Flexão e Cisalhamento	48
2.1.1.1 Nanni (1993)	48
2.1.1.2 Ashour (2006)	49
2.1.1.3 Reis (2006)	53
2.1.1.4 Kassem <i>et al.</i> (2011)	54

2.1.1.5 Ahmed, E. A. et al.(2010)	58
2.1.1.6 Alam e Hussein (2011)	62
2.1.1.7 Silva (2014)	65
2.1.1.8 Goldston et al (2016)	66
2.1.2 Regulamentações internacionais de projeto.....	70
2.1.2.1 Comportamento à flexão simples	72
2.1.2.2 Comportamento ao cisalhamento.....	74
2.1.2.3 Comportamento em serviço	79
2.2 Trabalhos nacionais.....	80
2.2.1 Tavares (2006)	80
2.2.2 Couto (2007)	81
2.3 Conclusões da Revisão Bibliográfica.....	83
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	84
3.1 Determinação dos modelos experimentais.....	86
3.1.1 Detalhamento	88
3.1.2 Taxa de armadura	91
3.2 Caracterização dos materiais.....	92
3.2.1 Concreto.....	92
3.2.2 Aço	95
3.2.3 GFRP	96
3.2.3.1 Ensaio de tração	96
3.2.3.2 Ensaio de quiema.....	99
3.2.4 Forma	100
3.3 Instrumentação.....	101
3.3.1 Extensômetros elétricos de resistência	101
3.3.2 Deflectômetros	110
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	111
4.1 Apresentação dos resultados experimentais	111
4.1.1 Cargas últimas	112
4.1.2 Deslocamentos no meio do vão	113
4.1.3 Deformação de tração e compressão	116
4.1.4 Deformação de tração longitudinal próxima aos apoios.....	119
4.1.5 Deformação dos estribos ao cisalhamento.....	123
4.1.5 Fissuração.....	130

4.1.6 Modos de ruptura	133
4.2 Análise dos resultados experimentais	135
4.2.1 Análise dos deslocamentos.....	135
4.2.2 Análise das Deformações no meio do vão	137
4.2.3 Análise das Deformações das barras longitudinais próximo aos apoios	139
4.2.4 Análise das Deformações dos estribos	140
4.2.5 Análise teórica x experimental.....	142
5 CONCLUSÕES	145
REFERÊNCIAS.....	148
ANEXOS	154

INTRODUÇÃO

Este trabalho trata de uma investigação experimental que teve por objetivo estudar o comportamento de vigas de concreto armadas totalmente (armadura longitudinal e transversal) com barras não-metálicas de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP).

Estruturas de concreto armado ou protendido são, em geral, bastante duráveis, desde que sejam bem projetadas, dimensionadas e executadas, e que, durante a fase de operação, sejam vistoriadas, conservadas e reparadas, quando necessário. Contudo, há certos tipos de estruturas, que pelo ambiente em que estão inseridas, possuem um risco maior de serem afetadas por agentes agressivos e de apresentarem patologias severas e comprometedoras em especial, a corrosão de suas armaduras. Estruturas portuárias e industriais são exemplos de elementos sujeitos a este tipo de degradação.

Ao longo dos anos, diversas ideias foram desenvolvidas a fim de melhorar o comportamento das armaduras à corrosão, tais como barras revestidas com resina epóxi, armaduras e cordoalhas galvanizadas para concreto protendido; armaduras revestidas com combinação de zinco e resina epóxi; armaduras com revestimento inoxidável e armaduras de aço inoxidável [1].

Outra alternativa viável é a utilização de barras não metálicas como armaduras para as estruturas de concreto. Tal material compósito é constituído de uma matriz polimérica impregnada com fibras contínuas e alinhadas, que podem ser de vidro, carbono, aramida e, mais recentemente, basalto. Contudo, estas armaduras possuem características físicas, químicas e mecânicas que as diferem das barras convencionais de aço.

Em se tratando de um material relativamente novo, há ainda fértil campo de pesquisa e desenvolvimento. Entretanto, nos países mais desenvolvidos tem-se verificado um aumento da demanda por barras de GFRP por causa de suas muitas aplicações bem sucedidas em lajes de pontes, em paredes de contenção, em pisos de estacionamento, em pavimentos contínuos e outras e, também, devido aos custos mais baixos das barras de GFRP em comparação com as barras poliméricas reforçadas com fibra de carbono (CFRP) e com fibra de aramida (AFRP), tornando o uso de GFRP mais atraente para o setor de construção [2] [3].

Este trabalho realiza uma investigação experimental visando o estudo do comportamento no estado limite último de flexão e de cisalhamento de vigas de concreto totalmente armadas com armadura não metálica, isto é, tanto na armadura longitudinal quanto na armadura transversal, usando barras de GFRP de fabricação nacional.

É importante destacar a relevância deste trabalho que agrega conhecimento na área de compósitos e contribui para o desenvolvimento de uma nova tecnologia na indústria brasileira.

Objetivos e Motivações.

O presente trabalho tem por objetivo estudar o comportamento de barras de fibra de vidro GFRP, direcionando essa pesquisa para suas características físicas e mecânicas; além de analisar seu comportamento quando utilizadas como armaduras de vigas em concreto armado submetidas à flexão e ao cisalhamento.

Mais além, o estudo tem o propósito de incrementar algumas análises encontradas na literatura e estudar a viabilidade técnica de sua utilização como alternativa ao concreto com armadura tradicional de aço.

Estrutura da dissertação

A presente dissertação está disposta em cinco capítulos.

O primeiro capítulo aborda as características físicas e mecânicas no material a ser estudado: barras de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP).

O segundo capítulo consiste no estudo bibliográfico de trabalhos relacionados ao uso de barras não metálicas como armaduras de vigas de concreto armado, analisando seu comportamento à flexão e ao cisalhamento. Além disso, são apontadas as regulamentações internacionais disponíveis hoje sobre o material, uma vez que ainda não há normativas técnicas referente ao GFRP no Brasil.

Após as análises das características do material e de suas publicações, apresentam-se no capítulo três todas as etapas do estudo experimental realizado nesta dissertação.

O capítulo quatro consiste na apresentação de dados dos ensaios realizados bem como suas análises, comparando valores teóricos com experimentais, além dos

resultados de uma viga normalmente armada com barras metálicas vs. vigas armadas com barras GFRP.

Finalmente no capítulo cinco são apresentadas as conclusões do estudo e sugestões para aprimoramento de resultados em trabalhos futuros.

1 GENERALIDADES

1.1 Breve Histórico

Os materiais compósitos com fibra de vidro vêm sendo usados pela indústria aeronáutica desde a Guerra Fria, dada a necessidade de aeronaves mais resistentes e menos pesadas. A partir de então, outros setores como o automobilístico e da construção civil também iniciaram estudos e técnicas de aprimoramento para fazerem uso destes materiais [4].

Com relação à sua utilização na engenharia civil, sabe-se que, embora desde a década de 30 o polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) fosse considerado como um substituto em potencial para o aço em armaduras de concreto, os estudos iniciais notaram problemas relacionados à ancoragem das barras de GFRP no concreto. Segundo RUBINSKY, alguns projetos com a utilização de barras GFRP foram propostos com o intuito de solucionar estes problemas. Contudo o alto custo de produção e execução deste, inviabilizaram sua utilização àquela época.[5]

Pesquisas isoladas foram realizadas nos anos 60 nos EUA e nos anos 70 na Europa e no Japão; porém, somente no final da década de 80 é que as pesquisas começaram a atrair investidores e pesquisadores em todo o mundo, sendo sua comercialização iniciada apenas há aproximadamente vinte anos [6].

Com o crescimento das redes hospitalares na América do Norte no início dos anos 80, a necessidade de estruturas de baixa condutividade magnética foi aumentando, sendo necessário um novo elemento de armadura, já que as barras de aço não atendiam bem a esta imposição. A partir deste momento as barras de GFRP passaram a ser estudadas de maneira mais meticulosa e profunda. Em virtude de seu aprimoramento no mercado da engenharia, outros tipos de construção, como obras costeiras e *hospitalares*, começaram a ser projetados com materiais não metálicos, em especial com as barras de GFRP [6].

Em 1991, O American Concrete Institute (ACI) estabeleceu o Comitê 440, cuja missão é a de desenvolver e documentar informações sobre polímeros reforçados com fibra (FRP), utilizados como armadura interna e externa em estruturas de concreto. O primeiro produto deste comitê foi um relatório a respeito do estado-da-arte da utilização de armaduras de FRP para estruturas de concreto, o

ACI 440R-96, cuja revisão mais recente é de 2007. Este mesmo comitê publicou, em 2001, a normativa ACI 440.1R-01, com recomendações para o dimensionamento de estruturas de concreto armadas com barras de FRP, cuja versão mais recente é de 2007 e, em 2004 publicou o código normativo ACI 440.3R-04, contendo os procedimentos para ensaio para as barras de FRP, atualizada em 2012.

Em 1991 iniciou-se na Inglaterra outro projeto de pesquisas em FRP, o BRITE –EURAM Project e em 1993 iniciou-se o EUROCRETE Project que futuramente deu início aos trabalhos do grupo de pesquisa FIB TG 9.3, conhecido hoje como TaskGroup 5.1 (T 5.1), que, em 2007, finalizou a norma para estruturas de concreto com armaduras de FRP, chamado FIB BULLETIN N° 40 [6].

No Brasil, alguns estudos sobre o assunto começaram a ser realizados, mas nenhum de caráter normativo. Podem ser citados como trabalhos pioneiros relacionados com armaduras de FRP a dissertação de mestrado de Tavares (2006) em que se analisam teórica e experimentalmente vigas de concreto armado com barras longitudinais GFRP e estribos de aço, Couto (2007) realizou a análise teórica e experimental do comportamento de aderência entre o concreto e barras de fibra GFRP. Silva (2014) estudou o comportamento de pequenas vigas de concreto armado com barras de CFRP e GFRP para infraestrutura de transportes.

1.2 Características dos Materiais

1.2.1 Materiais Compósitos

Sendo alternativas cada vez mais viáveis devido a sua durabilidade em longo prazo e elevada resistência em regiões com alta exposição e agressividade ambiental, os materiais compósitos poliméricos estão sendo amplamente explorados na construção civil.

No caso de compósitos poliméricos, observam-se três fases distintas: uma fase mais resistente chamada de reforço, uma fase menos rígida chamada de matriz e uma fase adicional, chamada de interfase ou interface, existente às vezes entre o reforço e a matriz devido às interações químicas ou outros efeitos de processamento, como pode ser visto na Figura 1, adaptada de [7].

As propriedades dos compósitos dependem de seus elementos constituintes, do formato, da distribuição de suas fases e da orientação do reforço. Em relação ao reforço, quanto mais uniforme for a sua distribuição, menos heterogêneo é o material

e menor é a probabilidade de falhas nas áreas mais fracas; a orientação, por sua vez, afeta a anisotropia do sistema[8].

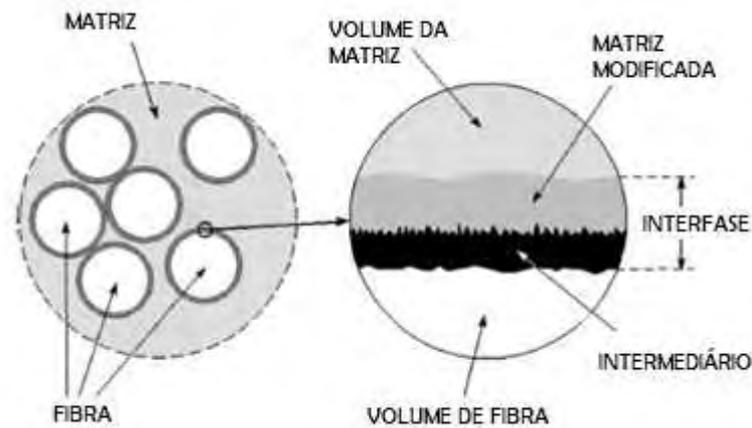


Figura 1 - Ilustração esquemática da interface dos compósitos, adaptada de [7].

As fases de um compósito têm funções diferentes dependendo do tipo e da sua aplicação. Nas situações em que se exige baixo ou médio desempenho estrutural, o reforço se dá, geralmente, sob a forma de fibras curtas ou partículas. Nos casos contrários, o reforço se apresenta na forma de fibras contínuas, cuja resistência e rigidez são determinadas na direção das mesmas. A matriz é o constituinte que fornece apoio e proteção às fibras, transfere a tensão entre elas e regula as propriedades mecânicas do material. A interfase, embora pequena em tamanho, auxilia no controle dos mecanismos de falha, tenacidade, fratura e no comportamento tensão-deformação do material[9].

Os materiais compósitos utilizados em aplicações estruturais são definidos, de uma maneira geral, como sendo dois ou mais materiais quimicamente distintos e fisicamente separados, combinados de tal forma a otimizar suas propriedades a fim de obter um desempenho superior se comparado ao dos seus componentes separadamente [4]. Esta relação entre as características dos materiais pode ser observada na Figura 2.

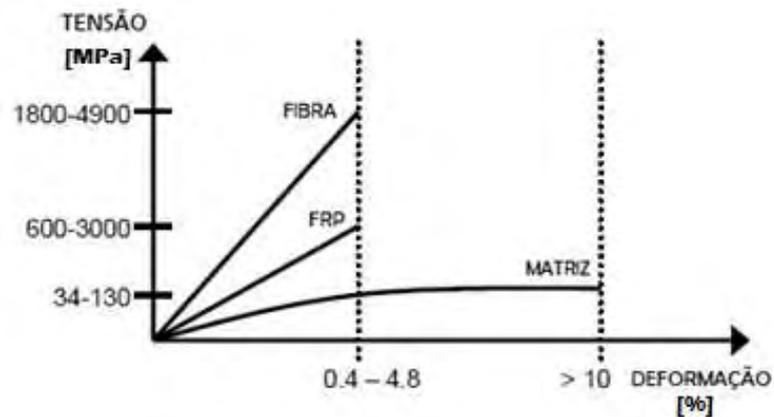


Figura 2 - Curva tensão x deformação comparativa entre matriz, fibra e compósitos, adaptada de[10].

Os materiais compósitos poliméricos podem ser utilizados para reparo e reforço de estruturas convencionais de concreto e também no projeto de estruturas novas [11]. Na Figura 3 é possível visualizar suas formas comerciais: tecidos bidirecionais, laminados unidirecionais, perfis e barras.



Figura 3 - Vários tipos e formas de compósitos de FRP usados na indústria da construção[10].

1.2.2 Barras de GFRP

A barra de GFRP é um material anisotrópico, constituído por fibras contínuas impregnadas por resinas poliméricas, podendo ser produzidas pelos métodos de pultrusão, entrançamento (*braiding*) ou através da tecelagem (*weaving*), sendo o processo de pultrusão o mais comumente utilizado[12].

Nos polímeros reforçados com fibra (FRP), são utilizadas fibras contínuas, incorporadas em uma matriz polimérica. As fibras constituem a espinha dorsal do material e determinam a resistência e rigidez do mesmo. Já a matriz polimérica é necessária para unificar, proteger e transferir tensões para as fibras, devendo ser química e termicamente compatível com as fibras [6].

O comportamento das barras de GFRP nas estruturas de concreto armado está diretamente ligado às suas propriedades físicas e mecânicas, como volume, tipo e orientação das fibras, tipo de resina, dimensão das barras e também a qualidade do processo de fabricação [12].

Nos itens que se seguem, serão expostas as características físicas, mecânicas e geométricas dos materiais que compõem as barras de GFRP.

1.2.2.1 Matriz Polimérica

Conforme já apresentada, a resina têm a função de envolver e aglutinar as fibras para garantir adequada transferência de tensões, proteger mecanicamente sua superfície durante a fabricação, manuseio e vida útil do compósito, além de protegê-las contra agressões ambientais e desgastes. Suas propriedades também devem conduzir a uma perfeita aderência entre as interfaces concreto / barra de FRP, além de proporcionar adequadas durabilidade e aplicabilidade ao compósito [13].

Com relação às características mecânicas da matriz, a literatura técnica refere que elas possuem pouca influência na resistência à tração do compósito, contudo, ajudam a evitar a flambagem das barras submetidas à compressão e são importantes para a resistência do compósito ao cisalhamento e à ação de elevadas temperaturas.

A matriz polimérica dos compósitos pode ser constituída de resinas de dois tipos:

- a) Termorrígidas: são as mais comuns, de polímeros irreversíveis que não podem ser dissolvidos nem fundidos depois de curados. Apresentam uma viscosidade inicial baixa, boa estabilidade dimensional, baixo coeficiente de dilatação térmica e elevada resistência aos solventes. No entanto, apresentam como pontos negativos o fato de não poderem ser armazenadas

por muito tempo, podendo vir a comprometer a eficiência do processo de pultrusão. Novas aplicações de temperatura e pressão não exercem influência no material, tornando-os infusíveis, insolúveis e não recicláveis. As resinas termorrígidas mais usadas na indústria de barras FRP são: epóxi, poliéster e vinil éster. Suas propriedades estão descritas na Tabela 1[13].

Tabela 1 – Propriedade das resinas termorrígidas, adaptado.

PROPRIEDADE	RESINA		
	Poliéster	Epóxi	Vinil Ester
Densidade (Kg/m ³)	1200 - 1400	1200 - 1400	1150 - 1350
Resistência a tração (Mpa)	34,5 - 104	55 - 130	73 - 81
Módulo de elasticidade (Gpa)	2,1 - 3,45	2,75 - 4,10	3,0 - 3,5
Coefficiente de Poisson	0,35 - 0,39	0,38 - 0,40	0,36 - 0,39
Coefficiente de dilatação térmica (10-8/°C)	55 - 100	45 - 65	50 - 75
Humidade (%)	0,15 - 0,60	0,08 - 0,15	0,14 - 0,30

Fonte: FIB, 2007 [6].

Entre as resinas termorrígidas, as compostas por epóxi apresentam elevadas propriedades mecânicas, baixa retração durante a cura, boa adesão a uma grande variedade de fibras, alta resistência à umidade são, menos afetadas pelo calor, são mais duráveis e mais caras do que as resinas de poliéster ou vinil éster. A sua baixa viscosidade, permitindo a saturação adequada entre os fios e o alinhamento dos mesmos, atrelada à sua baixa retração, são consideradas as principais vantagens deste material [14].

A resina de poliéster apresenta baixa viscosidade e pode ser produzida de forma a apresentar elevada resistência aos raios ultravioleta, sendo um bom isolante elétrico. No caso de adição de produtos como “*fillers*” e retardadores de chama, a resistência ao fogo pode aumentar. A retração volumétrica é a principal desvantagem deste produto.

Já a resina de vinil éster apresenta maior resistência mecânica do que a resina de poliéster, exibe boa adesão às fibras de vidro e uma elevada resistência aos ácidos, peróxidos e álcalis. Esta resina possui algumas das características benéficas das resinas epóxi, como a resistência química e resistência à tração e também algumas características das resinas poliméricas como a viscosidade e a velocidade de cura. Contudo, apresenta uma retração volumétrica superior à da resina epóxi e, comparada com esta última, apenas exibe aderência moderada[13].

- b) Termoplásticas: Este tipo de resina não tem suas ligações cruzadas¹ dissolvidas quando sob ação de ciclos de pressão e temperatura inferiores à temperatura de formação da resina. Podendo, portanto, ser recicladas. Apresentam elevada viscosidade durante o processo de impregnação, o que dificulta a incorporação de fibras longas, contudo têm a vantagem sobre as resinas termorrígidas de serem mais resistentes a impactos e microfissurações, devido a sua maior ductilidade e tenacidade. As resinas termoplásticas mais utilizadas são as compostas por polietileno, poliestireno ou metacrilato de polimetila na sua composição[11].

Benmokrane et. al. [15] realizou um estudo relacionado a testes com barras de fibras de vidro compostas pelas três principais resinas citadas anteriormente (poliéster, epóxi e vinil éster), a fim de verificar a melhor aplicabilidade delas. Neste estudo, as características físicas e propriedades mecânicas de barras de GFRP feitas com estas resinas foram avaliadas. O desempenho em longo prazo destas barras sob exposição alcalina, simulando um ambiente de concreto foi avaliado de acordo com ASTM D7705. A exposição alcalina consistiu na imersão das barras em uma solução alcalina por 1000, 3000 e 5000 horas à temperatura elevada (60°C) para acelerar os efeitos. Posteriormente, as propriedades das barras foram avaliadas e comparadas com os valores obtidos em amostras de referência não condicionadas. Os resultados dos ensaios revelaram que as barras GFRP fabricadas com resina de viniléster e epóxi em solução alcalina, enquanto que as barras de GFRP fabricadas com resina de poliéster evidenciaram as menores propriedades físicas e mecânicas e apresentaram degradação significativa destas propriedades após condicionamento.

Pelo acima exposto, as resinas de vinil éster e epóxi são as mais indicadas para a confecção de barras de GFRP a serem utilizadas em estrutura de concreto armado.

¹ As ligações cruzadas caracterizam a cadeia mais complexa de polímeros. Este tipo de ligação química une os monômeros em uma espécie de emaranhado. É necessário um nível de energia muito alto para quebrá-las, o que acaba por desfazer, conseqüentemente, a cadeia polimérica.

1.2.2.2 Fibra

As fibras de vidro utilizadas na fabricação de compósitos estruturais são derivadas de diferentes composições de sílica com adições de óxidos de cálcio, boro, sódio, ferro e alumínio. Devem ter alta resistência e rigidez, tenacidade, durabilidade, leveza e, de preferência, baixo custo. O desempenho das fibras é afetado pelo seu comprimento e composição química. Para que sejam usadas na fabricação de elementos estruturais, é desejável que possuam elevadas resistência e deformação últimas, módulo de elasticidade que produza comportamento aceitável na estrutura, e que haja homogeneidade de características entre as fibras.

Uma desvantagem das fibras de vidro é que na presença soluções aquosas elas se degradam facilmente, por possuírem uma superfície muito ativa quimicamente à água e umidade. Por isso, é tão importante que a matriz a ser utilizada seja adequada para o tipo de fibra. As fibras de vidro podem ser facilmente danificadas durante o manuseio, assim um filme protetor deve ser aplicado imediatamente após seu processo de fabricação. Este filme, além de protegê-la contra umidade, também é responsável por aumentar a adesão entre a fibra e matriz polimérica.

As fibras apresentam melhores propriedades térmicas se comparadas às das resinas, não degradando suas propriedades mecânicas até temperaturas em torno de 1000°C.

Com relação às suas características mecânicas, todas têm em comum o comportamento linear da curva de tensão-deformação específica até a ruptura, variando, de acordo com o processo de fabricação, seu módulo de elasticidade longitudinal e sua resistência, como detalhado na Figura 4[11].

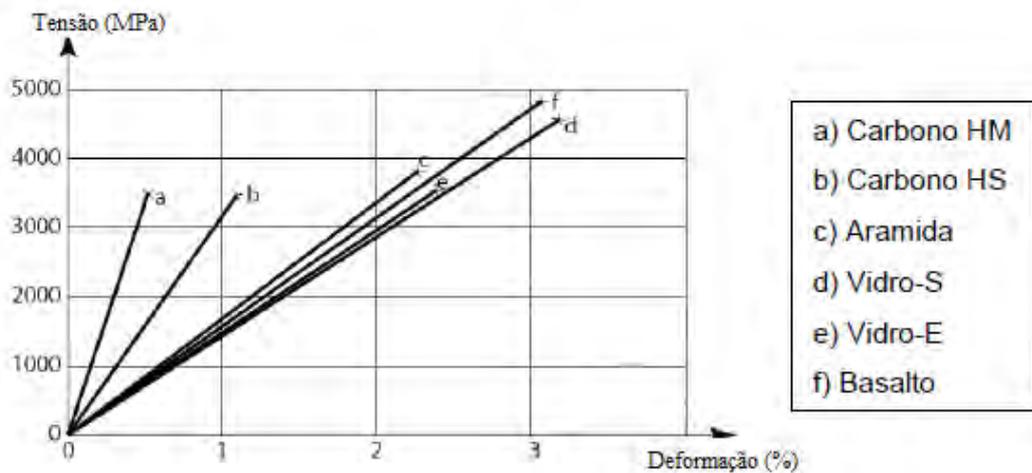


Figura 4 - Curva tensão x deformação de diversas fibras FRP[6].

Na construção civil, são comercializados três tipos de fibras de vidro: vidro-E, vidro-S e vidro-AR. Suas propriedades estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedade das fibras de compósitos FRP – adaptado.

Tipo de Fibra	Densidade (Kg/m ³)	Resistência a tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Deformação última (%)	Coef. Dilatação Térmica longitudinal (10-6/°C)	Coefficiente Poisson
Vidro - E	2500	3450	72,4	2,4	5	0,22
Vidro - S	2500	4580	85,5	3,3	2,9	0,22
Vidro - AR	2270	1800 - 3500	70 - 76	2,0 - 3,0	-	-

Fonte: FIB, 2007 [6].

As fibras do tipo vidro-E (*electrical glass*) possuem alta resistividade elétrica e são menos dispendiosas do que as fibras do tipo vidro-S (*structural* ou *high-strength glass*) todavia, apesar de mais caras e por isso menos usadas, estas últimas apresentam maior leveza, rigidez, resistência à tração e maior módulo de elasticidade. Com relação às fibras resistentes aos álcalis, as fibras do tipo vidro-AR (*alkali-resistant glass*) são as que possuem as características mais favoráveis, apesar de serem muito mais dispendiosas do que os outros tipos de fibra anteriormente mencionados, tendo seu uso declinado em detrimento das outras [13].

1.2.2.3 Processo de fabricação

As barras de GFRP podem ser produzidas através do processo de pultrusão e suas variações. A pultrusão consiste em tracionar um conjunto de fibras alinhadas unidirecionalmente, provenientes de bobinas de filamentos de fibra de vidro contínuo, denominadas “*rovings*”; banhar estas fibras em resina (Figura 6), colocá-las em moldes e realizar a sua cura, por calor, pela emissão de luz ou quimicamente, obtendo assim a forma final da barra, como na Figura 5. Para aumentar a aderência com o concreto, normalmente é realizado algum tipo de acabamento superficial antes da polimerização final [16].

Para fabricação de estribos e barras dobradas em fibra de vidro o processo consiste em uma linha consecutiva envolvendo a fabricação de barras contínuas com etapas posteriores de dobra no formato e dimensões desejadas, antes do acabamento e cura final.

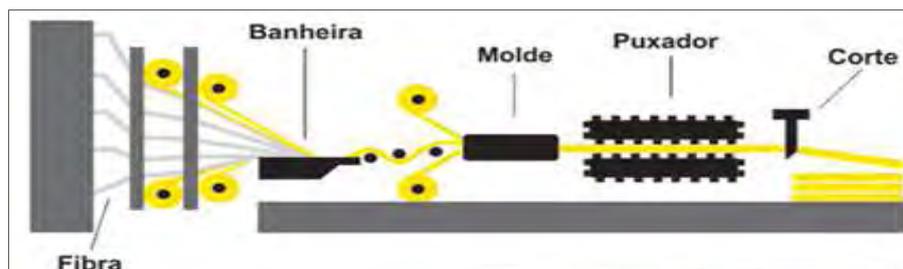


Figura 5 - Processo de pultrusão[17]



Figura 6 – Processo de impregnação da resina nas fibras – Foto feita durante visita técnica à Stratus em 07/03/18

Apesar de ser um processo relativamente simples, deve-se atentar aos diferentes parâmetros de fabricação na técnica de pultrusão, que podem influenciar o produto final, tais como como a variação na velocidade de puxar as fibras, a temperatura e velocidade de cura, tipo de conformação superficial adotada etc. em pesquisas microestruturais pode-se perceber que esses parâmetros influenciam diretamente na presença de vazios e defeitos em vários locais da seção transversal das barras de GFRP, como pode ser observado nas Figura 7 e Figura 8, sendo necessário desta forma a implantação de controles de qualidade rigorosos no seu sistema produtivo[18].

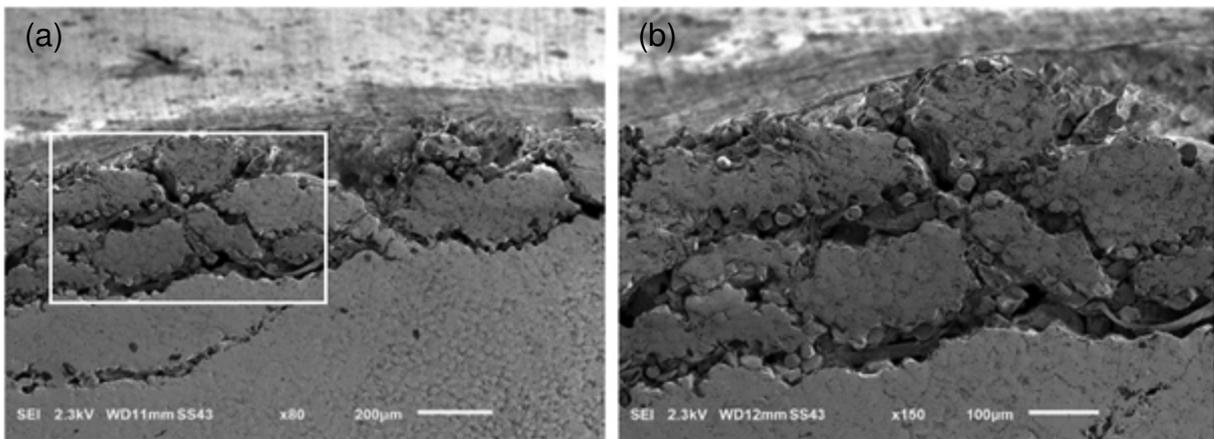


Figura 7 – (a) defeitos encontrados nas bordas de barras GFRP; (b) detalhe em zoom da figura 7a [18].

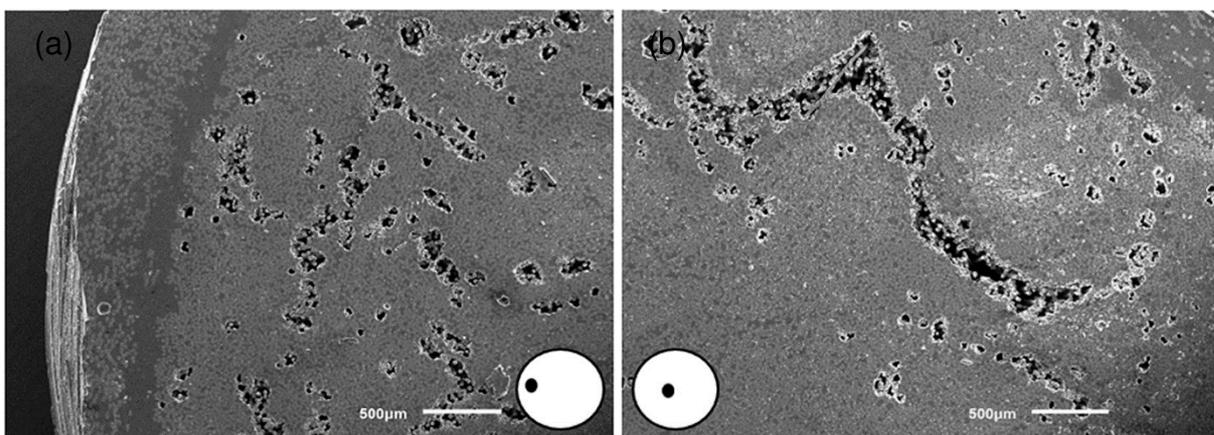


Figura 8 - (a) defeitos descontínuos e; (b) defeitos contínuos encontrados nas seções de barras GFRP[18].

As barras produzidas possuem comprimento ilimitado, sendo o tamanho do galpão e o transporte as únicas restrições envolvidas. Já suas vantagens estão diretamente ligadas à produção contínua, requisitos baixos de mão de obra e baixa perda de material[8].

1.3 Propriedades das barras GFRP

1.3.1 Geometria

Como visto anteriormente, os diferentes tipos de processo durante a pultrusão das barras de GFRP, com sua diversidade conformações superficiais, impacta diretamente no desempenho da peça. A conformação superficial é uma importante propriedade mecânica de ligação da barra com o concreto.

Pode-se encontrar barras com três tipos de conformação superficial: com nervuras moldadas na própria resina, areadas e com enrolamento helicoidal ou trançada com a própria fibra, como observado na Figura 9[6].

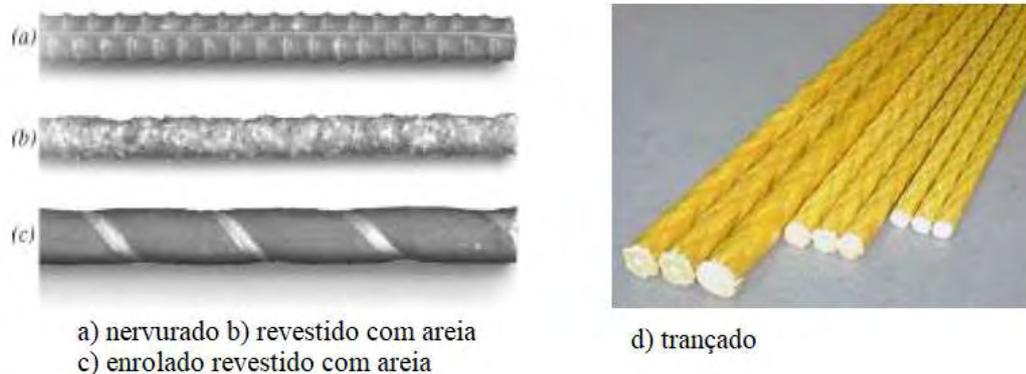


Figura 9 – Superfícies de barras GFRP[6].

Para avaliar a durabilidade e resistência ao cisalhamento de cada tipo de barra, levando em consideração sua superfície de contato, Gooranorimi et al. (2017), conduziram ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), que consiste na captura de imagens microscópicas dos elementos analisados e também na exposição das amostras a soluções alcalinas, a fim de simular a manifestação destas barras em ambientes corrosivos. Entre os tipos de superfície analisados estavam: superfície deformada com nervuras (GFRP-A) e revestidas com fibra (GFRP-B). Puderam concluir após os experimentos, que toda a seção transversal da

barra GFRP-B foi coberta de defeitos contínuos e vazios em toda sua extensão, comprometendo drasticamente a durabilidade do material. O GFRP-A foi caracterizado sem vazios e defeitos, demonstrando maior resistência ao condicionamento alcalino e, conseqüentemente apresentando maior durabilidade.

Com relação ao cisalhamento, o GFRP-A não expressou qualquer alteração na sua resistência ao cisalhamento, enquanto que o GFRP-B demonstrou uma perda de 15% desta propriedade. Desta forma, os autores concluíram que barras de superfície nervurada possuem características de durabilidade e resistência mais eficientes do que as outras apresentadas no mercado [18]

Os diâmetros da seção transversal e a geometria da barra dependem, tão somente da tecnologia disponível nas indústrias produtoras. Em geral, as fábricas fornecem barras em diâmetros equivalentes aos encontrados comercialmente para as barras de aço. Como não é possível dar formato às barras após o processo de polimerização, o formato final das armaduras deve ser providenciado pela fábrica.

Seguindo padrão normativo, as armaduras de fibra de vidro podem ser encontradas em diversos diâmetros e geometrias, como barras retas, estribos e malhas, fornecidos em tamanhos padrão de acordo com o fabricante.

1.3.2 Densidade

A massa específica das barras de GFRP são obtidas pela soma do volume da matriz polimérica e das fibras, multiplicado pelas respectivas massas específicas, como mostrado na Equação (1).

$$Y_c = Y_f \times V_f + Y_m \times V_m \quad (1)$$

Segundo o Boletim 40 da FIB (2007), a densidade de barras FRP, com base em resinas termorrígidas e para os valores usuais de frações de volume de fibras ($V_f = 0,5$ a $0,75$), são apresentados na Tabela 3. Como pode ser visto a partir desta tabela, os elementos de FRP têm uma densidade que varia de 16,5 a 27,5% da densidade do aço, o que leva a um manuseio mais fácil no canteiro de obras e menores custos de transporte.

Tabela 3 – Densidade típica das barras GFRP comparadas com as de aço (kg/m³) – adaptado.

MATRIZ	GFRP	AÇO
Poliéster	1750 - 2170	7850
Epóxi	1760 - 2180	
Vinil Ester	1730 - 2150	

Fonte: FIB, 2007 [6].

1.3.3 Condutividade eletromagnética

Por serem constituídos por fibras não condutoras e possuírem um bom isolamento elétrico e magnético, exibido pelas resinas que as revestem, as barras de GFRP apresentam enorme vantagem sobre as barras de aço quando se trata de suas aplicações em locais sujeitos a ação de campos magnéticos, como hospitais ou qualquer outro ambiente que possua aparelhos elétricos sensíveis[13].

1.3.4 Comportamento à tração

As barras de GFRP quando carregadas, ao contrário das de aço, alcançam sua resistência última sem apresentar comportamento plástico (patamar de escoamento). Possuem comportamento elástico-linear e ruptura brusca, sem aviso prévio, como pode ser observado no gráfico tensão-deformação, apresentado na Figura 10. Isso gera um grande problema para a padronização da resistência última, pois esta depende da disposição e quantidade de fibras e, ainda, do tipo de resina em cada barra[12].

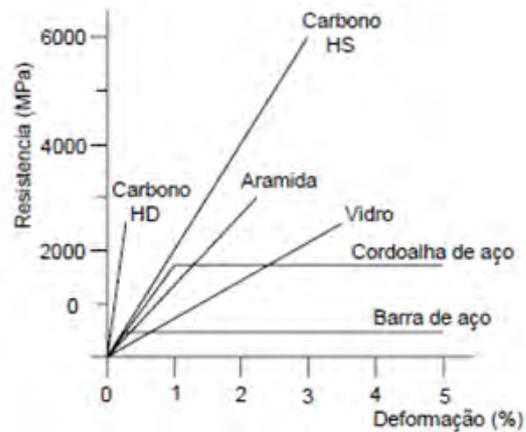


Figura 10 – Diagrama tensão x deformação comparativo das barras e cordoalhas de aço disponíveis no mercado em relação às barras de FRP [19].

O intervalo de valores das propriedades das barras de GFRP à tração, módulo de elasticidade e deformação, para 50% a 70% de volume de fibra (V_f), está presente na Tabela 4 [12].

Tabela 4 – Comparação de propriedades mecânicas entre barras de GFRP e de aço.

PROPRIEDADES	GFRP	AÇO
Tensão a tração (MPa)	450 a 1600	450 a 700
Módulo de elasticidade (GPa)	35 a 60	200
Deformação (%)	1,2 a 3,7	5 a 20

Fonte: ACI, 2005 [12].

Ao contrário do aço, a resistência à tração de uma barra de FRP pode variar com o diâmetro. De fato, Jorquera, et al (1998), refere que barras de GFRP de três diferentes fabricantes apresentaram reduções de resistência à tração de até 40% com o aumento do diâmetro. Tal fato é devido ao efeito *Shear Lag* caracterizado pelo fato de que as fibras localizadas próximas à superfície da barra estarem submetidas a maiores tensões que as fibras localizadas próximo ao centro da barra. Este fenômeno resulta na redução de eficiência e resistência das barras com diâmetros maiores, como pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 – Resistência à tração das barras FRP de acordo com o diâmetro.

DIÂMETRO(mm)	SEÇÃO TRANSVERSAL (mm ²)	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO(MPa)
9	71	900
13	127	740
16	198	655
19	285	620
22	388	585

Fonte: JOQUEIRA, 1998 [19].

É importante destacar que os ensaios para a caracterização da resistência à tração de barras de GFRP é complicado devido às concentrações de tensão que se formam dentro e em torno dos pontos de ancoragem das amostra de ensaio, podendo levar a uma falha prematura. Um ensaio adequado deve permitir que a falha ocorra à meia altura da amostra de teste.

Vale ressaltar, também, que as barra de GFRP não podem ser dobradas após a fabricação (uma exceção a isso seria uma barra de GFRP com uma resina termoplástica que poderia ser remodelada com a adição de calor e pressão). As barras GFRP no entanto, podem ser fabricadas com curvas, porém, neste caso, pode ocorrer uma redução da resistência de 40 a 50% em comparação com a resistência à tração de uma barra reta na porção de dobra devido às concentrações de flexão e tensão das fibras [12].

1.3.5 Comportamento ao cisalhamento

As fibras estruturais não se comportam bem quando solicitadas transversalmente. Por isto, nas barras poliméricas de fibra, a resistência transversal é basicamente devida à resina.

Uma sugestão, dada pelo ACI, para aumentar a resistência transversal consiste em utilizar no compósito fibras adicionais não alinhadas com o eixo da barra, o que pode ser conseguido trançando-se ou enrolando-se fibras ou, também, pela incorporação de mantas durante o processo de pultrusão.

A caracterização do comportamento ao corte de barras de GFRP pode ser feita por meio do método de ensaio padrão da ASTM D4475 [12].

Os fabricantes devem fornecer a descrição do método de ensaio utilizado para obtenção da resistência de cisalhamento por eles informada.

1.3.6 Comportamento à compressão

Observa-se, experimentalmente, que a resistência à compressão das barras de FRP é inferior à resistência à tração. O mesmo fenômeno ocorre em relação ao módulo de elasticidade, que é mais baixo para solicitações de compressão. Estas características acontecem de maneira diferente dependendo do tipo de fibra considerada, sendo mais evidentes na utilização da aramida e menos evidentes na utilização de carbono. O vidro apresenta comportamento intermediário [4].

Pesquisas experimentais realizadas, descritas no ACI (2015), mostram a ocorrência de fenômenos como microflambagem das fibras. Valores experimentais precisos para a resistência à compressão são difíceis de obter e são altamente dependentes da geometria da amostra e do método de ensaio.

O modo de falha depende das propriedades dos elementos constituintes de FRP(fibras e resina) e da fração de volume da fibra. A ruptura à compressão pode ocorrer em função da microfissuração das fibras, da tração transversal em virtude do efeito de Poisson e do cisalhamento entre as fibras.

O ACI 440 1R-15 (2015) indica que, de uma maneira geral, a resistência à compressão para barras de GFRP é consideravelmente menor que a de tração. O módulo de elasticidade à compressão para barras de GFRP é em torno de 80% menor que o módulo à tração [12].

1.3.7 Aderência ao concreto

Assim como as outras propriedades mecânicas das barras de fibra de vidro, a sua aderência depende da geometria da superfície, e do processo de fabricação, além das condições ambientais a que a estrutura ficará sujeita.

Nas barras lisas, a resistência de aderência é muito pequena, e por esta razão, na maioria dos projetos de concreto armado elas aparecem providas de dispositivos de ancoragem, como dobras, ganchos ou barras transversais, além de serem revestidas em alguns casos de areia para aumentar a rugosidade. As barras de GFRP não possuem nervuras propriamente ditas, mas consideram-se

acabamentos enrolados e trançados com fibra uma boa alternativa para garantir um pouco mais de aderência ao concreto em relação às barras lisas.

Achillides et al (2004) realizaram ensaios de arrancamento entre barras de fibra de vidro e de aço para verificarem, comparativamente, a aderência destes materiais ao concreto. Os autores puderam analisar, que durante a ruptura de arrancamento das barras de aço, as fissuras de cisalhamento se desenvolveram entre as nervuras da barra e o concreto adjacente, caracterizando que a resistência de aderência nesta situação é dependente da resistência do concreto, o que não acontece na aderência entre o concreto e a barra de GFRP.



Figura 11 – barra de fibra de vidro após o teste de arrancamento [20]

No ensaio de arrancamento com a barra de GFRP a ruptura por arrancamento ocorre em parte na superfície da barra e em parte no concreto, pelo desprendimento da superfície da barra. Sabe-se, também, que as tensões de aderência das barras de GFRP são transferidas da matriz polimérica para as fibras, sendo possível ocorrer falha de aderência entre essas camadas, efeito que não acontece no aço por ser este último um material homogêneo e isotrópico. O desprendimento da superfície pode se desenvolver na interface entre as sucessivas camadas de fibras, como mostra a Figura 12. A resistência ao cisalhamento entre as fibras e a resina controla a resistência de aderência entre as barras de FRP e o concreto. Por esta razão, o incremento da resistência do concreto não influencia de maneira significativa a resistência de aderência, esta passa a depender das propriedades da barra [20].

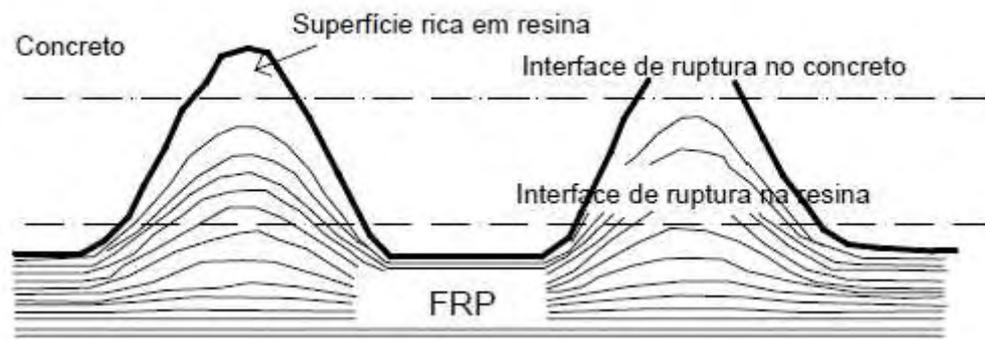


Figura 12 – Ruptura por cisalhamento nas camadas superficiais das barras GFRP [20].

Vale mencionar, também, que os ensaios desenvolvidos por Achillides et al (2004) verificaram que a utilização de barras de maior diâmetro leva a uma diminuição da aderência, e que o aumento do diâmetro faz com que a adesão se perca mais precocemente. Estes efeitos estão relacionados a:

- maiores diâmetros requerem maiores comprimentos de ancoragem, o que leva à diminuição da resistência média de aderência;
- devido ao efeito Poisson, assim como no aço, a tração nas barras produz uma pequena redução na área da seção transversal da barra, diminuindo as parcelas de aderência;
- nas barras de FRP, a transferência dos esforços entre as fibras se dá através da resina polimérica, surgindo o efeito de “*shearlag*”, ou seja, como a barra não se desloca, na seção transversal como um corpo rígido, pode haver movimento diferencial entre seu núcleo e sua camada superficial, acarretando uma distribuição não uniforme de tensões.

1.3.8 Fluência

A ruptura por fluência não é um problema para barras de aço em concreto armado, exceto em temperaturas extremamente altas, como as encontradas em um incêndio.

Já as barras de fibra, segundo o boletim 40 da FIB (2007) e o ACI (2015), quando sujeitos a uma carga constante ao longo do tempo, podem romper subitamente após um período de tempo designado por tempo limite de tolerância

(*endurance limit*). Este tempo de resistência também diminui à medida que a proporção do esforço de tração sustentado para a força a curto prazo da barra GFRP aumenta, podendo ser de forma irreversível em condições ambientais suficientemente adversas, como alta temperatura, exposição à radiação ultravioleta, alta alcalinidade, ciclos úmidos e secos ou ciclos de congelamento e descongelamento [6].

Segundo o ACI (2015), existem literaturas sobre os efeitos de tais ambientes, embora a extração de critérios de projeto generalizados seja dificultada pela falta de métodos e relatórios padrões de teste de fluência, bem como pela diversidade de constituintes e processos usados para fabricar produtos FRP patenteados. Além disso, poucos dados estão disponíveis atualmente para tempos de resistência além de 100 horas, o que resultaram em critérios de projetos julgados conservadores até que mais pesquisas tenham sido feitas sobre esse assunto.

Em geral, as fibras de carbono são as menos suscetíveis à ruptura por fluência, enquanto as fibras de aramida são moderadamente suscetíveis, e as fibras de vidro são as mais suscetíveis. Isto fica claro através dos testes de ruptura por fluência, realizados por Yamaguchi (1997) com barras de FRP lisas de 6mm de diâmetro reforçadas com fibras de vidro, aramida e carbono. Os resultados dos testes, realizados com diferentes níveis de carga e à temperatura ambiente em condições de laboratório, indicaram que existe uma relação linear entre a força de ruptura de fluência e o logaritmo do tempo para tempos de até quase 100 horas. As razões entre o nível de deformação na ruptura por fluência e a resistência inicial das barras de GFRP, AFRP e CFRP após 500.000 horas (mais de 50 anos) foram extrapoladas linearmente para 0.29, 0.47 e 0.93, respectivamente.

Vale ressaltar também, que, segundo o FIB (2007), a consideração da dos fatores relacionados à fluência da resina são importantes para resistência da estrutura armada com barra FRP à este efeito. Isto porque, com o passar do tempo e devido às cargas absorvidas pela estrutura, a matriz se torna incapaz de absorver esforços a ela aplicados, sendo estes então absorvidos apenas pelas fibras da armadura. Considera-se assim que a ruptura por fluência depende também do tipo, orientação e volume de fibras, sendo necessário limitar no dimensionamento a tensão limite a 60% da resistência a curto prazo, com o objetivo de eliminar este fenômeno [6].

1.3.9 Fadiga

A fadiga é um fenômeno que se caracteriza pela degradação da integridade do material resultante de repetidos carregamentos cíclicos.

Apesar da verificação de danos nas barras de FRP por fadiga ser complexa devido aos mecanismos de deterioração que ocorrem em diferentes partes, como a fissuração da matriz e ruptura das fibras, as barras de GFRP possuem uma alta resistência à fadiga, suportando mais de quatro milhões de ciclos de carregamento antes de iniciar a ruptura [12].

1.3.10 Resistência à umidade

A absorção excessiva de água nas barras de GFRP pode resultar na ionização das fibras, com conseqüente aparecimento de pites; já na resina a absorção de água pode inchar ou deformar a barra. Nestes casos, pode ocorrer a degradação da resistência axial e da rigidez do compósito [21]. Relata-se na literatura técnica que as principais conseqüências ligadas à absorção de umidade são a hidrólise da resina (causando plastificação) e a redução da sua temperatura de transição vítrea.

Robert e Benmokrane [22] realizaram estudos sobre a degradação das propriedades de resistência e rigidez de barras de fibra de vidro sujeitas à ação de água tratada e salina a diferentes temperaturas, e observaram a diminuição na resistência axial do compósito, porém com alteração negligenciável em relação ao módulo de elasticidade. Contradizendo os dados teóricos sobre a degradação da matriz em condições úmidas, os pesquisadores não observaram alterações na resina e também chegaram à conclusão de que, tanto a água salina quanto a doce, provocam a mesma degradação no material.

Existem resinas resistentes à umidade, devendo ser utilizadas quando a estrutura se encontra em contato permanente com água ou em situações de gelo e degelo[6].

1.3.11 Resistência ao fogo e variações de temperatura

O uso de barras de GFRP não é recomendado para estruturas em que a resistência ao fogo seja essencial para manter a integridade estrutural das mesmas. Como a barra está embutida no concreto, ela não pode queimar devido à falta de

oxigênio, no entanto, os polímeros são sensíveis às altas temperaturas, perdendo suas propriedades, devido ao calor excessivo.

Nos compósitos de GFRP, o efeito da alta temperatura é mais visível na resina do que nas fibras, uma vez que as resinas contêm grandes quantidades de carbono e hidrogênio, que são inflamáveis. Em um material compósito, as fibras, que exibem melhores propriedades térmicas do que a resina, podem continuar a suportar alguma carga na direção longitudinal, contudo, as propriedades de tração do compósito são reduzidas devido a uma diminuição na transferência de força entre fibras através da ligação à resina.

Na Tabela 6 abaixo podem ser observados as propriedades físicas de densidade e coeficiente de dilatação térmica dos materiais em GFRP comparados com o aço.

Tabela 6 – Propriedades físicas das barras de GFRP x Aço.

Propriedade	Tipo de resina	GFRP	AÇO
Densidade (g/cm ³)	Poliéster	1,75 a 2,17	7,85
	Epóxi	1,76 a 2,18	
	Vinil Ester	1,73 a 2,15	
Coeficiente de dilatação térmica (/°C)	Longitudinal	6,00 a 10,00	11,00
	Transversal	21,00 a 23,00	

Fonte: FIB, 2007 [6].

A temperatura a que um polímero começa a se tornar mais maleável, perdendo suas características iniciais, é conhecida como a temperatura de transição vítrea T_g . Além de T_g , o módulo elástico de um polímero é significativamente reduzido devido às alterações na sua estrutura molecular. Para Bootle et al. (2001) o valor de T_g depende do tipo de resina, mas se situa entre 70 e 175°C [23].

