

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS**

Carolina Dal Agnol Dalazen

**REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO
COM A UTILIZAÇÃO DE ARGAMASSA REFORÇADA COM
TÊXTEIS DE CARBONO E DE VIDRO**

Avaliador:
Data da Defesa: 26/02/2021, às 15 horas
Local: Apresentação Virtual

Porto Alegre
Fevereiro, 2021

CAROLINA DAL AGNOL DALAZEN

**REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO
COM A UTILIZAÇÃO DE ARGAMASSA REFORÇADA COM
TÊXTEIS DE CARBONO E DE VIDRO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Carlos Pérez Bergmann

Porto Alegre
Fevereiro, 2021

CAROLINA DAL AGNOL DALAZEN

**REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS EM CONCRETO ARMADO
COM A UTILIZAÇÃO DE ARGAMASSA REFORÇADA COM
TÊXTEIS DE CARBONO E DE VIDRO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada, em sua forma final, pelo Professor Orientador, pelo Professor Coorientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 26 de Fevereiro de 2021

Prof. Carlos Pérez Bergmann
Dr. pela Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen
Orientador

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Dr. pela University of Leeds
Coorientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Annelise Kopp Alves (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eng. Lucas Alexandre Reginato (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Eng. Luciane Fonseca Caetano (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus avós, Irene e José.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a essa força que nos dá esperança, mesmo quando parece não existir razão para tal, que nos dá consolo e nos enche de vontade de construir um mundo melhor e menos desigual. Alguns acreditam ser a natureza, outros, os mecanismos que regem o universo, eu acredito ser Deus, inteligência suprema e causa primária.

Ao Prof. Carlos Pérez Bergmann, orientador deste trabalho, pela disposição em me ajudar em todos os momentos.

Ao Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, coorientador deste trabalho, por me incentivar a pesquisar sobre o concreto têxtil e a acreditar no potencial desta pesquisa e no meu também.

Obrigada a todos os meus professores e minhas professoras, pois vocês são essenciais na formação deste trabalho e de todos os outros.

À empresa TEXIGLASS, pelo têxtil de vidro álcali-resistente disponibilizado para a realização dos experimentos.

À empresa MC-Bauchmie, por doar parte da argamassa utilizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M).

Ao Projeto PRONEX/FAPERGS, Núcleo de Excelência em Concretos Especiais, pelo auxílio financeiro.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de mestrado, a qual viabilizou este trabalho.

Aos pesquisadores: Marcia Machado (LACER), Daiana Sacilotto (LACOR), Matheus Schmidt, Cleiton Mertz, Carolina Fink, Leonardo Flor e Arthur Heylmann (LAMEF). Vocês me receberam como uma colega de laboratório, apesar de ser somente colega na UFRGS, oferecendo-me toda a assistência necessária. Obrigada por tudo!

Aos bolsistas de iniciação científica: Ronaldo Beraldin, Leandro Krupp, Gabriel Freitas e Julia Lenzi. Cada um de vocês foi muito importante para a etapa do trabalho a qual me auxiliaram, e tenho certeza que terão muito sucesso no que escolherem fazer.

Aos colegas Lucas, Luciane e Kassio, pela experiência que me transmitiram, além de serem exemplos de pesquisadores e professores.

À Andressa Giese, que tanto me incentivou a continuar a pesquisa com o concreto têxtil, por todo carinho, amizade e sugestões sempre tão assertivas.

Às colegas Débora Marx e Helena Strieder, que tornaram meus dias de laboratório mais leves. Gurias, foi ótimo compartilhar os obstáculos da vida de mestranda com vocês!

Ao Edgar Lucas e ao Eurípedes Fontes, pois, além de amigos, vocês foram figuras paternas nesse período de mestrado. Obrigada por acreditarem em mim e me ajudarem tanto!

Aos meus amigos, porque vocês me conhecem e me apoiam muito, tanto que sabiam – até mesmo antes de eu própria – que eu me tornaria Mestre em Engenharia.

Em especial, agradeço ao Marcos e ao Omar.

À minha família, amo a todos e os levo no coração por onde eu andar.

Ao meu pai, que, mesmo longe, consegue continuar sendo um grande amigo e apoiador.

Por fim, agradeço à minha mãe, que é minha maior incentivadora e nunca me deixa esquecer que “Tudo passa”. Obrigada por tudo, mãe. Te amo!

Deixa algum sinal de alegria, onde passes.