No ponto de vista de Kollár e Springer(2003), outras propriedades mais diretamente afetadas pela transferência de cisalhamento através da resina, tais como o cisalhamento e a resistência à flexão, são reduzidas significativamente em temperaturas acima de T_g . Para efeitos de concepção, os autores recomendaram que os materiais tenham um valor de T_g , pelo menos 30°C acima da temperatura máxima esperada.

O colapso estrutural pode ocorrer se a ancoragem e propriedade mecânica da fibra forem perdidas devido ao amolecimento do polímero ou se a temperatura

aumentar acima do limiar de temperatura das próprias fibras. Este último, pode ocorrer em temperaturas próximas de 980°C para fibras de vidro [12].

Apesar de não ser uma característica climática típica da maioria das regiões do Brasil, é importante relatar sobre o comportamento deste material sob baixas temperaturas. Estudos mostram que, em baixas temperaturas, pode ocorrer endurecimento e microfissuração da resina e, finalmente, a perda de aderência entre matriz e fibra. Os ciclos de gelo/degelo associados a sais podem causar degradação na matriz devido à dilatação provocada pelos depósitos de sais [6].

1.3.12 Álcalis e carbonatação

Embora o concreto proteja, tradicionalmente, as armaduras de aço, a alcalinidade do concreto pode afetar as fibras de vidro, a menos que resinas poliméricas adequadas sejam usadas para protegê-las, ou que sejam usadas fibras de vidro tipo AR como, comentado no item 1.2.2.2.

A velocidade de ataque dos álcalis às barras de GFRP depende da susceptibilidade das fibras a este ataque, da difusibilidade dos álcalis na resina, da qualidade da ligação da resina à fibra, da temperatura, da concentração dos álcalis (influenciada pelo tipo de cimento) e, finalmente, da mobilidade dos íons álcalis (influenciada pelo grau de saturação).

Desta forma, pode-se considerar pouco provável que a carbonatação afete as barras de GFRP, podendo mesmo aumentar a sua vida de serviço e a sua durabilidade, uma vez que leva à redução do pH, ou seja, do meio alcalino, tão prejudicial a algumas fibras e polímeros.

Estudos apontam que a resina Vinil Ester apresenta melhor resistência aos álcalis do que a resina epóxi [12].

1.3.13 Radiação ultravioleta

Os raios ultravioletas podem afetar negativamente os materiais poliméricos. As barras de GFRP envolvidas pelo concreto não se encontram expostas a esta radiação. No entanto, os raios ultravioletas podem causar a degradação da matriz polimérica durante a fase de armazenamento e transporte, prejudicando suas propriedades.

Apesar de baixa, em contato com raios UV, as barras de GFRP apresentam redução de resistência. Para evitar isto, deve-se incorporar à resina aditivos adequados ou camadas de fibras curtas aleatórias na superfície do material compósito, para garantir suas propriedades [11].

1.3.14 Durabilidade

As barras de GFRP podem ter sua resistência e rigidez reduzidas na presença de determinados ambientes tais como a água, radiação ultravioleta, elevada temperatura e soluções alcalinas ou ácidas, antes, durante e após a construção [12]. Em geral, a matriz previne a deterioração das fibras de vidro fornecendo uma barreira contra o ataque destes ambientes agressivos. Contudo, há fatores que podem influenciar esta proteção como: a natureza do ambiente, tensão no compósito, temperatura, condição e qualidade do compósito.

A eficiência da resina na barra de GFRP depende da continuidade da sua superfície. Desta forma, as extremidades cortadas de barras FRP e fibras expostas podem ser problemáticas em termos de durabilidade. Por conseguinte, a qualidade do compósito em termos de durabilidade pode ser avaliada pela ausência de fissuras, a forma como as fibras estão envolvidas pela resina, a ausência de vazios, grau de cura da resina e a interface entre fibra e resina.

Para garantir a durabilidade do GFRP, é necessário, na escolha da resina, ter atenção aos seguintes aspectos: ter capacidade de resistir ao ataque dos álcalis e cloretos, possuir rigidez suficiente para resistir ao microfendilhamento, ser suficientemente impermeável para resistir à penetração de agentes ambientais, ser fácil aplicação para minimizar as variações de qualidade e ser compatível com as fibras para garantir boa aderência entre os dois materiais [6].

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo serão apresentadas as referências da literatura técnica nacional e internacional pesquisadas para este trabalho. Como anteriormente explicitado, embora a tecnologia das armaduras não metálicas seja uma realidade de projeto em âmbito internacional, este assunto ainda foi pouco explorado no Brasil, motivo pelo qual há ainda, poucos trabalhos publicados.

2.1 Trabalhos internacionais

2.1.1 Flexão e Cisalhamento

2.1.1.1 Nanni (1993)

Nanni (1993) desenvolveu um dos primeiros trabalhos considerando a utilização de barras de compósitos de resina e fibra como alternativa à armadura de aço carbono em estruturas de concreto. Em seu trabalho, informou que, naquele momento, o foco das pesquisas devotavam-se à determinação das características de resistência e durabilidade destes novos materiais. Nanni destacou, ainda, que talvez, a utilização destas armaduras em concreto armado não fosse tão eficiente, sendo ideal a sua utilização com armaduras de protensão.

Com o objetivo de investigar as propriedades das barras de FRP usadas com armadura de flexão em vigas, o autor comparou previsões analíticas de diagramas momento-curvatura ($M-\kappa$) e carga-flecha para seções com armadura tradicional e com barras de aramida (AFRP).

As principais conclusões do pesquisador foram que, em relação à resistência teórica à flexão das vigas, tanto as com armadura tradicional quanto as com barra de AFRP apresentaram valores próximos, porém com grande diferença de rigidez entre elas – sendo a com barra de FRP muito menos rígida. Com isto, verificou-se dois fenômenos importantes: o primeiro é que podem ocorrer grandes deformações na viga, e, como consequência a verificação da deformação excessiva passa a ter papel principal. A segunda é que, normalmente, a resistência última é governada

pela deformação de compressão no concreto. Desta forma, o confinamento do concreto pode resultar em uma resistência mais elevada à flexão no estado limite último.

Nanni (1993) observou, ainda, baseado em trabalhos anteriores que atestaram que a aderência das barras de fibra no concreto é inferior à das barras de aço, que o escorregamento da armadura de FRP pode permitir uma melhor redistribuição de deformações entre duas fissuras, dando um aspecto mais dúctil à estrutura [24].

2.1.1.2 Ashour (2006)

Neste artigo, Ashour apresenta resultados de testes de 12 vigas de concreto armadas com barras de GFRP submetidas ao ensaio de flexão em quatro pontos. Todos os modelos ensaiados não apresentaram armadura transversal (estribos) nem armadura de compressão, e foram classificados em dois grupos de acordo com a resistência à compressão do concreto. Os principais parâmetros investigados em cada grupo foram a altura da viga e a taxa de armadura de GFRP, sendo observadas rupturas por flexão e cisalhamento.

A resistência à compressão das vigas do grupo 1 era de 34 MPa, enquanto que a das vigas do grupo 2 era de 59 MPa. Todas as vigas tinham o mesmo comprimento e largura de 2100 e 150 mm respectivamente, alterando apenas a altura de cada modelo de ensaio. A geometria das vigas e a disposição da carga e dos apoios estão ilustradas na Figura 13.

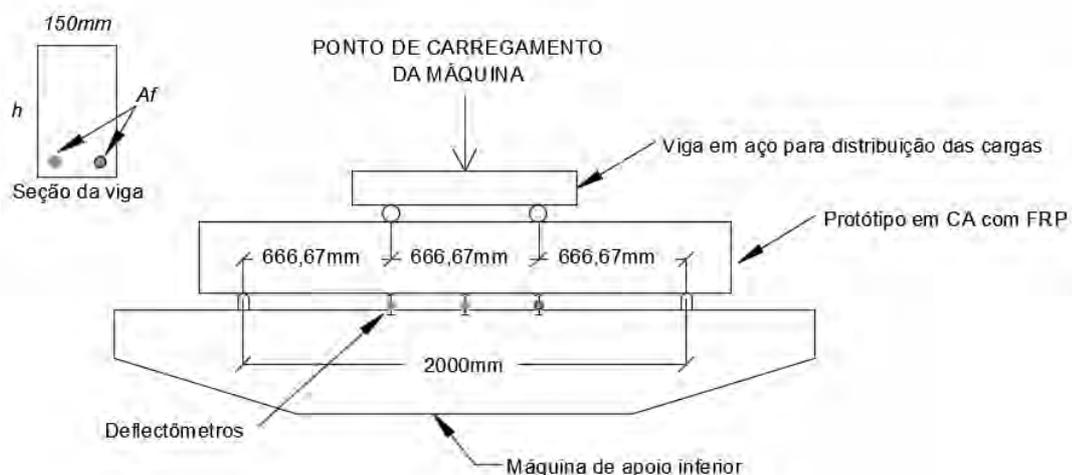


Figura 13 – Detalhe de posicionamento e dimensionamento das vigas de projeto.

A altura e as armaduras dos modelos foram os principais parâmetros investigados como resumido na Tabela 7. Foram examinadas três alturas de viga: 200, 250 e 300mm. Para cada altura, foram utilizadas duas quantidades de armadura de GFRP; um para caso subarmada (vigas 2, 4, 6, 8, 10 e 12) e o outro para caso superarmada (vigas 1, 3, 5, 7, 9 e 11).

Tabela 7 – Detalhe dos resultados dos ensaios. ²

SÉRIES DAS VIGAS	NOMENCLATURA	h (mm)	Barras de GFRP longitudinais				f _{cu} (N/mm ²)	P _{cr} (kN)	P (kN)	Modelos de ruptura
			No. # diâmetro (mm)	pf (%)	Ef (kN/mm ²)	ffu (N/mm ²)				
Série 1	Viga 1	200	4#6 mm	0,45	38	650	34	7	25	corte
	Viga 2	200	2#6 mm	0,23	38	650		3	18	flexão
	Viga 3	250	2#12 mm	0,71	32	705		13	35	corte
	Viga 4	250	2#6 mm	0,17	38	650		10	24	flexão e aderência
Série 2	Viga 5	300	3#12 mm	0,86	32	705	59	20	50	corte
	Viga 6	300	2#6 mm	0,14	38	650		14	33	flexão
	Viga 7	200	3#12 mm	1,39	32	705		8	35	corte
	Viga 8	200	2#6 mm	0,23	38	650		6	18	flexão e aderência
	Viga 9	250	3#12 mm	1,06	32	705		15	55	corte
	Viga 10	250	2#6 mm	0,17	38	650		12	29	flexão
	Viga 11	300	4#12 mm	1,15	32	705		24	60	corte
	Viga 12	300	4#6 mm	0,28	38	650		22	50	flexão e aderência

Fonte: Ashour, 2006. [33]

Os resultados dos ensaios mostraram que as primeiras fissuras ocorreram sempre na região do meio do vão para diferentes níveis de carga, dependendo da taxa de armadura GFRP usada e da resistência do concreto, conforme indicado na Tabela 7. À medida que a carga aumentava, surgiam novas fissuras de flexão e de cisalhamento e as fissuras existentes tornavam-se mais largas e consideravelmente mais profundas devido ao baixo módulo de elasticidade das barras GFRP.

As vigas ensaiadas exibiram dois modos diferentes de ruptura, como indicado na Tabela 7. As vigas subarmadas romperam por flexão, no meio do vão de flexão ou na carga aplicada devido à ruptura de tração das barras, como mostrado na

²h, a altura total das amostras de ensaio; pf, taxa de armadura GFRP = Af / bd; Af, a área de barras de FRP; b, a largura das amostras; d, a altura efetiva das barras de FRP; Ef e ffu, o módulo de elasticidade e resistência à tração das barras de GFRP; f_{cu}, a resistência à compressão concreto; P_{cr}, a carga total na primeira fissura visual; P, a carga de ruptura total

Figura 14. Em algumas vigas (vigas 4, 8 e 12), observaram-se fissuras horizontais ao nível da armadura de GFRP, caracterizando falha de aderência, conforme ilustrado na Figura 14.

Nas vigas superarmadas, próximo à carga de ruptura por cisalhamento, as fissuras no vão de corte tornaram-se progressivamente mais inclinadas, propagando-se diagonalmente em direção ao ponto de aplicação da carga, e, finalmente, rompendo por cisalhamento, como mostra a Figura 15.



VIGA 8



VIGA 10

Figura 14 – Rupturas características de flexão.

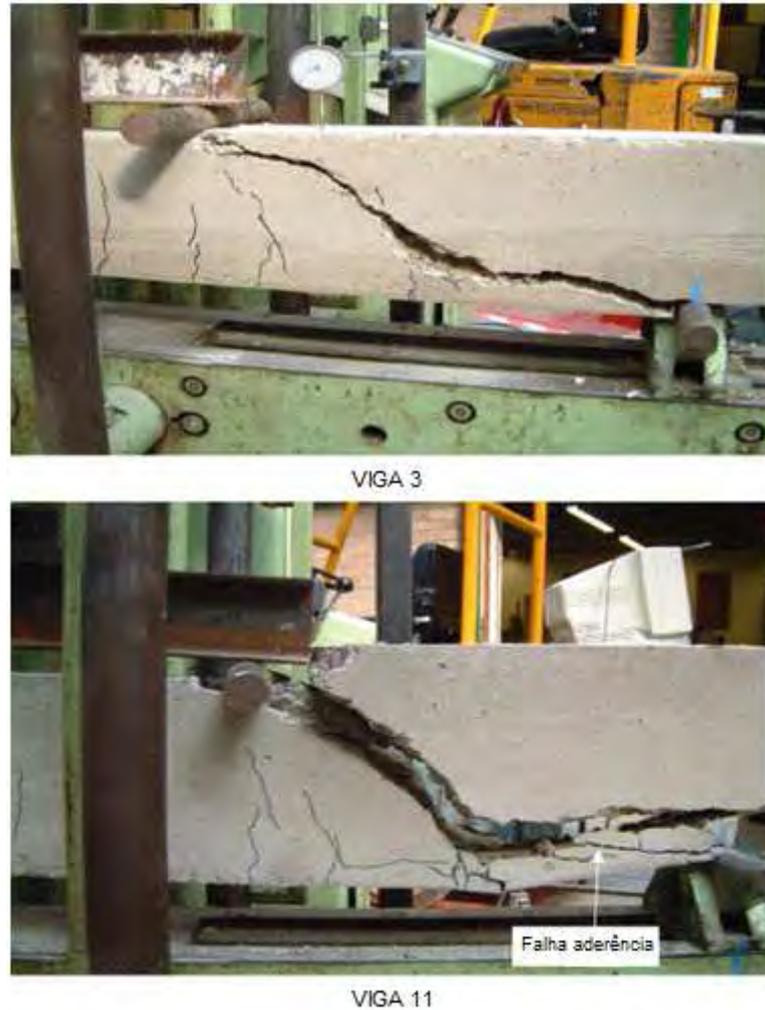


Figura 15 – Rupturas características de cisalhamento.

Com relação aos deslocamentos, os autores notaram que todas as vigas apresentaram um comportamento linear até a primeira fissura de flexão. Após esta fissura, houve uma mudança clara na rigidez de flexão, surgindo um comportamento visivelmente menos rígido. Os autores compararam as vigas com a mesma altura e notaram um aumento de rigidez quando se aumenta a taxa de armadura. Compararam as vigas armadas com a mesma taxa de armadura e notaram que aquelas com maior altura mostraram-se mais rígidas. Assim, concluíram que a quantidade de armadura de GFRP utilizada teve um efeito significativo sobre a rigidez de flexão das vigas ensaiadas.

Para a estimativa da capacidade resistente à flexão, os autores propuseram um método de cálculo baseado na compatibilidade de deformações e equilíbrio de forças, que apresentou boa correlação com os resultados experimentais. No que diz

respeito à previsão teórica do cisalhamento, os autores referem a necessidade de novos estudos para que se possa estabelecer uma metodologia mais consistente.

2.1.1.3 Reis (2006)

Esse autor realizou uma pesquisa ampla sobre as construções utilizando barras de fibra de vidro, analisando suas técnicas construtivas, dimensionamento e custos, de forma a obter uma comparação e uma melhor percepção das diferenças entre o dimensionamento de estruturas de concreto armado com aço e com FRP. Foram também estudados experimentalmente, vigas e lajes armadas com os dois tipos de material.

Em relação à viga estudada, trata-se de estrutura hiperestática, com três apoios e dois vãos de 4,0 metros cada.

O autor salientou a menor capacidade de redistribuição de momentos na viga armada com barras de fibra de vidro, devido à falta de comportamento elasto-plástico desse tipo de armadura, em relação à viga tradicional, o que levou a uma maior área de armadura necessária no apoio central.

Outra observação importante apresentada por este estudo foi em relação ao Estado limite Último (ELU). Apesar das barras de GFRP apresentarem resistência última superior a do aço, os coeficientes de ponderação recomendados pelo ACI (2015), fizeram com que as resistências de cálculo se aproximassem das do aço, perdendo-se essa vantagem da armadura de GFRP.

Com relação aos custos das construções em concreto armado com barras de GFRP como um todo, o autor constatou valores monetários duas vezes superior às aos das estruturas armadas com barras de aço. A diferença neste custo não se limita apenas ao elevado preço da armadura de GFRP propriamente dita, mas também ao fato das estruturas armadas com esse tipo de material possuírem menor rigidez, exigindo desta forma seções transversais maiores, e, conseqüentemente, mais armadas, para cumprir os critérios de deformação em serviço, e conseqüentemente, consumindo um maior volume de concreto.

2.1.1.4 Kassem *et al.* (2011)

Esses autores realizaram um programa experimental composto por 24 vigas armadas com barras de CFRP, GFRP, AFRP e aço, com 3.300 mm de comprimento e seção transversal de 200 mm de largura e 300 mm de altura. Foram ensaiadas 16 vigas com barras de GFRP, quatro com barras de CFRP, duas com barras de AFRP e duas com barras de aço, conforme mostrado na Tabela 8 e Figura 22.

Os parâmetros avaliados foram a taxa de armadura (ρ_f), o detalhamento das barras, o tipo da superfície da barra de GFRP (com areia ou nervuras) e o material utilizado (GFRP, CFRP, AFRP ou aço). Na Tabela 8, ρ_f/ρ_{fb} indica a relação entre a taxa de armadura adotada e a taxa de armadura balanceada (ρ_{fb}), que é a taxa de armadura calculada quando há simultaneamente o esmagamento do concreto, sendo $\epsilon_{cu} = 3,5\%$, e a ruptura da barra de FRP.

Tabela 8 – Programa experimental

SÉRIE	VIGAS	f_c (MPa)	E_c (GPa)	ρ_f (%)	ρ_f / ρ_{fb}	$E_f A_f$ (kN)	DETALHAMENTO
CFRP1	C1 - 4	40,4	31,6	0,6	1,2	32,376	4 \emptyset 9,5mm em 2 linhas
	C1 - 4b	40,4	31,6	0,6	1,2	32,376	2 x 2 \emptyset 9,5mm em feixe
	C1 - 6	39,3	29,8	0,9	1,9	48,564	6 \emptyset 9,5mm em 2 linhas
	C1 - 8	39,3	29,8	1,2	2,5	64,752	8 \emptyset 9,5mm em 2 linhas
CFRP2	C2 - 4	39,9	29,8	0,5	1,7	31,232	4 \emptyset 9,5mm em 2 linhas
	C2 - 4b	39,9	29,8	0,5	1,6	31,232	2 x 2 \emptyset 9mm em feixe
	C2 - 6	40,8	30,2	0,8	2,5	46,848	6 \emptyset 9mm em 2 linhas
	C2 - 8	40,8	30,2	1,1	3,3	62,464	8 \emptyset 9mm em 2 linhas
GFRP1	G1 - 6	39,05	29,3	1,6	1,5	30,960	6 \emptyset 12,7mm em 2 linhas
	G1 - 8	39,05	29,3	2,2	2	41,280	8 \emptyset 12,7mm em 2 linhas
GFRP2	G2 - 6	39,05	29,3	1,4	1,9	24,408	6 \emptyset 12mm em 2 linhas
	G2 - 8	39,05	29,3	1,9	2,5	32,544	8 \emptyset 12mm em 2 linhas
AFRP	AR - 6	39,05	29,3	0,9	3,9	22,152	6 \emptyset 9,5mm em 2 linhas
	AR - 8	39,05	29,3	1,2	5,2	29,536	8 \emptyset 9,5mm em 2 linhas
AÇO	ST - 4	40,8	30,2	0,9	0,2	80	4 \emptyset 9,5mm em 2 linhas
	ST - 6	40,8	30,2	1,3	0,3	120	6 \emptyset 9,5mm em 2 linhas

Fonte: Kassem et al., 2011. [34]

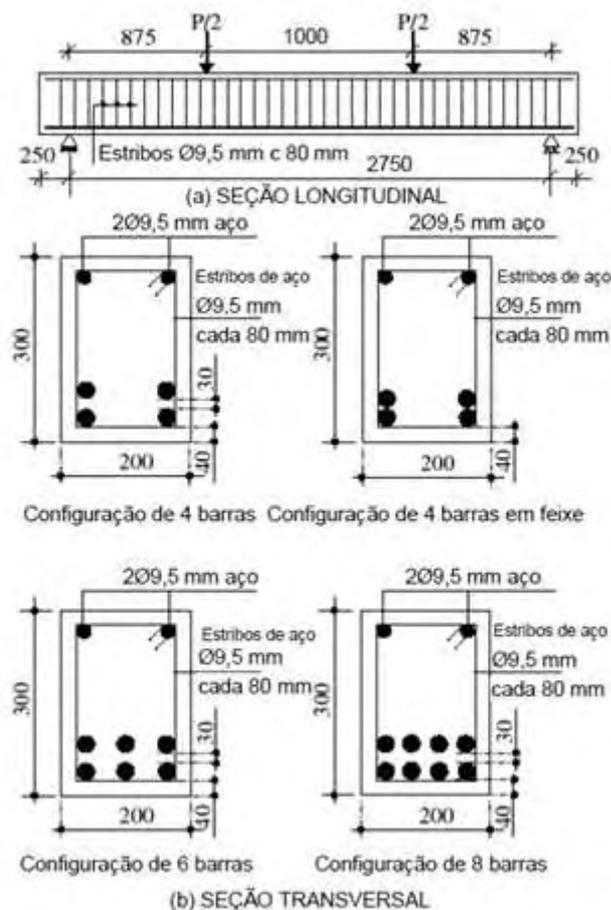


Figura 16 – Detalhamento das barras nas vigas: (a) seção longitudinal; (b) seção transversal.

Os autores concluíram que o comportamento carga *versus* deformação experimental da viga teve caráter linear até o início da fissuração e que entre a fissuração e a ruptura apresentou uma relação quase linear entre carga e deformação. Salientaram, ainda, que a ruptura ocorreu com grandes deslocamentos.

As vigas armadas com FRP romperam por esmagamento do concreto, pois a taxa de armadura utilizada foi maior que a taxa de armadura balanceada (ρ_{fb}). As vigas armadas com aço romperam pelo escoamento do aço, seguido pelo esmagamento do concreto. Foi recomendada uma taxa de armadura maior do que $1,4 \rho_{fb}$ para a obtenção da ruptura por esmagamento do concreto, o que está de acordo com o código ACI 440 1R (2006). Os resultados experimentais de altura da linha neutra no meio do vão se aproximaram dos valores técnicos calculados, bem como os momentos de fissuração.

Os parâmetros variados influenciaram a rigidez da viga e por conseguinte as flechas obtidas durante o carregamento. A Figura 17 apresenta a relação entre as flechas calculadas (Δ_{pred}) e as flechas obtidas experimentalmente (Δ_{exp}) no meio do vão da viga para momentos correspondentes a 30% e 67% do momento de ruptura (M_n).

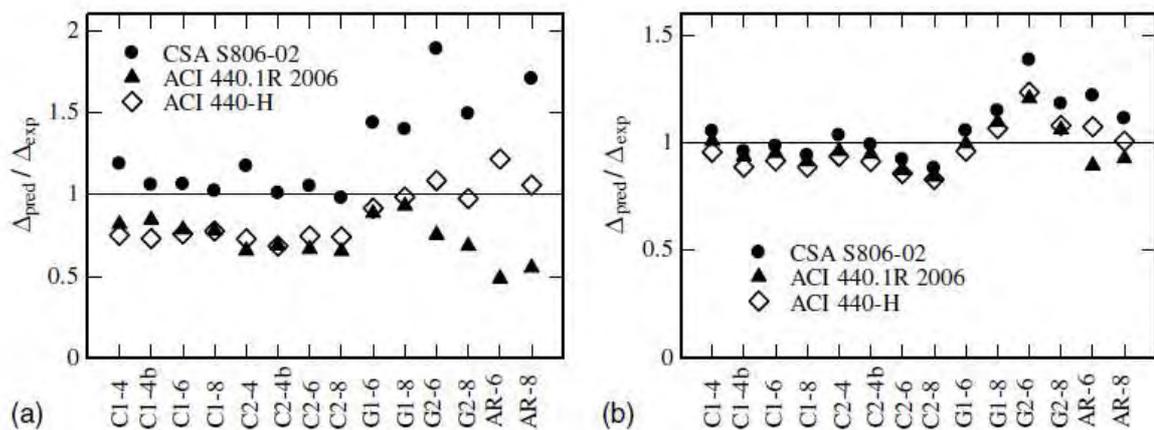


Figura 17 - Comparação entre os dados experimentais e calculados por diversos códigos para diferentes carregamentos (a) para $0,3 M_n$ (b) para $0,67 M_n$

Para o cálculo da flecha foram comparadas várias equações propostas para o momento de inércia equivalente. Na Equação (2) é apresentada a equação de

momento de inércia equivalente proposta pelo ACI 440.1R (2006) e nas Equações (3) e (4) as propostas pelo ACI 440-H e CSA S806 (2002), respectivamente.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g \quad (2)$$

Sendo $\beta_d = 0,2 \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \leq 1$

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \eta \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2} \leq I_g \quad (3)$$

Sendo $\eta = 1 - \frac{I_{cr}}{I_g}$ e $\gamma = 1,72 - 0,72 \frac{M_{cr}}{M_a}$

$$\Delta = \frac{M_a / a L^3}{24 E_c I_{cr}} \left[3 \frac{a}{L} - 4 \left(\frac{a}{L}\right)^3 - 8 \eta \left(\frac{L_g}{L}\right)^3 \right] \quad (4)$$

Sendo $\eta = 1 - \frac{I_{cr}}{I_g}$

Os autores concluíram que as equações propostas pelo ACI 440.1R (2006), subestimam as flechas em todas as vigas. A equação proposta pelo ACI 440-H pode ser considerada boa para os resultados das vigas armadas com barras de GFRP e AFRP, mas subestima os valores das flechas para as vigas armadas com barras de CFRP e a equação proposta pela CSA S806 (2002) atende aos resultados experimentais em todas as vigas.

A configuração das barras em feixe não influenciou significativamente o comportamento à flexão da viga. Se verificou, apenas, um pequeno aumento na abertura das fissuras, o que foi atribuído pelo autor à redução da superfície de aderência barra-concreto, devida ao agrupamento de barras.

2.1.1.5 Ahmed, E. A. et al.(2010)

Este artigo apresenta dados experimentais sobre a resistência ao cisalhamento de vigas longas de concreto armadas com estribos de GFRP. Um total de quatro vigas isostáticas com 7,0m de comprimento e seção transversal em forma de T foram ensaiadas até a ruptura. As variáveis estudadas foram o tipo, a taxa e a distribuição das armaduras de cisalhamento (estribos). Três vigas foram armadas com estribos de GFRP revestidos com areia, de 9,5 mm de diâmetro, com espaçamentos de 300mm, correspondente à metade da altura útil da viga ($d/2$), para SG 9.5-2; 200mm, correspondente à $d/3$, para viga SG 9.5-3 e 150mm, correspondente à $d/4$, para viga SG 9.5-4, e uma viga de referência armada com estribos de aço convencionais de 9,5 mm de diâmetro, espaçados de $d/2$ (SS-9.5-2). As vigas romperam por corte, devido à falha do estribo de GFRP ou por escoamento do aço dos estribos. Vale ressaltar que as armaduras longitudinais das vigas se mantiveram iguais em todos os modelos, adotando-se cordoalhas de aço com o objetivo de padronizar e garantir a rigidez na flexão e o efeito de pino em todos os modelos, obrigando a ruptura dos estribos, de modo a avaliar a capacidade resistente dos mesmos. Todos os estribos tinham o mesmo diâmetro e sua forma está apresentada na Figura 18.

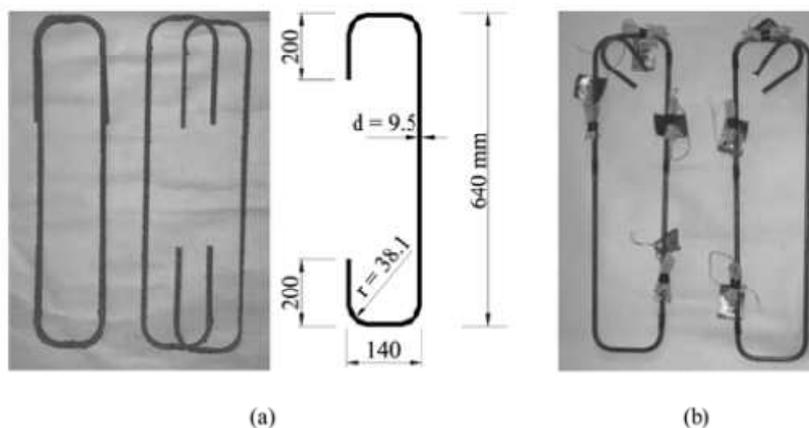


Figura 18 – Detalhes dos estribos: (a) de GFRP; (b) de aço.

A Figura 19 mostra o detalhe geométrico e as armaduras utilizadas nas vigas ensaiadas.

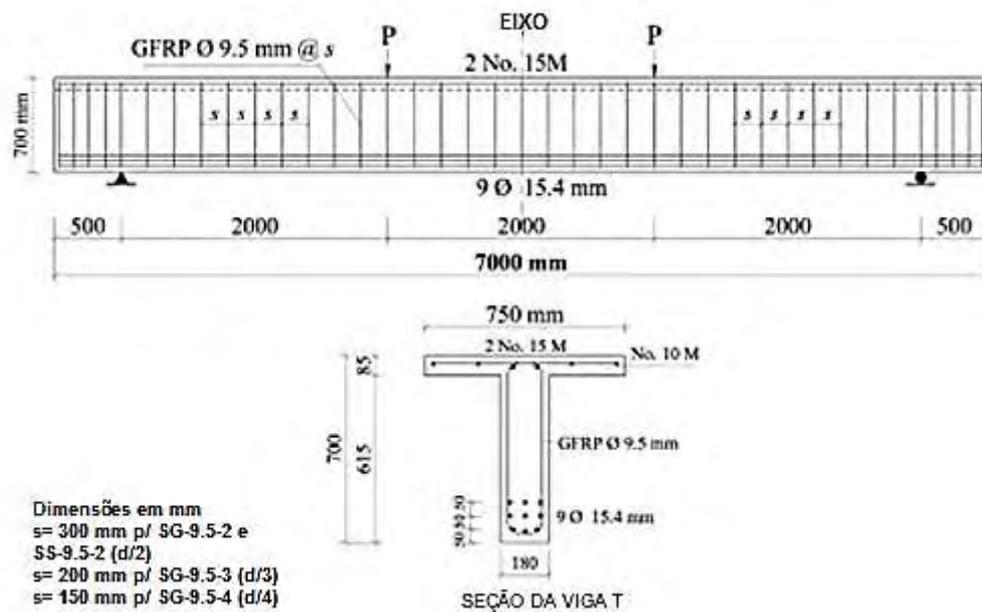


Figura 19 – Detalhe geométrico do projeto.

As vigas foram testadas em ensaio de quatro pontos, sendo o vão de 6 metros, deixando 0,5 metros em cada extremidade para evitar qualquer falha de ancoragem prematura da armadura longitudinal. A carga foi aplicada através de um atuador com capacidade de 1000 kN, utilizando um perfil metálico para a distribuição do carregamento. A carga foi aplicada de forma controlada, em patamares de 5,0 kN/min, até 90% da carga de ruptura esperada. Posteriormente, a carga foi aplicada a uma variação controlada por deslocamento de 0,6 mm/min para evitar problemas acidentais associados à falha de cisalhamento repentino.

Apesar da variação no valor da carga de ruptura de cisalhamento entre as vigas armadas com estribos de GFRP, observou-se um mecanismo de ruptura semelhante. A fissura na diagonal ocorreu de forma repentina para as três vigas devido à ruptura dos estribos de GFRP. Os estribos de GFRP foram submetidos a teste específico que revelou que a resistência à tração na dobra equivale a 58% da resistência de sua parte retilínea.

A Figura 20 mostra fotografias das vigas na ruptura, que atingiram valores de 259kN, 337kN e 416kN para os protótipos SG-9.5-2, SG-9.5-3 e SG-9.5-4, respectivamente. Já a Figura 21 mostra, esquematicamente, os padrões de fissuração final e sua inclinação, com os ângulos destacados. A fissura diagonal de cisalhamento da viga SG-9.5-2 foi a que mais se aproximou do ponto de aplicação da carga e com a inclinação mais acentuada. Nos outros dois modelos armados com

maiores taxas de armadura transversal de GFRP (SG-9.5-3 e SG-9.5-4) as fissuras diagonais deram-se no intervalo de cisalhamento médio. A principal diferença nos padrões de fissuração final entre as três vigas foi o número e o espaçamento das fissuras diagonais desenvolvidas no vão de corte.

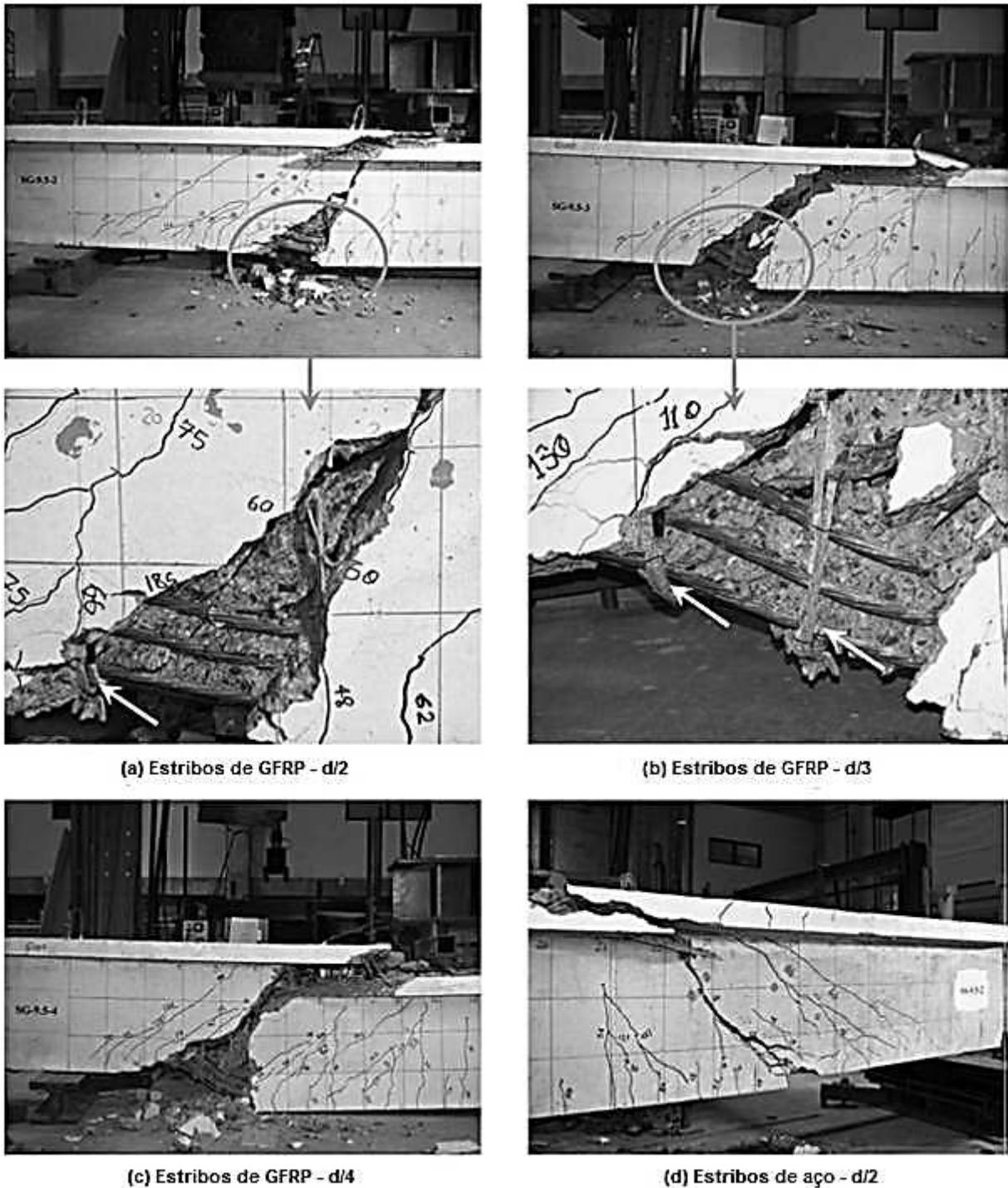


Figura 20 – Ruptura das vigas ensaiadas.

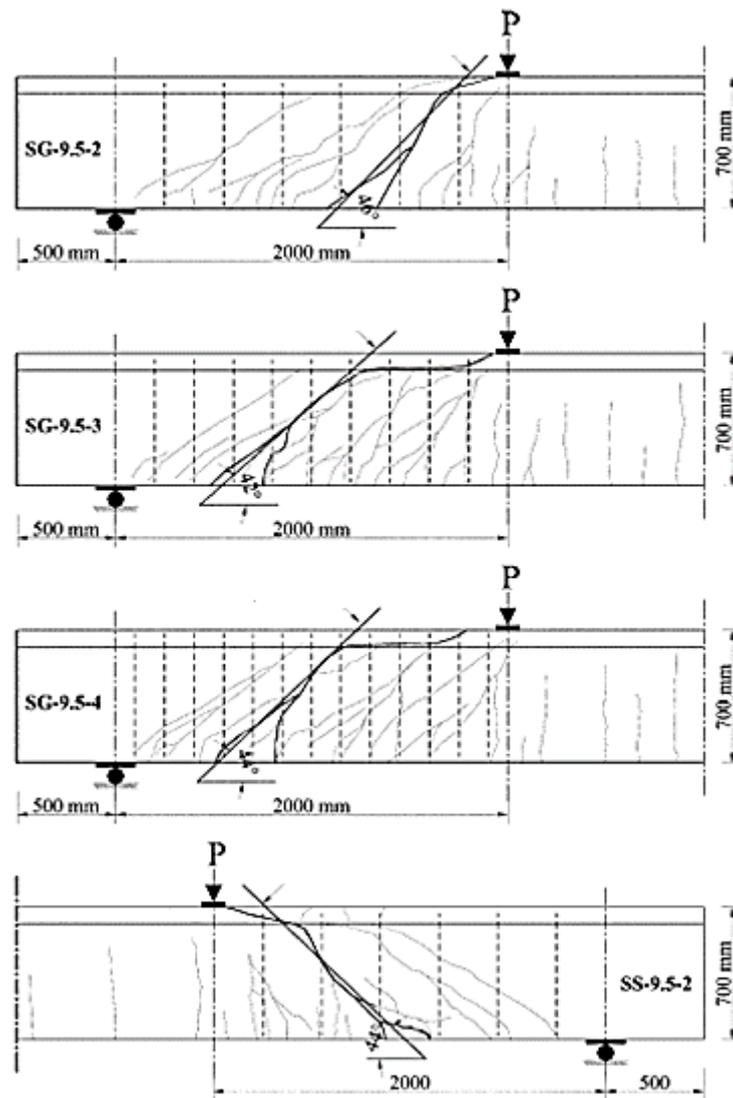


Figura 21 – Padrões de fissuras e ângulos de inclinação das vigas ensaiadas.

Os autores verificaram que a tensão nos estribos ao longo do vão de corte é afetada pelo padrão de fissuração e pela posição tanto do estribo quanto do extensômetro em relação à fissura. Perto de uma fissura, a tensão medida é maior do que a média. O nível de tensão no estribo cresce com o surgimento e estabilização das fissuras de cisalhamento. Os níveis de tensão mais altos foram medidos nos estribos de GFRP localizados no terço médio do vão de corte.

Como as vigas romperam por cisalhamento, a análise dos resultados revelou comportamento semelhante em todas no que se refere aos deslocamentos, às deformações máximas da armadura longitudinal e do concreto no meio do vão,

independentemente do material usado nos estribos. Da mesma forma, não houve ruptura do concreto comprimido.

Os autores compararam as deformações nos estribos e verificaram que o estribo de aço apresentou os menores valores de deformação quando comparados com os de GFRP, o que pode ser devido ao maior taxa de armadura de cisalhamento, dado por $\rho_{fv} E_{fv}/E_s$, onde $\rho_{fv} = A_{fv} / b.s$ (%) é a taxa de armadura transversal. De modo geral, as vigas com menor espaçamento de estribos apresentaram menores deformações nos estribos para qualquer nível de carregamento, isto porque há uma maior probabilidade de as fissuras diagonais cruzarem as zonas de dobra dos estribos. Assim, os autores recomendam que a relação entre a resistência da região da dobra e da porção reta do estribo seja maior ou igual a 0,6 ($f_{dobra}/f_{reta} \geq 0,6$). Quando isso ocorre, os estribos poliméricos conseguem atingir sua capacidade máxima na dobra e na porção reta simultaneamente, caso contrário, a ruptura é governada pela resistência da dobra e a porção reta não alcança a sua capacidade máxima. Concluíram, então, que o comportamento do estribo de GFRP depende não somente do seu módulo de elasticidade, mas também da sua configuração e de outras propriedades mecânicas, como as características de aderência dessas barras.

Os autores referem que as previsões para o cisalhamento das normas canadense CSA-S6-06 (2006) e japonesa JSCE subestimam muito a resistência ao corte. Contrariamente, tanto a ACI 440.1R-06 como a da norma canadense CAN/CSA S6-09 trazem boas previsões para a resistência ao corte de vigas armadas com estribos de GFRP, com um nível razoável de conservadorismo. Finalmente, os autores verificaram que o método analítico Response 2000 (R2K), se baseia na teoria do campo de compressão modificado (MCFT) fez boa previsão dos resultados, porém sobrestimou a abertura das fissuras [25].

2.1.1.6 Alam e Hussein (2011)

Com o intuito de verificar a influência das armaduras longitudinais na resistência ao cisalhamento de vigas armadas com barras não metálicas, os autores realizaram ensaios experimentais em vigas de concreto armadas com barras longitudinais de GFRP, CFRP e aço, sem a presença de estribos ou armadura de

compressão, intensificando assim o real objetivo do estudo, como observado na Figura 22. A relação a/d era de 2,5 para todas as vigas.

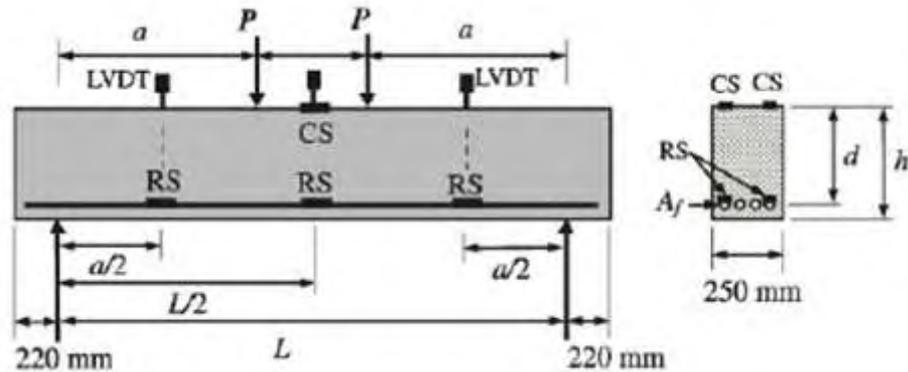


Figura 22 - Configuração do ensaio e localização dos extensômetros

Foram ensaiadas três vigas de concreto armadas com barras de GFRP, três com barras de CFRP e duas com barras de aço. As vigas de CFRP e GFRP tiveram taxas de armadura 0,5, 1,0, e 2,0 vezes a taxa de armadura balanceada, calculada de acordo com a CSA S806-02. Para as vigas de aço essa relação foi de 0,2 e 0,3. Todas as vigas ensaiadas experimentalmente tiveram suas características e propriedades mecânicas detalhadas nas Tabela 9 e Tabela 10. A taxa de armadura balanceada para as armaduras de FRP foi calculada de acordo com a norma canadense, de acordo com a Equação (5):

$$\rho_{bal} = \frac{\alpha_1 \beta_1 f'_c}{f_u} \times \frac{0,0035}{0,0035 + (f_u/E_f)}$$

Onde:

$$\alpha_1 = 0,85 - 0,0015 f'_c \geq 0,67;$$

$$\beta_1 = 0,97 - 0,0025 f'_c \geq 0,67;$$

f'_c é a resistência a compressão do concreto (MPa);

f_u é a resistência a tração da barra GFRP

E_f módulo de elasticidades da barra GFRP (MPa)

(5)

Tabela 9 – Característica das vigas ensaiadas – adaptado.

GRUPO	TIPO	IDENTIFICAÇÃO DAS VIGAS	h (mm)	d (mm)	L (mm)	f'c (MPa)	ρf (%)	ρf/ρbal
GRUPO 1	GFRP	G-0.5-350	350	305	2400	37,4	0,34	0,46
		G-2.5	350	305	2400	39,8	0,86	1,12
		G-2.5-350	350	296	2400	42,4	1,43	1,8
	AÇO	S-2.5	350	310	2400	49,3	0,9	0,16
		S-2.5-500	350	308	2400	49,3	1,43	0,28
GRUPO 2	GFRP	G-2.5-500	500	455	3100	37,4	0,35	0,48
		G-500	500	440	3100	44,7	0,9	1,07
		G-2.5-500	500	434	3100	37,4	1,47	2,02
	AÇO	S-500	500	458	3100	41,8	0,87	0,19
		S-2.5-500	500	458	3100	41,8	1,4	0,31

Fonte: Alam e Hussein, 2011. [26]

Tabela 10 – Propriedade das barras utilizadas – adaptado.

TIPO	DIÂMETRO (mm)	ÁREA SEÇÃO TRANSVERSAL (mm ²)	MÓDULO ELASTICIDADE (Gpa)	RESITÊNCIA A TRAÇÃO (MPa)
GFRP	12.7	127	46,3	786
	15.9	198	48,2	751
AÇO	11.3	100	200	fy = 418
	19.5	300	200	fy = 495
	25.2	500	200	fy = 445

Fonte: Alam e Hussein, 2011. [26]

Os resultados dos ensaios mostraram que todas as vigas romperam por corte, exceto a viga G-0.5-350. Em geral, os padrões de ruptura das vigas eram por tração diagonal ou compressão de cisalhamento. A viga G-0.5-350 rompeu por flexão, o que foi evidenciado pela ruptura das barras de GFRP. Como não houve armadura de cisalhamento nesta barra, como em todas as outras, a viga rompeu por flexão devido à sua baixa taxa de armadura, isto é, a rigidez de tração das barras nesta viga foi a mais baixa de todas as vigas do ensaio. Outras vigas com uma taxa de armadura menor do que a taxa de armadura balanceada romperam por corte. Notou-se, também, que as vigas romperam logo após a formação das fissuras diagonais, que por sua vez tiveram uma duração muito curta devido à ausência de armadura de cisalhamento (estribos).

Em geral, todas as vigas apresentaram comportamento linear antes e após a fissuração. As rigidezes das vigas antes da fissuração de flexão, foram quase idênticas, independentemente, da quantidade e tipo de armadura. Esse comportamento reflete a contribuição significativa da seção bruta para a inércia de

uma viga no Estádio I (não fissurado). As curvas carga-deslocamento diferiram após a fissuração, dependendo do tipo e quantidade de armadura. Para o mesmo nível de carga, os deslocamentos das vigas diminuíram com o aumento da taxa de armadura.

As vigas armadas com barras de aço tiveram a menor taxa de armadura, entretanto apresentaram as maiores rigidezes à flexão após a fissuração. Isto pode ser atribuído à alta rigidez axial destas barras. A Figura 23 apresenta o gráfico rigidez axial ($\rho_f E_f$) da barra versus rigidez à flexão da viga após a fissuração. Este gráfico sugere que o comportamento das vigas após a fissuração é governado pela rigidez axial das barras.

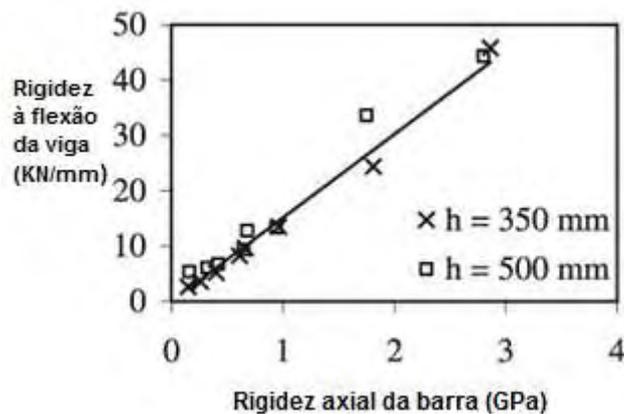


Figura 23 – Rigidez axial da barra VS rigidez à flexão da viga após fissuração.

Os autores também observaram que o aumento da taxa de armadura longitudinal de tração aumenta a capacidade da viga ao cisalhamento e que a resistência ao corte dada pela norma canadense aumenta linearmente com a raiz cúbica da rigidez axial das barras [26].

2.1.1.7 Silva (2014)

Silva (2014) estudou experimentalmente à flexão de quatro pontos o comportamento de vigotas de concreto armadas com barras de fibra de carbono e de fibra de vidro, variando-se o tipo de armadura, a resistência média do concreto e a taxa de armadura longitudinal observando-se a deformação dos modelos experimentais, a abertura de fissuras e carga última atingida e comparando este valor aos modelos teóricos propostos por regulamentações internacionais.

Para tanto, elaborou 14 modelos experimentais de seção transversal 15 x 15 cm e comprimento de 150 cm. Em relação à armadura longitudinal das vigotas, quatro foram armadas com aço, seis com barras de fibra de vidro e quatro com barras de fibra de carbono. Em relação à armadura transversal, 12 delas foram armadas com aço e duas com estribos de fibra de vidro.

Oito das vigas foram concretadas com concreto de resistência à compressão de 25 MPa e as restantes com resistência à compressão de 50 MPa. A previsão teórica do comportamento foi feita com base nos preceitos da NBR 6118 (NBR 6118, 2014) adaptando-se as variáveis às características das barras não metálicas.

A Tabela 11 mostra os resultados teóricos previstos e os experimentais encontrados pelo autor. Deve-se observar que a carga de ruptura estimada por flexão para todos os modelos foi menor do que a carga de ruptura por cisalhamento. Na média, a resistência teórica à flexão representou 26% da resistência teórica ao cortante. Todas as vigas romperam-se por flexão [27].

Tabela 11 – Resultados dos ensaios – adaptado.

Modelo Experimental	Tipo de armadura utilizada no Modelo		Fcm (MPa)	Carga de ruptura teórica		Modo de ruptura esperado	Resultados experimentais	
				À Flexão	Ao Cisalhamento		Carga de ruptura (kN)	Modo de ruptura
	Longit.	Transv.		(kN)	(kN)			
V25ASub	Aço	Aço	25	20,4	105,4	Flexão	43	Flexão
V25ASup	Aço	Aço	25	32,5	98	Flexão	54,9	Flexão
V25VSub	GFRP	Aço	25	8,9	98,6	Flexão	21,6	Flexão
V25VSuper	GFRP	Aço	25	14,5	93	Flexão	36,5	Flexão
V25TFVSub	GFRP	GFRP	25	16,4	115,7	Flexão	46,1	Flexão
V25TFVSuper	GFRP	GFRP	25	26,6	93,3	Flexão	53,1	Flexão
V50ASub	Aço	Aço	50	21,6	120,3	Flexão	46,6	Flexão
V50ASuper	Aço	Aço	50	35	103,3	Flexão	67,4	Flexão
V50VSub	GFRP	Aço	50	9,1	133,3	Flexão	54	Flexão
V50VSuper	GFRP	Aço	50	15,7	110,7	Flexão	62,7	Flexão

Fonte: Silva, 2014. [27]

2.1.1.8 Goldston et al (2016)

Este artigo apresenta os resultados de uma investigação experimental sobre os efeitos do uso de barras GFRP como armadura de vigas de concreto.

Comportamentos estáticos e dinâmicos (impacto) das barras foram investigados em doze vigas de concreto armado, de dimensões 2400 mm x 100 mm x 150 mm, sendo seis delas testadas sob carga estática para examinar os modos de falha e as capacidades de absorção de energia associadas, e as outras seis testadas sob carga de impacto usando um martelo mecânico.

Com relação aos materiais, foram usados no programa experimental concretos de duas resistências à compressão diferentes, 40 MPa e 80 MPa. Já as barras de GFRP ensaiadas à tração, atendendo às normas ASTM D7205/7205M, obtiveram as seguintes características, conforme Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de tração das barras de GFRP, adaptado.

Diâmetro	f_u (Mpa)	ϵ_{fu} (%)	E_f (GPa)
6,3	732	1,96	37,5
9,5	1764	3,18	55,6
12,7	1605	3,3	48,6

Fonte: Goldston et al., 2016. [40]

O programa experimental foi dividido em duas séries. A primeira série de seis vigas foi utilizada para investigar o comportamento à flexão sob carga estática (flexão de quatro pontos). Os principais parâmetros investigados foram o comportamento de carga-flecha, capacidade de absorção de energia, padrão de fissuração e modo de ruptura. A segunda série de seis barras foi utilizada para investigar o comportamento de vigas sob carregamento dinâmico de impacto. O objetivo principal foi investigar o efeito da força de impacto, dos deslocamentos dinâmicos no vão médio das vigas, da tensão de tração dinâmica das barras de GFRP e das forças de reação dinâmicas, incluindo forças inerciais e forças de reação de suporte. A variável de comparação utilizada nos ensaios foi a relação entre a armadura longitudinal (ρ_f) e a resistência à compressão do concreto.

Utilizaram-se barras de três diâmetros diferentes: 6,35mm (# 2), 9,5mm (# 3) e 12,7mm (# 4), proporcionando taxas de armadura longitudinais de 0,5%, 1,0% e 2,0%, respectivamente. As vigas de GFRP foram projetadas para serem duplamente armadas, com duas barras GFRP colocadas em compressão e duas em zonas de tração. Além disso, estribos de aço de 4 mm de diâmetro, com espaçamentos de

100 mm foram utilizados como armadura de corte. Foi adotada uma espessura de cobrimento de 15mm em todas as faces das vigas.

Por ser compatível com a proposta apresentada por esta dissertação, serão analisados apenas os ensaios estáticos das vigas, apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Detalhes do ensaio – adaptado.³

VIGA (A-#B-C-D)	Af(mm ²)	Mn(kNm)	ρ_f/ρ_{fb}	d (mm)	TIPO DE RUPTURA
40- # 2-0.5-S	63.4	5.70	0,9	127.8	Equilibrado (Fig. 19)
40- # 3-1.0-S	142.6	9.93	7.53	126.2	Concreto (Fig. 20)
40- # 4-2.0-S	253.4	11.6	12.7	124,7	Concreto
80- # 2-0.5-S	63.4	5.68	0,7	127.8	Ruptura de GFRP
80- # 3-1.0-S	142.6	11.5	5.65	126.2	Concreto
80- # 4-2.0-S	253.4	13.4	10.2	124,7	Concreto

Fonte: Goldston et al., 2016. [40]



Figura 24 – Ruptura equilibrada.

³A representa a força compressiva de concreto, B representa o tipo de barra de reforço GFRP, C representa a taxa de armadura e D representa o tipo de carregamento aplicado às barras (S representa carregamento estático). A_f = área de armadura de tração, M_n = capacidade do momento nominal e d = comprimento efetivo.



Figura 25 – Ruptura no concreto.

Após a análise dos resultados apresentados na Tabela 14 pode-se chegar a algumas conclusões sobre o estudo comparativo em questão:

A relação entre a taxa geométrica de armadura de viga e a taxa de armadura balanceada (ρ_f/ρ_{fb}) pode ser usada como um indicador para o modo de ruptura das vigas armadas com GFRP. O esmagamento de concreto na superfície superior ocorreu para vigas com a taxa de armadura maior do que a taxa de armadura balanceada calculada. Enquanto que, para as vigas armadas com taxa de armadura menor do que a taxa de armadura balanceada, a ruptura ocorreu nas barras de GFRP.

O efeito da resistência do concreto mostrou-se mais relevante na redução da flecha do meio do vão da viga, aumentando a rigidez à flexão pós-fissuração. Fazendo uma comparação da taxa de armadura de GFRP adotada com a taxa de armadura balanceada, observa-se que para as vigas com taxas de armadura maiores (2,0%) tem-se uma redução média de 21% na flecha, ao passo que para vigas com taxa de armadura menor (1,0%) houve redução nas flechas no meio do vão de apenas 7,0%.

A rigidez à flexão pós-fissuração mostrou-se maior para a viga com concreto de maior resistência para a mesma taxa de armadura. Desta forma, é possível dizer, que além da taxa de armadura estar diretamente relacionada a resistência à flexão das vigas não metálicas (de forma que quanto maior a taxa de armadura, menor será a deformação desta viga), a resistência do concreto também tem uma relação diretamente proporcional à rigidez do elemento estrutural.

Tabela 14 – Resultado dos ensaios – adaptado.⁴

Viga (modo de falha)	Pcr	Pexp	Mexp	Δexp	ε _{frp.média}	ε _{c.média}
	(kN)	(kN)	(kNm)	(mm)	(%)	(%)
40- # 2-0.5-S (falha equilibrada)	3.0	13.8	4.60	52.2	*	0.0014
40- # 3-1.0-S (esmagamento de concreto)	5.0	39.2	13.1	60.4	1.2	0.0029
40- # 4-2.0-S (esmagamento de concreto)	5.8	49.7	16.6	59,9	0,98	0.0033
80- # 2-0.5-S (ruptura de GFRP)	3.6	15.5	5.17	54.5	*	0.001
80- # 3-1.0-S (esmagamento de concreto)	5.9	42.6	14.2	56.3	*	0.0022
80- # 4-2.0-S (esmagamento de concreto)	5,7	49,5	16.5	47.3	0,93	0,0027

Fonte: Goldston et al., 2016. [40]

2.1.2 Regulamentações internacionais de projeto

São ainda poucas as regulamentações de projeto existentes, quando se diz respeito à utilização de barras de FRP como armadura para elementos de concreto. Nesse quesito, o Japão foi pioneiro em estabelecer os primeiros comitês de estudo e preparação de normas para elementos de concreto com barras de FRP, ainda no final da década de 1980. Tal esforço, levou à produção do primeiro código de projeto, publicado em 1996 em japonês e em 1997 em inglês, o JSCE [28].

O Canadá também foi pioneiro neste estudo, apresentando suas primeiras normas no início dos anos 2000. Nos Estados Unidos, o ACI estabeleceu um comitê

⁴**Pcr** = carga de fissuração, **Pexp** = capacidade de carga experimental, equivalente à primeira queda na capacidade de carga para vigas superarmadas, **Mexp** = capacidade do momento experimental, **Δexp**= deslocamento máxima experimental no intervalo do médio da viga, **ε_{frp.média}** = tensão média para os dois medidores de tensão conectados à armadura de tração GFRP, **ε_{c.média}** = tensão de concreto média na superfície superior das vigas de GFRP.

de estudo, o Comitê 440 em 1996, responsável pela edição de diversos documentos, dentre eles a norma 440.1R, a partir de 2001.

Um projeto europeu chamado *Eurocrete* ocorreu entre 1993 e 1997, com o principal objetivo de desenvolver a tecnologia de uso de barras de FRP para concreto. Este trabalho foi continuado, a partir de 1996, pela FIB, através de um grupo de trabalho que visa à elaboração de normas de projeto baseadas na experiência do Código Modelo do *Eurocode2*. Este grupo de estudo produziu, também, um Boletim em 2007 (FIB, 2007), abrangendo aspectos das propriedades mecânicas, caracterização e uso de barras de FRP em estruturas de concreto. Além disto, alguns países europeus desenvolveram comitês de estudo de maneira individual, como a Inglaterra, a Noruega e a Itália. O Código Modelo de 2010 trouxe algumas recomendações para a utilização de armaduras não metálicas. Atualmente, o *Eurocode 2* (2014) ainda não aborda este tema [29].

Deve-se destacar que as regulamentações existentes, especialmente o boletim da FIB (2007) e o ACI (2015) apresentam um caráter extremamente didático em relação aos assuntos que abordam.

Atualmente, no Brasil, existe um comitê técnico desenvolvido em parceria com a Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural (ABECE) e o Instituto Brasileiro do Concreto (Ibracon) para o estudo de materiais não convencionais para estruturas de concreto. Dentre os grupos de trabalho, o GT 03 trata especificamente da utilização de armaduras não metálicas.

Neste item são analisadas e discutidas as orientações relativas ao comportamento à flexão e ao cisalhamento, no estado limite último, para elementos armados com FRP recomendadas pelos seguintes documentos:

- ACI 440.1R-15 – *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars* (2015);
- CSA S806-02 – *Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers* (2002 – 2007);
- FIB Bulletin 40 – *FRP reinforcement in RC structures* (2007);
- CNR-DT 203/2006 – *Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars* (2007);

2.1.2.1 Comportamento à flexão simples

A literatura técnica refere que o comportamento à flexão de elementos armados com barras de FRP é análogo àqueles armados com barras de aço. Assim, as regulamentações de projeto que existem fazem alusão à teoria utilizada no concreto armado tradicional e se valem dos mesmos preceitos básicos:

- a) Deformações no concreto e na armadura de FRP são proporcionais à distância à linha neutra (hipótese das seções planas);
- b) A falha da seção ocorre quando se atinge uma deformação limite de compressão (no concreto) e/ou de tração (na armadura);
- c) A deformação de compressão do concreto deve ser limitada a um valor máximo, da ordem de 0,003;
- d) A resistência à tração do concreto é ignorada no estado limite último;
- e) Existe aderência perfeita entre concreto e armadura

Além disto, com respeito às propriedades mecânicas das barras de FRP, as normas dizem que:

- f) O comportamento tensão *versus* deformação da armadura de FRP é de caráter linear e elástico até sua ruptura; e
- g) Dado que a resistência à compressão das barras de FRP é teoricamente inferior a sua resistência à tração, apresentando ainda grande variabilidade, não se considera qualquer contribuição à compressão da armadura não-metálica.

O ACI destaca que essas premissas são válidas para seções retangulares com uma única camada de armadura. Não há evidência que a teoria, entretanto, não se aplique a outras configurações geométricas – apenas não há resultados experimentais que justifiquem os valores analíticos. Além disto, tanto o ACI quanto o boletim da FIB acrescentam que na hipótese de utilização de mais de uma camada de armadura, deve-se obrigatoriamente realizar o equilíbrio dos esforços internos levando-se em consideração a compatibilidade de deformações, visto que como não

existe patamar de escoamento para as armaduras, camadas diferentes estarão obrigatoriamente sujeitas a tensões diferentes.

Em relação ao modo desejado de ruptura para as seções, embora as regulamentações existentes permitam que ela se dê, tanto por alongamento excessivo como por esmagamento na compressão, elas sugerem que as seções sejam armadas de forma a romper por compressão. Assim, como no concreto armado tradicional, isto se dá, por compatibilidade de deformações, sempre que a deformação máxima no concreto aconteça antes da deformação máxima na armadura. Isto, naturalmente, dependerá das propriedades do concreto e do FRP e exigirá uma determinada taxa de armadura – a chamada “taxa balanceada” de armadura.

De acordo com o ACI, esta taxa é dada pela Equação (6):

$$\rho_{fb} = 0,85 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f_c}{f_{fu}} \cdot \frac{E_f \cdot \epsilon_{cu}}{E_f \cdot \epsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (6)$$

Já pela norma canadense S806-02 (2002), a taxa balanceada é dada pela Equação (7):

$$(c/d) \geq \frac{7}{7 + 2000\epsilon_{fu}} \quad (7)$$

O Boletim 40 da FIB recomenda a taxa proposta por Pilakoutas (2002) derivada do *Eurocode 2*:

$$\rho_{fb} = \frac{0,81(f_{ck} + 8) \cdot \epsilon_{cu}}{f_{fk} \left(\frac{f_{fk}}{E_{fk}} + \epsilon_{cu} \right)} \quad (8)$$

Pode-se também determinar a taxa de armadura balanceada de acordo com as hipóteses da NBR 6118 [30]. Para isto basta considerar a compatibilidade de deformações, o equilíbrio de esforços internos, a deformação máxima no concreto, ϵ_{cu} , de acordo com o item 8.2.10.1 e o bloco retangular de tensões de acordo com 17.2.2 da norma referenciada. Assim tem-se:

Por equilíbrio de esforços internos:

$$R_c = R_f \rightarrow b \cdot \lambda \cdot x \cdot \alpha_c \cdot f_c = A_f \cdot f_{fu} \quad (9)$$

Por compatibilidade de deformações:

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{\varepsilon_{fu}}{d-x} \rightarrow x = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \cdot d \quad (10)$$

Substituindo:

$$b \cdot \lambda \cdot \alpha_c f_c \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \cdot d = A_f \cdot f_{fu} \quad (11)$$

Logo encontra-se:

$$\rho_{fb} = \lambda \cdot \alpha_c \cdot \frac{f_c}{f_{fu}} \cdot \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \quad (12)$$

Embora as regulamentações prefiram que a ruína se dê por compressão excessiva, o boletim da FIB enumera uma série de inconvenientes deste fato:

- Custo. Maior custo, levando a elementos pouco econômicos;
- Filosofia de dimensionamento. Se a resistência do material não for utilizada, seu coeficiente de ponderação de resistências se torna irrelevante;
- Flechas imediatas. Serão maiores, se maiores deformações forem requeridas do FRP;
- Flechas de longo prazo. Se as tensões no concreto em serviço forem altas, ($0,45f_c$, de acordo com o *Eurocode*), maiores deformações por fluência ocorrerão.

2.1.2.2 Comportamento ao cisalhamento

O Boletim 40 da FIB (2007) descreve a maneira com que a utilização da armadura de FRP interfere no comportamento ao cisalhamento de vigas de concreto armado. Tais mudanças, devidas às características das barras, refletem-se em todos os mecanismos de resistência ao cisalhamento [6].

Quanto aos efeitos complementares aos de treliça (resistência da zona não fissurada, engrenamento dos agregados e efeito de pino), são os seguintes comentários tecidos pelo boletim da FIB:

Em relação à transferência de esforços pela zona não fissurada do concreto, enquanto que nas estruturas de concreto com armadura convencional o decréscimo da profundidade da linha neutra é mais evidente após o escoamento do aço, na utilização de armaduras de FRP tal fenômeno não acontece, pois não há escoamento e, além disto, com o aumento da deformação das barras de FRP, a profundidade da linha neutra tende a aumentar ligeiramente devido à natureza não linear do concreto. Assim, para seções equivalentes de aço e FRP, observa-se que a zona comprimida é bem menor para a última. Com isto, espera-se menor parcela de resistência ao cisalhamento pela zona não fissurada.

Já o engrenamento dos agregados é um fenômeno que ocorre na zona fissurada do elemento estrutural, pela tendência de deslocamento relativo entre os agregados de cada lado da fissura. De acordo com o boletim da FIB, estudos demonstraram que este efeito responde por 30 a 50% da resistência ao cisalhamento do concreto não fissurado. Contudo, esta parcela depende também da configuração superficial dos agregados e, principalmente, da abertura de fissuras. Assim, quando da utilização de armaduras de FRP, desenvolvem-se fissuras mais largas comparativamente àquelas observadas para estruturas com armadura metálica. Portanto, espera-se, também, uma menor magnitude deste efeito.

Finalmente, sobre o efeito de pino, sabe-se que tal comportamento está relacionado à resistência transversal das barras utilizadas longitudinalmente que, como se sabe, possui valor bastante baixo no caso de armaduras não metálicas. Assim, o boletim da FIB refere que quando se utiliza FRP como armadura de flexão, a resistência ao cisalhamento oferecido pelo efeito de pino (*"dowel action"*) pode ser considerado negligenciável. Por outro lado, o ACI 2015 refere que a contribuição da armadura longitudinal na resistência ao corte ainda não está determinada, porém, assume-se que esta contribuição é menor do que aquela com área equivalente em aço. Este código refere, inclusive, a necessidade de pesquisa nesta questão, a fim de quantificar este efeito.

O ACI (2015) refere, ainda, que pesquisas realizadas para avaliar a capacidade de elementos fletidos sem armadura de cisalhamento indicaram que a resistência do concreto ao corte é influenciada pela rigidez da armadura de tração.

Na prática, como há interação entre os mecanismos complementares aos de treliça e estes também são dependentes de fatores com grande dispersão (exemplo, quantidade de agregado), as regulamentações apresentam relações empíricas para o cálculo da parcela de V_c , isto é, esforço cortante resistente devido a estes mecanismos, a partir de correlações com as dimensões da seção transversal e da resistência do concreto. Na Tabela 15 encontram-se as formulações disponíveis nas normas.

Ressalta-se, que em todas as formulações a taxa geométrica de armadura (ρ_f , ρ_w , ρ_1) exerce papel fundamental no cálculo. Pois, embora o efeito de pino seja desconsiderado, taxas mais altas de armadura limitam a abertura de fissuras melhorando o engrenamento dos agregados e aumentam comparativamente a zona comprimida.

Como se observa pelos parágrafos acima, espera-se que a resistência ao cisalhamento dos mecanismos complementares (que é traduzido nas normas de dimensionamento como uma parcela empírica e normalmente denominada por V_c) é, de maneira geral, inferior àquela esperada para vigas análogas com armadura de aço.

Em relação ao comportamento dos estribos propriamente ditos, no caso de vigas armadas com aço, considera-se que a tensão a que os estribos estão sujeitos, no estado limite último, é igual à sua tensão de escoamento. Porém, quando da utilização de armaduras não metálicas, sabe-se que este fenômeno não faz parte das características das barras de FRP. Desta forma, segundo o boletim da FIB, outros fenômenos normalmente desprezados nas vigas com aço ganham importância no estudo da resistência ao cisalhamento, tais como deformações e escorregamento da armadura.

Tabela 15 – Determinação da parcela V_c da resistência ao cisalhamento por diversas normas.

Código	Formulação
ACI	$V_c = 0,4k\sqrt{f'_c}b_wd$ $k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f$ <p>n_frelação entre o módulo de elasticidade da armadura de FRP e do concreto</p>
CSA	$V_c = 0,035 \left(f'_c \rho_w E_F \frac{V_f}{M_f} d \right)^{1/3} b_w d$
CNR	$V_{r,ct} = 1,3 \left(\frac{E_F}{E_s} \right)^{1/2} \cdot 0,25f_{ct}(1,2 + \rho_1) \cdot b_d$ $1,3 \left(\frac{E_F}{E_s} \right)^{1/2} \leq 1$ <p>E_s é o módulo de elasticidade do aço, usado como referência</p>
JSCE	$V_c = \beta_d \cdot \beta_p \cdot f_{vc} \cdot b_w \cdot d$ $\beta_d = \sqrt[4]{1/d} \leq 1,5$ $\beta_p = \sqrt[3]{\frac{100\rho_w E_{fu}}{E_0}} \leq 1,5$ $f_{vc} = 0,2\sqrt[3]{f'_c}$

Além disto, tanto os estudos de Ahmed et al (2010) quanto o próprio ACI (2015) levaram à conclusão de que a resistência das barras quando dobradas é inferior às barras retas, devido à concentração de tensões naquela região e à fragilização do material devido ao processo de dobra. Desta forma, espera-se, igualmente, que a resistência dos estribos seja inferior à esperada para uma viga

com aço análoga. Assim, as normas costumam limitar as tensões ou deformações no estribo, a fim de controlar a abertura de fissuras de cisalhamento e impedir que ocorra falha na região da dobra (440-1R, 2015). A norma do ACI, por exemplo, introduz um fator de redução, f_{fb} , para levar em consideração a presença da dobra no estribo e a norma canadense limita as tensões em 40% da resistência última do estribo. A Tabela 16 apresenta a formulação para o cálculo da parcela de V_s por diversas normas:

Tabela 16 – Determinação da parcela V_f da resistência ao cisalhamento por diversas normas.

Código	Formulação
ACI	$V_f = \frac{A_{fv} \cdot f_{fv} \cdot d}{s}$ $f_{fv} = 0,004 \cdot E_f \leq f_{fb}$ $f_{fb} = \left(0,05 \cdot \frac{r_b}{d_b} + 0,3\right) \cdot f_{fu} \leq f_{fu}$
CSA	$V_{sf} = \frac{0,4 \cdot A_v \cdot f_{fu} \cdot d}{s}$
CNR	$V_{R,f} = \frac{A_{fv} \cdot f_{fr} \cdot d}{s}$ $f_{fr} = \frac{f_f}{2}$
JSCE	$V_s = \left(\frac{A_w}{s_s} E_w \cdot \varepsilon_{fw}\right) \cdot \left(\frac{d}{1,15}\right)$ $\varepsilon_{fw} = 1 \times 10^{-4} \cdot \sqrt{f'_{mc} \frac{p_w E_{fu}}{\left(\frac{A_w}{b_w s_s}\right) \cdot E_w}}$ $f'_{mc} = \left(\frac{h}{0,3}\right)^{-\frac{1}{10}} \cdot f'_c$

No caso de elementos armados com FRP, o ACI (2015) considera dois modos de ruptura ao esforço cortante:

- ruptura da armadura de esforço cortante, considerado frágil;
- ruptura do concreto da alma da viga, caracterizado por grandes deslocamentos.

Sempre que V_u exceder $V_c/2$ o ACI (2015) recomenda o uso de uma taxa mínima de armadura ao cisalhamento a fim de evitar ruptura brusca do elemento, calculada pela Equação (13).

$$A_{fv,min} = 0,35 \frac{b_w s}{f_{fv}} \quad (13)$$

Em relação aos estribos, este código recomenda que os mesmos devem ser fechados, com ganchos de 90°. O espaçamento máximo dos estribos retos deve ser menor do que $d/2$ ou 600 mm, de modo que todas as fissuras de corte sejam interceptadas por um estribo. Além disto, recomenda que a relação raio de dobradura/diâmetro da barra seja maior ou igual a 3.

2.1.2.3 Comportamento em serviço

Como os elementos de concreto armados com FRP têm baixa rigidez após a fissuração, as deflexões permitidas sob cargas de serviço podem controlar o projeto. Em geral, o projeto de seções transversais armadas com FRP para resistência à flexão satisfaz os critérios de serviço em relação ao controle de deslocamentos e fissuras [12].

O desempenho satisfatório em serviço pode ser descrito por dois parâmetros:

- Fissuração - largura excessiva das fissuras é indesejável por razões estéticas e outras (por exemplo, para evitar vazamento de água), que podem danificar ou deteriorar o concreto estrutural;
- Deslocamentos - devem estar dentro dos limites aceitáveis impostos pelo uso da estrutura.

2.2 Trabalhos nacionais

2.2.1 Tavares (2006)

Tavares (2006) ensaiou seis vigas à flexão com dimensões de 150 mm x 300 mm x 3.050 mm, sendo uma armada longitudinalmente e transversalmente com barras e estribos de aço e as demais armadas longitudinalmente com barras de GFRP e transversalmente com estribos aço. Das vigas armadas com GFRP, três delas apresentaram armadura longitudinal com ganchos em suas extremidades e as outras duas contiveram apenas barras retas. A viga de referência (V01) foi armada com duas barras de aço de 12,5 mm de diâmetro. As demais vigas foram armadas com: duas barras de 9,53 mm de diâmetro (V02); cinco barras de 6,35mm de diâmetro, sendo a primeira camada com três barras e a segunda com duas barras (V03); três barras de 9,53 mm de diâmetro, com e sem gancho (V04) e três barras de 6,35 mm de diâmetro em duas camadas, com e sem gancho (V05). O detalhamento da seção transversal de cada viga pode ser observado na Figura 26.

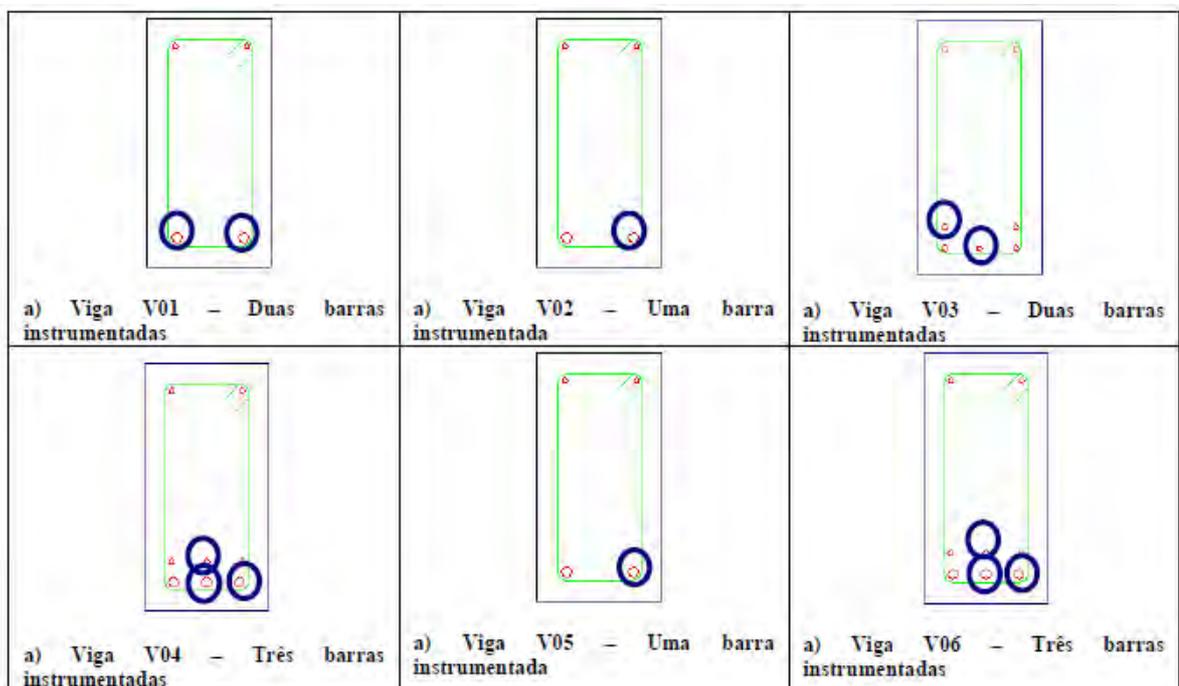


Figura 26 – Detalhamento das vigas e localização das barras instrumentadas para os ensaios à flexão.

O trabalho teve caráter pioneiro no Brasil, embora ainda tenham sido utilizadas armaduras importadas, do tipo ASLAN 100, da marca americana Hughes Brothers.

A autora estudou, basicamente, o comportamento dos modelos experimentais à flexão, tanto em serviço quanto em relação à capacidade última. A autora apontou as dificuldades na realização dos ensaios de caracterização e na armação das vigas, devido à sua flexibilidade, já que na amarração entre estribo de aço e as barras longitudinais de GFRP, a viga apresentava um descolamento, pois os estribos, em virtude da sua massa, flexionavam as barras e, na concretagem, foi difícil manter o elemento imóvel na forma.

As vigas armadas com GFRP tiveram flechas superiores às de aço. As três vigas (V02, V03 e V05) dimensionadas a partir da equivalência da capacidade resistente do modelo armado com barras de aço atingiram o valor de 10% para deformação específica em um carregamento próximo ao valor de 40kN (muito abaixo do valor de 80kN atingido pelas vigas armadas com barras de aço).

Tavares (2006) também observou que as aberturas das fissuras teóricas, obtidas pelo ACI 440.1R (2003), eram superiores às obtidas experimentalmente, além de verificar, também, que a limitação das deformações excessivas das vigas pode controlar o dimensionamento da peça.

Os resultados experimentais indicaram que a utilização de barras com ganchos influenciou as deformações nas extremidades das barras, tornando-as mais rígidas e melhorou a aderência sob cargas mais altas [8].

2.2.2 Couto (2007)

Em seu trabalho, Couto (2007) analisou o comportamento da aderência entre as barras de GFRP e o concreto, realizando ensaios do tipo arrancamento (“*pull-out*”) e posteriormente, modelando numericamente, o comportamento dos modelos experimentais por meio de um modelo de elementos finitos elaborado no software ANSYS.

Novamente, foram utilizadas barras de GFRP importadas, do tipo ASLAN 100. Foram consideradas barras com diâmetros de 9 e de 16 mm. Variou-se a resistência do concreto entre 30, 60 e 80MPa e foram considerados cinco exemplares para cada corpo de prova, de acordo com a Tabela 17, abaixo:

Tabela 17 – Características dos protótipos do ensaio.

Corpo de Prova	Resistência do concreto aos 28 dias (MPa)	Diâmetro da barra de GFRP (mm)	Número de Exemplares
C30B9	30	9	5
C30B16	30	16	5
C60B9	60	9	5
C60B16	60	16	5
C80B9	80	9	5
C80B16	80	16	5
Total			30

Fonte: Couto, 2007. [19]

A autora também relatou dificuldade na realização dos ensaios de caracterização das barras, especialmente quanto à tração, pois ocorreu falha por cisalhamento das barras na região próxima às ancoragens.

De acordo com o observado pelos ensaios acima referenciados, a ocorrência de ruptura da superfície das barras durante o ensaio de arrancamento, depende da resistência do concreto empregada. Além disso, a resistência da aderência entre as barras e o concreto é controlada, principalmente, pela parcela de atrito. Esses resultados se equivalem ao reportado pela literatura internacional.

Finalmente, em relação à análise numérica desenvolvida, destacou que um modelo computacional linear não representou bem o comportamento observado experimentalmente e que apenas os modelos relativos à resistência do concreto de 30 MPa encontraram aproximação com os resultados reais.

A modelagem numérica da interface entre barra e concreto carrega muita dificuldade, mesmo para o caso do concreto armado, e nem sempre consegue representar fielmente o comportamento experimental. Além disso, quando se utiliza um tipo de barra ortotrópica, que ainda sofre dano da conformação superficial provocando deslizamento, as dificuldades se multiplicam [19].

2.3 Conclusões da Revisão Bibliográfica

Muitos programas de pesquisa já foram realizados para investigar o comportamento à flexão de elementos lineares de concreto armados com barras de FRP, como:

- estudo do comportamento ao corte de vigas de concreto armadas com GFRP sem armadura de cisalhamento;
- uso de estribos de aço;

No entanto, o uso de estribos de FRP como armadura de cisalhamento em vigas não foi suficientemente explorado, de modo a fornecer um modelo racional e diretrizes satisfatórias para prever a força resistente de cisalhamento dessas vigas.

Devido às características unidirecionais dos materiais de FRP, as dobras nos estribos de FRP reduzem significativamente a sua capacidade resistente. Isto porque, ocorre concentração de tensões nas regiões de dobras, devido à curvatura e à fragilidade intrínseca das fibras particularmente ao seu eixo.

Apenas Ahmed et al. (2010) estudaram com mais profundidade estribos de GFRP e verificaram que a tensão nos estribos ao longo do vão de corte é afetada pelo padrão de fissuração e que as vigas com menor espaçamento de estribos apresentaram maior capacidade resistente ao corte e menores deformações nos estribos para qualquer nível de carregamento. Concluíram que o comportamento do estribo GFRP depende, não somente do seu módulo de elasticidade, mas também da sua configuração e de outras propriedades mecânicas, como as características de aderência dessas barras [25].

De modo geral, a literatura refere que a taxa de armadura longitudinal tem um efeito significativo na rigidez de flexão de vigas fletidas. O aumento da taxa de armadura longitudinal de tração aumenta a capacidade resistente ao corte, promove uma diminuição dos deslocamentos e da fissuração.

Em relação às previsões teóricas, os autores estudados não apresentaram um consenso.

Tais constatações levam à motivação do estudo do comportamento de estruturas integralmente armadas com barras de GFRP.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Após pesquisa na literatura técnica nacional e internacional sobre vigas isostáticas armadas com barras GFRP, foram encontrados poucos estudos internacionais e um nacional de vigas de concreto armado integralmente com armadura de fibra de vidro.

Assim, foi iniciado em janeiro de 2017, no LEC – Laboratório de Engenharia Civil da UERJ e no Laboratório de Materiais de Construção e Concreto do IME, instituição parceira nesta pesquisa, o programa de ensaios experimentais deste trabalho. Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais e ensaios de flexão em quatro pontos de vigas de concreto 100% armadas com material não metálico, especificamente, barras longitudinais e estribos em GFRP.

Os ensaios de caracterização foram realizados no IME e os ensaios de flexão dos modelos experimentais foram realizados no LEC-UERJ, na prensa hidráulica de acionamento elétrico para carga e registros de força – UBP 300, da marca *Losenhausenwerk* – LOS de 1000kN. As vigas foram apoiadas em um berço metálico, com distância entre os apoios de dois metros, e sobre os apoios foram fixadas com gesso placas metálicas de 1 cm de espessura, com largura aproximadamente igual a das vigas. A fim de garantir uma distribuição uniforme do carregamento, foram fixados sobre a viga, também com gesso, tarugos metálicos com seção transversal quadrada de 4 cm e comprimento igual ao da largura das vigas, cada um afastado 15 cm do eixo. Sobre estes tarugos, uma viga de seção I metálica foi apoiada, conforme pode ser observado nas Figura 27 e Figura 28. Desta forma, a carga que a máquina depositou sobre a estrutura metálica foi igualmente dividida entre os dois pontos de carregamentos desejados para o ensaio.

Os dados dos ensaios foram compilados pela leitura dos extensômetros colados nas amostras e dos deflectômetros posicionados na base inferior das vigas, especificamente, no eixo e na direção dos pontos de carregamento.

É importante informar que o carregamento das vigas foi realizado por meio de controle de esforço aplicado, com uma variação de 1 kN/min, aproximadamente, até sua ruptura.



Figura 27 – Modelo de carregamento para ensaio de flexão em quatro pontos.

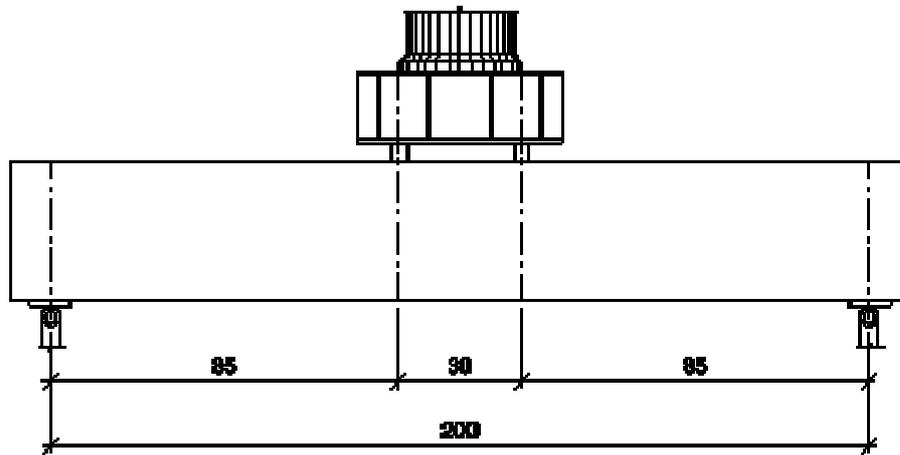


Figura 28 – Detalhamento ensaio de flexão em quatro pontos.

3.1 Determinação dos modelos experimentais

A substituição de armaduras metálicas tradicionais por barras não metálicas em estruturas de concreto altera seu comportamento mecânico sob vários aspectos, como já foi reportado exhaustivamente na literatura técnica [24], [10], [12], [6], [31], [32]. Como visto em detalhe nos capítulos anteriores, pode-se destacar:

- O baixo módulo de elasticidade das barras altera a rigidez total da estrutura, provocando maiores flechas, maiores aberturas de fissura e rápida diminuição da posição da linha neutra;
- O comportamento elástico e linear da barra até sua ruptura, e faz com que a ruptura se dê de maneira brusca, mesmo quando ela se inicia pela falha das barras;
- O acabamento superficial das barras pode piorar o comportamento geral quanto à aderência;
- Pela natureza do material e sua interação com o concreto, os mecanismos de combate ao esforço cortante funcionam de maneira diferente e, além disto, a presença de regiões de dobras no estribo diminui sua capacidade resistente;
- Finalmente, todas as características acima descritas sofrem influência do processo de fabricação da armadura não metálica.

Dessa forma, as previsões normativas e os resultados teóricos e experimentais observados na literatura técnica podem não ser totalmente válidos para as armaduras fabricadas no Brasil, que são o objeto de estudo deste trabalho.

Por isso, na determinação dos modelos experimentais, buscou-se, dentro do possível, avaliar esses parâmetros acima descritos e verificar o comportamento estrutural sob estas condições. Pensou-se, adicionalmente, em comparar-se, ao menos qualitativamente, os resultados observados com algum modelo experimental de referência, armado com barras de aço.

Assim, foram propostos os ensaios de vigas retangulares e, isostáticas, com taxas de armadura compatíveis com o observado na prática. O principal parâmetro avaliado nesse estudo foi a quantidade de armadura longitudinal de tração e seus efeitos no comportamento global da estrutura. Com vistas a avaliar o comportamento também ao cisalhamento, propôs-se também a avaliação da influência da quantidade de armadura transversal.

Finalmente, com vistas a examinar a homogeneidade dos resultados colhidos, optou-se pelo ensaio de dois espécimes de cada tipo de configuração de viga a ser estudada.

Foram moldados dois grupos de vigas armadas com fibras de vidro compostos por duas vigas iguais: V1A igual a V1B e V2A igual a V2B. As vigas do grupo 2, V2A e V2B, possuíam mais armaduras longitudinais de tração e estribos com menor espaçamento do que as vigas do grupo 1. A viga armada em aço foi denominada por VR1 e foi normalmente armada (Domínio 3).

Inicialmente, foram determinadas dimensões equivalentes para todos os modelos, usando como parâmetro o vão limite que a máquina de ensaios alcançava, sendo este de 2 metros de distância entre os apoios. Além disso, foi necessário atender a capacidade de carga máxima que o mini-guincho existente no laboratório da universidade sustentava.

Atendendo a estes requisitos, foram previstas vigas de 2,20 metros de comprimento, com 0,15 m de largura e 0,30 m de altura para a realização dos ensaios. Contudo, houveram problemas durante a confecção das armaduras de aço e de fibras de vidro, que levaram a vigas com dimensões maiores do que as projetadas, obrigando ao ajuste das formas e, conseqüentemente, à alteração das dimensões dos modelos.

A armadura metálica entregue pela empresa de armação fugiu do projeto, sendo fornecida com um comprimento maior, na direção longitudinal. Desta forma foi necessário realizar um aumento de 5 cm no comprimento da forma, que comportaria as armaduras de aço.

Com relação às vigas armadas com GFRP, os estribos que, inicialmente, deveriam ser confeccionados com o diâmetro de 6,3 mm, e conformação superficial do tipo “enrolada”, foram entregues pela fábrica em três configurações diferentes: trançados com \varnothing 9,6 mm; enrolados com \varnothing 8,2 mm e trançados com \varnothing 7,4 mm, conforme pode ser observado na Figura 29.

Devido a estas mudanças, foi necessário o aumento da largura e altura das formas das vigas armadas com GFRP, e do comprimento das formas das vigas armadas com aço.

Para que os resultados dos ensaios pudessem ser igualmente comparáveis, foram feitos gráficos de proporcionalidade dos resultados experimentais encontrados, de acordo com o sugerido por Leonhardt [33].



Figura 29 - Tipos de estribos utilizados: (a) enrolado com \varnothing 6,3 mm; (b) enrolado com \varnothing 8,2 mm; (c) trançado com \varnothing 9,6 mm; e (d) trançado com \varnothing 7,4 mm.

3.1.1 Detalhamento

V1A e V1B – Viga armada em barras - GFRP

Dimensões (m): 2,20 x 0,20 x 0,35;

Armadura longitudinal inferior 3 \varnothing 12,5 mm GFRP (enrolado);

Estribos: 4 \varnothing 8,2 mm GFRP (enrolado) e 16 \varnothing 7,4 mm GFRP (trançado), todos com espaçamento de 10 cm;

Armadura longitudinal superior: 2 \varnothing 6,3 mm GFRP (enrolado).

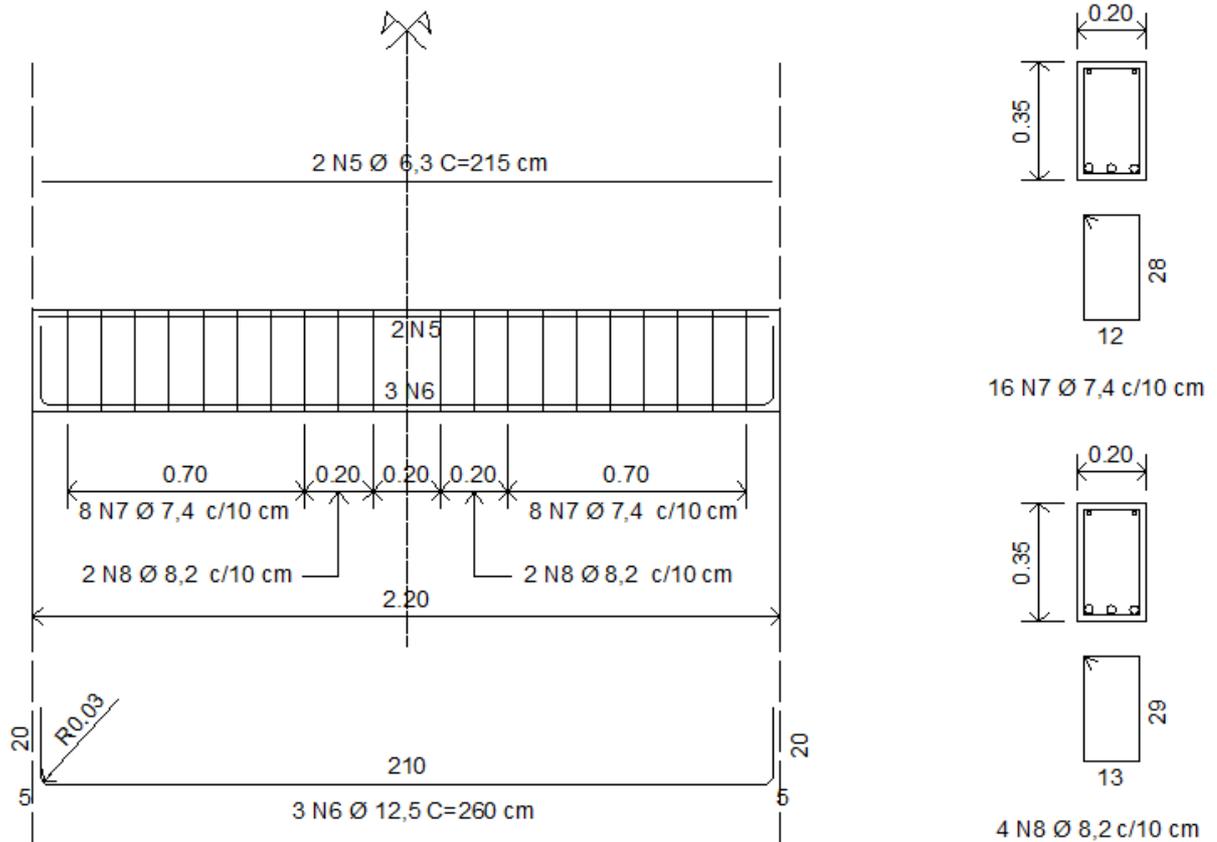


Figura 30 – Detalhamento das vigas V1A e V1B.

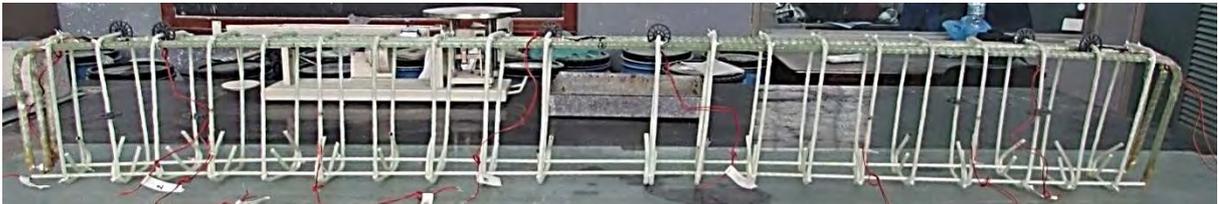


Figura 31 – Armadura da viga V1A.

V2A e V2B– Viga armada em barras - GFRP

Dimensões (m): 2,20 x 0,20 x 0,35

Armadura longitudinal inferior: 3 Ø 12,5 mm (1ª camada), GFRP (enrolado) e 2 Ø 12,5 mm (2ª camada), GFRP (enrolado);

Estribos: 2 Ø 8,2 mm GFRP (enrolado) e 24 Ø 9,6 mm GFRP (trançado), todos com espaçamento de 7,5 cm;

Armadura longitudinal superior: 2 Ø 6,3mm GFRP (enrolado).

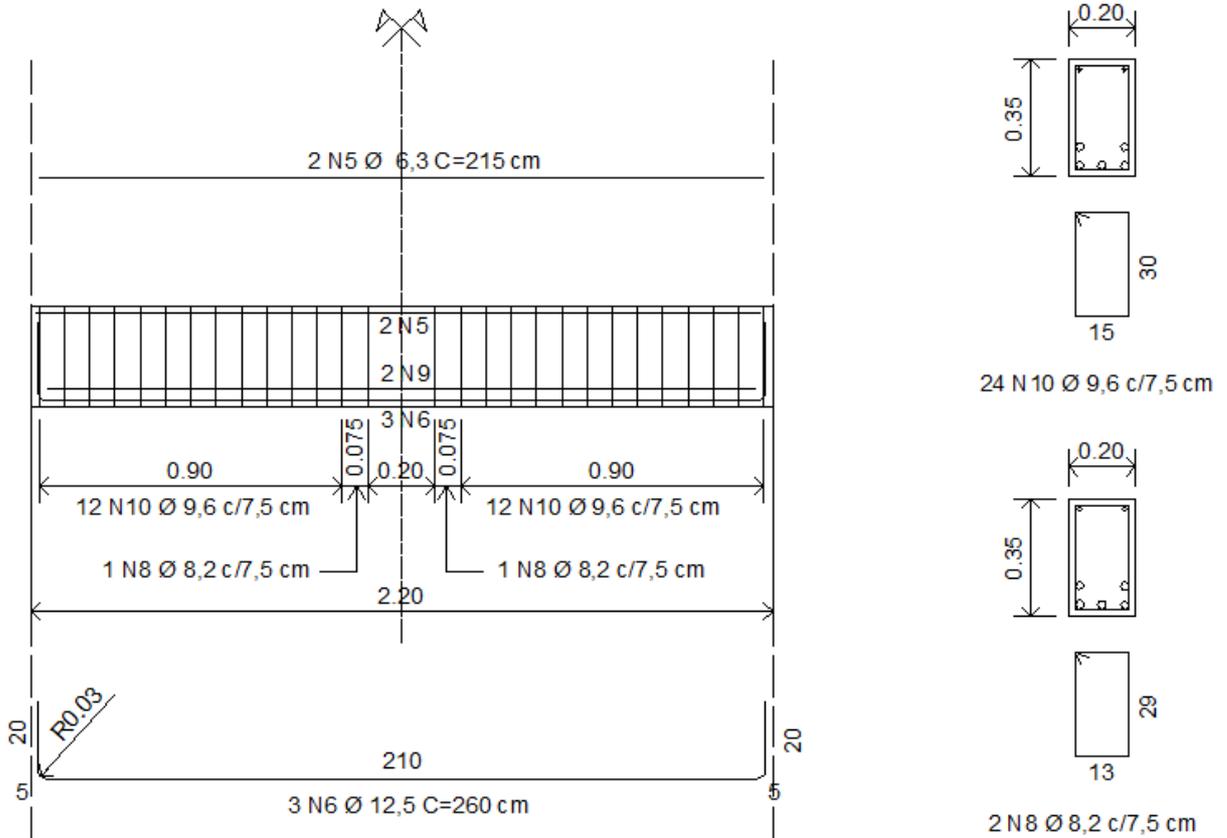


Figura 32 – Detalhamento das vigas V2A e V2B.



Figura 33 – Armadura da viga V2A.

VR1 – Viga armada em aço CA-50

Dimensões (m): 2,35 x 0,15 x 0,30;

Armadura longitudinal inferior: 3 Ø 12,5 mm;

Estribos: 14 Ø 6,3 mm espaçados a cada 15 cm;

Armadura longitudinal superior: 2 Ø 6,3 mm.

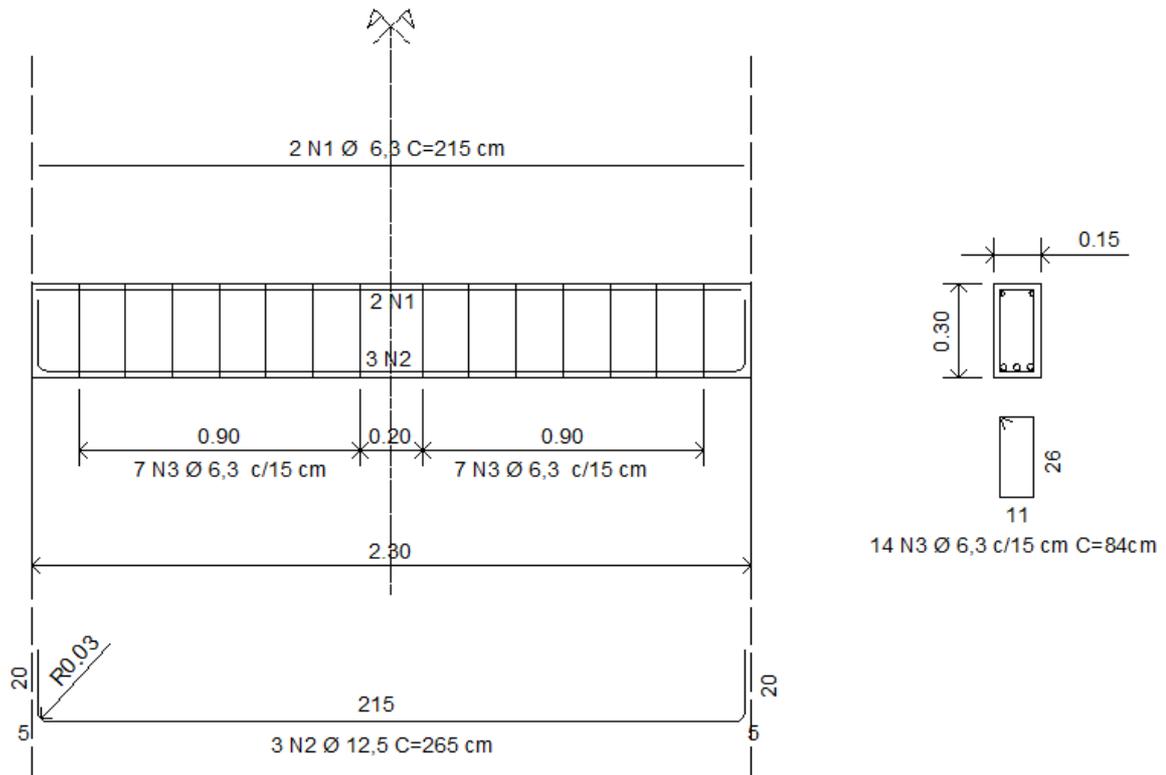


Figura 34 – Detalhamento da viga VR1.



Figura 35 – Armadura da viga VR1.

3.1.2 Taxa de armadura

As taxas de armadura adotadas na flexão e no cisalhamento estão apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Comparativo das taxas de armadura referente às vigas ensaiadas.