Chico Xavier

TRABALHO PUBLICADO

DALAZEN, C. D.; BERGMANN, C. P.; SILVA FILHO, L. C. P. Reforço à flexão de vigas em concreto armado com concreto têxtil de vidro álcali-resistente. 3º Seminário Baiano de Durabilidade e Desempenho das Construções, BADUCON, 2020, Salvador-Bahia.

RESUMO

O desenvolvimento de novos materiais é fundamental para o trabalho dos profissionais responsáveis pela conservação de edificações. Nas estruturas, os danos por falhas de projeto, a deterioração ao longo do tempo, o sinistro ou a troca de uso podem ser resolvidos pelo reforço estrutural. Esse reforço pode ser feito com a utilização de materiais compósitos. Entre eles, destacam-se os Polímeros Reforçados com Fibras (FRPs), os quais possuem alto custo e consumo de carbono. Uma alternativa ao FRP é o *Textile Reinforced Concrete* (TRC), ou Concreto Têxtil (CT). O CT, igualmente ao FRP, é composto por fibras de alto desempenho. Contudo, os fios são entrelaçados e têm maior espaçamento entre eles, formando os chamados têxteis que são posicionados entre camadas de uma matriz cimentícia, resultando no concreto têxtil. Os pioneiros nas pesquisas com o CT foram os alemães na década de 1990. No programa experimental desenvolvido, foram realizados ensaios de flexão a quatro pontos em quinze vigas de concreto armado. Oito dessas vigas foram reforçadas com CT de têxtil de carbono, e outras seis foram reforçadas com CT de têxtil de vidro álcali-resistente. Uma das vigas permaneceu sem reforço e foi utilizada como referência. Além disso, foram realizados ensaios com o intuito de caracterizar os materiais constituintes das vigas e do reforço. Os ensaios de resistência à flexão foram realizados em uma prensa hidráulica de aplicação de carga. Foram usados *strain gauges* e Linear Variable Differential Transdutor (LVDT), para verificar respectivamente a deformação e o deslocamento. Ademais, foi acompanhada a fissuração dos elementos em registros por vídeos e imagens. Os parâmetros de estudo das vigas reforçadas com CT foram o número de camadas de têxtil (três ou quatro camadas), o preparo da superfície (apicoamento ou jateamento) e o material do têxtil (carbono ou vidro álcali-resistente). A ruptura da viga-testemunho ocorreu pela deformação excessiva da armadura tracionada. As vigas reforçadas apresentaram um incremento de carga de até 85,5% em relação à viga-testemunho. As vigas apicoadas apresentaram ruptura precoce – descolamento do reforço do substrato de concreto. Nas vigas nas quais não houve ruptura precoce, a falha aconteceu de três modos: deslizamento do têxtil na matriz, ruptura do têxtil ou laminação do cobrimento de concreto. As vigas reforçadas com têxtil de vidro atingiram cargas próximas às cargas da verificação teórica, e as de carbono apresentaram valores experimentais menores do que os valores calculados.

Palavras-chave: Reforço Estrutural. Reforço à Flexão. Concreto Têxtil. Têxtil de Vidro Álcali-resistente. Têxtil de Carbono.

ABSTRACT

The development of new materials is fundamental to the professionals responsible for building conservation. In structures, damage due to design failure, deterioration over time, disaster or change of use can be solved by structural strengthening. The composite materials, among them, the FRP (fiber-reinforced polymers), are the most wanted materials that accomplishes of the structural request. However, the FRP have a high cost and carbon consumption. An alternative to FRP, is the Textile Reinforced (TRC) Concrete or Concreto Têxtil (CT). The TRC is also composed of high performance fibers. However, the yarns are twisted with greater spacing between them, resulting in the textiles that are positioned between layers of a cementitious matrix, resulting in the TRC. Some of the first reasearchs in this area were developed by germans in 1990. In the experimental program developed, four-point bending tests on fifteen RC beams were accomplished. Eight of these beams were strengthened with an external layer of carbon textile TRC and another six were strengthened with alkali-resistant glass textile. One of the beams remained without TRC strengthening and was used as control beam. In addition, tests were performed in order to characterize the constituent materials of the beams and the strenghtening. The bending tests were performed in a hydraulic load application machine. Strain gauges and LVDTs were used to verify, respectively, deformation and displacement, likewise the cracking of the elements was accompanied by videos and images. The study's parameters of the beams strengthening with textile concrete were the number of textile layers, the surface preparation and the textile material. The failure mode of the control beams occurred by the yielding of the steel in tension. The reinforced beams presented a load increase of up to 85.5% in relation to the control beam. The beams showed early failure – debonding of the TRC from the concrete substrate. In the beams in which there was no early failure, three types of failure occurred: debonding of the textile from the cementitious matrix, tensile rupture of the TRC material or delamination of the concrete cover. The beams reinforced with glass textile reached loads close to the theoretical verification loads, the carbon ones presented experimental values lower than the calculated values.

Key-words: Structural Strengthening. Flexural strengthening. Textile Reinforced Concrete. Alkali-resistant Glass Textile. Carbon Textile.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Número de publicações por ano na <i>Science Direct</i> sobre os três temas destacados na legenda da figura desde 2010.	20
Figura 2 – Diagrama de etapas da pesquisa.....	24
Figura 3 – Reforço por adição de chapas metálicas.	27
Figura 4 – Aplicação de reforço com FRP.	31
Figura 5 – Matérias-primas da indústria têxtil.....	33
Figura 6 – Classificação das fibras têxteis.....	34
Figura 7 – Processo de produção da fibra de vidro.	35
Figura 8 – Fiação das fibras de vidro.	35
Figura 9 - Processo produtivo da fibra de carbono.....	36
Figura 10 - Tex de um fio e de cada filamento do fio.	37
Figura 11 – Manta, fibras dispersas, tecido e fio contínuo de vidro.....	38
Figura 12 – Identificação dos fios no tecido.....	39
Figura 13 – (a) Malha por trama e (b) Malha por urdume.	39
Figura 14 – Tecido plano, <i>leno weave</i> , <i>crowfoot</i>	40
Figura 15 – (a) Corpo de prova do ensaio de arrancamento, (b) Ensaio de cisalhamento duplo e (c) Corpo de prova do ensaio de tração direta.	44
Figura 16 – Filamentos externos e internos de um fio de têxtil não impregnado com resina em uma matriz cimentícia.	46
Figura 17 – Distribuição de tensões no fio do têxtil de TRC.	46
Figura 18 – Diagrama carga <i>versus</i> deslizamento	47
Figura 19 – Seção monolítica de um fio de têxtil impregnado com resina.	48
Figura 20 – Seção do tecido de carbono em relação à impregnação.	49
Figura 21 – Seção transversal FRCM.....	50
Figura 22 – Ensaio de tração direta: comparação entre diferentes matrizes.	50
Figura 23 – Ensaio de tração direta dos diferentes níveis de impregnação.	51
Figura 24 – Gráfico resistência <i>versus</i> tempo de FRC.	53
Figura 25 – Retenção da rigidez inicial das vigas reforçadas com TRC e CFRP.	56
Figura 26 – Diferença entre duas vigas reforçadas com TRC, um delas pré-fissurada, e outra, não.	57
Figura 27 – (a)Tira de têxtil sendo posicionada na camada de reforço da viga e (b) Vigas com o reforço de TRC fresco.	58
Figura 28 – Gráfico carga <i>versus</i> deslocamento das vigas,.....	59
Figura 29 – Gráfico resultante dos ensaios de flexão nas vigas.	61
Figura 30 – Viga rompida, sem reforço externo.....	61