TIPO	bw (m)	d (m)	Taxa de armadura balanceada (ρ_{fb})	Taxa de armadura longitudinal (ρ_{sl})	Taxa de armadura cisalhamento (ρ_{sw})
V1A	0,2	0,325	0,0033525	0,00566393	0,00408807
V1B	0,2	0,325	0,0033796	0,00566393	0,00408807
V2A	0,2	0,305	0,0033722	0,01005889	0,00837634
V2B	0,2	0,305	0,0035313	0,01005889	0,00837634
VR1	0,15	0,275	0,0236848	0,0089249	0,00252993

3.2 Caracterização dos materiais

3.2.1 Concreto

O concreto utilizado neste experimento foi confeccionado no laboratório da UERJ. A mistura dos componentes foi realizada em betoneira fixa, com capacidade de 100 litros, e para a dosagem dos materiais, foi utilizada balança de precisão com capacidade máxima de 1000 kg.

Para atingir o cobrimento idealizado, foram conectados espaçadores plásticos de 2 cm à armadura (Figura 36). Além disso, com o objetivo de facilitar o processo de desforma do concreto, aplicou-se desmoldante do tipo óleo nas formas de madeira. Finalizando as etapas de preparo do concreto, para garantir o adensamento da mistura, foi utilizado vibrador elétrico após o lançamento do concreto, como pode ser observado na Figura 37.



Figura 36 – Espaçadores de plástico



Figura 37 – Adensamento da mistura com vibrador.

a) Cimento

Para a dosagem do concreto foi utilizado cimento do tipo CP II E 32, cimento Portland composto com escória de alto forno, Ultra Forte, da fabricante Holcim.

b) Agregado Miúdo

Como agregado miúdo foi utilizada areia média lavada, comercializada em sacos, sendo obtida em casas de materiais de construção locais. As análises de caracterização foram realizadas no LEC - UERJ, de acordo com as instruções normativas da NBR NM 248:2003, conforme Anexo I.

c) Agregado Graúdo

Como agregado graúdo, foi utilizada brita 0, obtida também no comércio local. As análises granulométricas deste minério, realizadas em concordância com a NBR NM 248:2003, encontram-se no Anexo II.

d) Água

A água empregada na mistura foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro/RJ.

e) Aditivo

Foi usado aditivo polifuncional superplastificante Siliconns Mix 400, da marca Silicon, cujas propriedades fornecidas pelo fabricantes estão especificadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Informações técnicas do aditivo.

RECOMENDAÇÕES	DOSAGEM	ASPECTO/COR	pH	MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)
Aditivo para a manutenção da plasticidade 200 min a 4h.	[480 ml - 1.950 ml] Recomendação inicial: 850 ml	Líquido translúcido / mel claro	3,0 +/- 1,0	1,04 +/- 0,02

Fonte: Catálogo Silicon, 2017. [34].

No Anexo III é possível observar o traço de concreto utilizado, indicando a quantidade dos materiais constituintes na mistura para chegar no traço ideal que atingisse uma resistência de, no mínimo, 20 MPa aos 28 dias. À proporção avaliada ideal, em massa, de cimento, areia, brita e água para o ensaio foi de 1:3,57:2,77:0,42, respectivamente.

Durante a concretagem, 43 corpos de prova cilíndricos de concreto de 100 mm x 200 mm de dimensões foram moldados. Trinta e um deles foram ensaiados aos 28 dias, dividindo-se entre ensaios de compressão axial, diametral e módulo de elasticidade do concreto. Os outros 12 corpos de prova restantes, foram ensaiados na data intermediária aos ensaios das vigas, tendo os ensaios sido limitados à compressão axial e módulo de elasticidade. Os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida para garantir o processo de cura do concreto até a data do ensaio, conforme ilustrado na Figura 38.

A fim de assegurar a eficiência dos resultados, os corpos de prova tiveram suas bases niveladas antes de serem colocados na máquina de compressão.

Para os três ensaios de caracterização do concreto, compressão axial, diametral e módulo de elasticidade, utilizou-se a máquina universal servo-hidráulica, marca CONTENCO, com capacidade de 1000kN, do Laboratório de Materiais de Construção e Concreto do IME, cujos valores médios encontram-se no ANEXO IV e resumidos na Tabela 20.



Figura 38 – Câmara úmida.

VIGAS	fck (MPa)*	Ec (MPa)**	fct (MPa)**
V1A	33.58	36232.25	3.622
V1B	31.86		
V2A	31.795		
V2B	33.295		
VR1	29.26		
* fck aos 28 dias.			
** Como o ensaio foi feito por amostragem, considerou-se a média dos resultados			

Tabela 20 - Resumo dos resultados de caracterização do concreto.

3.2.2 Aço

No estudo experimental foram utilizadas barras de aço CA-50 nervuradas de Ø6,3 mm e Ø12,5 mm, com suas propriedades testadas através de ensaio de tração direta na máquina universal de ensaios – UHP 60, da marca *Losenhausenwerk*. Para cada diâmetro foram utilizados três protótipos de 600 mm para análise de dados.

Os resultados dos ensaios de tração estão resumidos na Tabela 21.

Tabela 21 – Resultado dos ensaios de tração do aço.

\emptyset	Tensão escoamento (MPa)	Tensão ruptura (MPa)
\emptyset 6,3	720	926
\emptyset 12,5	563	703

3.2.3 GFRP

As vigas não metálicas moldadas para esse estudo tiveram suas armaduras de GFRP fornecidas pela empresa Stratus (2014), fabricante nacional de materiais em fibra de vidro e resina. As barras adotadas tinham diâmetros variando de \emptyset 12,5 mm a \emptyset 6,3 mm.

A empresa utiliza o processo de pultrusão para fabricação das barras, aplicando resina epóxi éster vinílica em conjunto com fibras de vidro com teor em peso na ordem de 70% de fibra e 30% de resina, proporcionando excelente resistência mecânica. As características fornecidas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 22

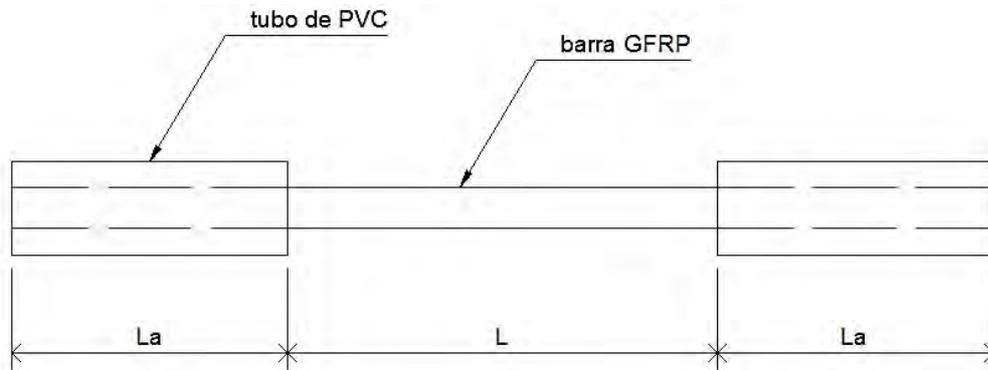
Tabela 22 – Propriedades das barras GFRP fornecidos pelo fabricante.

DESCRIÇÃO	6,3	12,5
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)	1070	989
MÓD. ELASTICIDADE (GPa)	48	48
DEFORMAÇÃO ÚLTIMA (%)	2,12	2,05

3.2.3.1 Ensaio de tração

Para caracterização à tração das barras de GFRP fornecidas pela Stratus (2014), foram propostos ensaios de tração baseados nas recomendações da norma ASTM D 7205. Inicialmente, consideraram-se protótipos com comprimento de 600 mm em barras de \emptyset 6,3 mm e \emptyset 12,5 mm de diâmetro. A fim de garantir a acoplagem das barras de GFRP às garras da máquina de tração, foi proposta a utilização de tubos de PVC, com diâmetros de \emptyset 20 mm e \emptyset 25 mm colados às extremidades das barras a serem ensaiadas. O diâmetro estudado diz respeito à exigência normativa de espessura mínima de 4 mm de material aglomerante entre tubo e barra. O material adesivo utilizado foi a resina epóxi de alta resistência, das marcas SIKADUR (Sikadur 32) e FISHER.

Segundo a ASTM D 7205, os comprimentos das barras ensaiadas devem respeitar as dimensões, detalhadas na Figura 39.



ONDE:

$L = 380 \text{ mm}$ ou $40 \times \varnothing$

$La = \text{min. } 300 \text{ mm p/ } \varnothing 6,3 \text{ mm}$
 $\text{min. } 380 \text{ mm p/ } \varnothing 12,5 \text{ mm}$

Figura 39 – Detalhe de comprimento de fixação dos tubos nas barras de GFRP

Como os protótipos disponibilizados para o ensaio possuíam comprimento menor do que o necessário, foram feitas adaptações aos comprimentos de cola exigidos, sendo adotados comprimentos iguais para L e La de 200 mm, como pode ser observado na Figura 40.



Figura 40 – Protótipos de barras de GFRP preparados para ensaio tração.

Os ensaios à tração longitudinal foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção e Concreto do IME, com uso da máquina universal servo-hidráulica (Figura 41), marca CONTENCO com capacidade de 1000 kN, a uma velocidade de 4 mm/min.

Essa tentativa de usar tubos de PVC com comprimento Le menor do que os previstos na norma ASTM D 7205, não foi bem sucedida, uma vez que os tubos

escorregaram antes que a barra atingisse seus limites máximos de resistência e, conseqüentemente, a ruptura. Como pode ser observado na Figura 41, houve o escorregamento do material, perdendo-se o confinamento da camada de epóxi, que veio a romper por fendilhamento.



Figura 41 – Máquina universal para ensaio de tração.



Figura 42 – Detalhes do escorregamento das barras de GFRP no ensaio de tração.

Para as previsões teóricas nos itens que se seguem, foram utilizados os valores característicos informados pelo fabricante, a Stratus (2014). Tais dados foram obtidos em ensaios realizados pelo Instituto Falcão Bauer, em São Paulo. Estes valores foram, ainda, corroborados por pesquisas experimentais, que estão sendo realizadas presentemente na PUC-Rio.

3.2.3.2 Ensaio de queima

Outro importante ensaio, realizado para conferir as porcentagens de fibra e resina existentes nas barras, foi o ensaio de queima. O ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção e Concreto do IME, seguindo as instruções normativas da ASTM D297-13.

O processo para captação de dados deste ensaio consistiu em selecionar, por amostragem, pequenos protótipos de cada bitola utilizada no ensaio, com aproximadamente, 10mm de comprimento e submetê-los à temperatura de 600°C por 3 horas, em Forno Mufla MA 305, para que, desta forma, a resina existente queimasse, restando apenas as fibras longitudinais.

Os detalhamentos e dados finais do ensaio são encontrados no Anexo V. Na Tabela 23 é possível verificar, de forma comparativa, a aproximação do percentual de fibra e resina encontrados no ensaio e estabelecidos pelo fabricante.

Tabela 23 – Resultados dos ensaios de queima.

DIÂMETRO	FABRICANTE		ENSAIO	
	Fibra (%)	Resina (%)	Fibra (%)	Resina (%)
6.3	70	30	77	23
12.5			75	25

3.2.4 Forma

Foram confeccionadas cinco formas com tábuas e sarrafos em madeira de pinus de 12 cm de espessura, com dimensões internas iniciais de 2200 x 300 x 150 mm, como mostra a Figura 43. Por se tratar de uma madeira de segunda categoria, foi sugerida a utilização de pregos em aço de cabeça dupla para o sistema de fechamento das formas, uma vez que estes danificam menos a madeira, além de serem mais práticos durante a execução.

Conforme relatado no item 3.1, houve problemas nas armaduras, tanto de aço como de fibra de vidro, que implicaram na alteração do comprimento, altura e largura de algumas formas, conforme ilustrado na Figura 44.



Figura 43 – Forma executada com dimensões iniciais.



(a)



(b)



(c)

Figura 44– Alterações nas formas: (a) aumento do comprimento, (b) aumento da largura e (c) aumento da altura.

3.3 Instrumentação

3.3.1 Extensômetros elétricos de resistência

Após serem armadas, conforme projeto estrutural apresentado no item 3.1.1 do presente trabalho, as barras de aço e de GFRP foram instrumentadas, conforme mostra o ANEXO VI.

As armaduras longitudinais foram instrumentadas na barra central, em sua face mais inferior, tanto no meio do vão quanto nas extremidades. Já os estribos tiveram os extensômetros colados nos locais em que se imaginou haver a maior

solicitação ao cisalhamento. O esquema de instrumentação pode ser visualizado da Figura 45 até a Figura 50.

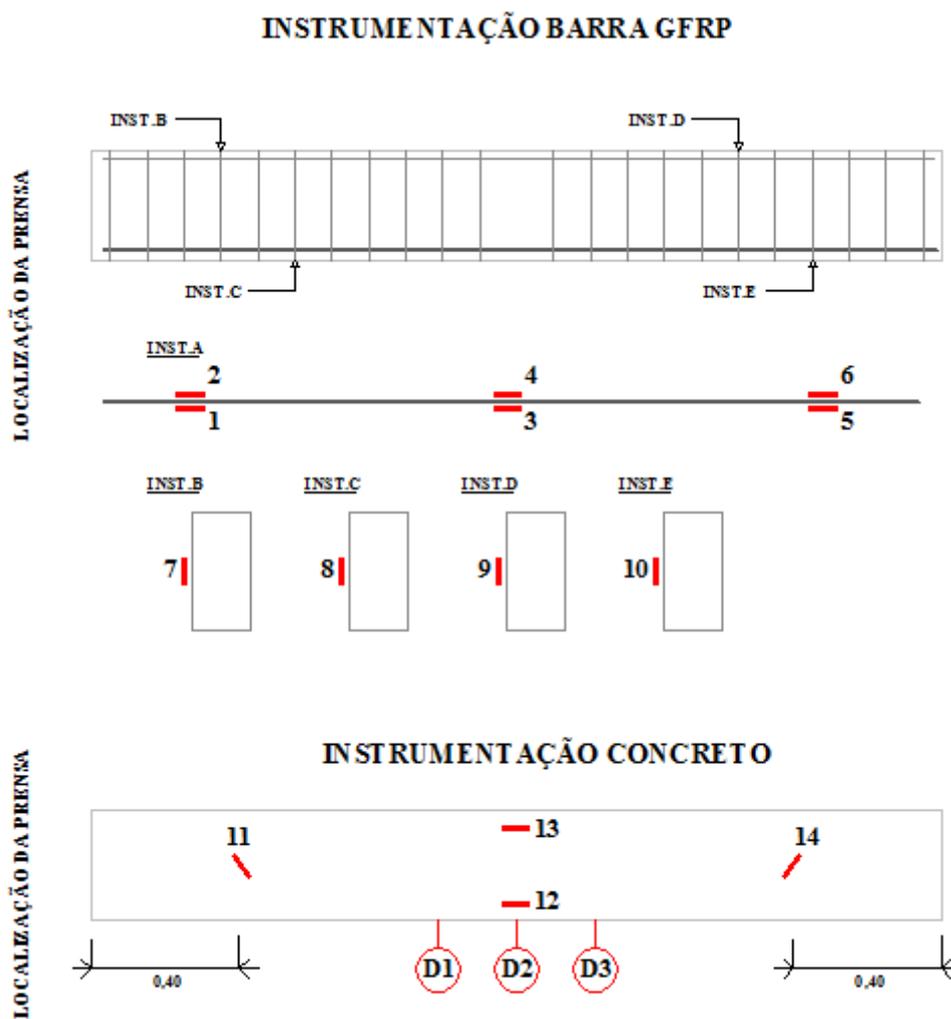
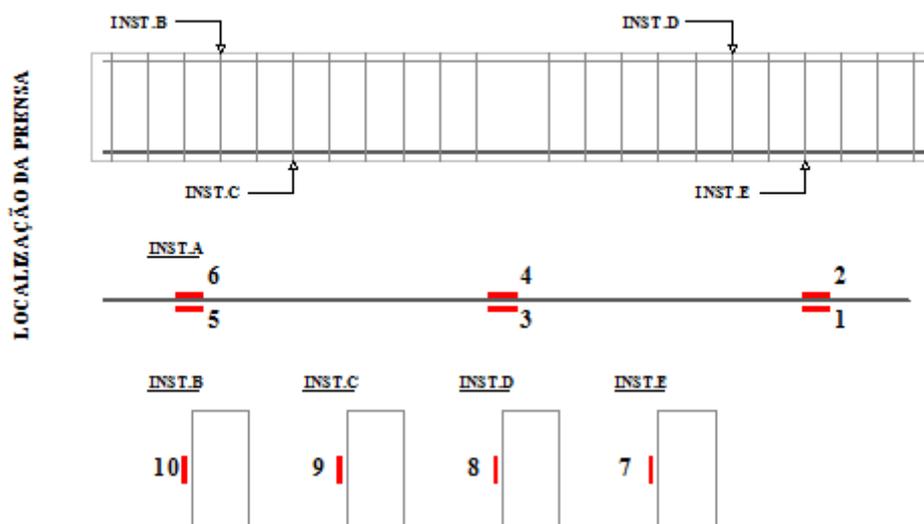


Figura 45 – Esquema de instrumentação da viga V1A.

INSTRUMENTAÇÃO BARRA GFRP



INSTRUMENTAÇÃO CONCRETO

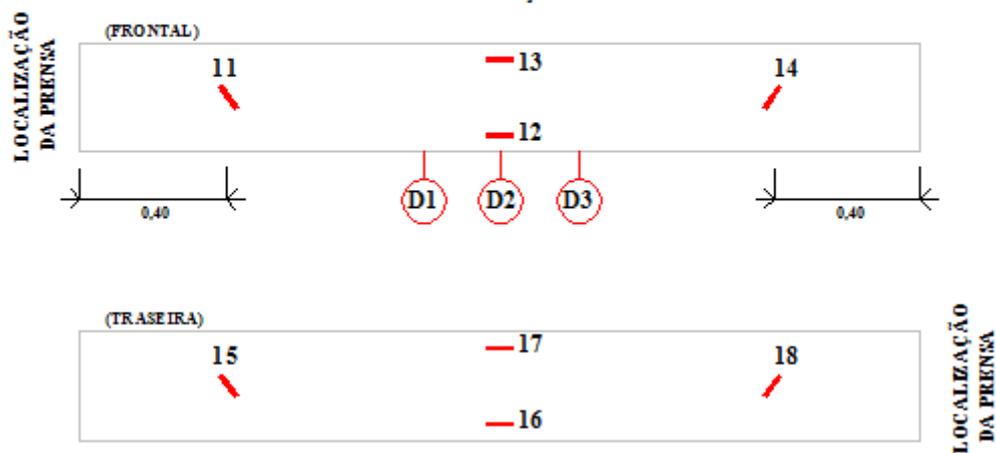
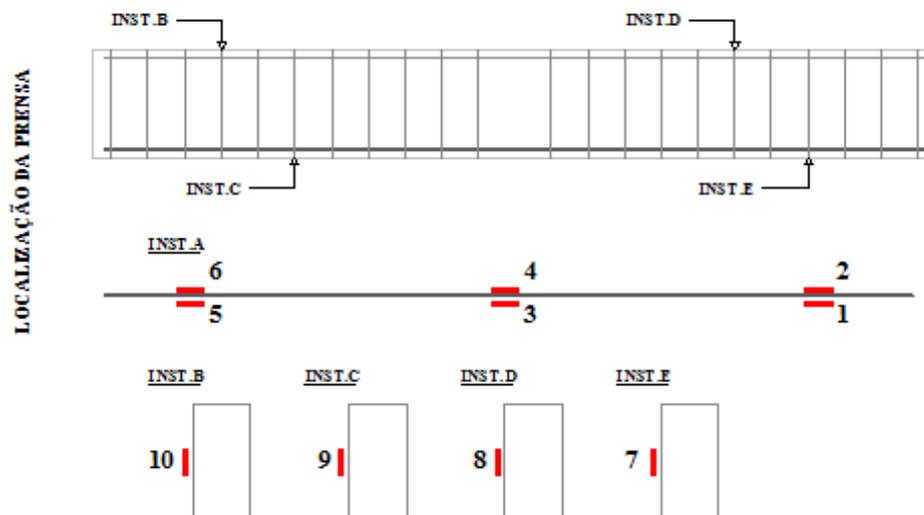


Figura 46 – Esquema de instrumentação da viga V1B.

INSTRUMENTAÇÃO BARRA GFRP



INSTRUMENTAÇÃO CONCRETO

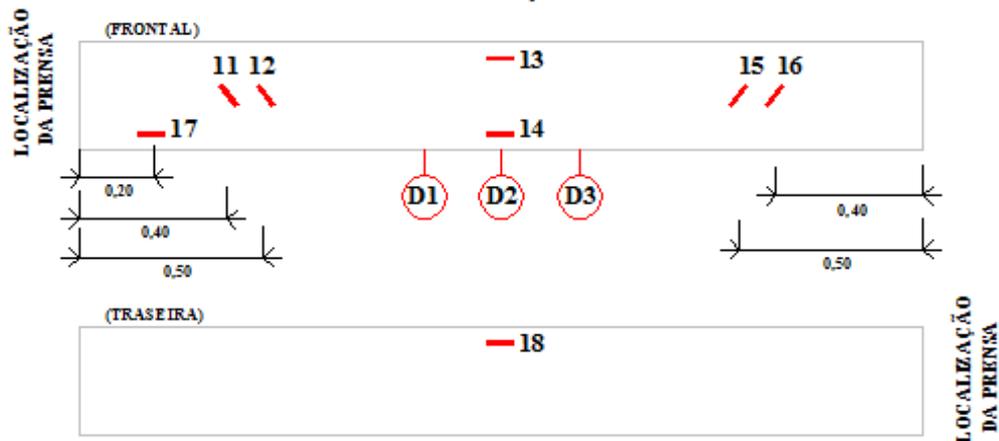


Figura 47 – Esquema de instrumentação da viga V2A.

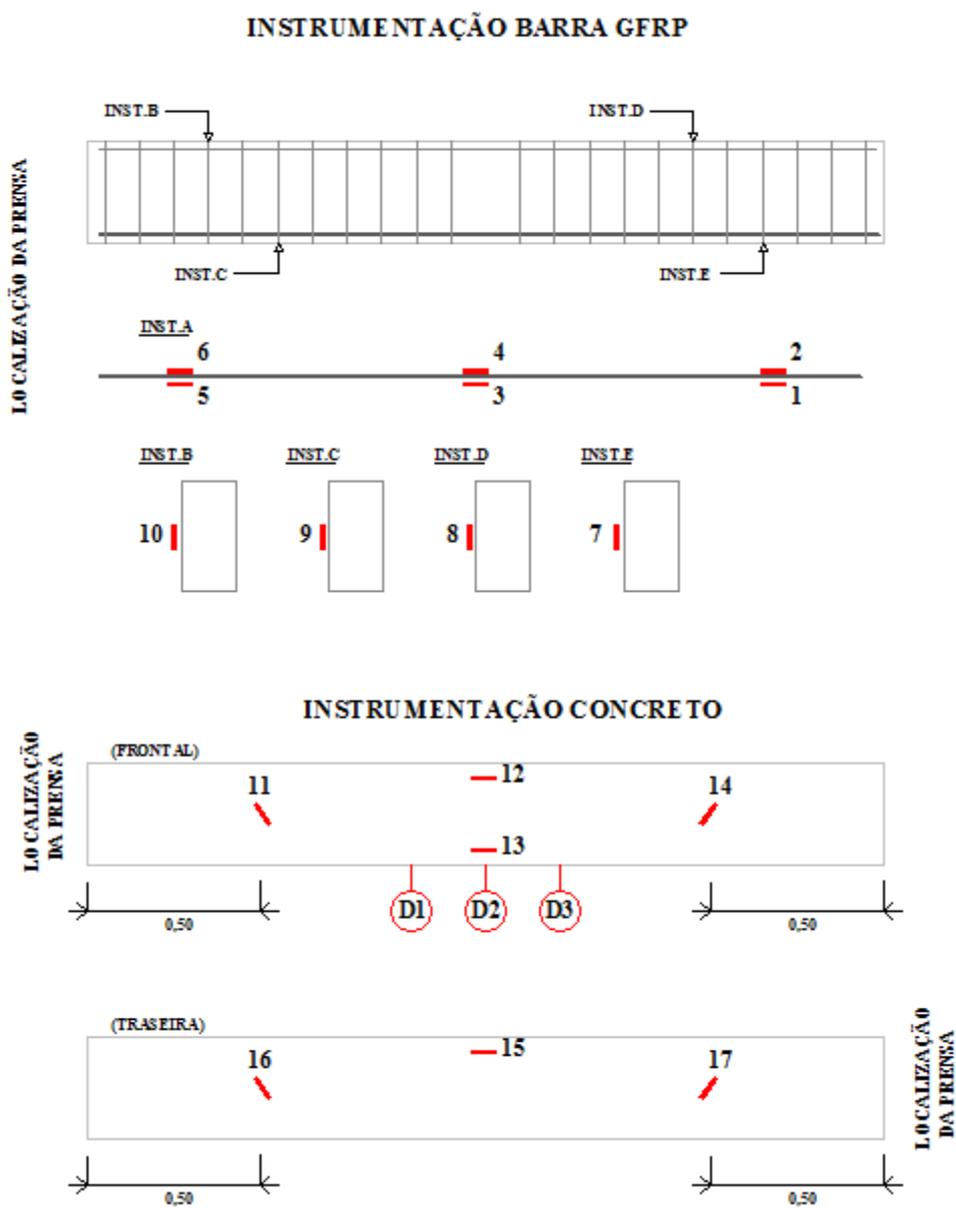


Figura 48 – Esquema de instrumentação da viga V2B.

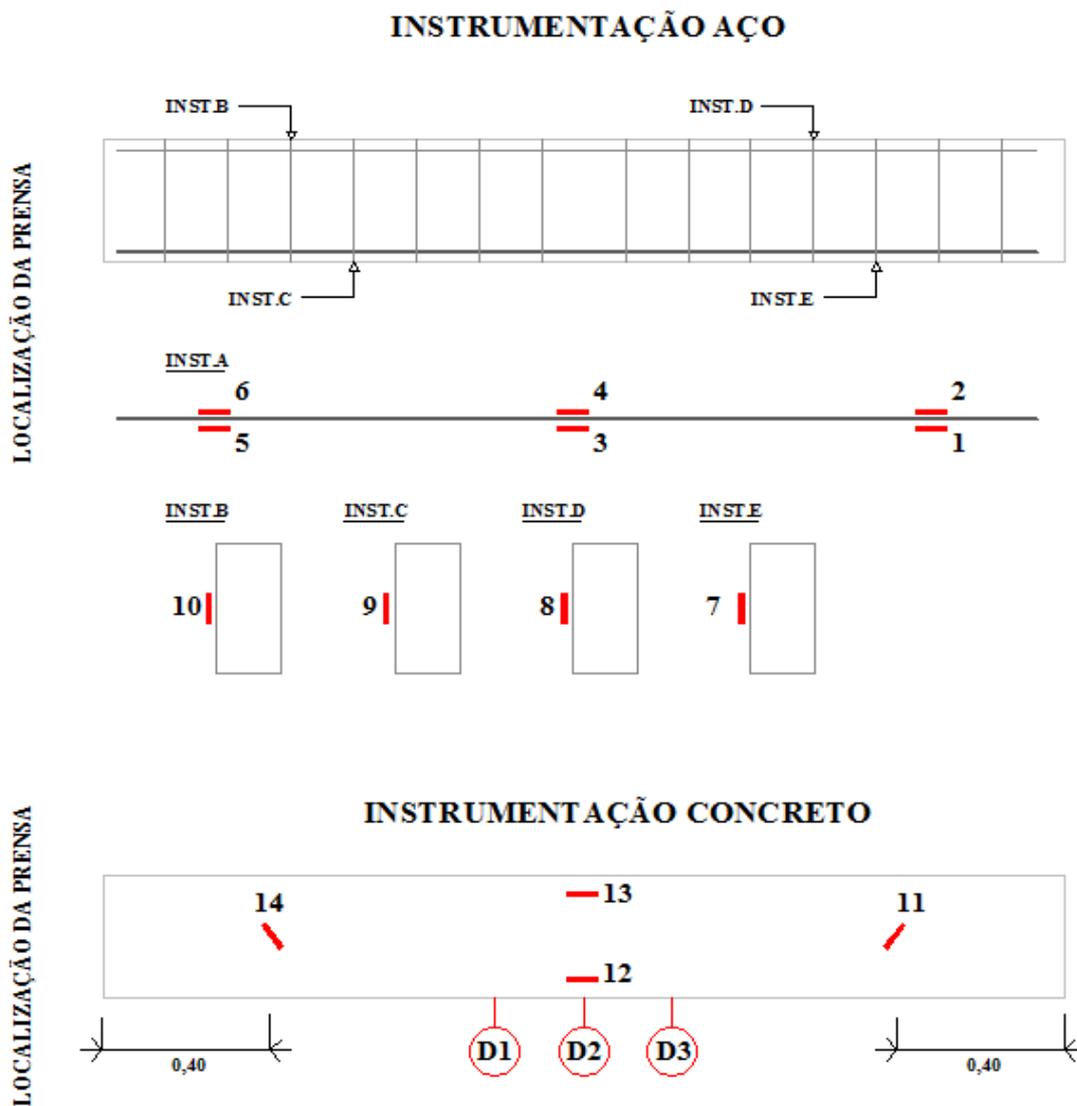
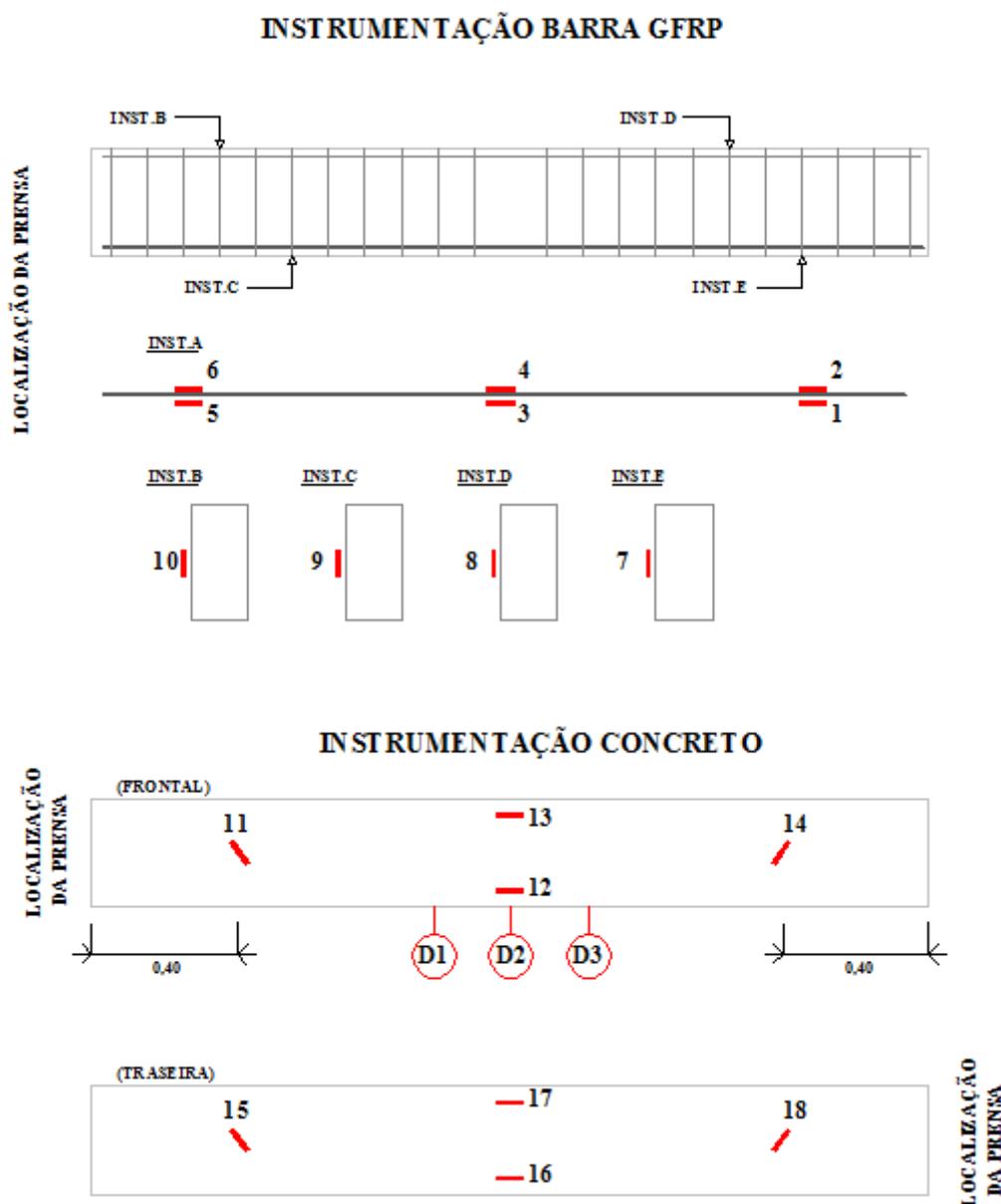


Figura 49 – Esquema de instrumentação da viga VR1.



Os extensômetros elétricos de resistência utilizados nas armaduras das vigas foram da marca *Excel*, com tipologia e fator *gage* especificados na Tabela 24.

Tabela 24 – Informações dos extensômetros utilizados.

TIPO	CÓDIGO	FATOR GAGE
Aço	PA-06-062-AB-120-L	2,14
GFRP - \varnothing 6,3mm	PA-06-125BA-120-L	2,14
GFRP - \varnothing 12,5mm	PA-06-125AA-120L	2,06
Concreto	PA-06-201BA-120L	2,15

Para fazer a colagem dos *straingages* (extensômetros), foram utilizados os materiais mostrados na Figura 51. Primeiramente, a superfície das barras foi levemente desbastada (Figura 52), com lixa N° 200 para as barras de GFRP e com lima para as barras aço, para garantir melhor aderência entre a cola e o material. Em seguida, o local desgastado foi limpo com isopropanol e acetona industrial, com auxílio de algodão e cotonete, para uma limpeza mais minuciosa. A colagem do extensômetro foi feita com cola *Loctite 496*, específica para superfícies rígidas, e que por ser de alta fixação, foi necessária a utilização de folhas plásticas não aderentes a este material para dar apoio ao operador no momento da colagem.



Figura 51 – Materiais para instrumentação das barras.



(a)



(b)

Figura 52 – Barras desbastadas: (a) de aço, (b) de GFRP.

Após 24 horas da colagem, foram soldados fios de eletrônica em todos os extensômetros (Figura 53), para que se pudesse acoplá-los à máquina de aquisição de dados.



Figura 53 – Etapa de soldagem dos extensômetros.

Mais 24 horas após a soldagem, foi realizada a proteção dos extensômetros com resina de silicone e, posteriormente, resina epóxi, já que os mesmos não poderiam entrar em contato com o concreto, caso contrário seriam danificados. Inicialmente, a proteção dos extensômetros colados nas barras de GFRP foi realizada com a borracha de silicone, porém, verificou-se após a secagem que ocorreram trincas no material, deixando a proteção frágil. Após esta verificação, a borracha de silicone foi substituída pela resina epóxi da marca Araldite bicomponente, modelo profissional, com o intuito de ter uma melhor aderência com o material polimérico.

Com relação à instrumentação dos extensômetros na superfície de concreto das vigas, as etapas foram as mesmas, com exceção da cola. Foi usado o adesivo instantâneo Loctite 401, específico para superfícies rugosas. Além disso, a aplicação

da proteção final de resina não foi necessária já que não teria contato abrasivo sobre estes extensômetros.

3.3.2 Deflectômetros

A aferição das flechas das vigas foi realizada com o uso de deflectômetros posicionados sobre o berço de apoio das vigas, localizados na base inferior dos protótipos, na direção do meio do vão e dos pontos de carregamento.

Apesar das leituras das flechas serem feitas eletronicamente com a conexão destes deflectômetros à unidade de aquisição de dados, também foi instalado um relógio analógico no meio do vão, para servir como contraprova dos resultados coletados pelo dispositivo de aquisição (Figura 54).



Figura 54 – Deflectômetros e relógio analógico instalados.

Os equipamentos utilizados são da marca *Gefran*, devidamente aferidos antes da execução do ensaio.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

O presente capítulo tem por objetivo apresentar o resumo dos ensaios de caracterização dos materiais, bem como os ensaios das vigas.

Após a análise de todos os trabalhos disponíveis na literatura técnica, em nível nacional e internacional, sobre o dimensionamento de estruturas armadas com fibras de vidro, foi tomado como base para avaliação do desempenho analítico dos modelos deste trabalho os preceitos encontrados ACI 440.1R (2015).

4.1 Apresentação dos resultados experimentais

Serão apresentados neste item os diversos resultados encontrados em cada viga, provenientes do ensaio à flexão de quatro pontos. Foram estudados parâmetros como: flecha, deformação no concreto, deformação na armadura de tração e cisalhamento, fissuração e modo de ruptura.

A Figura 55 indica a nomenclatura usada para indicação do carregamento.

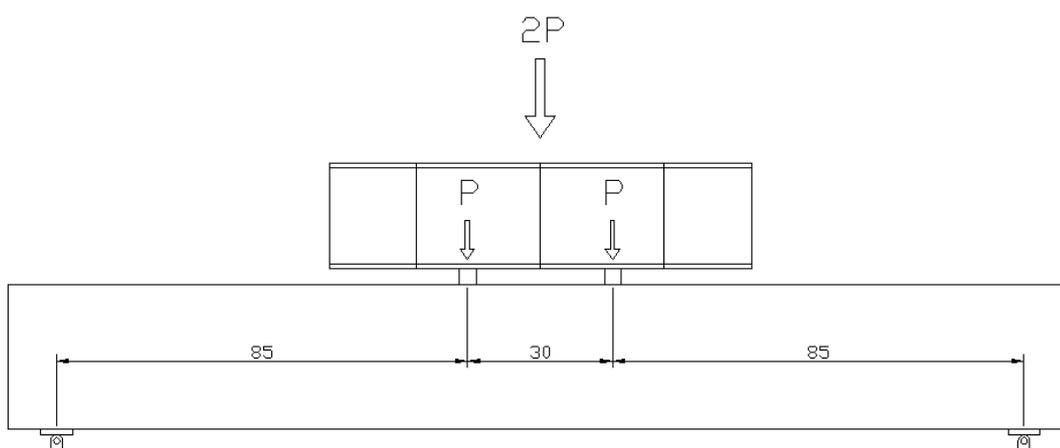


Figura 55 – Detalhe das cargas aplicadas.

4.1.1 Cargas últimas

Com base nas propriedades mecânicas indicadas, foram feitas previsões teóricas para os ensaios das vigas. Em relação ao comportamento à flexão, foi utilizado por Oliveira (2017) um algoritmo para determinação do diagrama momento curvatura, baseado nas hipóteses de cálculo para o concreto armado tradicional [35]. Essas hipóteses são válidas, segundo todas as regulamentações de projeto, para as armaduras de FRP, desde que sejam feitas as considerações necessárias: comportamento linear e elástico até a ruptura e baixo módulo de elasticidade. A Tabela 25 apresenta os resultados calculados a partir das normas vigentes e os experimentais.

Tabela 25 – Comparação das previsões analíticas à flexão com os resultados experimentais.

Valores Analíticos								
TIPO	fc (MPa)	fct (MPa)	Φ_{fiss} (1/m)	Mr (kN.m)	Curvatura (Φ) (1/m)	Mu (kN.m)	2Pr, prensa (kN)	2Pu, prensa (kN)
V1A	33,6	3,72	0,000587	15,19	0,058414	82,37	35,73	193,82
V1B	31,9	3,56	0,000562	14,55	0,057052	79,87	34,23	187,92
V2A	31,8	3,51	0,000553	14,33	0,047180	88,31	33,71	207,78
V2B	33,3	3,42	0,000540	13,97	0,048128	90,84	32,87	213,75
VR1	29,3	3,53	0,000649	7,93	0,040400	98,96	18,67	232,85
Valores Experimentais								
TIPO	fc (MPa)	fct (MPa)	Φ_{fiss} (1/m)	Mr (kN.m)	Curvatura (Φ)	Mu (kN.m) (1/m)	2Pr, prensa (kN)	2Pu, prensa (kN)
V1A	33,6	3,72	0,001570	12,02	0,035590	55,96	28,30	131,68
V1B	31,9	3,56	0,000450	13,25	0,040840	62,50	31,18	147,06
V2A	31,8	3,51	0,000530	11,34	0,061710	105,52	26,68	248,28
V2B	33,3	3,42	0,000450	11,34	0,074830	116,94	26,68	275,15
VR1	29,3	3,53	0,001490	10,02	0,028180	50,83	23,58	119,60

Para avaliação da capacidade resistente ao esforço cortante, foram considerados os preceitos do ACI 440.1R (2015) da norma italiana CNR-DT-203 (2007) e da norma canadense CSA-806 (2002). No Gráfico 1 é possível observar a grande dispersão das prescrições normativas e que as normas do ACI e CNR são as que mais se aproximam dos resultados experimentais.

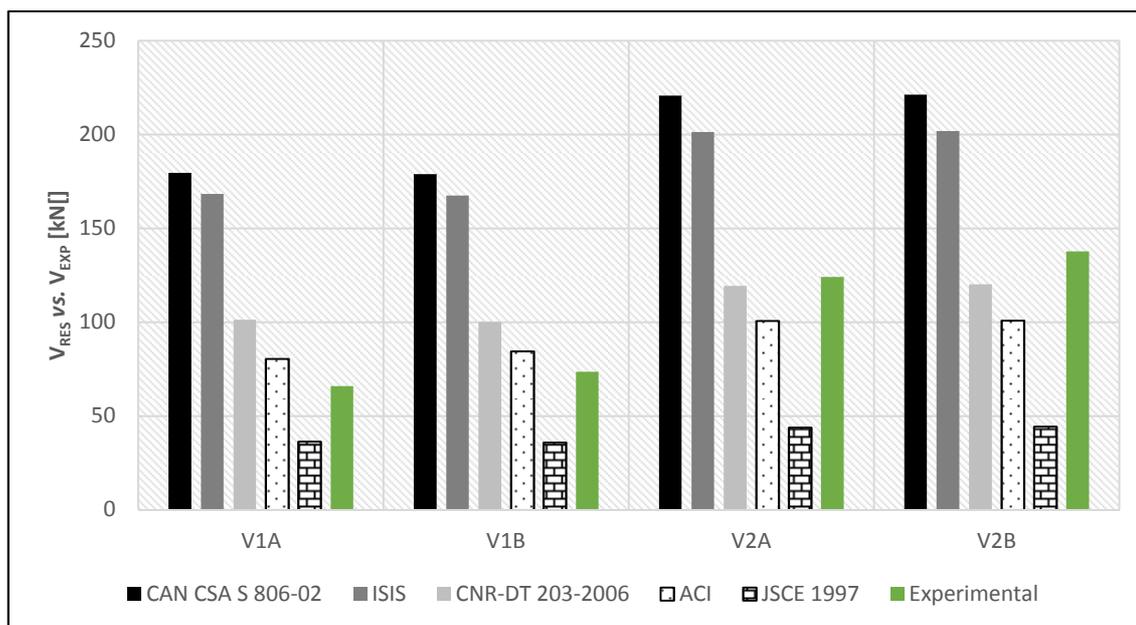


Gráfico 1—Comparação entre os esforços cortante resistente obtido pelas normas e os resultados experimentais.

4.1.2 Deslocamentos no meio do vão

Os gráficos a seguir (Gráfico 2 até Gráfico 6) mostram os deslocamentos medidos sob os pontos de aplicação das cargas, através do deflectômetro D1 e D2, e no meio do vão, pelo deflectômetro D2. O detalhamento das instrumentações, apresentados no item 3.3.1 esclarecerá a posição dos flexímetros.

Durante alguns ensaios os cabos de conexão dos deflectômetros ao aparelho de coleta de dados apresentaram problemas de mal contato na conexão, o que resultou na falta de leitura de alguns deslocamentos, como foi o caso em VR1 e V2A, que apresentaram leituras apenas no meio do vão.

Ressalta-se também que as oscilações observadas nos gráfico, são caracterizadas pelo escorregamento das barras durante o carregamento das vigas ensaiadas. Além disso, para preservar os aparelhos de transducencia, os mesmos foram retirados antes da ruptura final das vigas, o que pode ser facilmente observação pela interrupção da leitura no Gráfico 5.

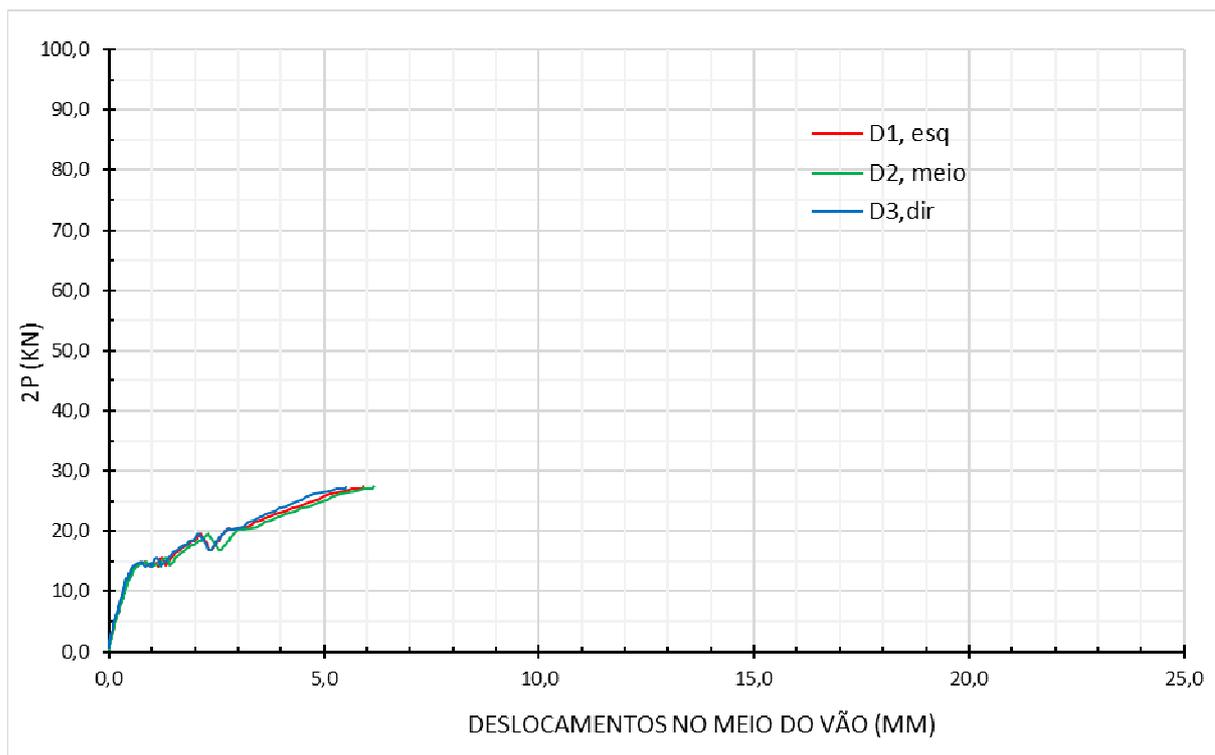


Gráfico 2 – Carga x flecha no meio do vão da viga V1A.

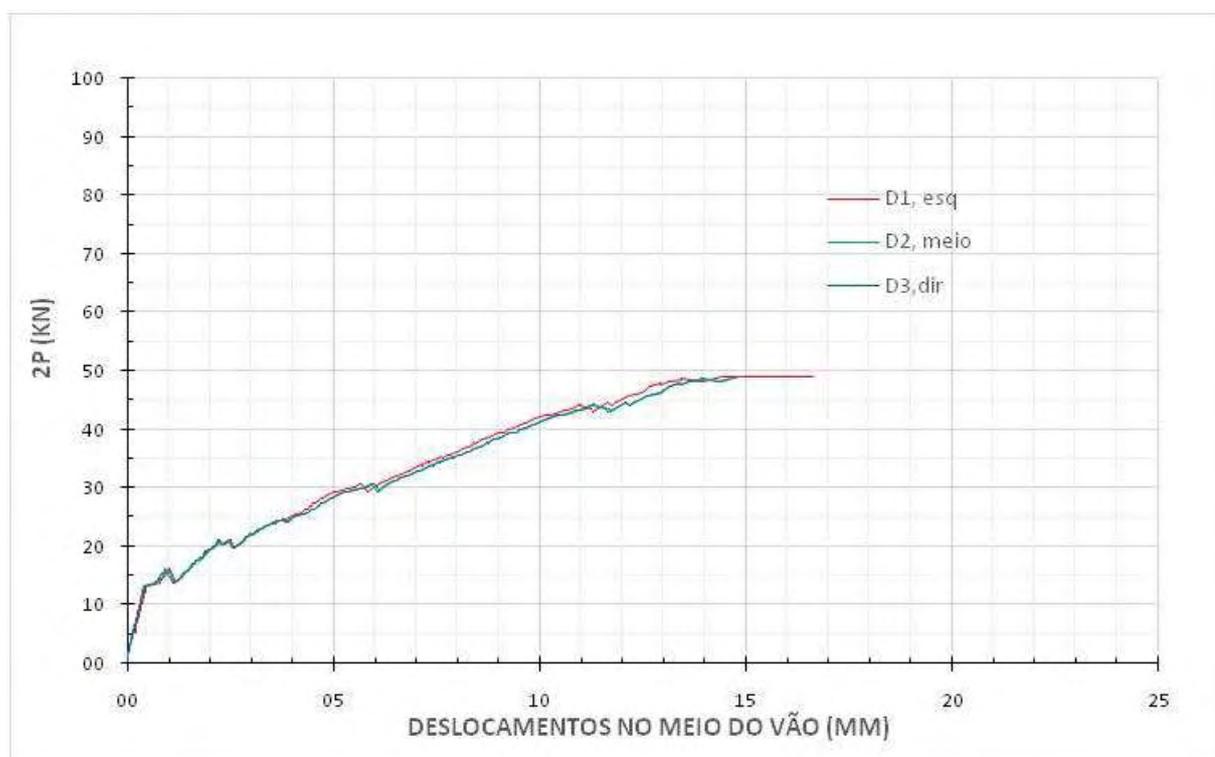


Gráfico 3 – Carga x flecha no meio do vão da viga V1B.

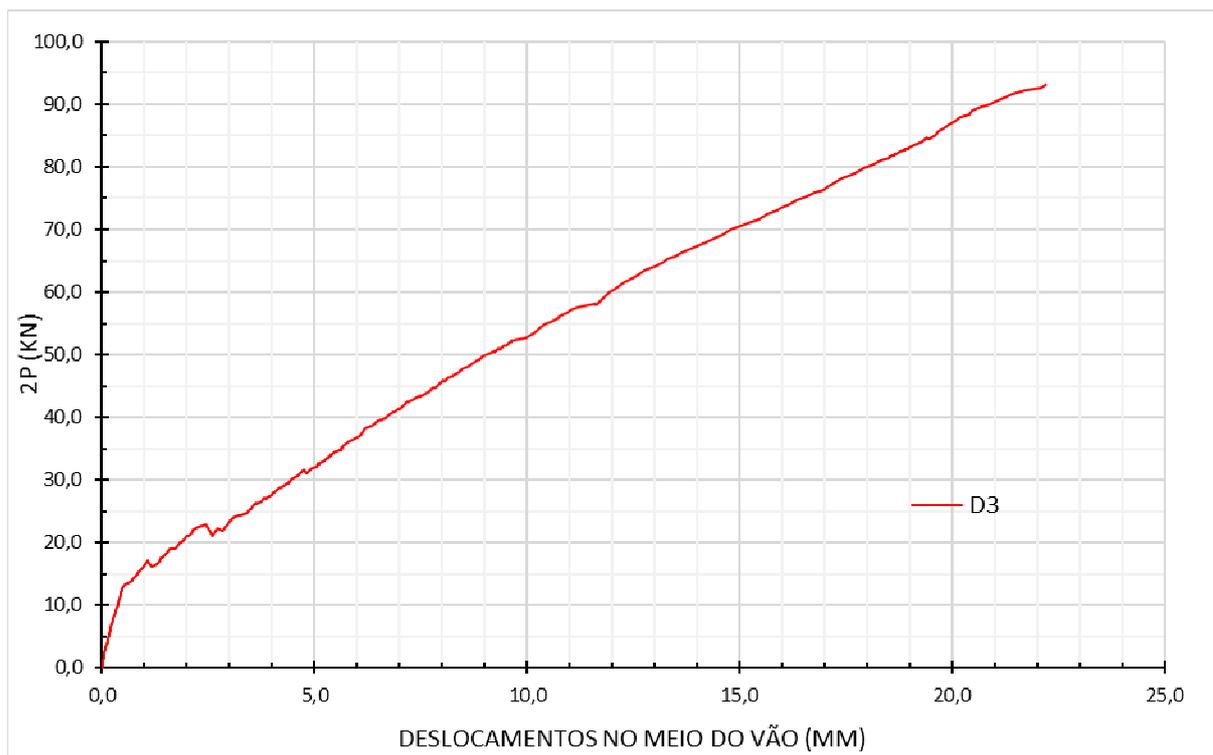


Gráfico 4 – Carga x flecha no meio do vão da viga V2A.