Figura 31 – Viga reforçada com TRM rompida por falta de aderência entre substrato de concreto e TRM.....	62
Figura 32 – Viga reforçada com TRM rompida por ruptura do têxtil no centro do vão.	62
Figura 33 – Execução do reforço de pilar de concreto armado com TRM.	64
Figura 34 – Pilares reforçados com TRM de fibra de carbono (a) e de vidro (b) após a ruptura.	65
Figura 35 – Pilar reforçado com TRC na reforma do estádio Maracanã.....	66
Figura 36 – Matriz experimental do trabalho.	67
Figura 37 – Detalhamento das armaduras de aço das vigas.	70
Figura 38 – (a) <i>Strain gauges</i> colados nas barras e (b) Região de ruptura de uma das barras.	71
Figura 39 – Gráfico com a curva de tensão <i>versus</i> deformação do aço utilizado nas armaduras.	71
Figura 40 – Têxtil de vidro álcali-resistente.....	73
Figura 41 – Têxtil ARMO – mesh L500.	74
Figura 42 – Registros do têxtil de vidro no estereomicroscópio: Aumento de 79 vezes (a) e Aumento de 225 vezes (b).....	75
Figura 43 – Registro do têxtil de carbono no MEV, com aumento de 50 vezes.	75
Figura 44 – Registro do têxtil de vidro no MEV, com aumento de 50 vezes.	76
Figura 45 – Registro da seção transversal dos filamentos de carbono no MEV.	76
Figura 46 – Registro da seção transversal dos filamentos de vidro no MEV.....	77
Figura 47 – (a) Máquina de ensaio à tração direta e (b) Corpo de prova de têxtil de vidro posicionado nas garras.....	78
Figura 48 – (a) Corpos de prova do têxtil de vidro e (b) Corpos de prova do têxtil de vidro com o preparo nas extremidades.	79
Figura 49 – Gráfico do carregamento dos trechos de têxtil com: (a) Um fio de urdume, (b) Dois fios de urdume, (c) Três fios de urdume, (d) Quatro fios de urdume, (e) Cinco fios de urdume, (f) Seis fios de urdume.	80
Figura 50 – Rupturas dos têxteis de vidro álcali-resistente (a e b).....	81
Figura 51 – (a) Corpo de prova do têxtil de carbono e (b) Preparo das extremidades do têxtil.	81
Figura 52 – (a) Ensaio à tração direta do têxtil de carbono e (b) Ruptura de um fio do têxtil.	82
Figura 53 – (a) Carregamento em um urdume do têxtil de carbono e (b) Carregamento em metade do urdume do têxtil.	83
Figura 54 – Superfície apicoada das vigas.	85
Figura 55 – Superfície jateada.	85
Figura 56 – Superfície apicoada.	85
Figura 57 – Apicoamento da superfície das vigas.	86
Figura 58 – Corte das tiras de têxtil.....	86

Figura 59 – Posicionamento das vigas.	87
Figura 60 – Dispositivo de referência.....	88
Figura 61 – Posicionamento do dispositivo de referência.....	88
Figura 62 – Afrouxamento dos sargentos.....	89
Figura 63 – Afrouxamento dos sargentos.....	89
Figura 64 – Argamassadeira.	90
Figura 65 – Adição de água na argamassa seca.....	90
Figura 66 – (a) Preenchimento do molde para ensaio de índice de consistência e (b) Ensaio de índice de consistência de argamassa.	90
Figura 67 – Argamassa arremessada e pressionada.....	91
Figura 68 – Argamassa sendo pressionada contra a viga.	92
Figura 69 – Posicionamento da tira de têxtil na camada de argamassa.....	92
Figura 70 – Elevação do sistema limitador de camadas.....	93
Figura 71 – (a) <i>Strain gauge</i> colado em uma das barras de aço das vigas e conectado aos cabos do sistema de aquisição de dados e (b) <i>Strain gauge</i> colado na face comprimida do concreto.	94
Figura 72 – Instrumentação completa do ensaio à flexão a quatro pontos.....	94
Figura 73 – Diagramas das vigas ensaiadas.	95
Figura 74 – Posicionamento da viga testemunho na mesa de ensaio.	95
Figura 75 – Gráfico comparativo das cargas atingidas pelas repetições das configurações de reforço.	98
Figura 76 – Relação entre fatores controláveis e resposta.....	99
Figura 77 – Domínios de estado-limite último de uma seção transversal.....	102
Figura 78 – Esquema de equilíbrio da seção transversal, adaptado de Beber (2003).	103
Figura 79 – Fluxograma de cálculo iterativo da linha neutra.	104
Figura 80 – (a) Gráfico de carga vs. deslocamento das vigas reforçadas com têxtil de carbono e jateadas (b) Gráfico de carga vs. deslocamento das vigas reforçadas com têxtil de vidro álcali-resistente e jateadas.....	107
Figura 81 – (a) Gráfico de carga vs. deslocamento das vigas reforçadas com têxtil de carbono e apicoadas (b) Gráfico de carga vs. deslocamento das vigas reforçadas com têxtil de vidro álcali-resistente e apicoadas.....	108
Figura 82 – (a) Ruptura precoce das vigas apicoadas reforçadas com têxtil de carbono e (b) Ruptura precoce das vigas apicoadas reforçadas com têxtil de vidro.	109
Figura 83 – Gráfico de flecha na ruptura de cada viga reforçada.....	110
Figura 84 – Gráfico de carga vs. deformação do concreto e do aço das vigas J3V1 e J4V1.	112
Figura 85 – Viga testemunho após ruptura por deformação excessiva da armadura.	113
Figura 86 – Viga A3C1 após ruptura por falha na interface reforço-viga.....	113
Figura 87 – Viga A3C2 após ruptura por falha na interface reforço-viga.....	113