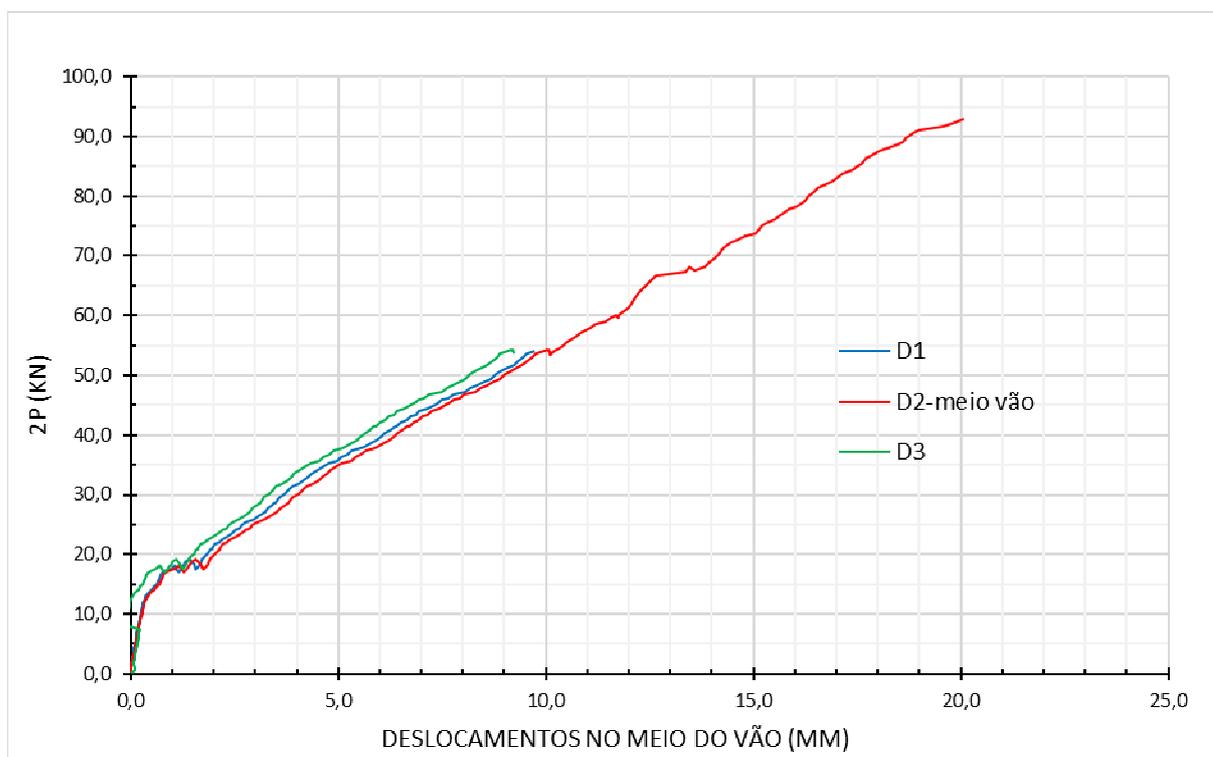


Gráfico 5 – Carga x flecha no meio do vão da viga V2B.

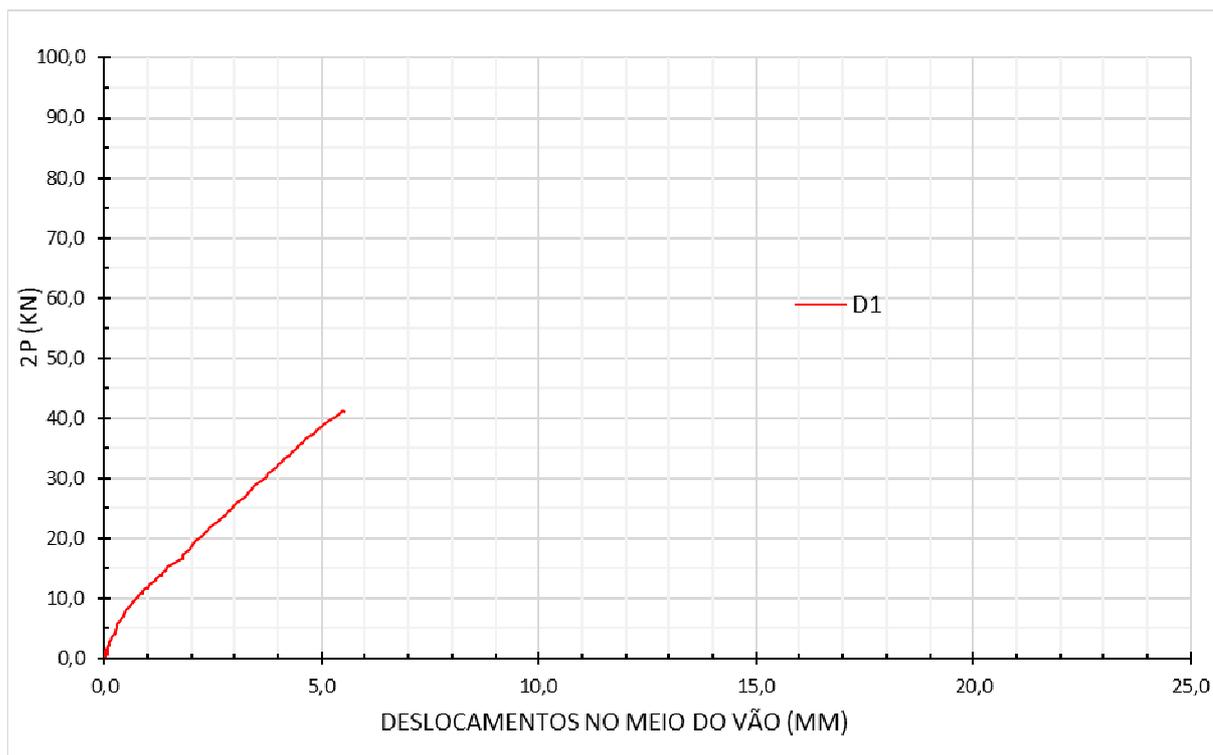


Gráfico 6 – Carga x flecha no meio do vão da viga VR1.

4.1.3 Deformação de tração e compressão

Os valores de deformação das armaduras longitudinais de tração e do concreto no meio do vão, em função do momento, estão expostos nos Gráfico 7 ao Gráfico 11.

Em todas as vigas longitudinais de tração foram colados dois extensômetros nas barras centrais, porém na maioria dos ensaios o extensômetro inferior foi perdido durante o processo de concretagem. Puderam ser observados, também, oscilação no carregamento devido aos pontos de escorregamento da barra.

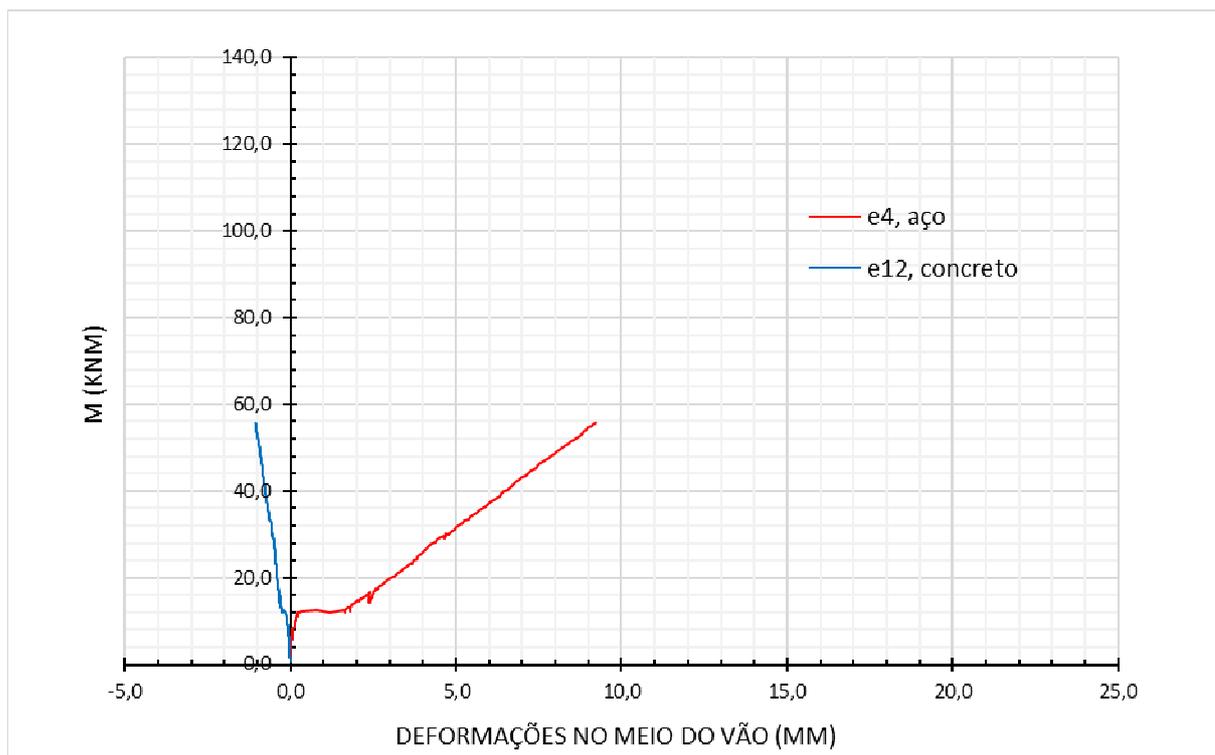


Gráfico 7 – Momento x deformação no meio do vão da viga V1A.

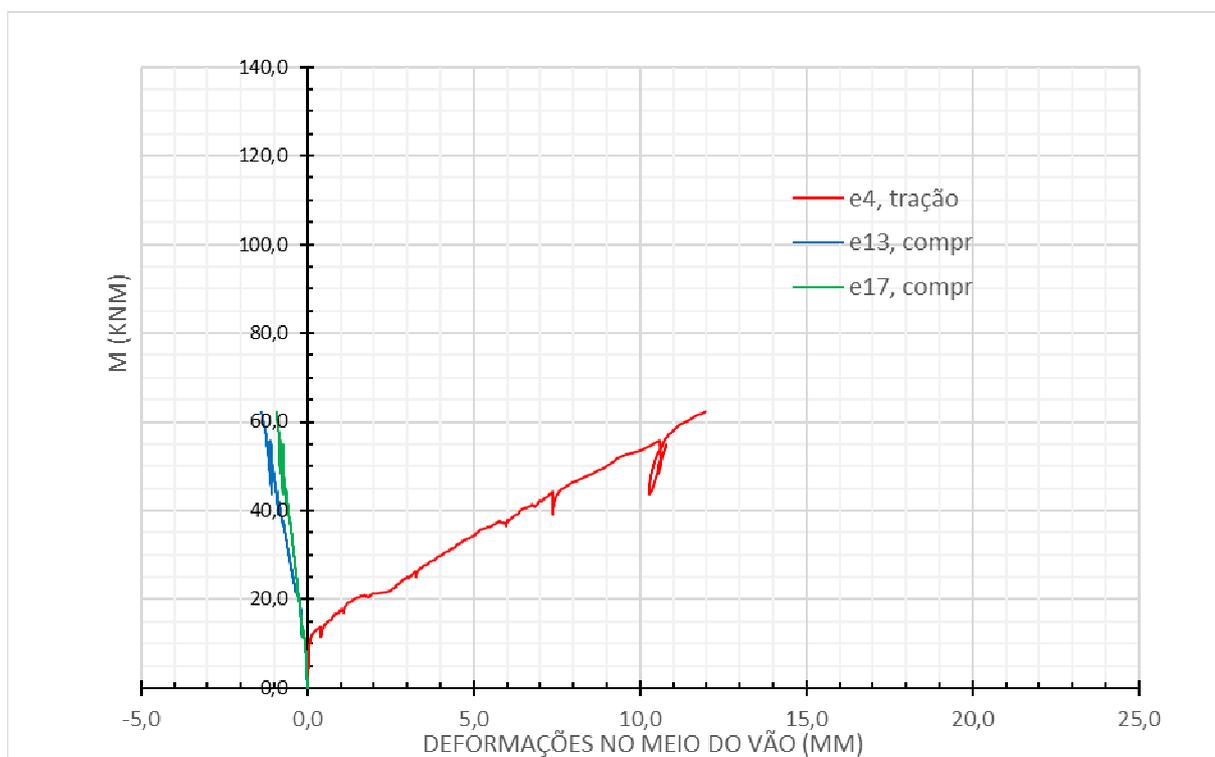


Gráfico 8 – Momento x deformação no meio do vão da viga V1B.

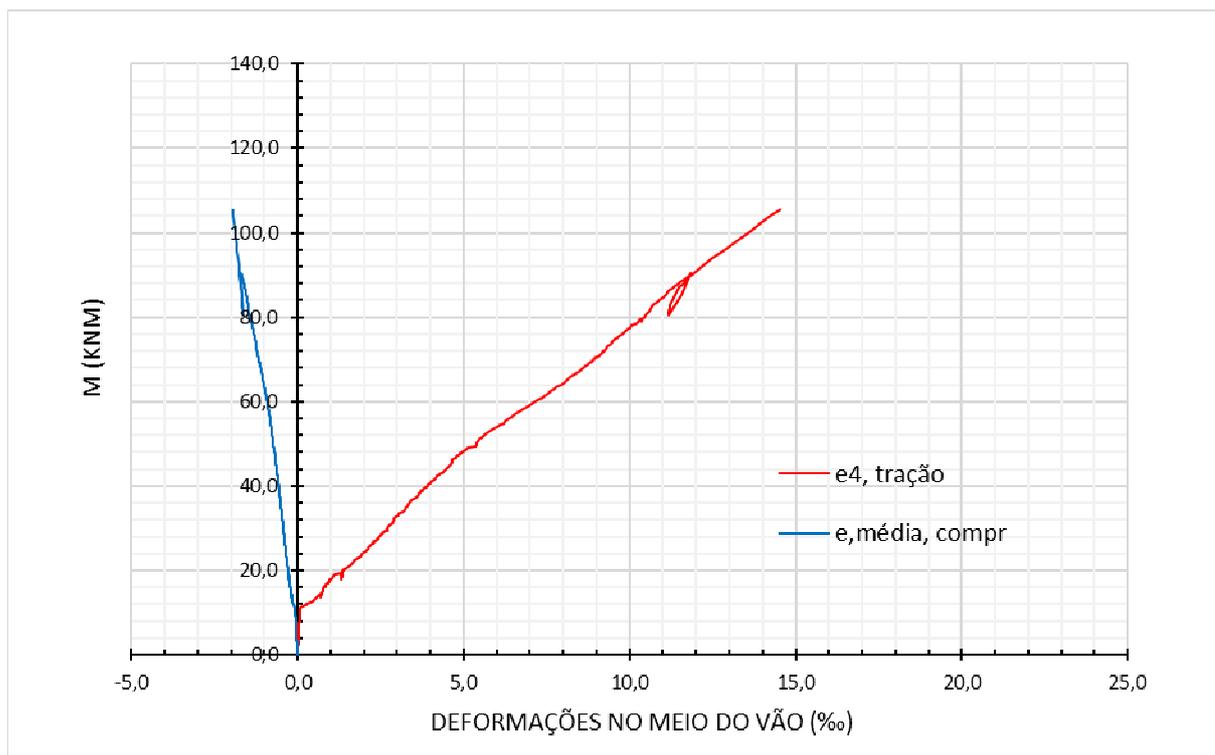


Gráfico 9 – Momento x deformação no meio do vão da viga V2A.

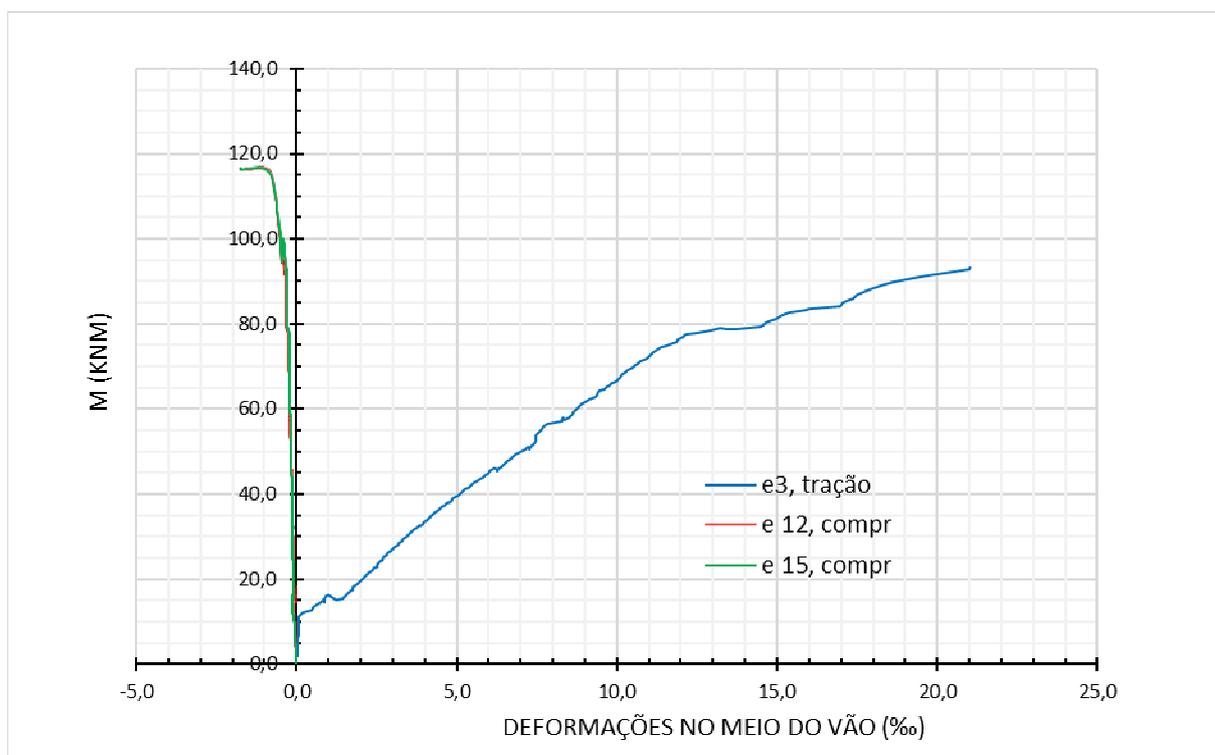


Gráfico 10 – Momento x deformação no meio do vão da viga V2B.

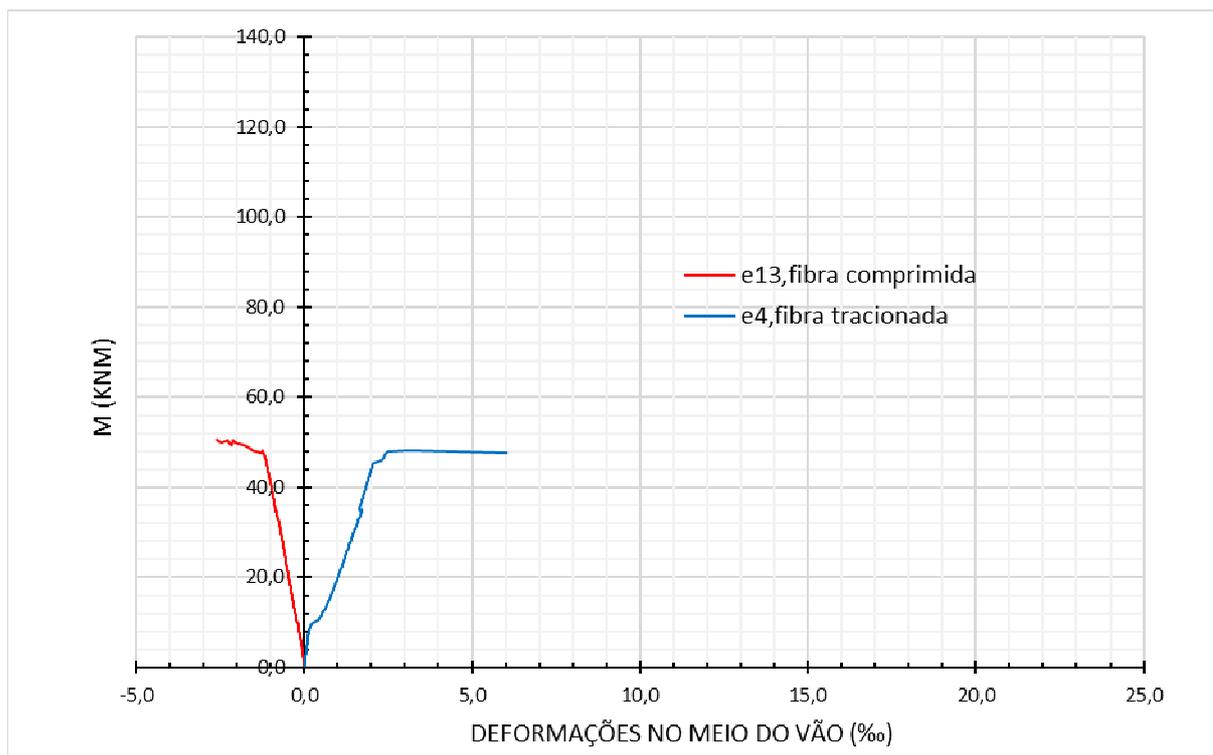


Gráfico 11 – Momento x deformação no meio do vão da viga VR1.

Na Tabela 26 podem ser observados os valores máximos de deformação no concreto (ϵ_c) e na armadura de tração (ϵ_f).

Tabela 26 – Deformações máximas.

TIPO	ϵ_c (‰)	ϵ_f (‰)
V1A	1.07	9.26
V1B	1.39	11.99
V2A	2.29	14.54
V2B	1.75	21.03
VR1	2.64	6.04

4.1.4 Deformação de tração longitudinal próxima aos apoios

Para estas medições, foi disposto um par de extensômetros de cada lado dos apoios das vigas (ver item 3.3.1). Estes extensômetros tiveram comportamento idêntico e, por isso, considerou-se nos Gráfico 12 ao Gráfico 16 o valor médio de

deformação de cada par em cada lado da viga, em função do momento fletor no meio do vão.

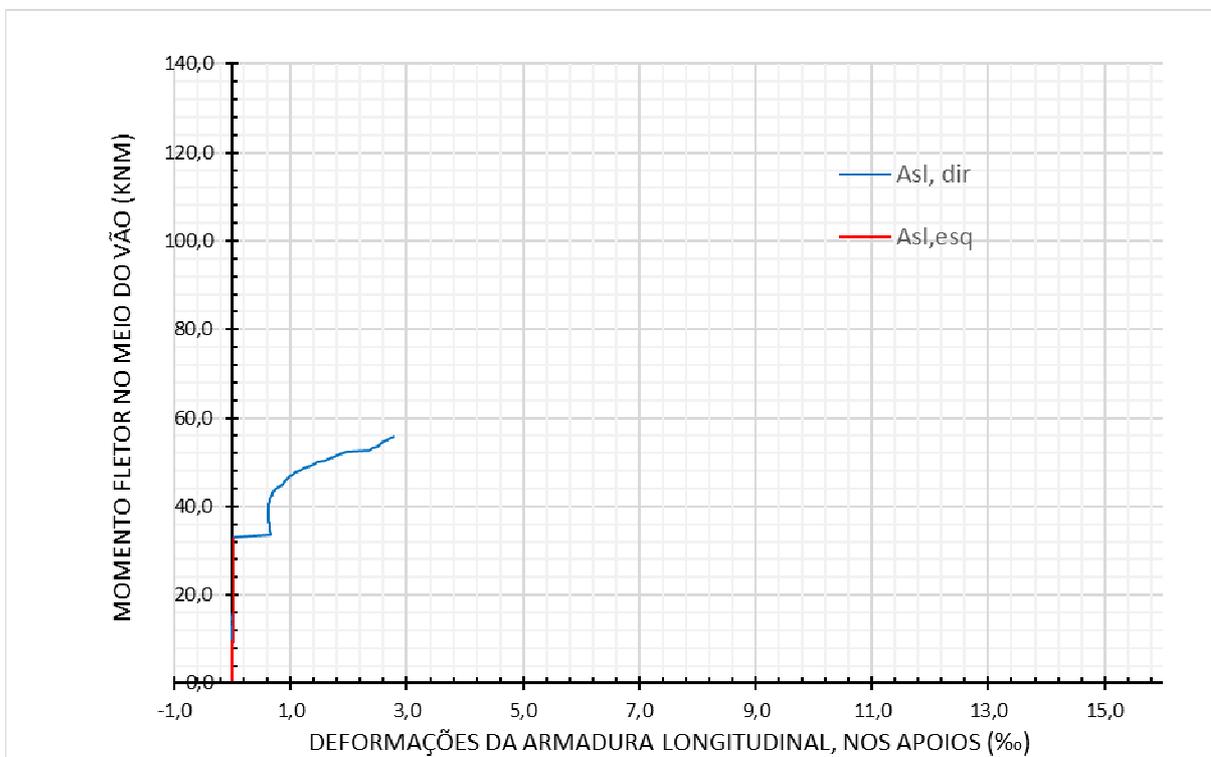


Gráfico 12 –Momento fletor no meio do vão x deformação no apoio da viga V1A.

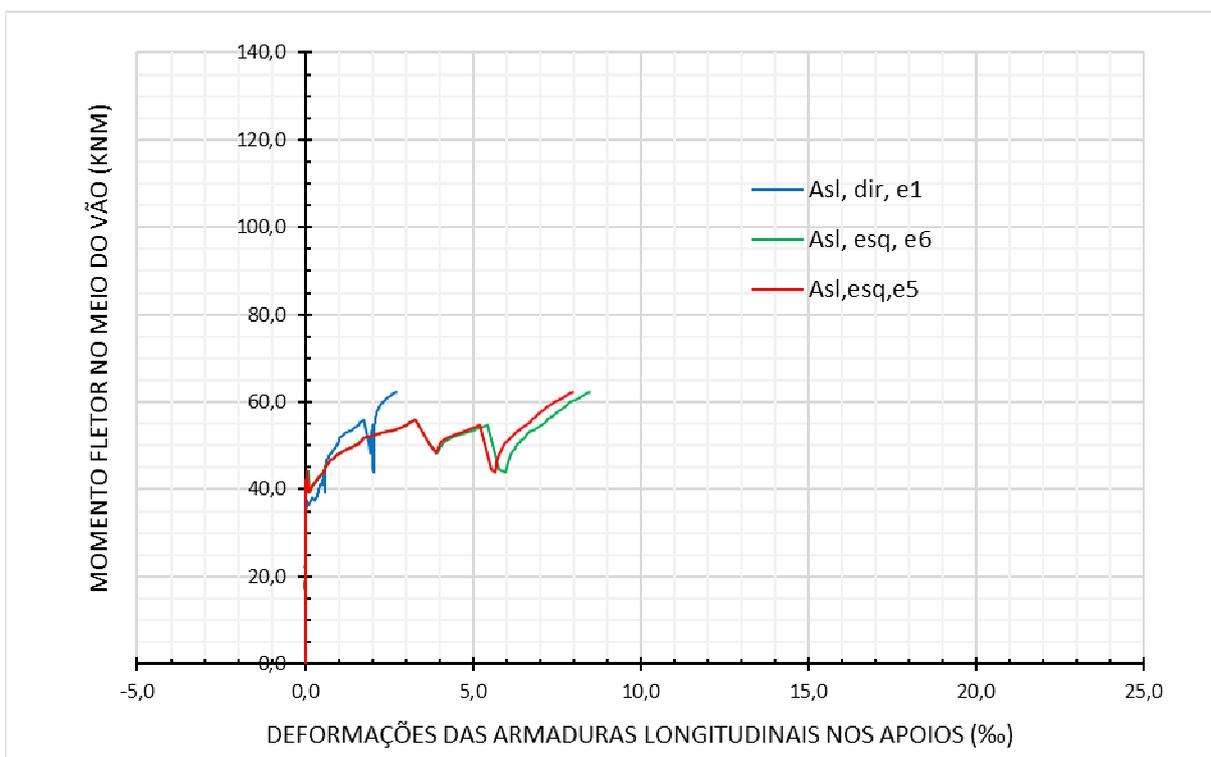


Gráfico 13 - Momento fletor no meio do vão x deformação nos apoios da viga V1B.

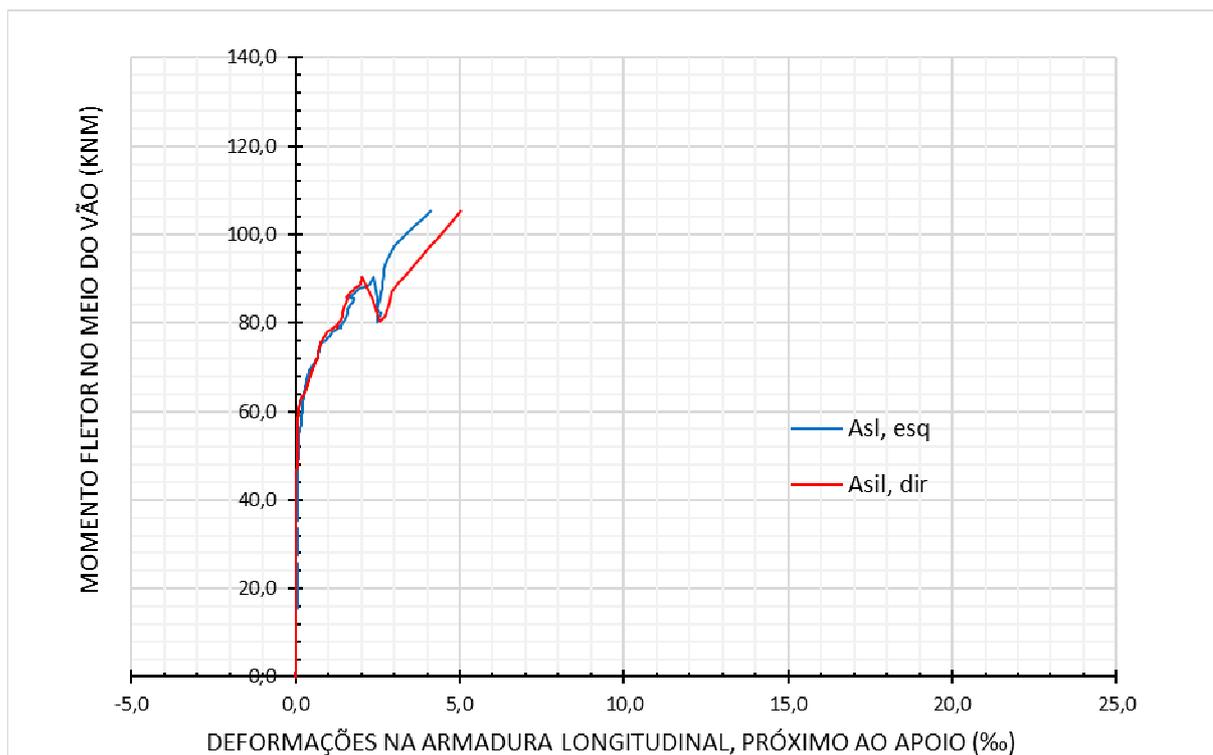


Gráfico 14 - Momento fletor no meio do vão x deformação nos apoios da viga V2A.

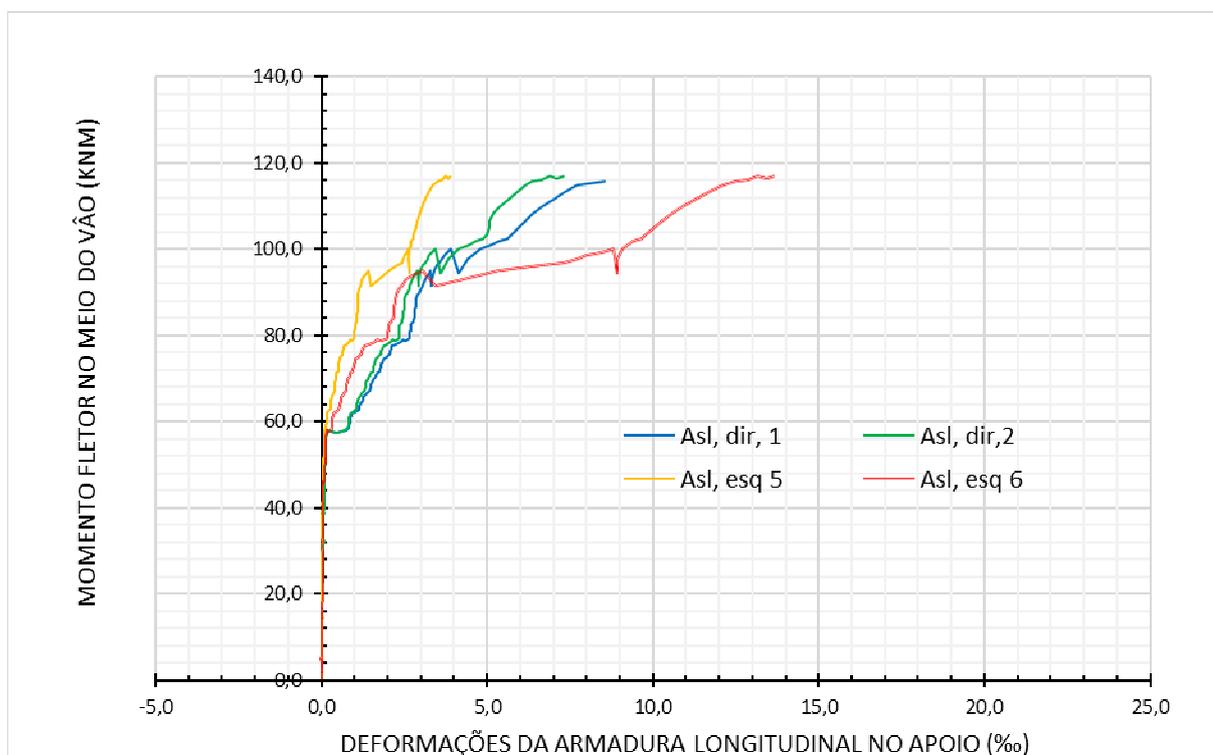


Gráfico 15 - Momento fletor no meio do vão x deformação nos apoios da viga V2B.

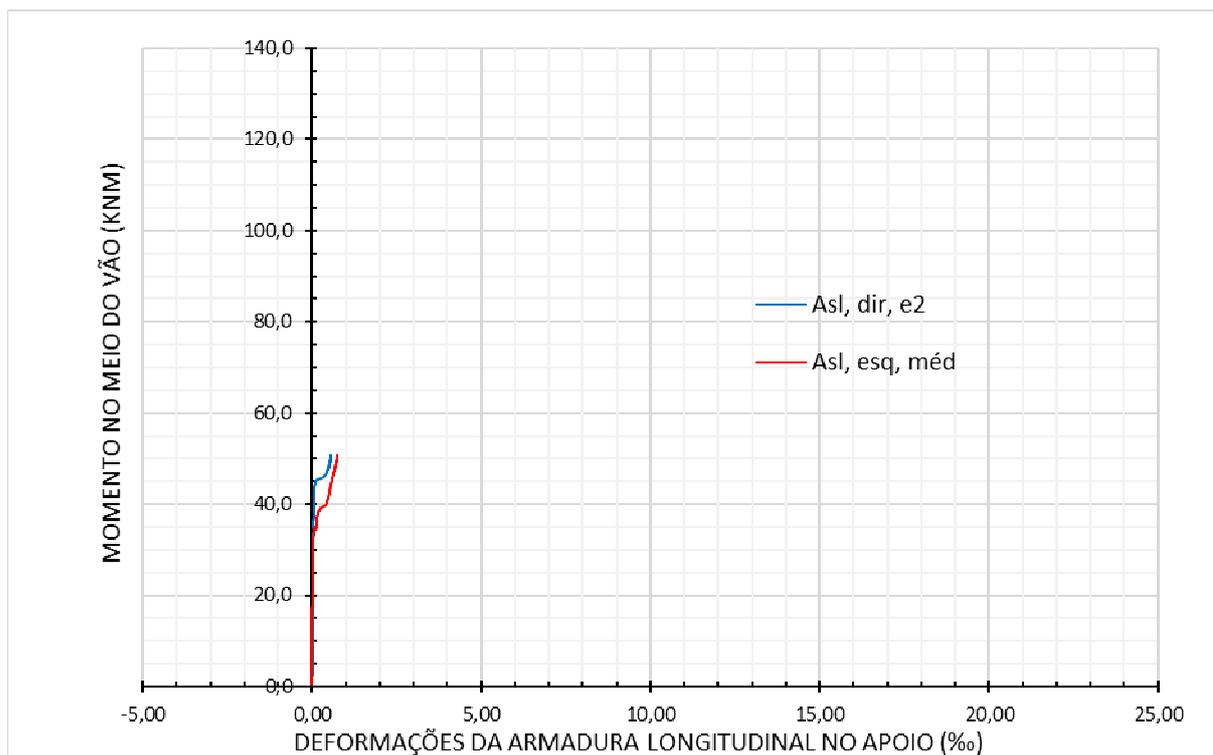


Gráfico 16 –Momento fletor no meio do vão x deformação nos apoios da viga VR1.

Na Tabela 27 são comparadas as deformações máximas de tração da armadura longitudinal no apoio de todas as vigas ensaiadas e os momentos fletores correspondentes.

Tabela 27 – Deformações máximas das armaduras longitudinais nos apoios das vigas.

TIPO	ϵ_f , long. apoio(‰)	M (kN.m)
V1A	2,79	55,96
V1B	8,5	62,5
V2A	5,05	105,52
V2B	8,56	116,94
VR1	0,75	50,83

É possível notar a provável falha na leitura dos extensômetros da viga V1A, mas, mesmo assim, é viável a comparação das deformações entre os dois grupos. Nota-se que, para um momento de 60 kN.m, o grupo 1 atinge deformações de, aproximadamente, 7‰, enquanto que para este mesmo momento o grupo 2 atinge deformações de 0,1‰, deixando evidenciar desta forma que a maior quantidade de estribos, e como consequência o menor espaçamento entre ele, ajuda de forma positiva a reduzir a deformação das vigas, inclusive em seus apoios.

4.1.5 Deformação dos estribos ao cisalhamento

A fim de se verificar as deformações dos estribos no vão do corte, foram colados em pelo menos dois estribos em cada viga, conforme apresentado no item 3.3.1. Os extensômetros colados no concreto, nos estribos e as fissuras nas rupturas das vigas são apresentadas esquematicamente nas Figura 56 até Figura 60.

Os gráficos 17 ao 24 apresentam valores de deformações dos estribos em função do esforço cortante atuante e a contribuição do concreto no cortante (parcela V_c representada pela linha vertical).

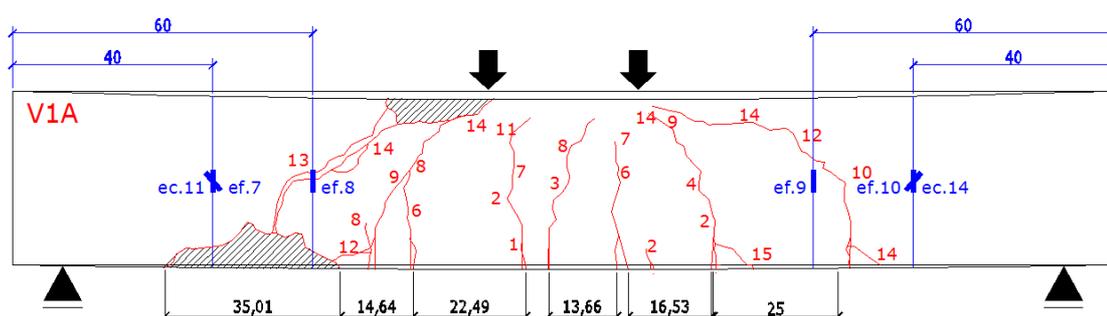


Figura 56 – Instrumentação de cisalhamento da viga V1A (ef = extensômetro no estribo de GFRP; ec = extensômetro no concreto)

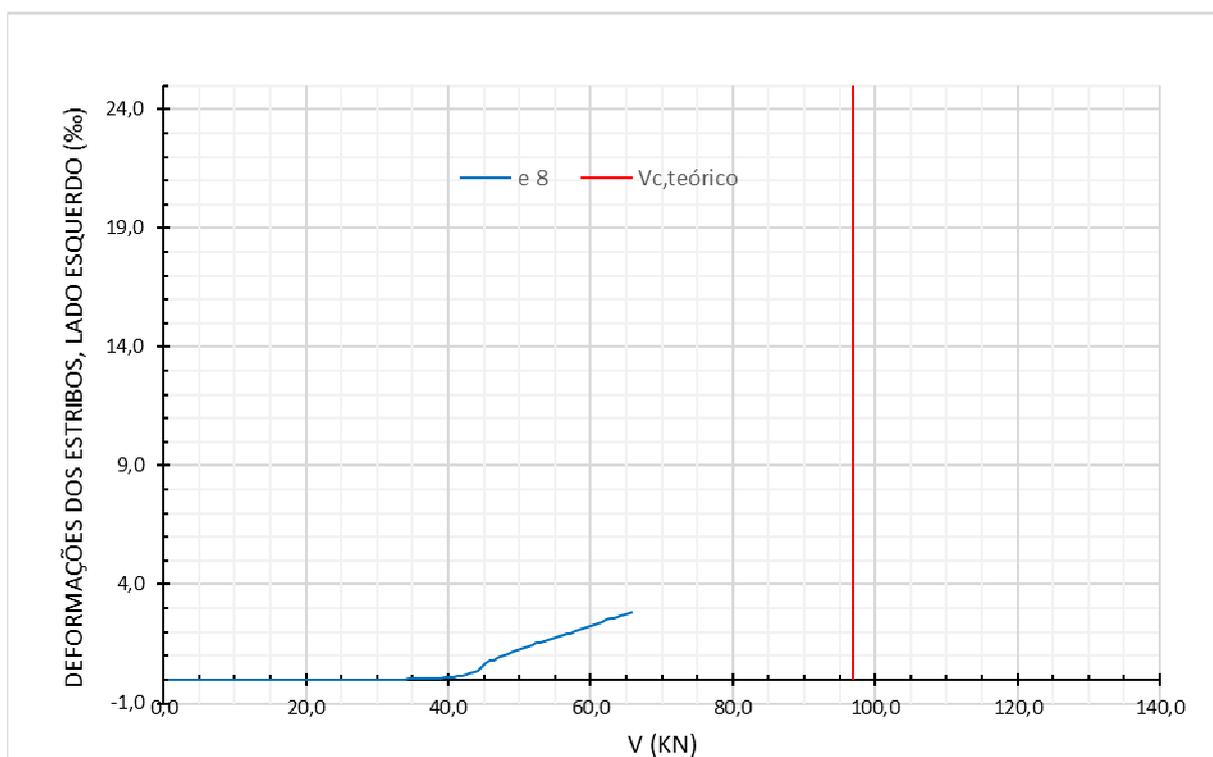


Gráfico 17 - Deformação dos estribos x esforço cortante na viga V1A.

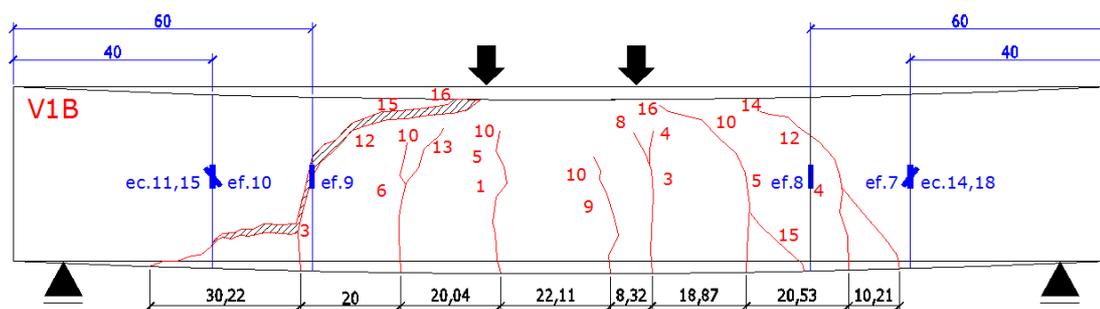


Figura 57 – Instrumentação de cisalhamento da viga V1B (ef = extensômetro no estribo de GFRP; ec = extensômetro no concreto).

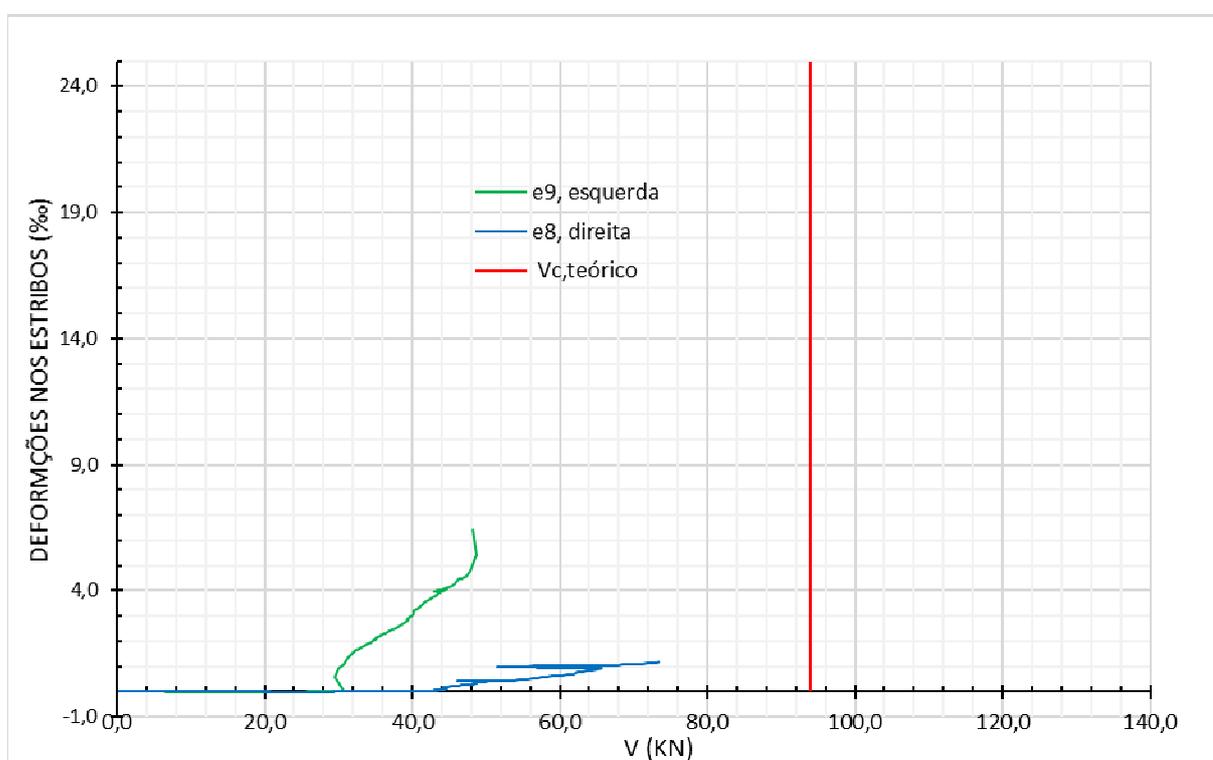


Gráfico 18 - Deformação dos estribos x esforço cortante na viga V1B.

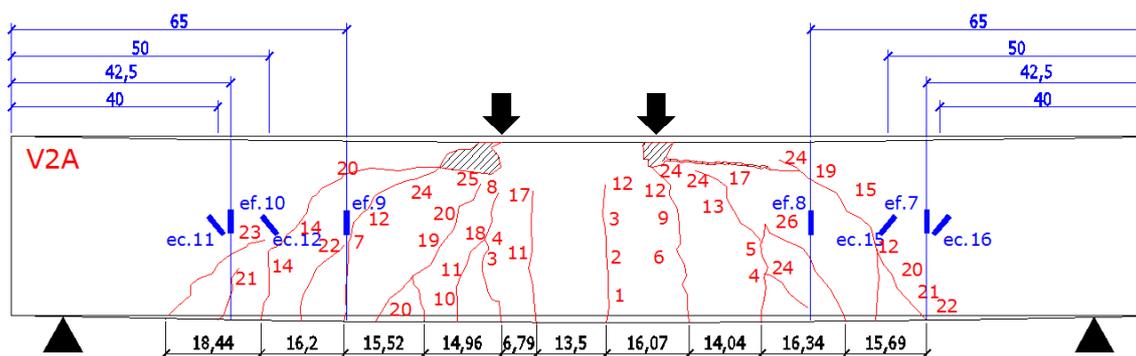


Figura 58 – Instrumentação de cisalhamento da viga V2A (ef = extensômetro no estribo de GFRP; ec = extensômetro no concreto).

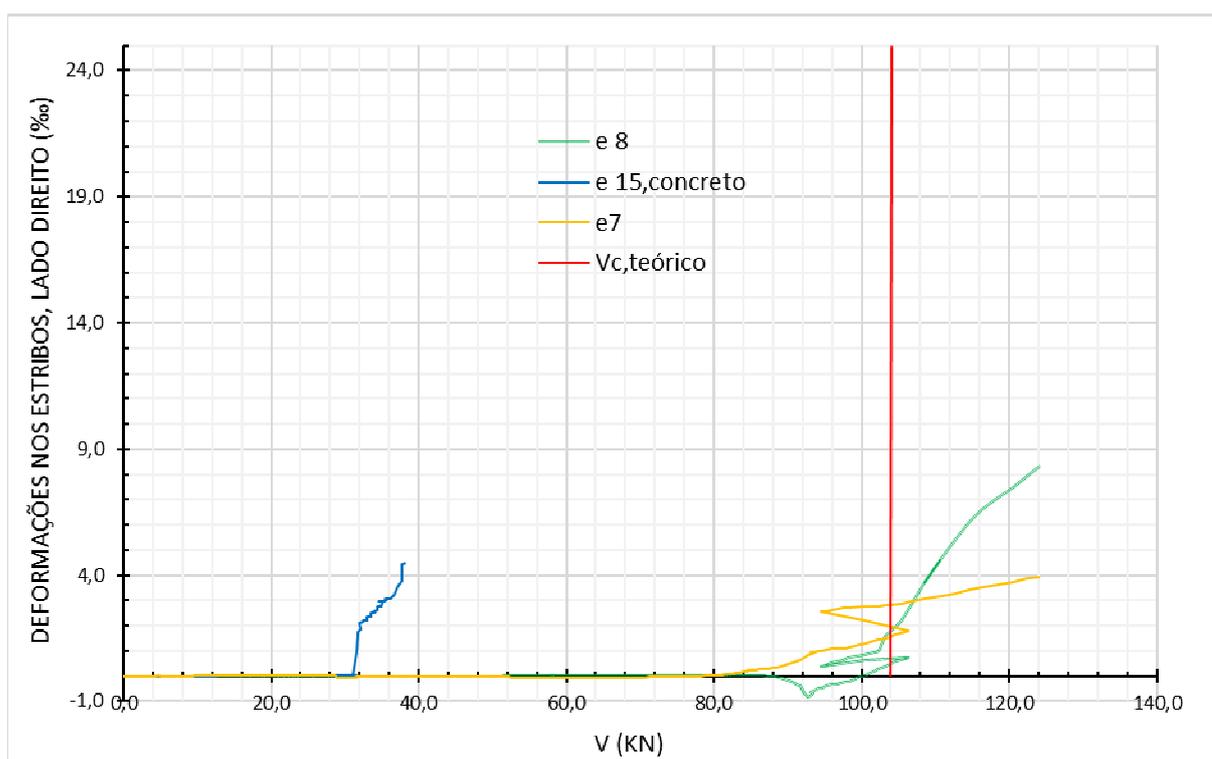


Gráfico 19 - Deformação dos estribos x esforço cortante, dir na viga V2A.

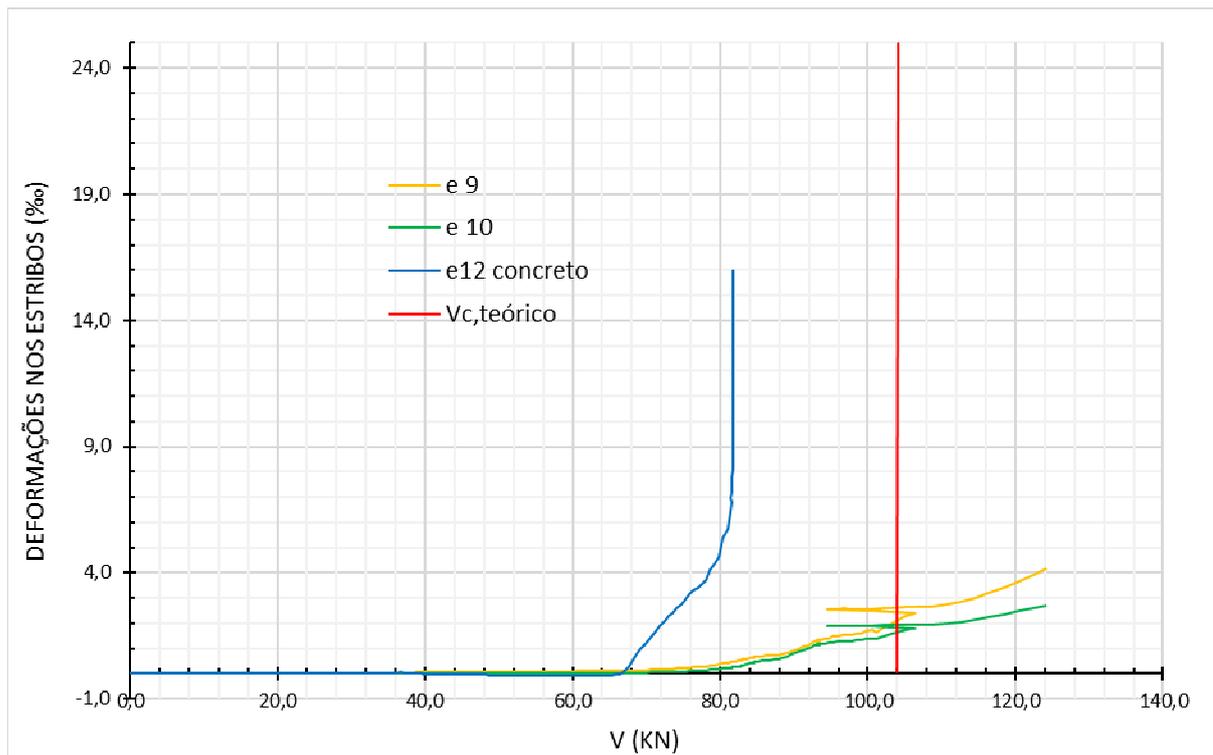


Gráfico 20 - Deformação dos estribos x esforço cortante, esq na viga V2A.

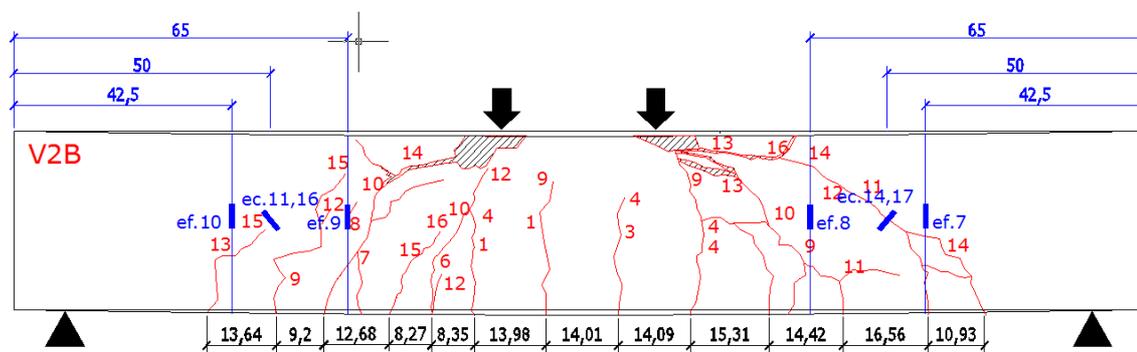


Figura 59 - Instrumentação de cisalhamento da viga V2B (ef = extensômetro no estribo de GFRP; ec = extensômetro no concreto)

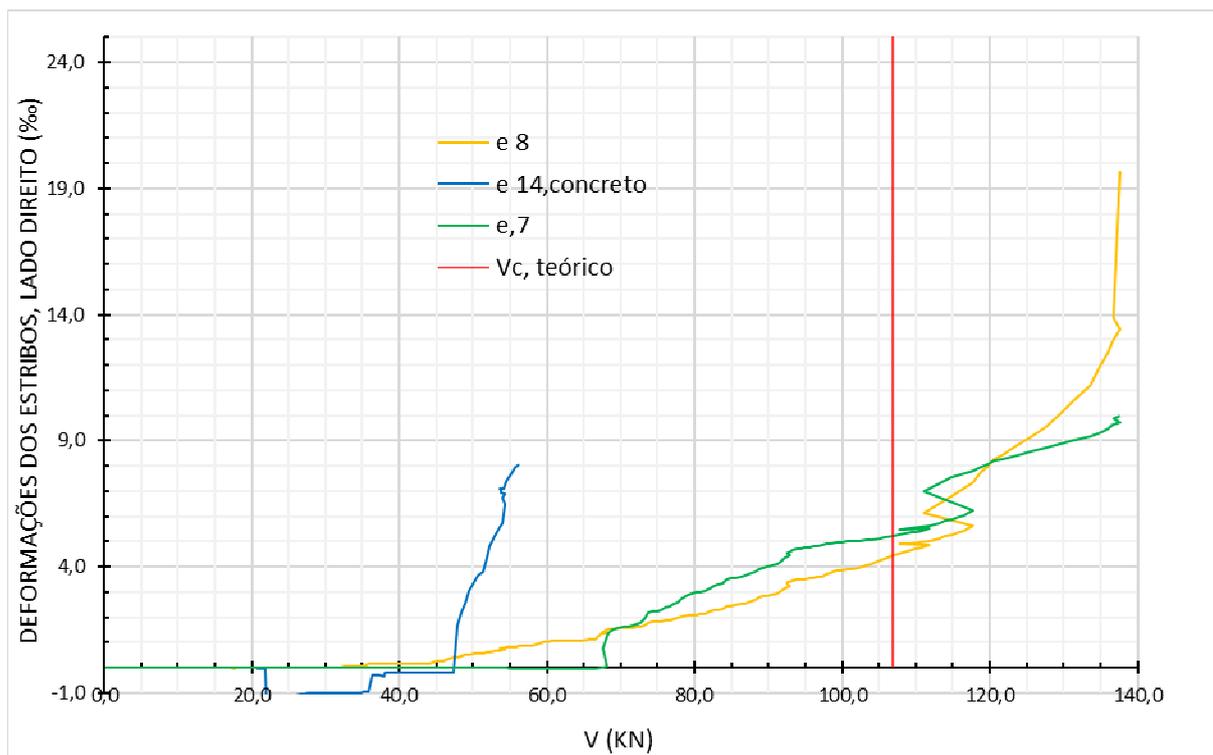


Gráfico 21 - Deformação dos estribos x esforço cortante,dir na viga V2B.

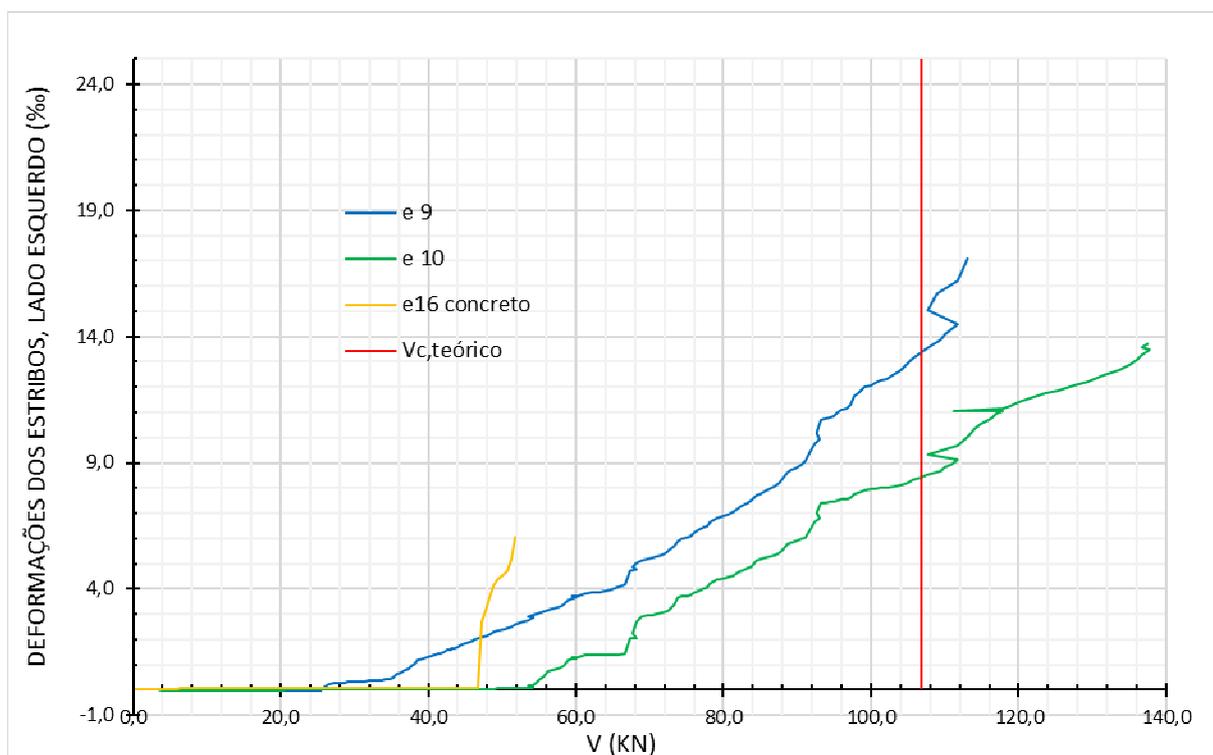


Gráfico 22 - Deformação dos estribos x esforço cortante,esq na viga V2B.

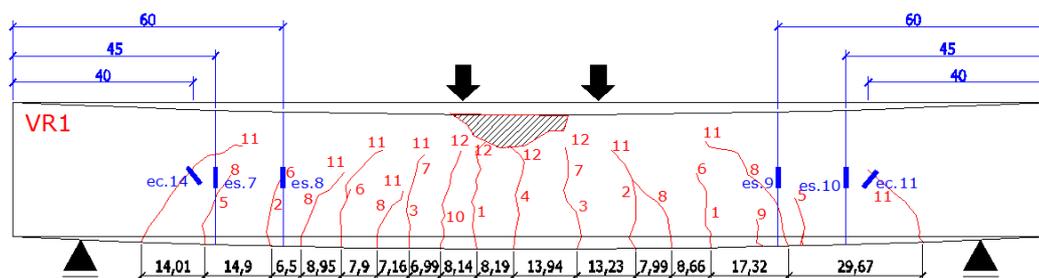


Figura 60 – Instrumentação de cisalhamento da viga VR1 (ef = extensômetro no estribo de GFRP; ec = extensômetro no concreto)

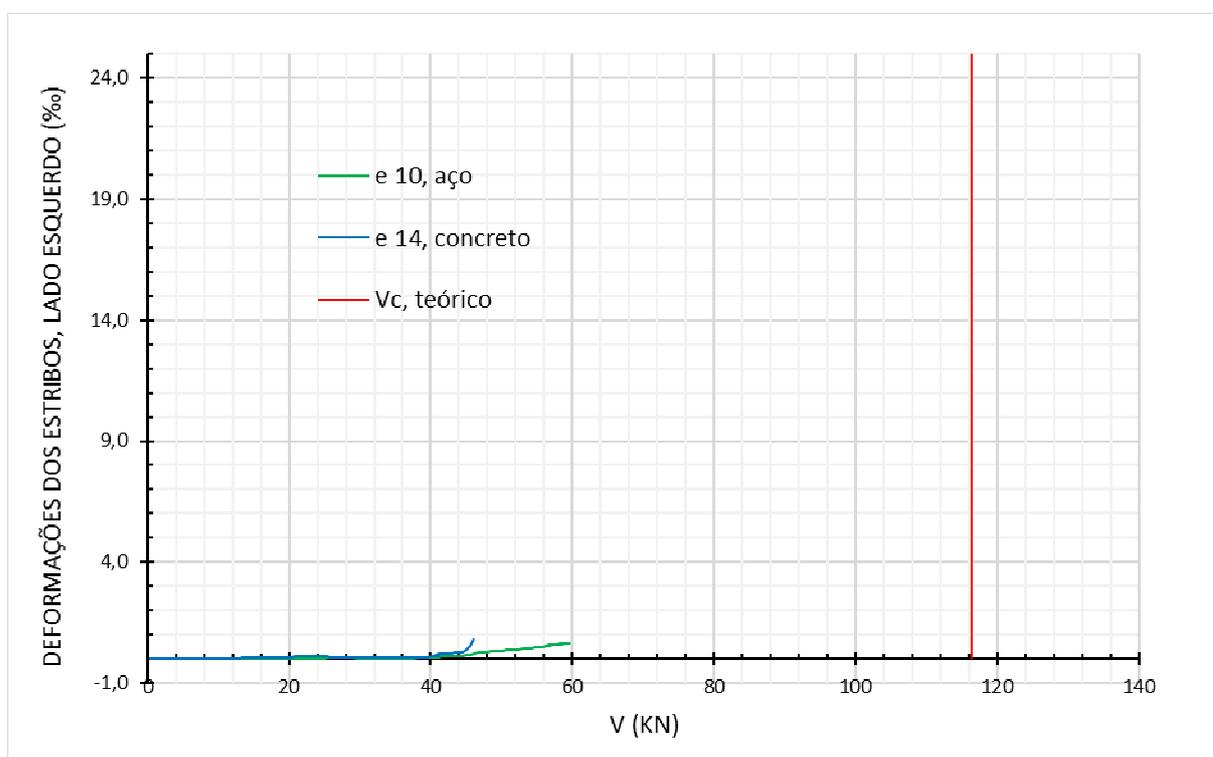


Gráfico 23 – Deformação dos estribos x esforço cortante,esq na viga VR1.

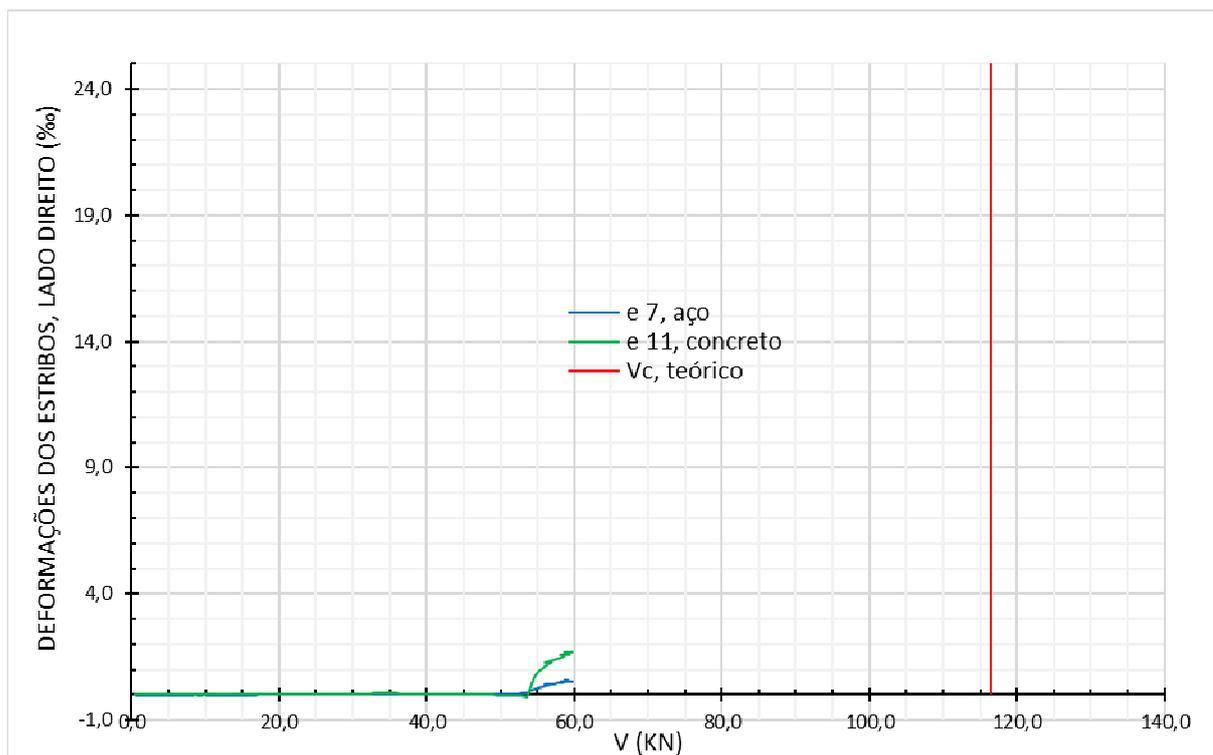


Gráfico 24 - Deformação dos estribos x esforço cortante,dir na viga VR1.

Na Tabela 28 encontram-se, de forma comparativa, os resultados das deformações máximas dos estribos de cada viga e os esforços cortantes correspondentes.

Tabela 28 – Deformação máxima nos estribos das vigas.

TIPO	ε_f , cortante(‰)	V (kN)
V1A	2,82	80,53
V1B	6,46	80,12
V2A	8,35	100,62
V2B	19,68	100,82
VR1	1,74	47,64

Analisando-se as deformações nos estribos e o padrão de fissuração, verifica-se que os estribos mais solicitados (com maiores deformações) localizavam-se, aproximadamente, no terço médio do vão de corte, tal qual refere Ahmed et al (2010). Como já era de se esperar a deformação dos estribos ao longo do vão de

corde é afetada pelo padrão de fissuração, ou seja, o nível de tensão no estribo cresce com o surgimento e estabilização das fissuras de cisalhamento.

4.1.5 Fissuração

Os padrões de fissuração das vigas na ruptura são mostrados da Figura 61 até Figura 65. A relação das aberturas de fissura (w) pelas cargas de cada uma das vigas não metálicas pode ser observada na Tabela 29

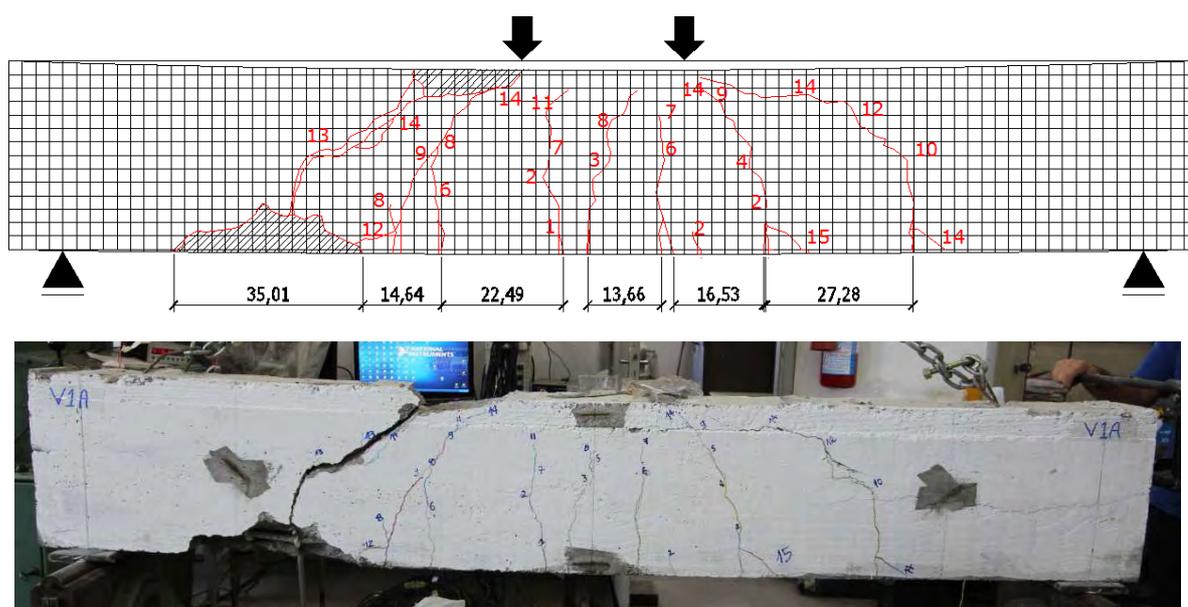
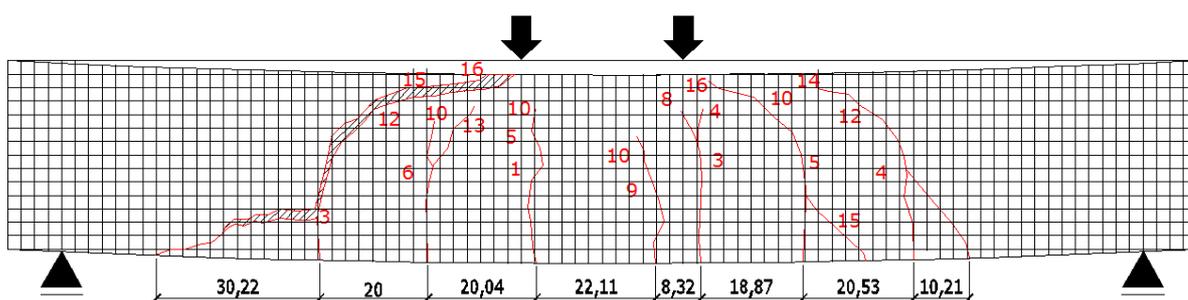


Figura 61 – Padrão de fissuração na ruptura - V1A.



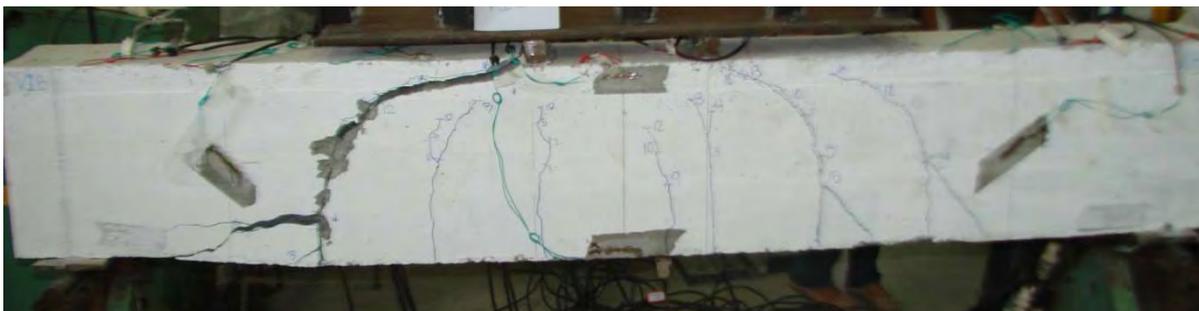


Figura 62 - Padrão de fissuração na ruptura - V1B.

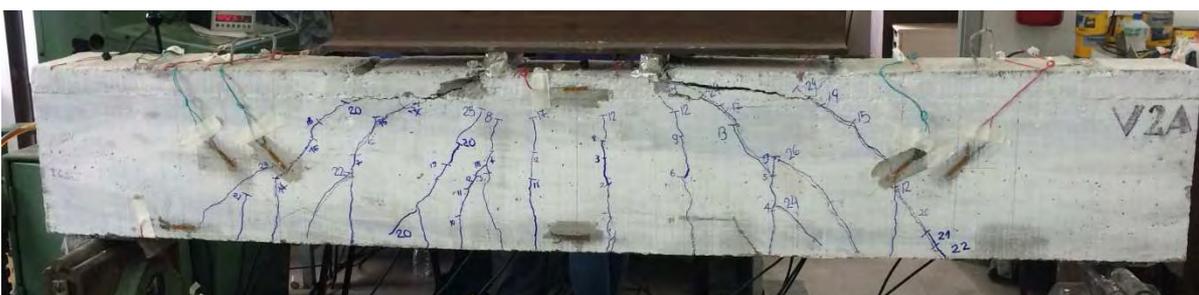
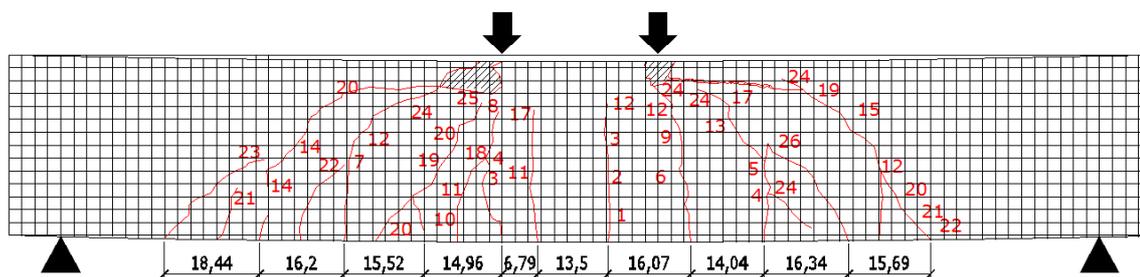


Figura 63 – Padrão de fissuração na ruptura – V2A.

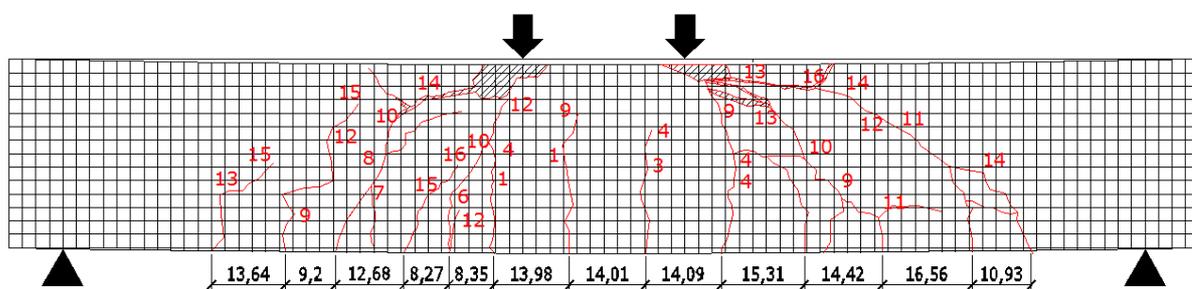




Figura 64 – Padrão de fissuração na ruptura – V2B.

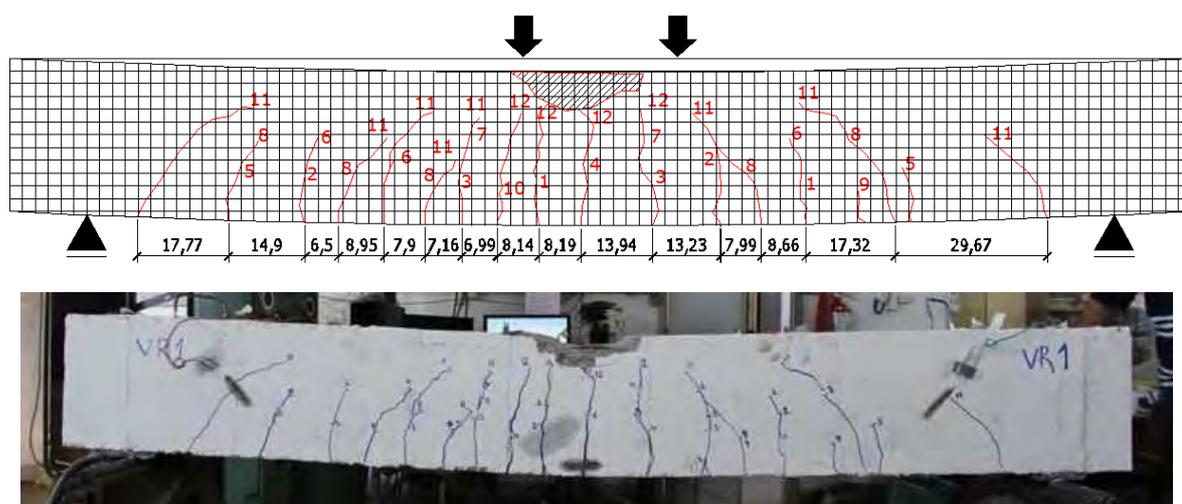


Figura 65 – Padrão de fissuração na ruptura – VR1.

Analisando os dados da Tabela 29, pode-se observar que para uma mesma carga, as fissuras de flexão das vigas do grupo 1 tiveram uma abertura mais significativa do que as fissuras das vigas do grupo 2. Conseqüentemente, este último grupo suportou cargas maiores até sua ruptura. Estas características são provenientes da quantidade de armadura longitudinal no grupo 2 ser maior do que no grupo 1, resistindo mais às solicitações de flexão.

Tabela 29 – Carga x abertura máxima de fissuras na flexão das vigas.

Intervalo de carga da prensa - 2P (kN)		V1A		V1B		V2A		V2B	
		N° fissura	w (mm)	N° fissura	w (mm)	N° fissura	w (mm)	N° fissura	w (mm)
35,00	40,00	2	0,5	-	-	-	-	-	-
40,00	45,00	-	-	-	-	3	0,3	-	-
45,00	50,00	-	-	1	0,5	-	-	-	-
50,00	55,00	-	-	-	-	-	-	1	0,3
55,00	60,00	2	0,9	-	-	-	-	3	0,3
60,00	65,00	-	-	1	0,9	3/6	0,3/0,5	-	-
70,00	75,00	-	-	-	-	-	-	1	0,4
75,00	80,00	-	-	-	-	3	0,3	3	0,7
90,00	95,00	2	2,0	1	1,4	-	-	-	-
95,00	100,00	-	-	-	-	6	0,8	1	0,6
100,00	105,00	-	-	-	-	3	0,3	3	0,8
110,00	115,00	-	-	-	-	-	-	1/3	0,6/0,9
115,00	120,00	-	-	-	-	-	-	1/3	0,7/1,0
135,00	140,00	-	-	-	-	-	-	3	1,2
160,00	165,00	-	-	-	-	-	-	3	1,3
165,00	170,00	-	-	-	-	6	1,5	-	-

Os espaçamentos das fissuras nas vigas do grupo 1, grupo 2 e VR1 foi da ordem de 20 cm, 14 cm e 12 cm, respectivamente. Portanto, é comprovado, desta forma, que a utilização da maior taxa de armadura de GFRP ao cisalhamento de fato contribui no desenvolvimento da fissuração.

4.1.6 Modos de ruptura

As vigas V1A e V1B romperam por cisalhamento, constatando que os mecanismos de resistência ao cisalhamento não funcionaram adequadamente. Observou-se o surgimento de poucas fissuras, inicialmente verticais que, rapidamente, atingiram a porção superior da viga. Isto porque, dada a baixa rigidez axial da armadura longitudinal, por equilíbrio de esforços, a linha neutra decresce rapidamente após a fissuração. Com a continuidade da abertura da fissura que se estendeu do ponto de aplicação da carga até o apoio, foram ouvidos diversos estalos, significando, como comprovou-se posteriormente com a “autópsia” dos espécimes, o escorregamento da armadura longitudinal inferior, seguido pelo rompimento transversal das armaduras longitudinais superiores e por fim a ruptura dos estribos atravessados pela fissura, configurando a ruptura global das peças, como pode ser observado na Figura 66.



Figura 66 - Ruptura da armadura longitudinal de compressão (esquerda) e ruptura dos estribos (direita) da viga V1B.

As vigas V2A e V2B tiveram ruptura tanto por flexão, com esmagamento do concreto na porção superior da viga, quanto por esforço cortante. O comportamento destes modelos durante o carregamento apresentou melhor aspecto de fissuração, com fissuras mais bem distribuídas. Este melhor desempenho, comparado ao grupo 1, é devido à maior quantidade de armadura, tanto longitudinal quanto transversal, com um afastamento menor entre os estribos. Não foram ouvidos estalos nem se observou a ruptura de quaisquer barras, (ver Figura 67), apesar da posição da linha neutra ter decrescido rapidamente após a fissura, como no grupo 1.



Figura 67 – Armadura aparentemente íntegra após a ruptura.

Todas as vigas armadas com GFRP atenderam às condições de espaçamento máximo dos estribos preconizado pelo ACI 2015, que foi menor do que $d/2$. Entretanto, vê-se claramente nestes resultados o efeito do maior confinamento dos estribos. Ao diminuir o espaçamento dos estribos, evitou-se a ruptura do mesmo em suas dobras.

A literatura técnica refere sempre, que a existência de dobras em barras de FRP influencia negativamente sua resistência, motivo pelo qual as regulamentações, tais como o ACI limitam a deformação dos estribos em valores baixos [12]. O ACI ainda recomenda que a relação entre raio de dobra e diâmetro da barra seja maior ou igual a três. Para os estribos utilizados nos modelos experimentais, esta relação variou entre 5,3 a 7,9. Ainda assim, foi observada, especialmente no Grupo 1, a ruptura dos estribos na região da dobra.

A viga VR1 rompeu por flexão, como esperado, com padrão de fissuração compatível ao tipo de ruína. A taxa de armadura longitudinal utilizada garantiu grandes deslocamentos, ao mesmo tempo em que a resistência dos estribos foi pouco utilizada.

4.2 Análise dos resultados experimentais

4.2.1 Análise dos deslocamentos

O Gráfico 25 indica, claramente, como o aumento na taxa de armadura longitudinal e o confinamento dos estribos contribuíram para o aumento de rigidez à flexão. Por exemplo, para uma carga de 40kN o valor da flecha caiu de 9,52mm para 6,45mm, o que representa uma redução de, aproximadamente, 30%, enquanto a taxa de armadura do Grupo 1 para o Grupo 2 foi aumentada em 77% para as armaduras longitudinais e 105% para as armaduras transversais.

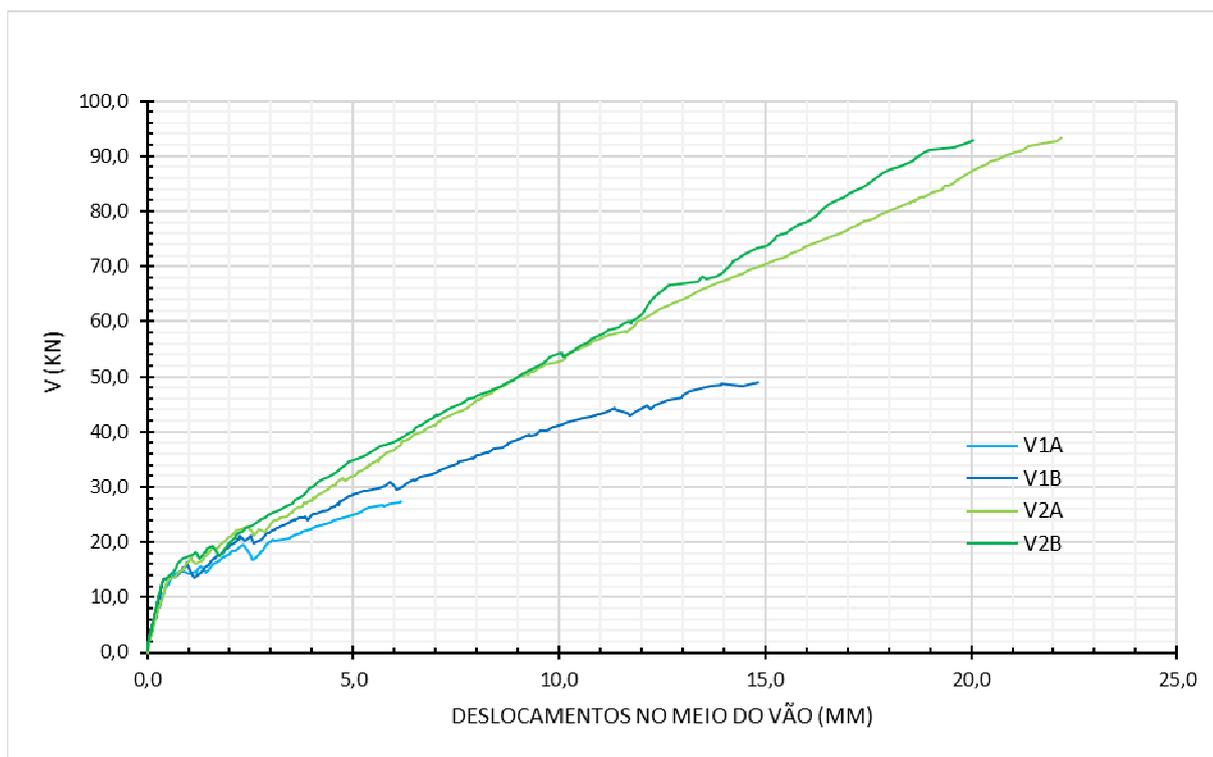


Gráfico 25- Comparação da curva carga x deslocamento entre os grupos 1 e 2.

As fotos apresentadas nas Figura 67 e Figura 68 ilustram que as armaduras longitudinais superiores também fletiram, reduzindo suas capacidades em dar apoio aos estribos na transmissão dos esforços cisalhantes. Estas armaduras romperam durante o carregamento, iniciando o processo de colapso da viga.



Figura 68 – Detalhe do deslocamento vertical das armaduras longitudinais superiores (V2A à esquerda e V1B à direita).

No Gráfico 26 estão plotadas as curvas carga-deslocamento das vigas V2A, V2B e VR1, essa última dimensionada no Domínio3. Nota-se uma proximidade entre essas curvas, o que comprova a necessidade do emprego de maiores taxas de armadura quando se trabalha com barras de fibra de vidro.

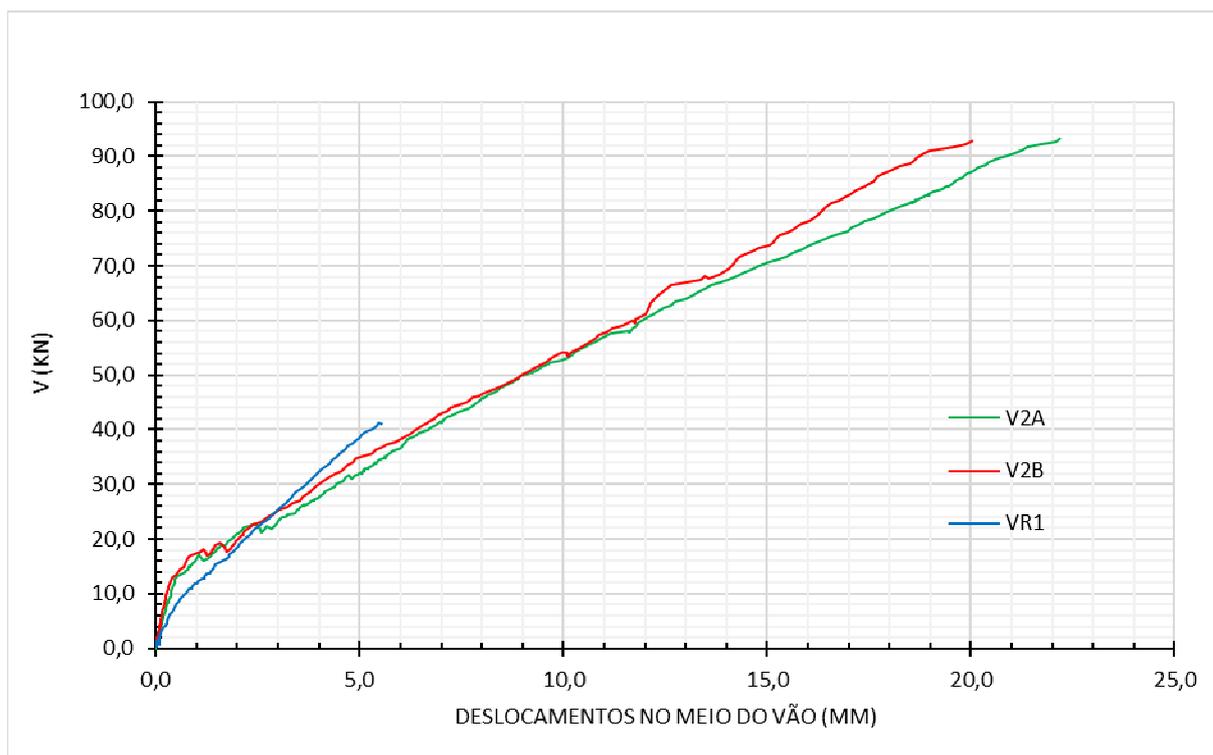


Gráfico 26 – Comparação da curva carga x deslocamento entre as vigas do grupo 2 com a VR1.

4.2.2 Análise das Deformações no meio do vão

Nos Gráfico 27 e Gráfico 28 observa-se que enquanto as vigas V1A e V1B tiveram comportamento bem semelhante, as vigas V2A e V2B apresentaram-se ligeiramente equidistantes. Tal fato parece ser devido a alguma inconsistência na leitura desses extensômetros, porque as curvas apresentadas pelas demais leituras efetuadas mostram sempre que todas as vigas tiveram comportamento semelhante, por grupo.

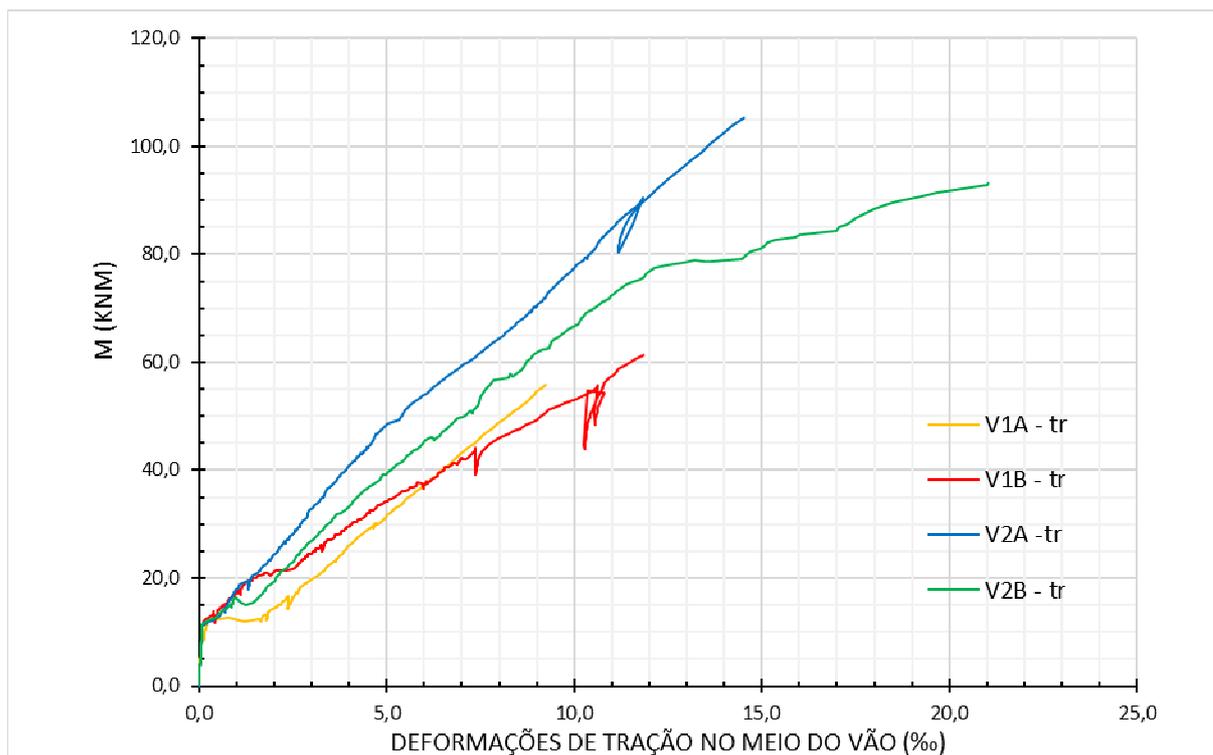


Gráfico 27 - Comparação da curva momento x deformação de tração no meio do vão entre as vigas do grupo 1 e 2.

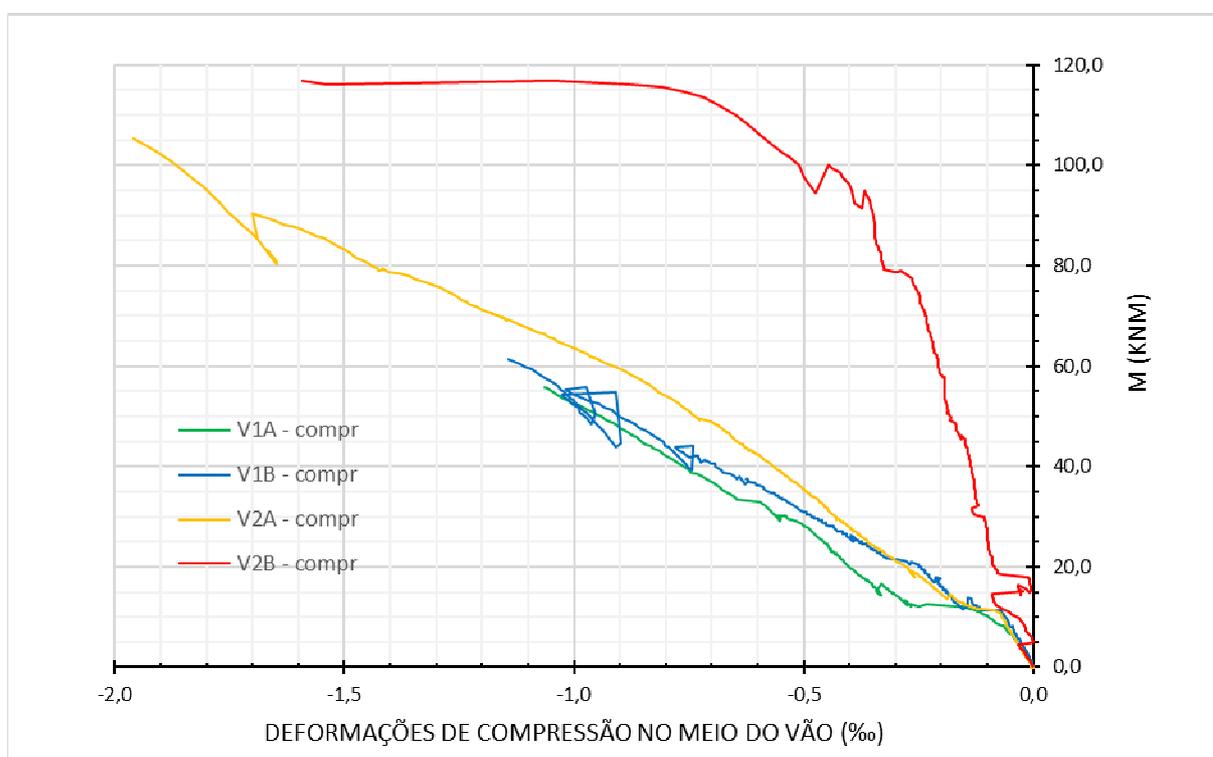


Gráfico 28 - Comparação da curva momento x deformação de compressão no meio do vão entre as vigas do grupo 1 e 2.

4.2.3 Análise das Deformações das barras longitudinais próximo aos apoios

No Gráfico 29 verifica-se que em vigas fletidas totalmente armadas com GFRP, as barras longitudinais são capazes de contribuir na absorção dos esforços cortantes. Além disso, vê-se no gráfico que a parcela de contribuição das vigas V2A e V2B foram maiores que as das vigas V1A e V2A.

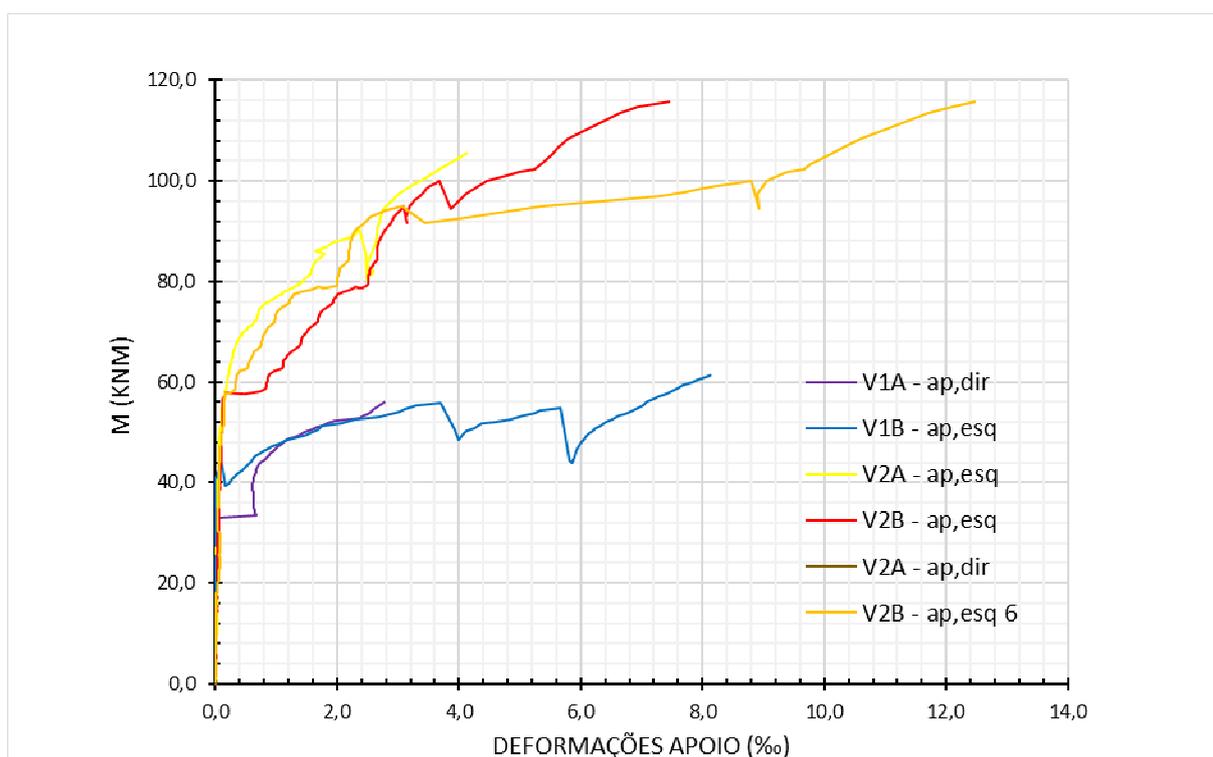


Gráfico 29 - Comparação da curva momento x deformação de tração no apoio entre as vigas do grupo 1 e 2.

O Gráfico 30 ilustra as pequenas deformações sofridas pela barra longitudinal em aço da viga VR1, o que está coerente, uma vez que esta viga não foi solicitada ao corte, pois sua ruptura foi caracterizada pelo Domínio 3 – esmagamento do concreto e escoamento das armaduras de tração no meio do vão.