Figura 88 – Viga A4C1 após ruptura por falha na interface reforço-viga.....	114
Figura 89 – Viga A4C2 após ruptura por falha na interface reforço-viga.....	114
Figura 90 – Viga A3V1 após ruptura por falha na interface reforço-viga.	114
Figura 91 – Viga A3V2 após ruptura por falha na interface reforço-viga.	114
Figura 92 – Viga A4V1 após ruptura por falha na interface reforço-viga.	114
Figura 93 – Viga A4V2 após ruptura por falha na interface reforço-viga.	115
Figura 94 – Gráfico de carga vs. deformação do concreto e do aço das vigas J3C1, J3C2 e J4C1.....	116
Figura 95 – Viga J3C1 após a ruptura por laminação do cobrimento do concreto.	116
Figura 96 – Viga J3C2 após a ruptura por deslizamento do têxtil na matriz.	116
Figura 97 – Viga J4C1 após ruptura por laminação do cobrimento do concreto.	117
Figura 98 – Viga J4C2 após ruptura por laminação do cobrimento do concreto.	117
Figura 99 – Viga J3V1 após ruptura por deslizamento do têxtil na matriz e ruptura do têxtil.	117
Figura 100 – Viga J4V1 após ruptura por deslizamento do têxtil na matriz e ruptura do têxtil.	117
Figura 101 – (a) Ruptura por deslizamento do têxtil na matriz (b) Ruptura por laminação do cobrimento de concreto e (c) Ruptura do têxtil na matriz.	119
Figura 102 – Padrão de fissuração C, de Escrig, Gil e Bernat-Maso (2017).....	120
Figura 103 – Comportamento trilinear do reforço de concreto têxtil.....	120
Figura 104 – Gráfico de momento vs. deslocamento do centro do vão da viga J3V1.	121
Figura 105 – Gráfico de momento vs. deslocamento do centro do vão da viga J4V1.	121
Figura 106 – Gráfico de momento vs. deslocamento do centro do vão da viga J3C1.	122
Figura 107 – Gráfico de momento vs. deslocamento do centro do vão da viga J3C2.	122
Figura 108 – Gráfico de momento vs. deslocamento do centro do vão da viga J4C1.	123
Figura 109 – Região não demarcada devido à limitação do equipamento.	125
Figura 110 – Fissuração da viga J3C1 e modelo utilizado para apresentação da evolução das fissuras.....	125
Figura 111 – Fissuração das vigas J3C2 e J4C1.....	125
Figura 112 – Fissuração das vigas J3V1 e J4V1.	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fração do volume de fibras, número de camadas de têxtil e espessura da camada de reforço,.....	58
Tabela 2 – Cargas de fissuração, abertura de fissuras e de ruptura dos experimentos,.....	59
Tabela 3 – Ductilidade das vigas reforçadas, de.	60
Tabela 4 – Valores de média e desvio-padrão da resistência à compressão simples dos corpos de prova da matriz cimentícia utilizada.....	70
Tabela 5 – Valores de média e desvio-padrão do módulo de elasticidade estático dos corpos de prova da matriz cimentícia utilizada.....	70
Tabela 6 – Dados dos ensaios de caracterização do aço conforme NBR ISO 6892-1.	72
Tabela 7 – Tabela de informações técnicas do têxtil de vidro álcali-resistente fornecida pelo fabricante.	73
Tabela 8 – Tabela de informações técnicas do têxtil de carbono fornecida pelo fabricante. ...	74
Tabela 9 – Áreas e diâmetros dos fios de urdume.....	76
Tabela 10 – Diâmetros dos filamentos.	78
Tabela 11 – Cargas de ruptura dos urdumes do têxtil de vidro.	79
Tabela 12 – Cargas do ensaio à tração direta no têxtil de carbono.	83
Tabela 13 – Diâmetros do ensaio de determinação do índice de consistência.....	91
Tabela 14 – Carga máxima e incremento de carga das vigas ensaiadas.....	97
Tabela 15 – Níveis dos três fatores variáveis utilizados na ANOVA.	99
Tabela 16 – Carga máxima das vigas reforçadas.	99
Tabela 17 – Tabela ANOVA com os dados de carga máxima das vigas.....	101
Tabela 18 – Carga máxima teórica.	106
Tabela 19 – Redução na rigidez das vigas reforçadas.	110
Tabela 20 – Cargas nas deformações específicas do aço e do concreto.....	111
Tabela 21 – Modo de ruptura das vigas ensaiadas.	118
Tabela 22 – Momentos de fissuração, de pseudoescoamento e de ruptura das vigas jateadas.	123
Tabela 23 – Legenda da fissuração demarcada das vigas durante os ensaios.	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM – American Society for Testing and Materials

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

FRP – Fiber Reinforced Polymers

FRCM – Fabric-Reinforced Cementitious Matrix

TRC – Textile Reinforced Concrete

TRM – Textile Reinforced Mortar

FRC – Fabric-Reinforced Concrete

CFRP – Carbon Fiber Reinforced Polymer

LVDT – Linear Variable Differential Transdutor

OPC – Ordinary Portland Cement

IPC – Inorganic Phosphate Cement

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	22
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	22
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	22
2.2.1 Objetivo Principal.....	22
2.2.2 Objetivos Secundários	22
2.3 PREMISSA	23
2.4 DELIMITAÇÕES.....	23
2.5 LIMITAÇÕES.....	23
2.6 Delineamento.....	24
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	25
3.2 REFORÇO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE CONCRETO ARMADO	25
3.3 CONCRETO TÊXTIL.....	31
3.3.1 Têxteis	32
3.3.2 Matriz	41
3.3.3 Ligação	44
3.3.4 Durabilidade	51
3.4 REFORÇO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE CONCRETO ARMADO COM CONCRETO TÊXTIL.....	55
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	67
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	67
4.1.1 Matriz experimental.....	67
4.1.2 Concreto	69
4.1.3 Matriz cimentícia.....	69
4.1.4 Armadura.....	70
4.1.5 Têxteis	72
4.1.6 Execução dos reforços	84
4.1.6.1 Preparo da superfície das vigas.....	84
4.1.6.2 Preparo das tiras de têxtil.....	86
4.1.6.3 Execução das camadas do reforço	87
4.1.7 Instrumentação	93
4.1.8 Procedimento de ensaio	94
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	96
5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	96
5.2 CARGA MÁXIMA	96
5.2.1 Análise de variância	97
5.2.2 Carga máxima teórica.....	102
5.3 CARGA E RIGIDEZ.....	106
5.4 MODO DE RUPTURA E DEFORMAÇÃO	111

5.5 FISSURAÇÃO	119
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	127
REFERÊNCIAS	130
ANEXO A.....	134
ANEXO B.....	137
ANEXO C.....	140

1 INTRODUÇÃO

As antigas edificações eram construídas utilizando-se materiais naturais ou empíricos. Hoje, os materiais utilizados na construção civil possuem alto nível de desenvolvimento científico. As construções de séculos atrás foram pensadas como infundáveis, porém a solidez das grandes construções de argila, de madeira e de rocha não as privou da deterioração. A Muralha da China, construção de imponente estrutura, por exemplo, exigiu ações de conservação ao longo do tempo.

O concreto armado, material compósito que une as propriedades do aço e do concreto, amplamente utilizado no século XX e XXI, apresentou-se como uma boa opção para a construção civil, pois permitia que as estruturas fossem mais esbeltas e com diferentes geometrias (JUVANDES, 1999). Porém, a otimização do ponto de vista estrutural e econômico gera maior sensibilidade a qualquer efeito dos materiais constituintes, da execução ou do cálculo, podendo gerar situações de grande risco (BEBER, 2003). O pouco conhecimento acerca da durabilidade do concreto armado no século XX e da disseminação do uso desse material ocasionou a degradação precoce, resultando em diversos problemas apresentados nas estruturas no século XXI.

Atualmente, a durabilidade das estruturas tornou-se uma importante questão, podendo-se destacar algumas circunstâncias determinantes para a degradação precoce das estruturas: a agressividade do meio, os agentes físicos e químicos e biológicos que podem originar fragilização mecânica, os materiais utilizados, o uso da edificação, os sinistros (pontes e viadutos são frequentemente reparados, a fim de evitar acidentes), os erros de projeto ou a construção, que podem exigir reforço das estruturas antes mesmo de entrar em funcionamento. Assim, surge uma necessidade, a de decidir qual intervenção a estrutura existente deverá receber: recuperação, reforço, substituição (JUVANDES, 1999).