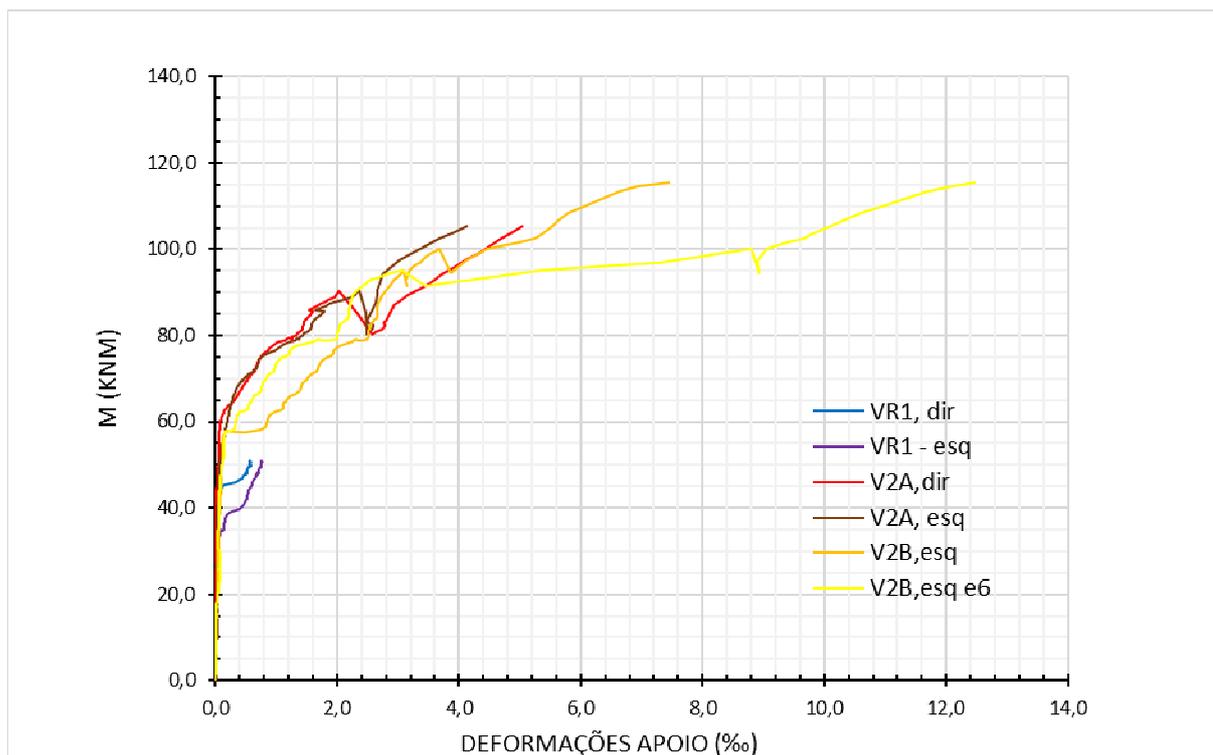


Gráfico 30 - Comparação da curva momento x deformação de tração no apoio entre as vigas do grupo 2 e a VR1.

4.2.4 Análise das Deformações dos estribos

Assim como as barras longitudinais, os estribos das vigas V2A e V2B também foram capazes de melhor absorver os esforços cortantes, ou seja, as vigas com menor espaçamento de estribos apresentaram maior capacidade resistente ao corte e menores deformações nos estribos para qualquer nível de carregamento.

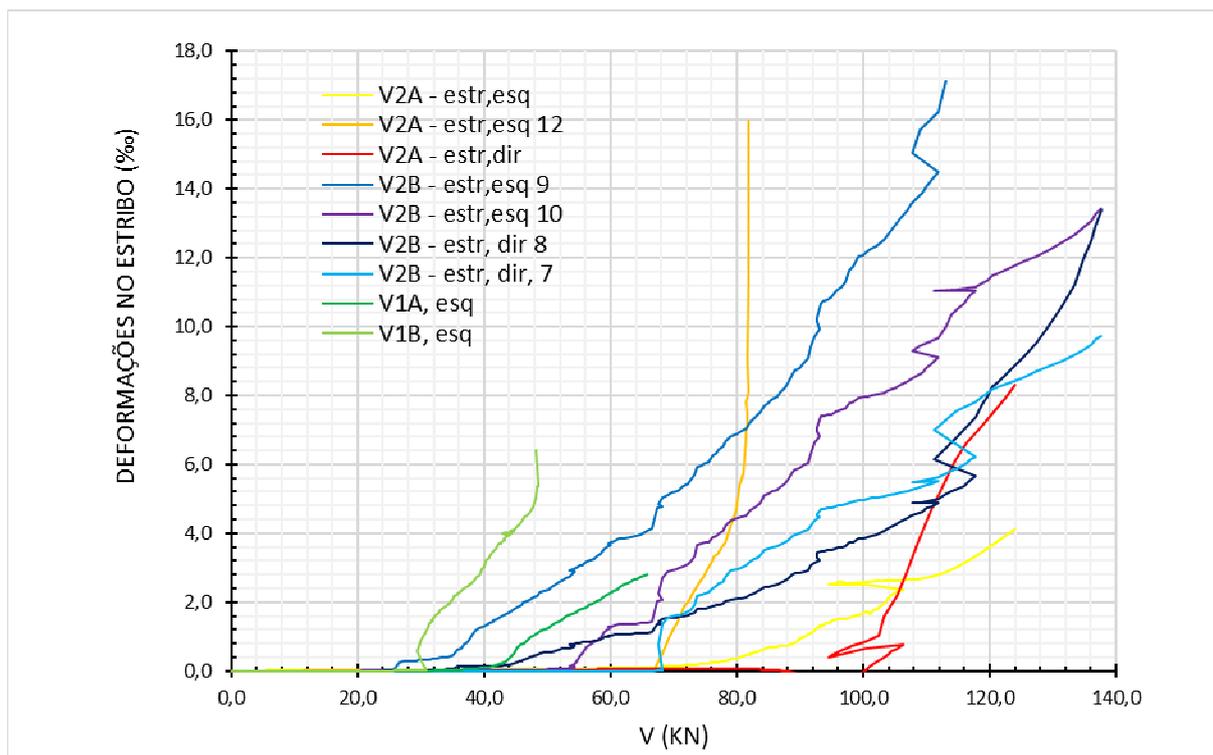


Gráfico 31 - Comparação da curva deformação x cortante entre as vigas do grupo 1 e 2.

Durante os ensaios e à medida que o carregamento era aplicado, observou-se que a linha neutra subia de forma bem acentuada, reduzindo a zona comprimida, o que conseqüentemente minorava a parcela de resistência ao cisalhamento.

Em relação ao termo V_c , calculado de acordo com as normas vigentes NBR6118 e ACI 2015 pode-se dizer que tal qual previsto pela literatura técnica, as vigas armadas com GFRP apresentaram valores de V_c mais baixos do que o equivalente à armadura de aço. Para as vigas do Grupo 1 este valor foi da ordem de 21,5kN e para o Grupo 2 de 23,6kN, portanto valores praticamente iguais; entretanto, o gráfico acima parece indicar que o valor de V_c para o Grupo 2 é maior, o que se justifica devido às maiores taxas de armadura que limitam a abertura de fissuras melhorando o engrenamento dos agregados e aumentam comparativamente a zona comprimida.

A fim de controlar a abertura de fissuras de cisalhamento, prevenindo a degradação do mecanismos de engrenamento dos agregados e impedir que ocorra falha na região da dobra do estribo, a norma do ACI (2015) limita as deformações

nos estribos em 0,004. Mediante as deformações observadas no gráfico acima verifica-se que tal limitação é muito conservadora.

Tal qual ocorreu com as deformações na barra longitudinal junto ao apoio, o gráfico abaixo ilustra as pequenas deformações sofridas pelos estribos em aço da viga VR1, o que está coerente, uma vez que esta viga não foi solicitada ao corte.

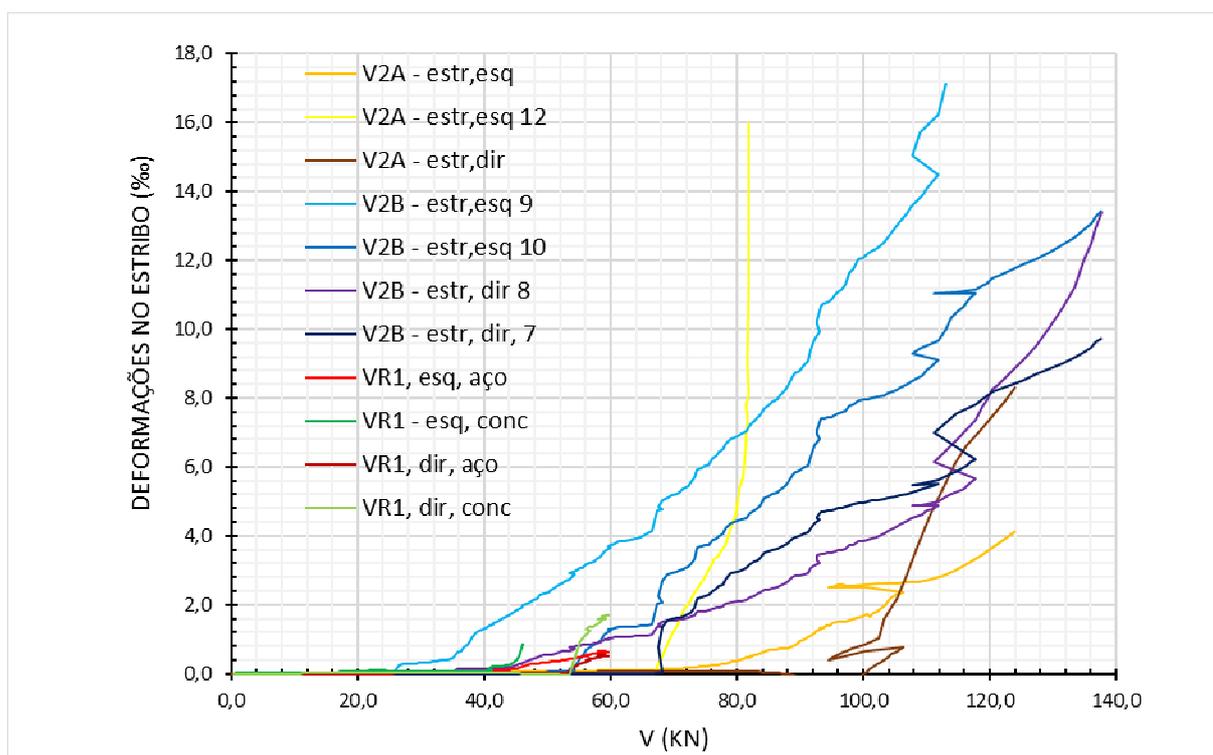


Gráfico 32 - Comparação da curva deformação x cortante entre as vigas do grupo 2 e a VR1.

4.2.5 Análise teórica x experimental

O Gráfico 33, abaixo, mostra a comparação teórico – experimental dos valores de deslocamentos no meio do vão em relação ao momento aplicado. Nota-se, por estes dados, que as vigas se mostraram com mais deflexões do que as predições do ACI.

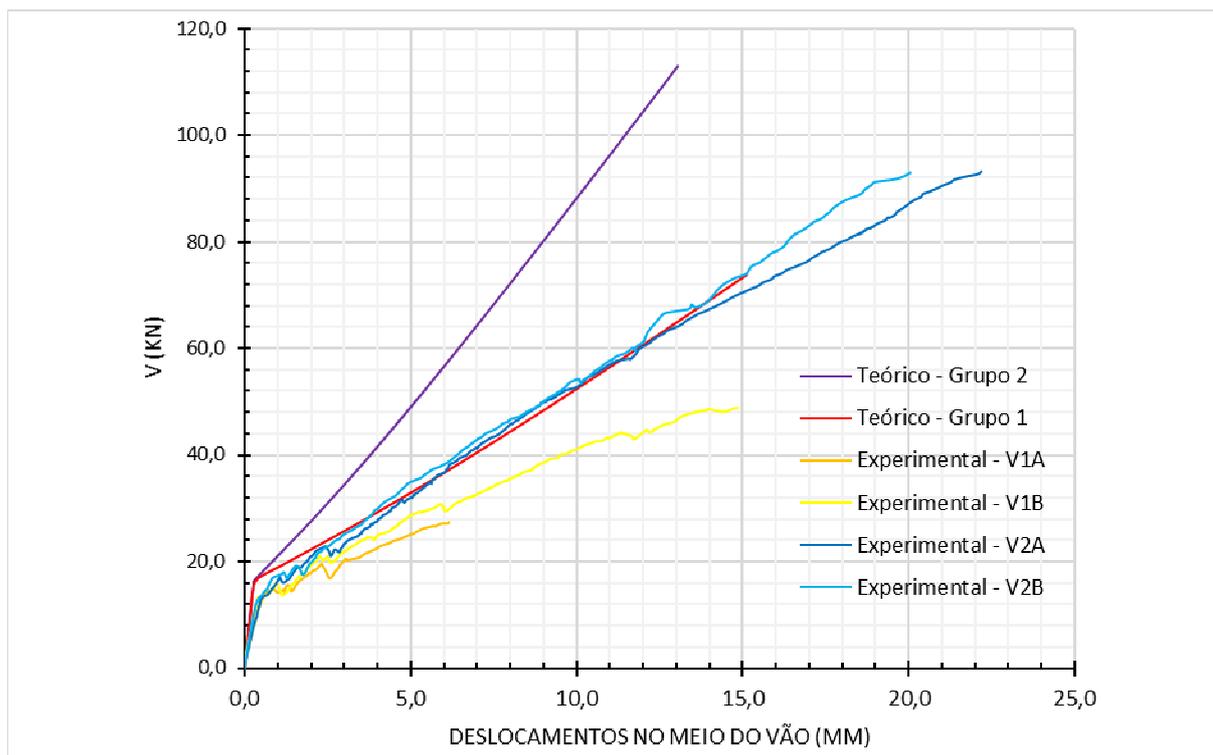


Gráfico 33 – Comparação da curva carga x deslocamento entre os resultados teóricos e experimentais dos grupos 1 e 2.

No Gráfico 34 estão plotadas as curvas momento-curvatura calculadas a partir dos valores experimentais e teóricos obtidos em programa computacional [35]. Neste gráficos vê-se que a previsão do comportamento da rigidez pelo programa mostrou-se bastante coerente.

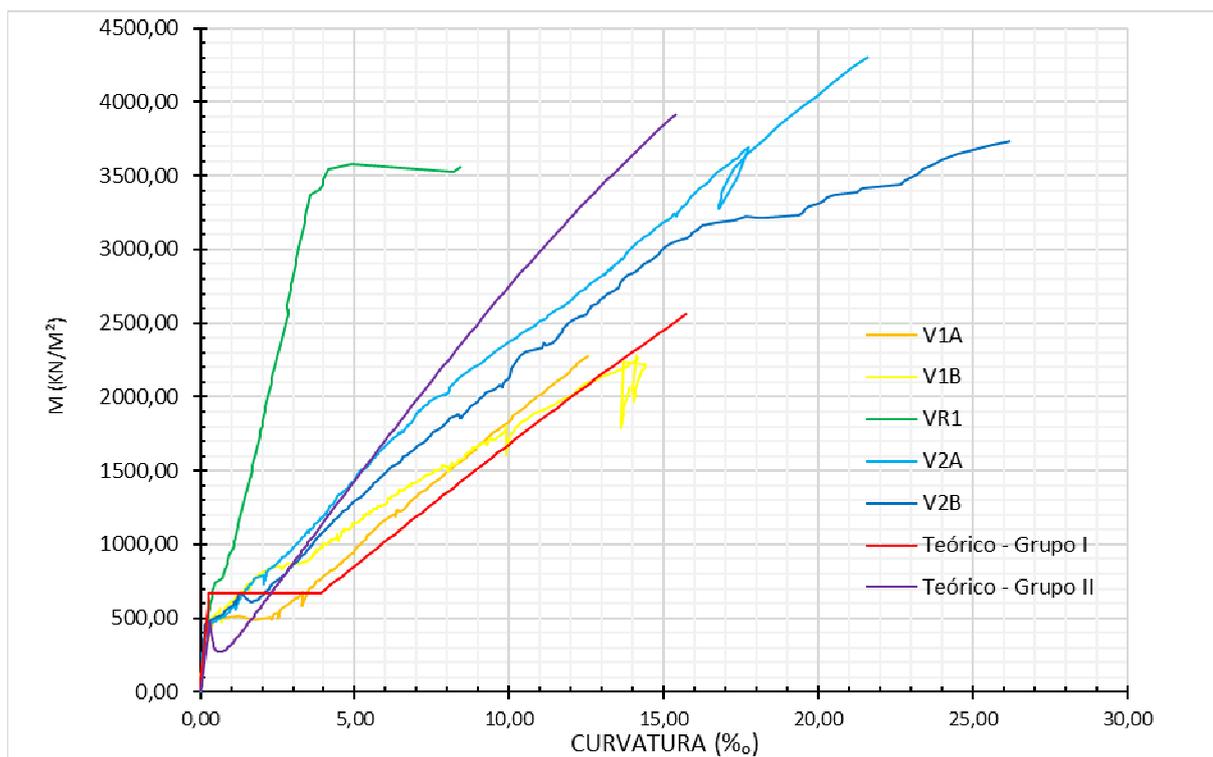


Gráfico 34 - Comparação da curva momento x curvatura entre os resultados teóricos e experimentais dos grupos 1 e 2.

5 CONCLUSÕES

Nesta pesquisa foram ensaiadas vigas biapoiadas totalmente armadas com barras de GRFP, por entender-se que não faz sentido usar estribos em aço uma vez que estas são as armaduras mais expostas à agressividade e, também, com o objetivo de suprir uma necessidade detectada na revisão bibliográfica.

Apesar do número reduzido de ensaios, o programa experimental desenvolvido possibilitou a análise de vários aspectos. Os gráficos dos ensaios apresentados denotam homogeneidade nos resultados, o que permite avaliações confiáveis. Assim, e tendo por base os ensaios realizados, pode-se fazer as seguintes considerações:

- O desempenho das armaduras de GRFP é afetado pelo baixo módulo de elasticidade, pela configuração superficial e pela aderência ao concreto. Entretanto, pode-se dizer que o uso de armaduras de GFRP em vigas de concreto é viável, contanto que se atenda a certos requisitos. Embora muitas premissas usadas no dimensionamento das estruturas em aço sejam aplicáveis ao dimensionamento com armaduras poliméricas, é preciso ter em mente que tais dimensionamentos apresentam comportamentos distintos, uma vez que são dois materiais completamente diversos.
- Tal qual refere a literatura técnica, o aumento das taxas de armaduras longitudinal e transversal contribuem para a melhoria do desempenho de elementos fletidos em relação a diversos aspectos, como:
 - aumento de rigidez à flexão;
 - diminuição dos deslocamentos;
 - aumento da capacidade resistente ao cisalhamento;
 - diminuição da abertura e do espaçamento das fissuras de flexão.
- Em relação aos complementares da resistência ao cisalhamento, parcela empírica denominada por V_c , pode-se dizer que tal qual previsto pela literatura técnica, as vigas armadas com GFRP apresentaram valores de V_c mais baixos do que o equivalente à armadura de aço. Entretanto, o aumento das taxas de armadura usadas nas vigas do Grupo 2 foi capaz de limitar a

abertura de fissuras, melhorando o engrenamento dos agregados, e aumentar a zona comprimida, permitindo obter maiores valores de V_c .

- Constatou-se de forma clara que em vigas fletidas totalmente armadas com GFRP, as barras longitudinais são capazes de contribuir na absorção dos esforços cortantes.
- A adoção de maiores taxas de armaduras longitudinal e transversal, além de promover o aumento do termo V_c possibilitou maior contribuição das barras longitudinais no apoio e maior absorção dos esforços pelos estribos contribuindo sobremaneira na capacidade resistente ao corte.
- A literatura técnica refere a fragilidade das dobras dos estribos e, por isso, a norma do ACI (2015) limita, para projeto, as deformações nos estribos em 0,004. Tal fato foi constatado nos ensaios do Grupo 1. Entretanto, as deformações obtidas pelos estribos das vigas do Grupo 2, em que foram usadas maiores taxas de armaduras, indicaram que essa limitação é muito conservadora.
- As deformações dos estribos ao longo do vão de corte é afetada pelo padrão de fissuração, ou seja, o nível de deformação no estribo cresce com o surgimento e estabilização das fissuras de cisalhamento. Os estribos mais solicitados localizavam-se aproximadamente no terço médio do vão de corte, tal qual refere Ahmed et al (2010).
- Em relação às previsões teóricas, a norma do ACI (2015) apresentou valores mais rígidos, o que é contra a segurança. No que diz respeito às curvas Momento-curvatura, os valores teóricos obtidos com o algoritmo que foi considerado, conseguiu-se refletir de forma satisfatória os resultados experimentais.

Finalmente, ressalta-se que o comportamento geral dos modelos analisados dependeu do processo de fabricação do material compósito, e, em especial quanto ao seu acabamento superficial e qualidade de polimerização. Naturalmente, outros fatores como tipo de resina e tipo de fibra utilizados têm, também, sua parcela de importância. Desta forma, confirmou-se que embora as previsões teóricas previstas por diversas regulamentações, com maior ou menor grau se aproximem do resultado encontrado experimentalmente, o presente trabalho mostrou que é fundamental a

execução do maior número de pesquisas experimentais a fim de que haja um banco de dados relevante que possa nortear futuras regulamentações.

Assim como acontece no âmbito internacional, os custos de fabricação destes materiais compósitos tende a diminuir, desde que haja maior interesse do mercado pelo produto, o que só pode acontecer com a sedimentação do conhecimento, padronização dos processos e, especialmente, confiança do meio técnico.

Este trabalho, pela primeira vez no Brasil, conduziu experimentos com a utilização total de armaduras em vigas. E pela primeira vez foram utilizadas armaduras fabricadas com tecnologia 100% nacional. Daí o ineditismo e importância desta pesquisa.

Felizmente, em um momento em que a ciência encontra grande dificuldade para avançar no país, é extremamente gratificante conseguir desenvolver algo relevante, a despeito das mais adversas condições encontradas. É importante também agradecer à *Stratus Compósitos Estruturais*, que forneceu todas as armaduras que possibilitaram a realização dos experimentos dessa Dissertação, sem as quais este trabalho não seria realizado.

Durante a realização dos experimentos e posteriormente na discussão de seus resultados, contatou-se a gama de assuntos ainda a serem explorados, dentre os quais se destacam as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Análise de vigas de diferentes larguras e a influência deste parâmetro no cisalhamento;
- Análise da influência do diâmetro das barras no comportamento à flexão e cisalhamento;
- Análise da influência da armadura longitudinal construtiva;
- Análise da resistência real dos estribos devida à presença de dobras;

Esse trabalho, ainda, fomentou o início e a criação de um grupo de pesquisa, da UERJ, para a pesquisa e desenvolvimento dessa nova tecnologia. Talvez seja, esse, o maior contributo dessa Dissertação. Esse trabalho não termina aqui: é apenas o começo.

O seguinte artigo originou-se deste estudo:

Teixeira, B. A. C. T *et al.* (2018), "Utilização de armaduras não metálicas no Brasil", X Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas, Rio de Janeiro, maio.

REFERÊNCIAS

1. HEAD, M. E. A. **Stainless Steel Prestressing Strands and Bars for use in Prestressed Concrete Girders and Slabs**. Maryland State Highway Administration / Morgan State University. Baltimore, p. 121. 2015.
2. AHMED, E. A. E. A. Case Study: Design, Construction, and Performance of the La Chancelière Parking Garage's Concrete Flat Slabs Reinforced with GFRP Bars. **Journal of Composites for Construction**, Março 2016.
3. BENMOKRANE, B. et al. Designing and Testing of Concrete Bridge Decks Reinforced with Glass FRP Bars, v. 11, n. 2, p. 217-229, Março, Abril 2006.
4. LUKE , S. L.; ESTRADA, H. Composites Primer. In: ZOGHI, M. **The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering**. Florida: CRC Press, 2013. p. 706.
5. RUBINSKY, A.; RUBINSKY, I. A preliminary investigation of the use of fibre-glass for prestressed concrete. **Magazine of Concrete Research**, p. 71-78, Setembro 1954.
6. FIB. FÉDERATION INTERNACIONALE DU BETÓN. CEB/FIB Bulletin 40: FRP reinforcement in RC structures, 2007.
7. CECH, V.; PALESCH, E.; LUKES, J. The glass fiber-polymer matrix interface/interphase characterized by nononscale imaging techniques. **Composites Science and Technology** , v. 83, 2013.
8. TAVARES, D. H. **Análise teórica e experimental de vigas de concreto armadas com barras não metálicas de GFRP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - USP. São Carlos, p. 118. 2006.
9. SERUTI, A. C. **Caracterização mecânica e desempenho estrutural de elementos pultrudados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - UFRJ. Rio de Janeiro. 2013.
10. ISIS. **ISIS Educational Module 3: An Introduction to FRP-Reinforced. Intelligent Sensing for Innovative Structures**. Canada. 2003.

11. TEIXEIRA, A. M. A. J.; CARNEIRO, L. A. V. Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na engenharia de construção. **Revista Ciência e Tecnologia**, v. 3º quadrimestre, p. 52-66, 2008.
12. ACI 440.1R-15, A. C. I. **Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars**. [S.l.]. 2015.
13. REIS, V. L. F. **Construção de Estruturas de Betão Armado com Varões de FRP**. Dissertação (Mestrado em Materiais e Processos de Construção) - Universidade do Porto. Porto. 2009.
14. BULLETIN14. **FIB BULLETIN 14 - FRP as externally bonded reinforcement of R.C. structures: basis of design and safety concept**. [S.l.]. 2001.
15. BENMOKRANE, B. et al. Laboratory assessment and durability performance of vinyk-ester, polyester, and epoxy glass-FRP bars for concrete structures. **Composites Part B Engineering**, v. 114, p. 163-174, 2017.
16. BAKIS, E. C. et al. Analysis of bonding mechanisms of smooth and lugged FRP rods embedded in concrete. **Composites Science and Technology**, v. 58, p. 1307-1319, 1998.
17. STRATUS FRP. **Catálogo de especificações técnicas de vergalhões e estribos de fibra de vidro**. [S.l.]. 2014.
18. GOORANORIMI, O. et al. Microstructural investigation of glass fiber reinforced polymer bars. **Composites Part B**, v. 110, p. 388-395, 2017.
19. COUTO, I. A. **Análise Teórica e Experimental do Comportamento da Aderência entre o Concreto e Barras de Fibra de Vidro Impregnadas por Polímeros**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - USP. São Carlos. 2007.
20. ACHILLIDES, Z.; PILAKOUTAS, K. Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions. **Journal of Composites for Construction**, v. 8, p. 173-181, 2004.
21. LUKE, A. B.; WILLIAMS, B.; SADEGHIAN, P. Specific Durability Issues. In: ZOGHI, M. **The International Handbook of FRP in Civil Engineering**. Florida: CRC Press, 2013. p. 706.
22. ROBERT, M. . E. B. B. Combined Effect of Saline Solution and Moist Concrete on Long-Term Durability of GFRP Reinforcing Bars. **Construction & Building Materials Journal**, v. 38, p. 274-287, 2012.

23. BOOTLE, J.; BURZESI, F.; FIORINI, L. Design Guidelines. In: _____ **ASM Handbook**. Ohio: [s.n.], v. 21: Composites, 2001. p. 388-395.
24. NANNI, A. Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications. **Developments in Civil Engineering**, v. 42, p. 450, 1993a.
25. AHMED, E. A.; EL-SALAKAWY, E. F.; BENMOKRANE, B. Performance Evaluation of Glass Fiber-Reinforced Polymer Shear Reinforcement for Concrete Beams. **ACI Structural Journal**, p. 55-62, 2010.
26. ALAM, M. S.; HUSSEIN, A. Experimental investigation on the effects of longitudinal reinforcement on the shear strength of fibre reinforced polymer reinforced concrete beams. **NRS Research Press** , p. 243-251, 2011.
27. SILVA, C. B. E. **Comportamento de vigas de concreto armadas com barras de CFRP e GFRP para infraestrutura de transportes. Dissertação (Mestrado em Engenharia)**. IME. Rio de Janeiro. 2014.
28. JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERING. **Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials**. JSCE. [S.l.]. 1997.
29. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1.1: General rules and rules for buildings**. [S.l.]. 2004.
30. ABNT6118. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro. 2014.
31. ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440-R- State-of-the-art report on fiber reinforced plastic (FRP) - reinforcement for concrete structures**. ACI - American Concrete Institute. [S.l.]. 1996.
32. ACI - AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 440.1R-06 - Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars**. ACI. [S.l.]. 2006.
33. LEONHARDT, F. **Construções do Concreto: Verificação da Capacidade de Utilização**. Berlim: Interciência, v. IV, 1979.
34. SILICON. **Ficha de informações de segurança de produtos químicos - Silicon mix 40 - Ref 117**. [S.l.]. 2015.

35. OLIVEIRA, L. O. S. B. **Exame de Qualificação de Doutorado**. UERJ. Rio de Janeiro, p. 26. 2017.
36. JORQUERA, P.; MAYORGA, C. V. **Barras de plástico reforçado com fibra de vidro**. Universidade do Chile. Chile. 1998.
37. KOLLÁR, L. P.; SPRINGER, G. S. **Mechanics of Composite Structures**. New York: Cambridge University Press, 2003.
38. ASHOUR, A. F. Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars. **Construction and Building Materials**, 2006. 1005-1015.
39. KASSEM, C.; FARGHALY, A. S.; BENMOKRANE, B. Evaluation of Flexural Behavior and Serviceability Performance of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars. **Journal of Composites for Construction**, p. 682-695, 2011.
40. GOLDSTON, M.; REMENNIKOV, A.; NEAZ SHEIKH, M. Experimental investigation of the behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars under static and impact loading. **Engineering Structures**, p. 220-232, 2016.
41. PILAKOUTAS, K.; NEOCLEOUS, K.; GUADAGNINI, M. Design philosophy issues of fibres reinforced polymer reinforced concrete structures. **Journal of Composites for Construction**, p. 154-161, 2002.
42. CAN/CSA-S806. **THE CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION CAN/CSA-S806-02 - Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers**. [S.I.]. 2002.
43. CNR-DT203. **CNR - ADVISORY COMMITTEE ON TECHNICAL RECOMMENDATIONS FOR CONSTRUCTION. CNR-DT 203/2006 - Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars**. [S.I.]. 2007.
44. ABNT5739. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739:2007 - Concreto: Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro. 2007.
45. ABNT53. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 53: 2009 - Agregado graúdo: Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro. 2009.
46. ABNT52. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52:2009 - Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa**

- específica aparent.** Rio de Janeiro. 2009.
47. ABNT45. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 45:2006 - Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro. 2006.
48. ABNT30. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM30:2001 - Agregado miúdo: Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro. 2001.
49. ABNT248. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248:2003 - Agregados: Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro. 2003.
50. ABNT8522. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522:2017 - Concreto: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão.** Rio de Janeiro. 2017.
51. ABNT7222. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222:2017 - Concreto e argamassa: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro. 2017.
52. ASTM D7205. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D7205/D7205M-06 - Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars.** [S.I.]. 2016.
53. ASTM D297. **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D297-13 - Standard Test Methods for Rubber Products: Chemical Analysis.** [S.I.]. 2013.
54. GANGARAO, H. S. V.; VIJAY, P. V. **Aging of Structural Composites under Varying Environmental Conditions.** Japan Concrete Institute. Tokyo, p. 91-98. 1997b.
55. THERIAULT, M.; BENMOKRANE, B. **Effects of FRP Reinforcement Ratio and Concrete Strength on Flexural Behavior of Concrete Beams.** **Journal of Composites for Construction**, v. 2, p. 7-16, 1998.

ANEXOS

- ANEXO I – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MIÚDOS**
- ANEXO II – CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS GRAÚDOS**
- ANEXO III – DOSAGEM DO CONCRETO**
- ANEXO IV – CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO**
- ANEXO V – ENSAIO DE QUEIMA**
- ANEXO VI – MODELO DE INSTRUMENTAÇÃO DAS VIGAS**

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO								ANEXO I			
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL								FLS:	1/1		
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL								LOCAL:	UERJ		
	RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES								DATA:	24/mai/17		
ENSAIO FÍSICO DE AGRAGADO MIÚDO - AREIA												
1) GRANULOMETRIA DO AGRAGADO MIÚDO (NBR NM 248:2003)												
Abertura da malha das peneiras	a) massa inicial seca (gr) = 1.014,9				(Vr) Massa retida	(Mrm) Massa retida	(Mra) Massa retida	Faixas em relação as % retidas acumuladas				
	b) massa inicial seca (gr) = 1.015,5							Limites Inferiores		Limites Superiores		
	(Mrg) Massa retida (gr)		(Mr%) Massa retida (%)		Variações	média	acumulada	Zona	Zona	Zona	Zona	
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b	+ 4 %	(%)	(%)	Utilizável	Ótima	Utilizável	Ótima	
12,5	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	0	
9,5	0,0	0,0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0	0	0	0	
6,3	2,4	0,8	0,2%	0,1%	0,2%	0,2%	0,2%	0	0	0	7	
4,75	1,6	1,9	0,2%	0,2%	0,0%	0,2%	0,3%	0	0	5	10	
2,36	22,1	23,2	2,2%	2,3%	0,1%	2,2%	2,6%	0	10	20	25	
1,18	123,6	125,9	12,2%	12,4%	0,2%	12,3%	14,9%	5	20	30	50	
0,6	289,5	303,6	28,5%	30,0%	1,4%	29,2%	44,1%	15	35	55	70	
0,3	384,1	396,1	37,9%	39,1%	1,2%	38,5%	82,6%	50	65	85	95	
0,15	154,7	131,0	15,3%	12,9%	2,3%	14,1%	96,7%	85	90	95	100	
Fundo	36,4	31,0	3,6%	3,1%	0,5%	3,3%	100,0%	100	100	100	100	
(Mt) Total Σ	1.014,4	1.013,5	Módulo de Finura = 2,41				Diâmetro máximo = 2,36					
$Mt = (\sum \text{ de } Mrg)$ $Mr\% = (Mrg / Mt) * 100$ $Vr = (Mr\% \text{ ensaio a} - Mr\% \text{ ensaio b})$ $Mrm = (Mr\% \text{ ensaio a} + Mr\% \text{ ensaio b}) / 2$ $Mra = (\sum Mrm \text{ Massa retida})$ Módulo finura = % retidas acumuladas, nas peneiras da serie normal / 100 Ø máximo = abertura da peneira na qual apresenta % retida acumulada												
2) MASSA ESPECÍFICA DO AGRAGADO MIÚDO (NM 52:2009)												
Massa de agregado seco para o ensaio: Ms (g)								498,8				
Volume do frasco: Vf (cm³)								500				
Massa do frasco + agregado: M1 (g)								865,1				
Massa do frasco + agregado + água: M2 (g)								1163,7				
Massa específica da água: Me.a (g/cm³)								1				
Volume de água adicionado ao frasco: Va = M2 - M1 / Me.a (m³)								298,6				
Massa específica do agregado seco: Me.ag.s = Ms / (Vf - Va) (g/cm³)								2,477				
Massa da areia (agregado) na condição saturada superfície seca: Mag.sss (g)								500				
Massa específica da areia (agregado) saturado superfície seca: Me.ag.sss = Mag.sss / (Vf - Va) (g/cm³)								2,48				
Massa específica: Me = ((Ms / ((Vf - Va) - ((Mag.sss - Ms) / Me.a))) (g/cm³)								2,49				
3) UMIDADE (NBR NM 30:2001)												
Massa do agregado úmido: Mh (g)								1150,5				
Massa do agregado seco: Ms (g)								1085,4				
Umidade: U = [(Mh - Ms) / (Ms)]								0,06				
Porcentagem de umidade media (%)								6,00				
4) ABSORÇÃO (NBR NM 30:2001)												
Massa do agregado saturado: Mst (g)								500				
Massa do agregado seco: Ms (g)								498,8				
Umidade: U = [(Mst - Ms) / (Ms)]								0,002				
Porcentagem de umidade media (%)								0,241				

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO								ANEXO II			
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL								FLS:	1/2		
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL								LOCAL:	UERJ		
									DATA:	19/mai/17		
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES												
ENSAIO FÍSICO DE AGRAGADO GRAÚDO - BRITA 0												
1) GRANULOMETRIA DO AGRAGADO GRAÚDO (NBR NM 248:2003)												
Abertura da malha das peneiras (mm)	a) massa inicial seca (gr) = 2.053,3				(Vr)	(Mrm)	(Mra)	Faixas em relação as % retidas acumuladas				
	b) massa inicial seca (gr) = 2.005,8							Massa retida	Massa retida	Massa retida	Limites Inferiores	
	(Mrg) Massa retida (gr)		Mr% Massa retida (%)		Variações ± 4 %	média (%)	acumulada (%)	Zona	Zona	Zona	Zona	
	Ensaio a	Ensaio b	Ensaio a	Ensaio b				Utilizável	Ótima	Utilizável	Ótima	
12,5	24,4	14,6	1,2%	0,7%	0,5%	1,0%	1,0%	0	0	0	0	
9,5	283,9	236,7	13,9%	11,8%	2,0%	12,8%	13,8%	0	0	0	0	
6,3	918,9	927,1	44,9%	46,3%	1,5%	45,6%	59,4%	0	0	0	7	
4,75	433,3	376,3	21,2%	18,8%	2,4%	20,0%	79,4%	0	0	5	10	
2,36	236,0	252,9	11,5%	12,6%	1,1%	12,1%	91,5%	0	10	20	25	
1,18	39,7	53,7	1,9%	2,7%	0,7%	2,3%	93,8%	5	20	30	50	
0,6	24,5	39,2	1,2%	2,0%	0,8%	1,6%	95,4%	15	35	55	70	
0,3	26,4	38,6	1,3%	1,9%	0,6%	1,6%	97,0%	50	65	85	95	
0,15	27,1	29,2	1,3%	1,5%	0,1%	1,4%	98,4%	85	90	95	100	
Fundo	33,4	32,3	1,6%	1,6%	0,0%	1,6%	100,0%	100	100	100	100	
(Mt) Total Σ	2.047,6	2.000,6	Módulo de Finura = 5,69				Diâmetro máximo = 12,5					
Mt = (S de Mrg) Mr% = (Mrg / Mt) * 100 Vr = (Mr% ensaio a - Mr% ensaio b) Mrm = (Mr% ensaio a + Mr% ensaio b)/2 Mra = (Σ Mrm Massa retida) / (Mt) * 100 Módulo finura = Σ % retidas acumuladas, nas peneiras da serie normal / 100 D. máximo = abertura da peneira na qual apresenta % retida acumulada = 100												
2) MASSA ESPECÍFICA DO AGRAGADO GRAÚDO (NBR NM 53:2009)												
Massa da amostra seca: Ms (g)								1757,6				
Massa da amostra em água: Ma (g)								1115				
Massa da amostra em condição saturada superfície seca (SSS): Mss (g)								1787				
Massa específica do agregado seco: Me.s = Ms / (Ms - Ma) (g/cm ³)								2,735				
Massa específica do agregado SSS: Me.sss = Msss / (Msss - Ma) (g/cm ³)								2,659				
Massa específica aparente: Me.ap = Ms / (Msss - Ma) (g/cm ³)								2,615				
3) UMIDADE (NBR NM 30:2001)												
Massa do agregado úmido: Mh (g)								1124,9				
Massa do agregado seco: Ms (g)								1114,3				
Umidade: [(Mh - Ms) / (Ms)]								0,00951				
Porcentagem de umidade media: [(Mh - Ms) / (Ms)] * 100 (%)								0,951				
4) ABSORÇÃO (NBR NM 30:2001)												
Massa do agregado saturado: Mst (g)								1787				
Massa do agregado seco: Ms (g)								1757,6				
Umidade = [(Mst - Ms) / (Ms)]								0,016727355				
Porcentagem de umidade media: [(Mst - Ms) / (Ms)] * 100 (%)								1,672735548				
5) MASSA UNITÁRIA (NBR NM 45:2006)												
Massa do recipiente + agregado: Mar (Kg)								1,1298				
Massa do recipiente vazio: Mr (Kg)								0,2037				
Massa de água necessária para encher o recipiente: Ma (Kg)								0,667				
Massa específica da água à sua temperatura de ensaio (23°C): Me.a (Kg/m ³)								997,54				
Volume do recipiente: V = Ma / Me.a (m ³)								0,001				
Massa unitária do agregado: M.u = Mar - Mr / V (Kg/m ³)								1385,04				

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO	ANEXO II	
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL	FLS:	2/2
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL	LOCAL :	UERJ
		DATA:	19/mai/17
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES			

ENSAIO FÍSICO DE AGRAGADO GRAÚDO - BRITA 0

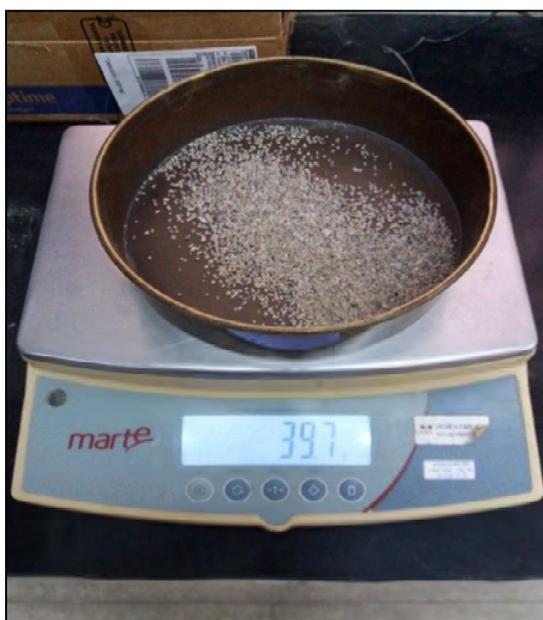
4) RELATÓRIO FOTOGRÁFICO



Peneira de malha 12,5 mm



Peneiramento realizado



Balança utilizada no ensaio

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		ANEXO III																								
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	01/05																							
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL		LOCAL :	UERJ																							
			DATA:	01/mai/17																							
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES																											
DOSAGEM DO CONCRETO																											
1) CONSIDERAÇÕES INICIAIS																											
<p>Características do Projeto</p> <p>1.1) Tipo de construção (influenciará na trabalhabilidade desejada): VIGA</p> <p>1.2) Tipo de exposição da estrutura (ditará o fator a/c adequado para a durabilidade):</p> <p>1.3) Resistência do concreto aos 28 dias: 20MPa</p> <p>Características dos materiais (disponibilizados por meio de ensaios)</p> <p>1.4) Diâmetro máximo do agregado graúdo (ANEXO 1): 12,5 mm</p> <p>1.5) Massa específica do agregado graúdo SSS(ANEXO 1) = 2,659 g/cm³</p> <p>1.6) Massa unitária do agregado graúdo (levando em conta o volume para ensaio de massa unitária do ANEXO 2): 1385,04 Kg/m³</p> <p>1.7) Peso areia seca (levando em conta o volume para ensaio de umidade ANEXO 2): 1085,4g</p> <p>1.8) Peso areia úmida (levando em conta o volume para ensaio de umidade ANEXO 2): 1150,5 g</p> <p>1.9) Módulo de Finura (MF) do agregado miúdo (ANEXO 2): 2,41</p> <p>1.10) Massa específica do agregado miúdo SSS (ANEXO 2) = 2,48 g/cm³</p> <p>1.11) Resistência à compressão, do cimento utilizado, esperada aos 28 dias = CP II E 32 (32Mpa)</p> <p>1.12) Massa específica do cimento (de acordo com fabricante) = 3100 kg/m³</p>																											
2) CALCULAR RESISTENCIA DE DOSAGEM OU MEDIA (fcr')																											
<p>Considerando fck (Mpa) 20</p> <p>Adota-se a Tabela 1:</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Resistência a compressão especificada - Fc' (Mpa)</th> <th>Resistência de dosagem (Fcr')</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>< 20,7</td> <td>fc + 6,9</td> </tr> <tr> <td>20,7 - 34,5</td> <td>fc + 8,3</td> </tr> <tr> <td>>34,5</td> <td>fc + 9,6</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">TABELA 1: Resistência de dosagem - Adaptada ACI</p> <p>Neste caso utiliza-se a fórmula:</p> $f_{cr'} = f_c + 6,9$ $f_{cr'} = 26,9 \quad \text{Mpa}$					Resistência a compressão especificada - Fc' (Mpa)	Resistência de dosagem (Fcr')	< 20,7	fc + 6,9	20,7 - 34,5	fc + 8,3	>34,5	fc + 9,6															
Resistência a compressão especificada - Fc' (Mpa)	Resistência de dosagem (Fcr')																										
< 20,7	fc + 6,9																										
20,7 - 34,5	fc + 8,3																										
>34,5	fc + 9,6																										
3) ESCOLHA DO ABATIMENTO																											
<p>Adota-se a Tabela 2:</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Tipos de Obras</th> <th colspan="2">Abatimentos (mm)</th> </tr> <tr> <th>Máximo</th> <th>Mínimo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Paredes de fundações e sapatas armadas</td> <td>75</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>Sapatas planas, caixões e paredes de infra-estrutura</td> <td>75</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>Vigas e paredes armadas</td> <td>100</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>Pilares de edifícios</td> <td>100</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>Pavimento e lajes</td> <td>75</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>Construções de concreto massa</td> <td>50</td> <td>25</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">TABELA 2: Abatimentos - Adaptada ACI</p> <p>Logo: Abatimento máximo = 100 Abatimento mínimo = 25</p>					Tipos de Obras	Abatimentos (mm)		Máximo	Mínimo	Paredes de fundações e sapatas armadas	75	25	Sapatas planas, caixões e paredes de infra-estrutura	75	25	Vigas e paredes armadas	100	25	Pilares de edifícios	100	25	Pavimento e lajes	75	25	Construções de concreto massa	50	25
Tipos de Obras	Abatimentos (mm)																										
	Máximo	Mínimo																									
Paredes de fundações e sapatas armadas	75	25																									
Sapatas planas, caixões e paredes de infra-estrutura	75	25																									
Vigas e paredes armadas	100	25																									
Pilares de edifícios	100	25																									
Pavimento e lajes	75	25																									
Construções de concreto massa	50	25																									

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		ANEXO III																																																																																										
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	02/05																																																																																									
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL		LOCAL :	UERJ																																																																																									
			DATA:	01/mai/17																																																																																									
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES																																																																																													
DOSAGEM DO CONCRETO																																																																																													
4) DIMENSÕES CARACTERÍSTICAS AGREGADOS																																																																																													
<p>Conforme ensaio físico do agregado graúdo realizado neste estudo, apresentado no ANEXO 1, pode-se determinar o diâmetro máximo do agregado graúdo utilizado (brita0)</p> <p style="text-align: center;">\varnothing máx brita (mm) = 12,5</p>																																																																																													
5) ESTIMATIVA CONSUMO DA AGUA DE AMASSAMENTO (Ca) E TEOR DE AR INCORPORADO																																																																																													
<p>Em função da dimensão máxima das partículas do agregado, do slump e da presença ou não de ar incorporado na mistura, é possível saber o consumo estimado de água de amassamento utilizado</p>																																																																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Slump, mm</th> <th colspan="5">Diâmetro máximo do agregado graúdo</th> </tr> <tr> <th>9,5</th> <th>12,5</th> <th>19</th> <th>25</th> <th>37,5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sem ar incorporado</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>25 até 50</td> <td>207</td> <td>199</td> <td>190</td> <td>179</td> <td>166</td> </tr> <tr> <td>75 até 100</td> <td>228</td> <td>216</td> <td>205</td> <td>193</td> <td>181</td> </tr> <tr> <td>150 até 175</td> <td>243</td> <td>228</td> <td>216</td> <td>202</td> <td>190</td> </tr> <tr> <td>ar não incorporado</td> <td>3%</td> <td>2,5%</td> <td>2%</td> <td>2%</td> <td>1%</td> </tr> <tr> <td>Com ar incorporado</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>25 até 50</td> <td>181</td> <td>175</td> <td>168</td> <td>160</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>75 até 100</td> <td>202</td> <td>193</td> <td>184</td> <td>175</td> <td>165</td> </tr> <tr> <td>150 até 175</td> <td>216</td> <td>205</td> <td>197</td> <td>184</td> <td>174</td> </tr> <tr> <td>ar incorporado</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>baixa exposição</td> <td>4,5%</td> <td>4%</td> <td>3,5%</td> <td>3%</td> <td>2,5%</td> </tr> <tr> <td>média exposição</td> <td>6%</td> <td>5,5%</td> <td>5%</td> <td>4,5%</td> <td>4,5%</td> </tr> <tr> <td>alta exposição</td> <td>7,5%</td> <td>7%</td> <td>6%</td> <td>6%</td> <td>5,5%</td> </tr> </tbody> </table>					Slump, mm	Diâmetro máximo do agregado graúdo					9,5	12,5	19	25	37,5	Sem ar incorporado						25 até 50	207	199	190	179	166	75 até 100	228	216	205	193	181	150 até 175	243	228	216	202	190	ar não incorporado	3%	2,5%	2%	2%	1%	Com ar incorporado						25 até 50	181	175	168	160	150	75 até 100	202	193	184	175	165	150 até 175	216	205	197	184	174	ar incorporado						baixa exposição	4,5%	4%	3,5%	3%	2,5%	média exposição	6%	5,5%	5%	4,5%	4,5%	alta exposição	7,5%	7%	6%	6%	5,5%
Slump, mm	Diâmetro máximo do agregado graúdo																																																																																												
	9,5	12,5	19	25	37,5																																																																																								
Sem ar incorporado																																																																																													
25 até 50	207	199	190	179	166																																																																																								
75 até 100	228	216	205	193	181																																																																																								
150 até 175	243	228	216	202	190																																																																																								
ar não incorporado	3%	2,5%	2%	2%	1%																																																																																								
Com ar incorporado																																																																																													
25 até 50	181	175	168	160	150																																																																																								
75 até 100	202	193	184	175	165																																																																																								
150 até 175	216	205	197	184	174																																																																																								
ar incorporado																																																																																													
baixa exposição	4,5%	4%	3,5%	3%	2,5%																																																																																								
média exposição	6%	5,5%	5%	4,5%	4,5%																																																																																								
alta exposição	7,5%	7%	6%	6%	5,5%																																																																																								
TABELA 3: Consumo de água (kg/m³) - Adaptada ACI																																																																																													
<p>Desta forma assume-se que o consumo de água é : Ca (Kg/m³) 193</p>																																																																																													
6) RELAÇÃO AGUA/CIMENTO																																																																																													
<p>A determinação da a/c é em função da curva de Abrams do cimento, sendo necessário conhecer a resistência do mesmo. Adotando um cimento CP II E, temos uma resistência aos 28 dias de : 32 Mpa</p>																																																																																													
TABELA 4: Relação a/c - Adaptada ACI																																																																																													