Ações nas estruturas de concreto armado são importantes e, em alguns casos, evitam a necessidade de demolição. Na reabilitação estrutural – ação que possibilita que a estrutura seja novamente capaz de atender às demandas de ocupação –, podem-se destacar três ações: a recuperação, o reforço e o *retrofit* (KARBHARI, 2006). Essas ações são importantes, tendo em

vista o crescente número de estruturas deterioradas. Neste trabalho, uma técnica de reforço estrutural será objeto de estudo. O surgimento de materiais inovadores resultou em novos insumos para os sistemas de reforço estrutural. Hoje, a escolha da melhor técnica de reforço a ser empregada percorre: técnicas consolidadas antigas, como a protensão externa, o aumento de seção da estrutura, a colagem de chapa metálica ou perfil metálico; técnicas consolidadas menos antigas, como os FRPs ; e técnicas inovadoras, como a utilização de TRC (um material utilizado inicialmente na confecção de painéis de fachada).

A utilização dos FRPs é conhecida como uma técnica de reforço eficiente e de alto investimento. Nesse método, a malha embebida por resina é colocada camada por camada na face submetida à tração do elemento de concreto armado deteriorado. A adição do reforço na superfície externa da zona tracionada é realizada em diversos outros sistemas e pode comportar vários tipos de materiais alternativos às resinas reforçadas com fibras. Entre os novos materiais com potencial como sistema de reforço estrutural se destacam os compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras.

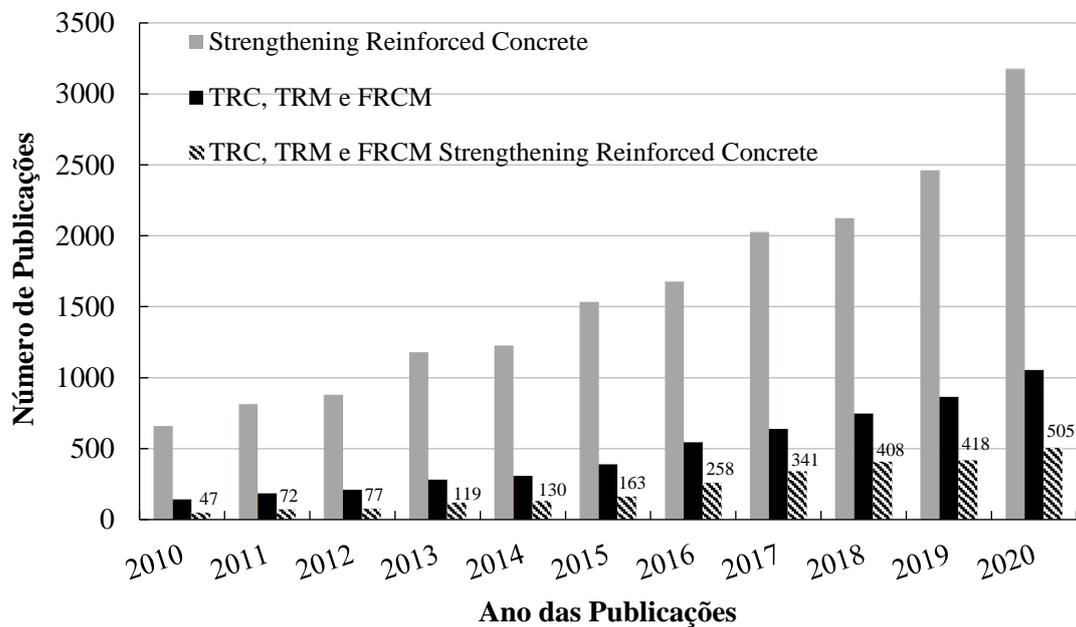
Os materiais cimentícios são materiais com alta rigidez e resistência à compressão, baixa resistência à tração e comportamento frágil. Assim, esses materiais são reforçados, tradicionalmente, com aço e, de forma alternativa, com fibras (VERBRUGGEN *et al.*, 2014). Dentro da categoria de compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras faz-se necessária a diferenciação de dois tipos de compósitos. Quando fibras dispersas são adicionadas na mistura da matriz fresca, obtém-se o FRC, quando se utilizam fibras contínuas com controlada distribuição e posicionamento a serem envolvidas por uma matriz cimentícia, obtém-se o TRC (VERBRUGGEN; TYSMANS; WASTIELS, 2014). Os estudos com fibras descontínuas apresentam bons resultados para ductilidade, mas não para tensões de tração. Com a intenção de atingir um comportamento dúctil e uma alta resistência a tração, é necessária uma estrutura densa e contínua de filamentos. Por isso, os tecidos são empregados. A produção e as propriedades do TRC unem o comportamento dos FRPs e os compósitos de matriz cimentícia com fibras descontínuas (VERBRUGGEN *et al.*, 2014).