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		ANEXO III																																																														
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	03/05																																																													
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL		LOCAL:	UERJ																																																													
			DATA:	01/mai/17																																																													
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES																																																																	
DOSAGEM DO CONCRETO																																																																	
7) OBSERVAR OS LIMITES ESTABELECIDOS DE ACORDO COM A DURABILIDADE																																																																	
<p>Primeiramente classifica-se a agressividade ambiental do local da estrutura de acordo com a NBR 6118:2014, estabelecido na Tabela 5</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Classe de agressividade</th> <th>Agressividade</th> <th>Classificação para tipo de ambiente do</th> <th>Risco de deterioração da</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">I</td> <td rowspan="2">Fraca</td> <td>Rural</td> <td rowspan="2">Insignificante</td> </tr> <tr> <td>Submersa</td> </tr> <tr> <td>II</td> <td>Moderada</td> <td>Urbana^{1 2}</td> <td>Pequena</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">III</td> <td rowspan="2">Forte</td> <td>Marinha</td> <td rowspan="2">Grande</td> </tr> <tr> <td>Industrial</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">IV</td> <td rowspan="2">Muito Forte</td> <td>Industrial</td> <td rowspan="2">Elevado</td> </tr> <tr> <td>Respingos de Maré</td> </tr> </tbody> </table> <p>¹ Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos</p> <p>² Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegida de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente</p> <p style="text-align: center;">TABELA 5: Rgressividade ambiental - Adaptada NBR</p> <p>Considerando a atuação do ensaio em uma área de baixa agressão ambiental, adota-se I</p> <p>A qualidade do concreto deve ser respeitada conforme a Tabela 6 abaixo:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Concreto</th> <th rowspan="2">Tipo</th> <th colspan="4">Classe ambiental</th> </tr> <tr> <th>I</th> <th>II</th> <th>III</th> <th>IV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Relação água/aglomerante em massa</td> <td>CA</td> <td><= 0,65</td> <td><= 0,60</td> <td><= 0,55</td> <td><= 0,45</td> </tr> <tr> <td>CP</td> <td><= 0,60</td> <td><= 0,55</td> <td><= 0,50</td> <td><= 0,45</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Classe de concreto (NBR 8953)</td> <td>CA</td> <td>>= C20</td> <td>>= C25</td> <td>>= C30</td> <td>>= C40</td> </tr> <tr> <td>CP</td> <td>>= C25</td> <td>>= C30</td> <td>>= C35</td> <td>>= C40</td> </tr> <tr> <td>Consumo de cimento por m³ de concreto (Kg/m³)</td> <td></td> <td>>= 260</td> <td>>= 280</td> <td>>= 320</td> <td>>= 360</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">TABELA 6: Qualidade do concreto I - Adaptada NBR</p> <p>Como o ideal é o fator a/c ser <= 0,65 pela Tabela 6, e na Tabela 4 o valor encontrado 0,67 ultrapassa o limite, adota-se 0,65</p>					Classe de agressividade	Agressividade	Classificação para tipo de ambiente do	Risco de deterioração da	I	Fraca	Rural	Insignificante	Submersa	II	Moderada	Urbana ^{1 2}	Pequena	III	Forte	Marinha	Grande	Industrial	IV	Muito Forte	Industrial	Elevado	Respingos de Maré	Concreto	Tipo	Classe ambiental				I	II	III	IV	Relação água/aglomerante em massa	CA	<= 0,65	<= 0,60	<= 0,55	<= 0,45	CP	<= 0,60	<= 0,55	<= 0,50	<= 0,45	Classe de concreto (NBR 8953)	CA	>= C20	>= C25	>= C30	>= C40	CP	>= C25	>= C30	>= C35	>= C40	Consumo de cimento por m ³ de concreto (Kg/m ³)		>= 260	>= 280	>= 320	>= 360
Classe de agressividade	Agressividade	Classificação para tipo de ambiente do	Risco de deterioração da																																																														
I	Fraca	Rural	Insignificante																																																														
		Submersa																																																															
II	Moderada	Urbana ^{1 2}	Pequena																																																														
III	Forte	Marinha	Grande																																																														
		Industrial																																																															
IV	Muito Forte	Industrial	Elevado																																																														
		Respingos de Maré																																																															
Concreto	Tipo	Classe ambiental																																																															
		I	II	III	IV																																																												
Relação água/aglomerante em massa	CA	<= 0,65	<= 0,60	<= 0,55	<= 0,45																																																												
	CP	<= 0,60	<= 0,55	<= 0,50	<= 0,45																																																												
Classe de concreto (NBR 8953)	CA	>= C20	>= C25	>= C30	>= C40																																																												
	CP	>= C25	>= C30	>= C35	>= C40																																																												
Consumo de cimento por m ³ de concreto (Kg/m ³)		>= 260	>= 280	>= 320	>= 360																																																												
8) CONSUMO DE CIMENTO (C _c)																																																																	
<p>De acordo com a equação abaixo, é possível determinar o consumo de cimento do traço:</p> $C_c = C_a / (a/c)$ $C_c \text{ (Kg/m}^3\text{)} = 296,92$																																																																	
9) CONSUMO DE AGREGADO GRUDO (C _{agg})																																																																	
$C_{agg} = V_b \times M_u$ <p>Onde: V_b é o volume de agregado grão seco/m³ do concreto, encontrado na Tabela 7 M_u é a massa unitária compactada do agregado grão, encontrada em ensaio no Anexo 01 desta dissertação.</p>																																																																	

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		ANEXO III																																			
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	04/05																																		
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL		LOCAL :	UERJ																																		
			DATA:	01/mai/17																																		
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES																																						
DOSAGEM DO CONCRETO																																						
9) CONSUMO DE AGREGADO GRÚDO (Cag) _Continuação																																						
Sabendo que o módulo de finura (MF) da areia, encontrado no ensaio do Anexo 02, é igual a: 2,41																																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Diâmetro máximo agregado grúdo</th> <th colspan="4">Módulo de finura da areia</th> </tr> <tr> <th>2,40</th> <th>2,60</th> <th>2,80</th> <th>3,00</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>9,5</td> <td>0,50</td> <td>0,48</td> <td>0,46</td> <td>0,44</td> </tr> <tr> <td>12,5</td> <td>0,59</td> <td>0,57</td> <td>0,55</td> <td>0,53</td> </tr> <tr> <td>19</td> <td>0,66</td> <td>0,64</td> <td>0,62</td> <td>0,60</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>0,71</td> <td>0,69</td> <td>0,67</td> <td>0,65</td> </tr> <tr> <td>37,5</td> <td>0,75</td> <td>0,73</td> <td>0,71</td> <td>0,69</td> </tr> </tbody> </table>					Diâmetro máximo agregado grúdo	Módulo de finura da areia				2,40	2,60	2,80	3,00	9,5	0,50	0,48	0,46	0,44	12,5	0,59	0,57	0,55	0,53	19	0,66	0,64	0,62	0,60	25	0,71	0,69	0,67	0,65	37,5	0,75	0,73	0,71	0,69
Diâmetro máximo agregado grúdo	Módulo de finura da areia																																					
	2,40	2,60	2,80	3,00																																		
9,5	0,50	0,48	0,46	0,44																																		
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53																																		
19	0,66	0,64	0,62	0,60																																		
25	0,71	0,69	0,67	0,65																																		
37,5	0,75	0,73	0,71	0,69																																		
ACI																																						
Adotando: Mu= 1385,04 kg/m ³ Vb= 0,59																																						
$C_{agg} = V_b \times M_u$																																						
Cagg (Kg/m ³)= 817,1736																																						
10) CONSUMO AGREGADO MIUDO (Cagm)																																						
$V_{agm} = 1 - (C_c / \gamma_c + C_{agg} / \gamma_{agg} + C_a / \gamma_a)$																																						
Onde:																																						
Vagm é o volume de areia		γ_c (g/cm ³) = 3,10 =		3100 Kg/m ³																																		
γ é a massa específica de cada material		γ_{agg} (g/cm ³) = 2,659 =		2659 Kg/m ³																																		
C é o consumo de cada material		γ_a (g/cm ³) = 1,00 =		1000 Kg/m ³																																		
Vagm = 0,4039																																						
Como o consumo de areia é dado pela fórmula:																																						
$C_{agm} = V_{agm} \times \gamma_{agm}$																																						
Sabendo que : γ_{agm} (g/cm ³) = 2,480 = 2480 Kg/m ³																																						
Cagm (Kg/m ³)= 1001,6589																																						
11) TRAÇO INICIAL																																						
$C_c / C_c : C_{agm} / C_c : C_{agg} / C_c : C_a / C_c$																																						
1 : 3,37 : 2,75 : 0,65																																						

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		ANEXO III																																						
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	05/05																																					
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL		LOCAL :	UERJ																																					
			DATA:	01/mai/17																																					
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES																																									
DOSAGEM DO CONCRETO																																									
12) CORREÇÃO DO TRAÇO																																									
<p>O traço deve ser corrigido:</p> $U \% = (100 \times (\text{peso úmido} - \text{peso seco})) / \text{peso seco}$ <p style="margin-left: 40px;">Uareia(%) 6,00 Ubrita(%) 0,95</p> <p>Onde:</p> <p style="margin-left: 100px;">U é a porcentagem de umidade</p> <p>Peso úmido areia pelo ensaio do ANEXO 2: 1150,50 Peso úmido brita pelo ensaio do ANEXO 1: 1124,90 Peso seco areia pelo ensaio do ANEXO 2: 1085,40 Peso seco brita pelo ensaio do ANEXO 1: 1114,30</p> <p>Corrigindo o valor de consumo dos materiais, observamos que o peso deles por m³ de concreto é:</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Antes da correção de umidade (Kg)</th> <th>Depois da correção de umidade (Kg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CIMENT</td> <td>296,92</td> <td>296,92</td> </tr> <tr> <td>AREIA</td> <td>1001,66</td> <td>1061,74</td> </tr> <tr> <td>BRITA</td> <td>817,1736</td> <td>824,95</td> </tr> <tr> <td>ÁGUA</td> <td>193</td> <td>125,15</td> </tr> </tbody> </table> <p>Traço corrigido:</p> $Cc/Cc : Cagm/Cc : Cagg/Cc : Ca/Cc$ <p style="text-align: center;">▼</p> $1 : 3,57 : 2,77 : 0,42$						Antes da correção de umidade (Kg)	Depois da correção de umidade (Kg)	CIMENT	296,92	296,92	AREIA	1001,66	1061,74	BRITA	817,1736	824,95	ÁGUA	193	125,15																						
	Antes da correção de umidade (Kg)	Depois da correção de umidade (Kg)																																							
CIMENT	296,92	296,92																																							
AREIA	1001,66	1061,74																																							
BRITA	817,1736	824,95																																							
ÁGUA	193	125,15																																							
12) CORREÇÃO DO QUANTITATIVO FINAL																																									
Quantitativo de concreto:																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>MODELO</th> <th>QUANT.</th> <th>VOL. UNIT. (cm³)</th> <th>VOL. TOTAL. (cm³)</th> <th>VOL. UNIT. (L)</th> <th>VOL. TOTAL. (L)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Corpos de prova 10x20cm</td> <td>18</td> <td>1.570,00</td> <td>28.260,00</td> <td>1,57</td> <td>28,26</td> </tr> <tr> <td>Blocos para ensaio aderência</td> <td>8</td> <td>8.000,00</td> <td>64.000,00</td> <td>8,00</td> <td>64,00</td> </tr> <tr> <td>Vigas AÇO 220x30x15 cm</td> <td>3</td> <td>99.000,00</td> <td>297.000,00</td> <td>99,00</td> <td>297,00</td> </tr> <tr> <td>Vigas GFRP 220x30x15 cm</td> <td>3</td> <td>99.000,00</td> <td>297.000,00</td> <td>99,00</td> <td>297,00</td> </tr> <tr> <td colspan="4" style="text-align: center;">TOTAL</td> <td>207,57</td> <td>686,26</td> </tr> </tbody> </table>						MODELO	QUANT.	VOL. UNIT. (cm ³)	VOL. TOTAL. (cm ³)	VOL. UNIT. (L)	VOL. TOTAL. (L)	Corpos de prova 10x20cm	18	1.570,00	28.260,00	1,57	28,26	Blocos para ensaio aderência	8	8.000,00	64.000,00	8,00	64,00	Vigas AÇO 220x30x15 cm	3	99.000,00	297.000,00	99,00	297,00	Vigas GFRP 220x30x15 cm	3	99.000,00	297.000,00	99,00	297,00	TOTAL				207,57	686,26
MODELO	QUANT.	VOL. UNIT. (cm ³)	VOL. TOTAL. (cm ³)	VOL. UNIT. (L)	VOL. TOTAL. (L)																																				
Corpos de prova 10x20cm	18	1.570,00	28.260,00	1,57	28,26																																				
Blocos para ensaio aderência	8	8.000,00	64.000,00	8,00	64,00																																				
Vigas AÇO 220x30x15 cm	3	99.000,00	297.000,00	99,00	297,00																																				
Vigas GFRP 220x30x15 cm	3	99.000,00	297.000,00	99,00	297,00																																				
TOTAL				207,57	686,26																																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>MATERIA L</th> <th>QTD. P/ 1M³ CONCRETO (KG)</th> <th>QTD. P/ 1L CONCRETO (KG)</th> <th>QTD. P/ TOTAL LITROS CONCRETO</th> <th>QTD. P/ TOTAL LITROS CONCRETO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cimento</td> <td>296,92</td> <td>0,297</td> <td>203,77</td> <td>631,68</td> </tr> <tr> <td>Areia</td> <td>1061,74</td> <td>1,062</td> <td>728,63</td> <td>1807,00</td> </tr> <tr> <td>Brita</td> <td>824,95</td> <td>0,825</td> <td>566,13</td> <td>1505,33</td> </tr> <tr> <td>Água</td> <td>125,15</td> <td>0,125</td> <td>85,88</td> <td>85,88</td> </tr> <tr> <td>Aditivo</td> <td>0,5% do cimento</td> <td>0,5% do cimento</td> <td>0,5% do cimento</td> <td>3,16</td> </tr> </tbody> </table>						MATERIA L	QTD. P/ 1M ³ CONCRETO (KG)	QTD. P/ 1L CONCRETO (KG)	QTD. P/ TOTAL LITROS CONCRETO	QTD. P/ TOTAL LITROS CONCRETO	Cimento	296,92	0,297	203,77	631,68	Areia	1061,74	1,062	728,63	1807,00	Brita	824,95	0,825	566,13	1505,33	Água	125,15	0,125	85,88	85,88	Aditivo	0,5% do cimento	0,5% do cimento	0,5% do cimento	3,16						
MATERIA L	QTD. P/ 1M ³ CONCRETO (KG)	QTD. P/ 1L CONCRETO (KG)	QTD. P/ TOTAL LITROS CONCRETO	QTD. P/ TOTAL LITROS CONCRETO																																					
Cimento	296,92	0,297	203,77	631,68																																					
Areia	1061,74	1,062	728,63	1807,00																																					
Brita	824,95	0,825	566,13	1505,33																																					
Água	125,15	0,125	85,88	85,88																																					
Aditivo	0,5% do cimento	0,5% do cimento	0,5% do cimento	3,16																																					
ADITIVOS: Os aditivos plastificantes são recomendados entre 0,2 à 0,5 % do consumo de cimento.																																									

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO					ANEXO IV	
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL					FLS:	1/10
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL					LOCAL :	IME
						DATA:	05/set/17
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES							
CARACTERIZAÇÃO CONCRETO							
INFORMAÇÕES DOS CP's (ensaio aos 28 dias)							
N° CP	BETONAGEM	DATA BETONAGEM	DATA RETIRADA CÂMERA ÚMIDA	DIÂMETRO (d) (em cm)	ALTURA (h) (em cm)	PESO (em g)	TIPO ENSAIO
1	Primeira	07 de agosto de 2017	31 de agosto de 2017	9,92	19,56	3.460,85	Compressão Axial (fc)
2				9,86	19,24	3.426,66	Compressão Axial (fc)
3				9,96	19,65	3.319,48	Compressão Axial (fc)
4				9,925	19,955	3.406,12	Módulo de Elasticidade (Ec)
5				9,98	19,93	3.515,23	Compressão Diametral (fct)
6	Segunda			10,12	19,57	3.540,12	Compressão Axial (fc)
7				9,9	19,62	3.559,16	Compressão Axial (fc)
8				10	19,86	3.480,87	Compressão Axial (fc)
9				9,93	18,86	3.578,07	Módulo de Elasticidade (Ec)
10	9,91			19,93	3.553,73	Compressão Diametral (fct)	
11	Terceira			9,95	19,625	3.514,71	Compressão Axial (fc)
12				10,025	20	3.559,16	Compressão Axial (fc)
13				9,955	19,63	3.534,52	Compressão Axial (fc)
14				10,02	19,54	3.542,81	Módulo de Elasticidade (Ec)
15				9,92	19,67	3.554,36	Compressão Diametral (fct)
16	Quarta			10	19,56	3.508,53	Compressão Axial (fc)
17				10,02	19,57	3.515,74	Compressão Axial (fc)
18				9,86	19,83	3.534,10	Compressão Diametral (fct)
19	Quinta			10,09	20	3.587,34	Compressão Axial (fc)
20				9,94	19,05	3.504,86	Compressão Axial (fc)
21				9,71	19,005	3.488,16	Módulo de Elasticidade (Ec)
22				9,98	19,59	3.484,13	Compressão Diametral (fct)
23	Sexta			10	19,73	3.550,80	Compressão Axial (fc)
24				10,06	19,715	3.513,32	Compressão Axial (fc)
25				10	20	3.549,22	Compressão Diametral (fct)
26	Sétima			10	19,74	3.503,65	Compressão Axial (fc)
27				10,06	19,885	3.586,48	Compressão Axial (fc)
28				10,05	19,76	3.501,89	Módulo de Elasticidade (Ec)
29				9,9	19,69	3.475,15	Compressão Axial (fc)
30	Oitava			10,06	19,86	3.464,88	Compressão Axial (fc)
31				10,06	19,88	3.553,15	Compressão Diametral (fct)
INFORMAÇÕES DOS ENSAIOS							
Os ensaios foram realizados na prensa universal servo-hidráulica da marca CONTENCO - Classe II, no Instituto Militar de Engenharia (IME).							
Cada ensaio foi programado automaticamente pela máquina anteriormente mencionada, adequadamente calibrada e respeitando as exigências normativas.							
Todos os corpos de prova (CP) ensaiados tem geometria cilíndrica, com dimensões nominais de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura.							
Os resultados dos ensaios saem em Kilograma-força (kgf), quando referente às cargas, e em megapascal(Mpa), quando referente à tensão.							

		UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO			ANEXO IV						
		PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL			FLS:	2/10					
		AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL			LOCAL :	IME					
					DATA:	05/sep/17					
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES											
CARACTERIZAÇÃO CONCRETO											
1) ENSAIO COMPRESSÃO AXIAL (ABNT NBR 5739:2007)											
N° CP	BETONAGEM	F (kgf)	fc (Mpa)	fcm ¹ (Mpa)	1.1) Avaliação estatística de desempenho do ensaio (Anexo B - NBR 5739:2007)						
					Ai (Mpa)	1.1.1) Desvio padrão (Se)					
1	Primeira	23.220,00	28,9929	29,2614	10,4759	Se= 4,420193211 (1ª, 2ª e 3ª betonada) Se= 1,775517851 (4ª, 5ª, 6ª, 7ª e 8ª betonada) Se total= 6,195711062 Nota: Os desvios padrões foram separados em Se1 e Se2, pois os coeficientes de cálculo variam de acordo com a quantidade de CP disponível.					
2		23.650,00	29,5298								
3		15.260,00	19,0539								
6	Segunda	25.720,00	32,1145	32,9011	1,3860						
7		26.830,00	33,5004								
8		26.500,00	33,0884								
11	Terceira	27.980,00	34,9363	34,9114	10,5883						
12		19.500,00	24,3481								
13		27.940,00	34,8864								
16	Quarta	26.430,00	33,0010	32,9386	0,1249		fcm= 31,50987457 Cve= Se/fcm Cve= 0,196627602 Como o valor de Cve encontrado é menor ou igual à 3, o ensaio realizado foi considerado EXCELENTE (Nível 1), conforme categorização da Tabela B.2 da NBR 5739:2007 apresentada abaixo:				
17		26.330,00	32,8761								
19	Quinta	21.540,00	26,8952	30,7972	7,8039						
20		27.790,00	34,6991								
23	Sexta	26.570,00	33,1758	32,8012	0,7492						
24		25.970,00	32,4266								
26	Sétima	27.520,00	34,3620	33,7939	1,1362						
27		26.610,00	33,2257								
29	Oitava	26.980,00	33,6877	33,7876	0,1998	NIVEL 1		NIVEL 2	NIVEL 3	NIVEL 4	NIVEL 5
30		27.140,00	33,8875			Cve ≤ 3		3 ≤ Cve ≤ 4	5 ≤ Cve ≤ 5	5 ≤ Cve ≤ 6	6 ≤ Cve ≤ 7
Legenda: F: força máxima alcançada fcm ¹ : resistência a compressão média por betonada fc: resistência à compressão, calculada pela fórmula: $fc = (4F) / \pi \times d^2$ fcm: resistência média à compressão (em Mpa)											
1.1.3) FOTOS ENSAIO COMPRESSÃO AXIAL											
CP1											
vigentes.											

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		ANEXO IV	
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	3/10
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL		LOCAL :	IME
			DATA:	05/set/17
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES				
CARACTERIZAÇÃO CONCRETO				
CP 2				
<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>				
CP 3				
<div style="display: flex; justify-content: space-around;">    </div>				
<p>OBS: O CP 3 apresensou falha na concretagem, sendo observado brocas em toda sua extensão</p>				

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		ANEXO IV	
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	4/10
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL		LOCAL :	IME
			DATA:	05/sep/17
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES				
CARACTERIZAÇÃO CONCRETO				
CP 6		CP 7		
				
CP 8		CP 11		
				

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		ANEXO IV	
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	5/10
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL		LOCAL :	IME
			DATA:	05/sep/17
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES				
CARACTERIZAÇÃO CONCRETO				
CP 12			CP 13	
CP 16			CP 17	

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		ANEXO IV	
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	6/10
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL		LOCAL :	IME
			DATA:	05/sep/17
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES				
CARACTERIZAÇÃO CONCRETO				
CP 19			CP 20	
CP 23			CP 24	

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		ANEXO IV	
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	7/10
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL		LOCAL :	IME
			DATA:	05/set/17
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES				
CARACTERIZAÇÃO CONCRETO				
CP 26			CP 27	
CP 29			CP 30	

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		ANEXO IV		
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	8/10	
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL		LOCAL :	IME	
			DATA:	VARIADAS	
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES					
CARACTERIZAÇÃO CONCRETO					
2) ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE (ABNT NBR 8522:2017)					
<p>> Para este ensaio foi utilizado o módulo de deformação tangente inicial, empregado geralmente quando se requer caracterizar deformações de concreto submetido a tensões baixas.</p> <p>> Aplicou-se a metodologia A, especificada na NBR 8522:2017, mantendo a tensão do limite superior (σ_b) fixa.</p> <p style="text-align: center;">2.1) MÉTODO DE CÁLCULO</p> $E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} 10^{-3}$ <p>Onde:</p> <p>E_{ci} = módulo de elasticidade de cada corpo de prova, em gigapascal (Gpa)</p> <p>σ_b = é a tensão maior, considerada com 30% da resistência à compressão, expressa em megapascals (Mpa)</p> <p>0,5 = é o valor da tensão básica, expresso em megapascals (Mpa)</p> <p>ε_b = é a deformação específica do concreto, conforme gráfico abaixo, sob a tensão maior</p> <p>ε_a = é a deformação específica do concreto sob a tensão básica.</p>					
2.2) CORPOS DE PROVA ENSAIADOS					
N CP	BETONADA	DATA ENSAIO	Fc (Mpa)	30% Fc	NOTA
4	PRIMEIRA	06/09/2017	29,26	8,78	Falha na máquina - Sem compilação resultados
9	SEGUNDA	04/12/2017	32,90	9,87	
14	TERCEIRA	04/12/2017	34,91	10,47	
21	QUINTA	04/12/2017	30,80	9,24	Falha na máquina - Sem compilação resultados
28	SÉTIMA	04/12/2017	33,79	10,14	Falha na máquina - Resultado adquirido por fotos durante ensaio
32	PRIMEIRA	25/01/2018	42,32	12,70	
34	SEGUNDA	25/01/2018	47,16	14,15	

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO					ANEXO IV																									
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL					FLS:	9/10																								
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL					LOCAL :	IME																								
						DATA:	VARIADAS																								
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES																															
CARACTERIZAÇÃO CONCRETO																															
3) ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE (ABNT NBR 8522:2017)																															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">CP 9</th> <th style="text-align: center;">MÁX1</th> <th style="text-align: center;">MIN1</th> <th style="text-align: center;">MÁX2</th> <th style="text-align: center;">MÍN2</th> <th style="text-align: center;">MÁX3</th> <th style="text-align: center;">MÍN3 (A)</th> <th style="text-align: center;">MÁX4 (B)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">TENSÃO</td> <td style="text-align: center;">12,149</td> <td style="text-align: center;">0,499</td> <td style="text-align: center;">12,611</td> <td style="text-align: center;">0,499</td> <td style="text-align: center;">15,470</td> <td style="text-align: center;">0,387</td> <td style="text-align: center;">12,511</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">DEFORMAÇÃO</td> <td style="text-align: center;">292</td> <td style="text-align: center;">7</td> <td style="text-align: center;">314,5</td> <td style="text-align: center;">11,5</td> <td style="text-align: center;">412,5</td> <td style="text-align: center;">23</td> <td style="text-align: center;">329,5</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Eci,cp9 = 39.556,56 Mpa</p> <p style="text-align: center;">O rompimento deste CP ocorreu com fc de 44,57 Mpa</p>								CP 9	MÁX1	MIN1	MÁX2	MÍN2	MÁX3	MÍN3 (A)	MÁX4 (B)	TENSÃO	12,149	0,499	12,611	0,499	15,470	0,387	12,511	DEFORMAÇÃO	292	7	314,5	11,5	412,5	23	329,5
CP 9	MÁX1	MIN1	MÁX2	MÍN2	MÁX3	MÍN3 (A)	MÁX4 (B)																								
TENSÃO	12,149	0,499	12,611	0,499	15,470	0,387	12,511																								
DEFORMAÇÃO	292	7	314,5	11,5	412,5	23	329,5																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">CP 14</th> <th style="text-align: center;">MÁX1</th> <th style="text-align: center;">MIN1</th> <th style="text-align: center;">MÁX2</th> <th style="text-align: center;">MÍN2</th> <th style="text-align: center;">MÁX3</th> <th style="text-align: center;">MÍN3 (A)</th> <th style="text-align: center;">MÁX4 (B)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">TENSÃO</td> <td style="text-align: center;">14,234</td> <td style="text-align: center;">0,537</td> <td style="text-align: center;">15,333</td> <td style="text-align: center;">0,562</td> <td style="text-align: center;">14,384</td> <td style="text-align: center;">0,524</td> <td style="text-align: center;">14,384</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">DEFORMAÇÃO</td> <td style="text-align: center;">434</td> <td style="text-align: center;">9,5</td> <td style="text-align: center;">477,5</td> <td style="text-align: center;">15,5</td> <td style="text-align: center;">449,5</td> <td style="text-align: center;">17,5</td> <td style="text-align: center;">449,5</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Eci,cp14 = 32.082,56 Mpa</p> <p style="text-align: center;">O rompimento deste CP ocorreu com fc de 42,90 Mpa</p>								CP 14	MÁX1	MIN1	MÁX2	MÍN2	MÁX3	MÍN3 (A)	MÁX4 (B)	TENSÃO	14,234	0,537	15,333	0,562	14,384	0,524	14,384	DEFORMAÇÃO	434	9,5	477,5	15,5	449,5	17,5	449,5
CP 14	MÁX1	MIN1	MÁX2	MÍN2	MÁX3	MÍN3 (A)	MÁX4 (B)																								
TENSÃO	14,234	0,537	15,333	0,562	14,384	0,524	14,384																								
DEFORMAÇÃO	434	9,5	477,5	15,5	449,5	17,5	449,5																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">CP 32</th> <th style="text-align: center;">MÁX1</th> <th style="text-align: center;">MIN1</th> <th style="text-align: center;">MÁX2</th> <th style="text-align: center;">MÍN2</th> <th style="text-align: center;">MÁX3</th> <th style="text-align: center;">MÍN3 (A)</th> <th style="text-align: center;">MÁX4 (B)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">TENSÃO</td> <td style="text-align: center;">15,333</td> <td style="text-align: center;">0,499</td> <td style="text-align: center;">15,945</td> <td style="text-align: center;">0,487</td> <td style="text-align: center;">15,533</td> <td style="text-align: center;">0,512</td> <td style="text-align: center;">15,108</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">DEFORMAÇÃO</td> <td style="text-align: center;">359</td> <td style="text-align: center;">34</td> <td style="text-align: center;">377,5</td> <td style="text-align: center;">46</td> <td style="text-align: center;">388</td> <td style="text-align: center;">57</td> <td style="text-align: center;">518</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Eci,cp32 = 31.662,37 Mpa</p> <p style="text-align: center;">O rompimento deste CP ocorreu com fc de 41,70 Mpa</p>								CP 32	MÁX1	MIN1	MÁX2	MÍN2	MÁX3	MÍN3 (A)	MÁX4 (B)	TENSÃO	15,333	0,499	15,945	0,487	15,533	0,512	15,108	DEFORMAÇÃO	359	34	377,5	46	388	57	518
CP 32	MÁX1	MIN1	MÁX2	MÍN2	MÁX3	MÍN3 (A)	MÁX4 (B)																								
TENSÃO	15,333	0,499	15,945	0,487	15,533	0,512	15,108																								
DEFORMAÇÃO	359	34	377,5	46	388	57	518																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">CP 34</th> <th style="text-align: center;">MÁX1</th> <th style="text-align: center;">MIN1</th> <th style="text-align: center;">MÁX2</th> <th style="text-align: center;">MÍN2</th> <th style="text-align: center;">MÁX3</th> <th style="text-align: center;">MÍN3 (A)</th> <th style="text-align: center;">MÁX4 (B)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">TENSÃO</td> <td style="text-align: center;">18,230</td> <td style="text-align: center;">0,537</td> <td style="text-align: center;">22,188</td> <td style="text-align: center;">0,437</td> <td style="text-align: center;">16,919</td> <td style="text-align: center;">0,437</td> <td style="text-align: center;">19,254</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">DEFORMAÇÃO</td> <td style="text-align: center;">437,5</td> <td style="text-align: center;">38</td> <td style="text-align: center;">591</td> <td style="text-align: center;">64</td> <td style="text-align: center;">441</td> <td style="text-align: center;">62</td> <td style="text-align: center;">514</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Eci,cp34 = 41.629,83 Mpa</p> <p style="text-align: center;">O rompimento deste CP ocorreu com fc de 48,52 Mpa</p>								CP 34	MÁX1	MIN1	MÁX2	MÍN2	MÁX3	MÍN3 (A)	MÁX4 (B)	TENSÃO	18,230	0,537	22,188	0,437	16,919	0,437	19,254	DEFORMAÇÃO	437,5	38	591	64	441	62	514
CP 34	MÁX1	MIN1	MÁX2	MÍN2	MÁX3	MÍN3 (A)	MÁX4 (B)																								
TENSÃO	18,230	0,537	22,188	0,437	16,919	0,437	19,254																								
DEFORMAÇÃO	437,5	38	591	64	441	62	514																								

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		ANEXO IV																																																							
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	10/10																																																						
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL		LOCAL :	IME																																																						
			DATA:	VARIADAS																																																						
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES																																																										
CARACTERIZAÇÃO CONCRETO																																																										
3) ENSAIO TRAÇÃO DIÂMETRAL(ABNT NBR 7222:2011)																																																										
$f_{ct} = \frac{2P}{\pi D L}$																																																										
<p>Onde:</p> <p>P= carga máxima, N</p> <p>D = diâmetro do corpo de prova, mm</p> <p>L= comprimento do corpo de prova, mm</p>																																																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>CP</th> <th>BETONADA</th> <th>Pu</th> <th>d</th> <th>L</th> <th>fct (MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5</td> <td>1</td> <td>110800,00</td> <td>100</td> <td>200</td> <td>3,52687</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>2</td> <td>113900,00</td> <td>100</td> <td>200</td> <td>3,62555</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>3</td> <td>125800,00</td> <td>100</td> <td>200</td> <td>4,00434</td> </tr> <tr> <td>18</td> <td>4</td> <td>110900,00</td> <td>100</td> <td>200</td> <td>3,53006</td> </tr> <tr> <td>22</td> <td>5</td> <td>113000,00</td> <td>100</td> <td>200</td> <td>3,59690</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>6</td> <td>107500,00</td> <td>100</td> <td>200</td> <td>3,42183</td> </tr> <tr> <td>31</td> <td>8</td> <td>114700,00</td> <td>100</td> <td>200</td> <td>3,65101</td> </tr> <tr> <td colspan="5" style="text-align: center;">Tensão média (MPa)</td> <td>3,62237</td> </tr> </tbody> </table>					CP	BETONADA	Pu	d	L	fct (MPa)	5	1	110800,00	100	200	3,52687	10	2	113900,00	100	200	3,62555	15	3	125800,00	100	200	4,00434	18	4	110900,00	100	200	3,53006	22	5	113000,00	100	200	3,59690	25	6	107500,00	100	200	3,42183	31	8	114700,00	100	200	3,65101	Tensão média (MPa)					3,62237
CP	BETONADA	Pu	d	L	fct (MPa)																																																					
5	1	110800,00	100	200	3,52687																																																					
10	2	113900,00	100	200	3,62555																																																					
15	3	125800,00	100	200	4,00434																																																					
18	4	110900,00	100	200	3,53006																																																					
22	5	113000,00	100	200	3,59690																																																					
25	6	107500,00	100	200	3,42183																																																					
31	8	114700,00	100	200	3,65101																																																					
Tensão média (MPa)					3,62237																																																					

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO						ANEXO V			
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL						FLS:	1/2		
	ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL						LOCAL :	IME		
							DATA:	27/jul/17		
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES										
ENSAIO DE QUEIMA DAS AMOSTRAS GFRP (ASTM D297 - 13)										
1) PORCENTAGEM DE MATERIAL NAS AMOSTRAS (ANTES DA QUEIMA)										
Número Amostra	Nome Amostra	Ø comercial (mm)	Ø verificado (cm)	Comp. (cm)	Volume (cm³)	Peso cadinho (g)	Amostra + Cadinho (g)	Massa da Amostra (g)	Massa Específica (g/cm³)	Peso Específico (g/cm³)
1	B1_Am 1	6,3	0,646	0,939	0,30761	22,5757	23,162	0,5863	1,9060	19,0599
2	B1_Am 2		0,662	0,975	0,33542	22,5185	23,1067	0,5882	1,7536	17,5362
3	B2_Am 1		0,648	1,018	0,33556	22,475	23,1223	0,6473	1,9290	19,2903
4	B2_Am 2		0,626	1,095	0,33685	22,5641	23,2748	0,7107	2,1099	21,0986
5	B3_Am 1	12,5	1,283	1,046	1,35162	22,2327	24,8205	2,5878	1,9146	19,1459
6	B3_Am 2		1,225	0,996	1,17328	22,5328	24,9423	2,4095	2,0536	20,5365
7	B4_Am 1		1,305	1,058	1,41441	22,3031	24,9156	2,6125	1,8471	18,4706
8	B4_Am 4		1,257	1,072	1,32964	22,3488	24,9935	2,6447	1,9890	19,8903
2) PORCENTAGEM DE MATERIAL NAS AMOSTRAS (DEPOIS DA QUEIMA)										
As amostras foram inseridas em forno específico até atingir 600 °C. Após chegar a esta temperatura foi deixado em processo de queima, por 3 horas, em temperatura constante.										
Número Amostra	Nome Amostra	Cadinho + Amostra [sem resina]	Massa de Resina (g)	% de Resina	Cadinho+Amostra [sem fibra longa] (g)	Massa de Fibra Longa (g)	% de Fibra Longa			
1	B1_Am 1	23,03	0,132	23%	22,5757	0,4543	77%			
2	B1_Am 2	22,97	0,1367	23%	22,5185	0,4515	77%			
3	B2_Am 1	22,97	0,1523	24%	22,475	0,495	76%			
4	B2_Am 2	23,11	0,1648	23%	22,5641	0,5459	77%			
5	B3_Am 1	24,16	0,6605	26%	22,2327	1,9273	74%			
6	B3_Am 2	24,35	0,5923	25%	22,5328	1,8172	75%			
7	B4_Am 1	24,25	0,6656	25%	22,3031	1,9469	75%			
8	B4_Am 4	24,33	0,6635	25%	22,3488	1,9812	75%			
3) INFORMAÇÕES ADICIONAIS										
<p>1) Tipo do forno utilizado: Forno Mufla MA 305</p> <p>2) O forno estava com o "timer" apresentando temperatura diferente da que de fato se encontrava. Para solucionar tal divergência, foi inserido ao forno um termopar, conectado a um multímetro, para fazer a conferência de temperatura interna. Chegou-se a conclusão de que quando o forno apresentava temperaturas próximas à 540°C seria a temperatura equivalente aos 600°C desejados para realização do ensaio.</p>										

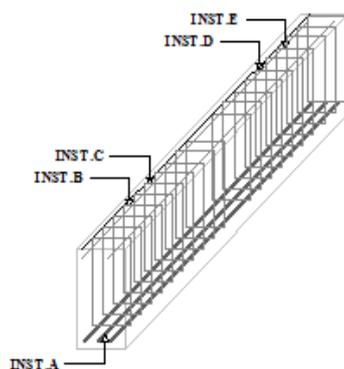
	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		ANEXO V	
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	2/2
	ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL		LOCAL :	IME
			DATA:	27/jul/17
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES				
ENSAIO DE QUEIMA DAS AMOSTRAS GFRP (ASTM D297 - 13)				
4) RELATÓRIO FOTOGRÁFICO				
   				

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		ANEXO VI																																																	
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	1/5																																																
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL		LOCAL:	UERJ																																																
			DATA:	19/out/17																																																
RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES																																																				
INSTRUMENTAÇÃO																																																				
1) Instrumentação da V1A																																																				
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">OBSERVAÇÕES</th> </tr> <tr> <th>Strain</th> <th>Canal</th> <th>Strain</th> <th>Canal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>S1</td> <td>11*</td> <td>S11</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>S2</td> <td>12</td> <td>S12</td> </tr> <tr> <td>3*</td> <td>S3</td> <td>13</td> <td>S13</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>S4</td> <td>14*</td> <td>S14</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>S5</td> <td>Deflectôm.</td> <td>Canal</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>S6</td> <td>D1</td> <td>V1</td> </tr> <tr> <td>7*</td> <td>S7</td> <td>D2</td> <td>V2</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>S8</td> <td>D3</td> <td>V3</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>S9</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>10*</td> <td>S10</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table> <p>(*) - Não funcionou / Erro de leitura</p>			OBSERVAÇÕES				Strain	Canal	Strain	Canal	1	S1	11*	S11	2	S2	12	S12	3*	S3	13	S13	4	S4	14*	S14	5	S5	Deflectôm.	Canal	6	S6	D1	V1	7*	S7	D2	V2	8	S8	D3	V3	9	S9	-	-	10*	S10	-	-
OBSERVAÇÕES																																																				
Strain	Canal	Strain	Canal																																																	
1	S1	11*	S11																																																	
2	S2	12	S12																																																	
3*	S3	13	S13																																																	
4	S4	14*	S14																																																	
5	S5	Deflectôm.	Canal																																																	
6	S6	D1	V1																																																	
7*	S7	D2	V2																																																	
8	S8	D3	V3																																																	
9	S9	-	-																																																	
10*	S10	-	-																																																	
INSTRUMENTAÇÃO BARRA GFRP																																																				
LOCALIZAÇÃO DA PRENSA																																																				
LOCALIZAÇÃO DA PRENSA	INSTRUMENTAÇÃO CONCRETO																																																			

	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO	ANEXO VI	
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL	FLS:	2/5
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL	LOCAL :	UERJ
	RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES	DATA:	26/out/17

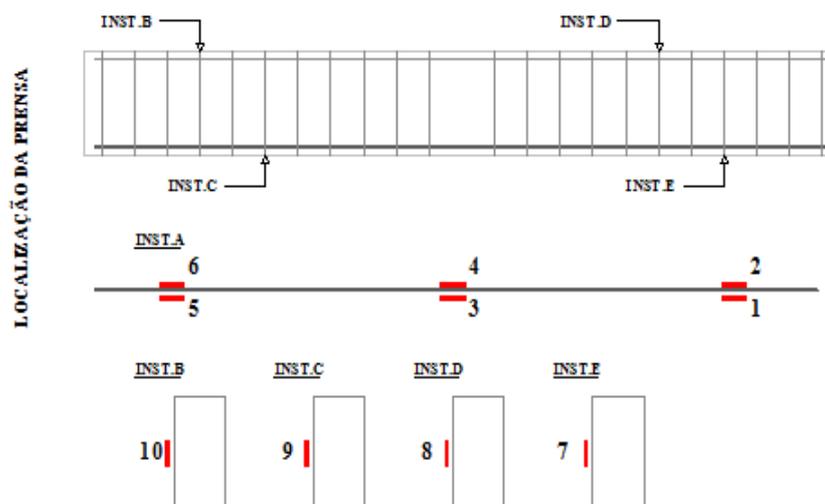
INSTRUMENTAÇÃO

2) Instrumentação da V1B

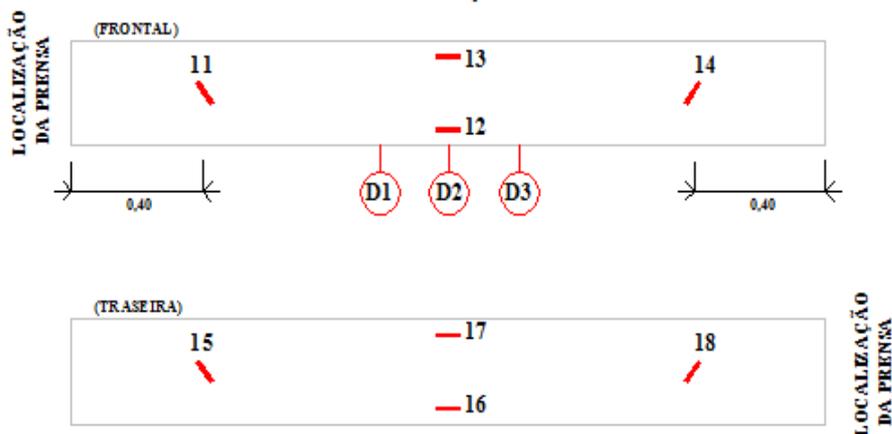


OBSERVAÇÕES					
Strain	Canal	Strain	Canal	Strain	Canal
1	S0	8	S7	15*	S14
2*	S1	9	S8	16	S15
3*	S2	10*	S9	17	S16
4	S3	11*	S10	18	S17
5	S4	12	S11	Deflectôm.	Canal
6	S5	13	S12	D1	V1
7*	S6	14*	S13	D2	V2
(*) - Não funcionou / Erro de leitura				D3	V3

INSTRUMENTAÇÃO BARRA GFRP



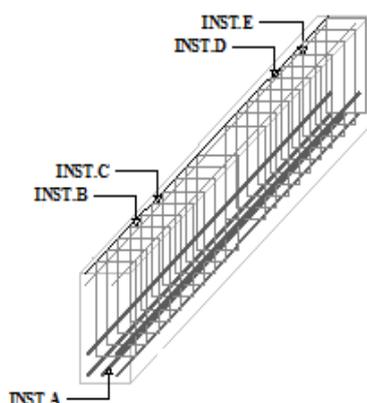
INSTRUMENTAÇÃO CONCRETO



	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO		ANEXO VI	
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL		FLS:	3/5
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL		LOCAL :	UERJ
	RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES		DATA:	08/dez/17

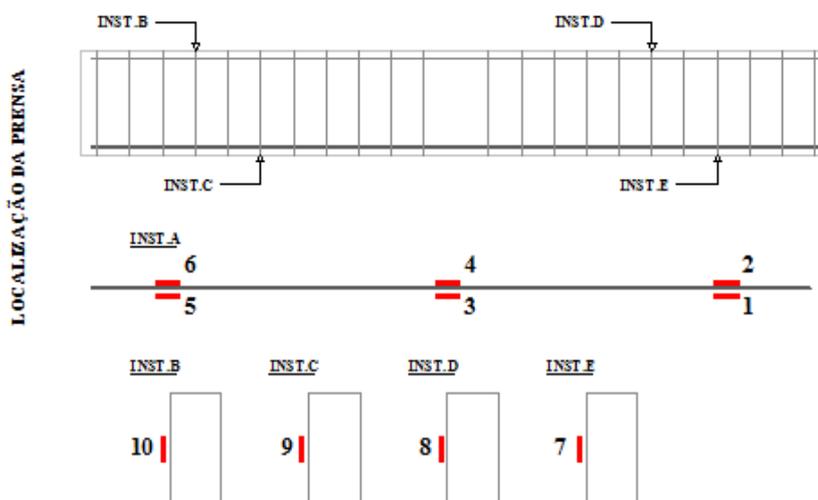
INSTRUMENTAÇÃO

3) Instrumentação da V2A

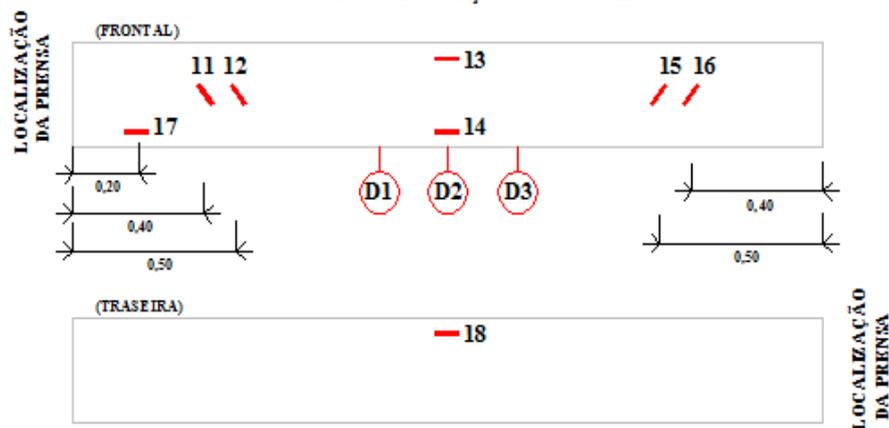


OBSERVAÇÕES					
Strain	Canal	Strain	Canal	Strain	Canal
1	S1	8	S8	15	S15
2	S2	9	S9	16	S16
3	S3	10	S10	17	S17
4	S4	11	S11	18	S18
5	S5	12	S12	Deflectôm.	Canal
6*	S6	13	S13	D1	V1
7	S7	14	S14	D2	V2
(*) - Não funcionou / Erro de leitura				D3	V3

INSTRUMENTAÇÃO BARRA GFRP



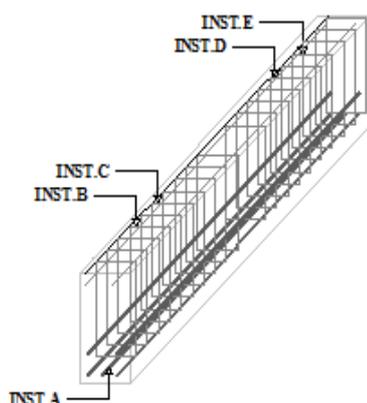
INSTRUMENTAÇÃO CONCRETO



	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO	ANEXO VI	
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL	FLS:	4/5
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL	LOCAL :	UERJ
	RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES	DATA:	12/dez/17

INSTRUMENTAÇÃO

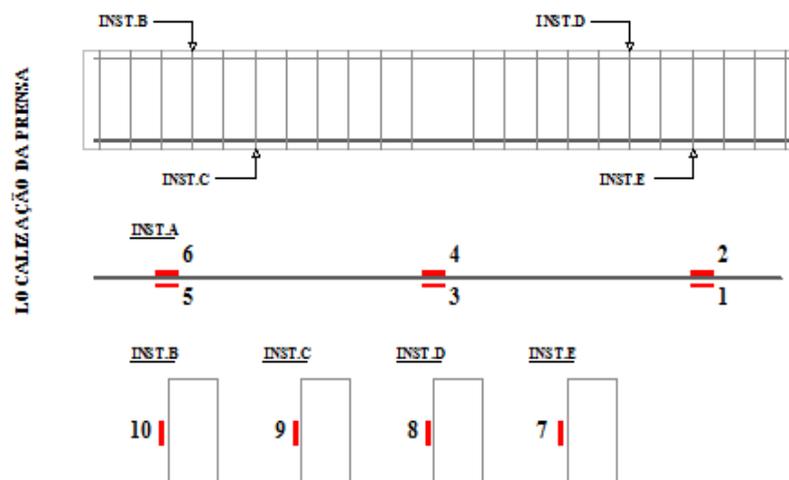
4) Instrumentação da V2B



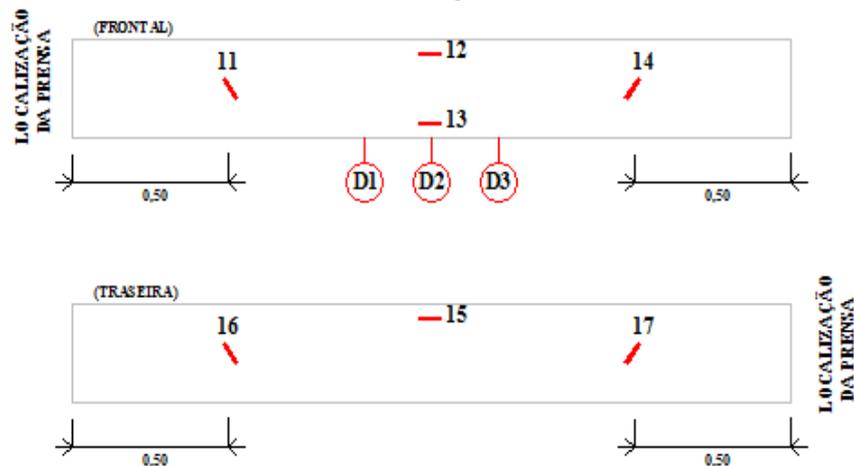
OBSERVAÇÕES					
Strain	Canal	Strain	Canal	Strain	Canal
1	S1	8	S8	15	S15
2	S2	9	S9	16	S16
3	S3	10	S10	17	S17
4	S4	11	S11	Deflectôm.	Canal
5	S5	12	S12	D1	V1
6	S6	13	S13	D2	V2
7	S7	14*	S14	D3	V3

(*) - Não funcionou / Erro de leitura

INSTRUMENTAÇÃO BARRA GFRP



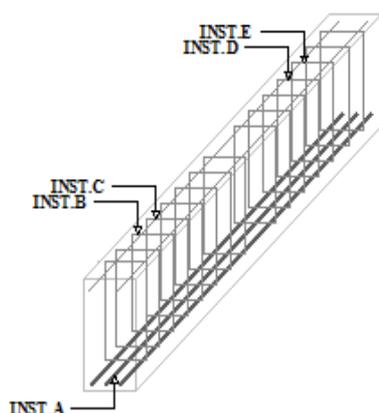
INSTRUMENTAÇÃO CONCRETO



	UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO	ANEXO VI	
	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL	FLS:	5/5
	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADAS COM BARRAS DE FIBRA DE VIDRO - UM ESTUDO EXPERIMENTAL	LOCAL :	UERJ
	RESULTADO DE ENSAIOS E CARACTERIZAÇÕES	DATA:	05/out/17

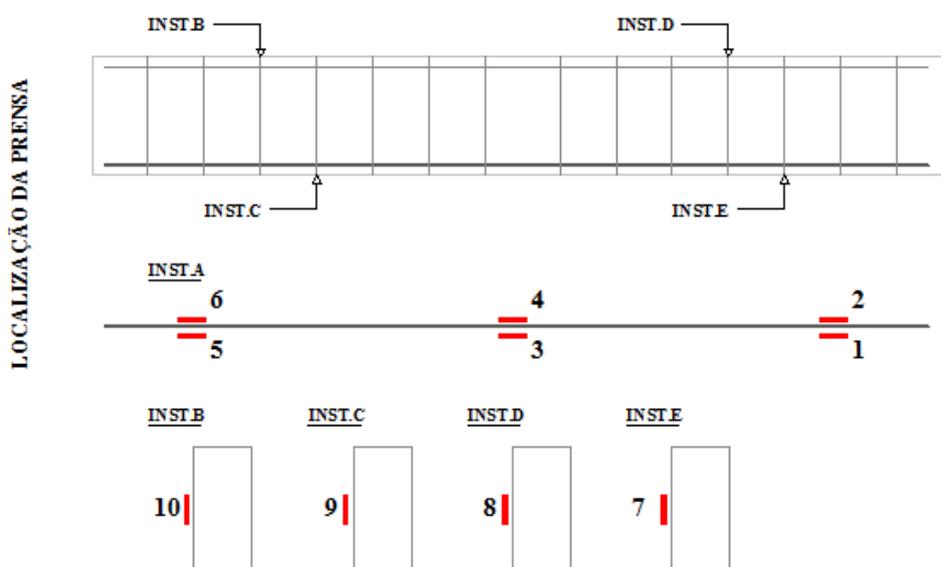
INSTRUMENTAÇÃO

5) Instrumentação da VR1



OBSERVAÇÕES			
Strain	Canal	Strain	Canal
1	S1	11	S11
2	S2	12	S12
3	S3	13	S13
4	S4	14	S14
5	S5	Deflectôm.	Canal
6	S6	D1	V1
7	S7	D2	V4
8	S8	D3	V5
9	S9	-	-
10	S10	-	-

INSTRUMENTAÇÃO AÇO



INSTRUMENTAÇÃO CONCRETO