Desde o início do século XXI, tem-se usado o TRC na confecção de painéis de revestimento externo e, em alguns casos menos frequentes, nos reservatórios especiais de água, como método de proteção de fundações da pressão d'água, nos elementos estruturais integrados para pisos de concreto armado, nos elementos estruturais de formas complexas e esbeltas, no reforço de

alvenaria e nas passarelas de pedestres (HEGGER *et al.*, 2006). Dessa forma, o TRC demonstra ser um material com potencial para diversas aplicações, incluindo-se, nessa lista, a utilização do TRC como reforço de elementos estruturais de concreto armado.

A Figura 1 apresenta um gráfico de colunas em que é apresentado o número de artigos publicados (eixo y), de 2010 a 2020 (eixo x), que versam sobre algum dos três temas apresentados na legenda.

Figura 1– Número de publicações por ano na *Science Direct* sobre os três temas destacados na legenda da figura desde 2010.



Analisando-se o gráfico da Figura 1, é possível perceber o alto número de artigos publicados versando sobre o reforço em elementos de concreto armado. Esse alto número é resultado da ampla variedade de materiais empregados como reforço, sendo uma necessidade crescente reforçar estruturas. A pesquisa também apontou a quantidade de publicações acerca de compósitos de matriz cimentícia reforçados com fibras de alto desempenho (segunda coluna). Os dois assuntos formaram uma terceira busca: reforço de elementos de concreto armado reforçados com compósitos de fibras de alto desempenho com matriz cimentícia (terceira coluna). É provável que as pesquisas acerca dos três continuem aumentando, já que, a cada ano, novos materiais são testados como alternativa de reforço de estruturas e aqueles materiais que já estão sendo estudados terão o comportamento bem definido pelas pesquisas.

Dentre as diversas aplicações dos compósitos de matriz cimentícia, a utilização desse material aderido à superfície de elementos estruturais é relevante e deve ser considerada devido ao crescente número de estruturas que necessitam de reforço. Sendo assim, foi realizado um estudo do comportamento do compósito CT aderido a vigas de concreto armado como reforço à flexão. As diretrizes desse estudo serão apresentadas no próximo capítulo.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para o desenvolvimento do trabalho serão descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: Qual é o comportamento do Concreto Têxtil (CT) como reforço à flexão em vigas de concreto armado, empregando reforço com têxtil de vidro álcali-resistente, ou têxtil de carbono, diferentes números de camadas têxteis e tratamentos superficiais distintos na superfície das vigas?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa são classificados em: objetivo principal e objetivos secundários. Eles serão descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal do trabalho é avaliar os resultados experimentais dos ensaios à flexão em vigas de concreto armado reforçadas com concreto têxtil de vidro e de carbono.

2.2.2 Objetivos Secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) analisar os efeitos na carga máxima, na deformação do aço e do concreto, na rigidez e no tipo de ruptura do reforço à flexão com concreto têxtil nas vigas;
- b) caracterizar os materiais utilizados neste trabalho, sendo eles os principais: concreto, aço, têxtil e argamassa;
- c) identificar as vantagens e desvantagens do método de produção.

2.3 PREMISSA

O trabalho tem por premissa a possível utilização do concreto têxtil como material capaz de suprir parte da crescente demanda de reforços e reparos de elementos de concreto armado.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimitou-se em avaliar o comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com concreto têxtil de vidro e de carbono. Foram avaliados: a carga máxima, a deformação do concreto e do aço, o deslocamento no vão e a fissuração da viga nos ensaios à flexão. Foram utilizados três fatores variáveis na execução do reforço com concreto têxtil: número de camadas de têxtil empregadas (três ou quatro), material dos têxteis (carbono ou vidro álcali-resistente) e tratamento superficial dos elementos de concreto armado (apicoamento ou jateamento).

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) foram utilizadas quatorze vigas de mesma dimensão, 150 centímetros de comprimento, 20 centímetros de altura e 12 centímetros de largura, reforçadas com quatro barras de aço de 0,63 centímetros, duas na zona tracionada e duas na zona comprimida, estribos também de 0,63 centímetros, com espaçamento de 6 centímetros concretadas anteriormente ao início deste trabalho como parte da dissertação da aluna Andressa Giese;
- b) as dimensões das vigas foram as máximas estabelecidas pelo ensaio e pelo equipamento escolhido, exceto a altura de 20 centímetros, que foi obtida pelo dimensionamento da viga no estágio II;
- c) o têxtil e a argamassa matriz foram adquiridos antes da pesquisa, e a argamassa não foi fator variável por ter efeito de bloco: o reforço de uma matriz diferente deveria ser aplicada em quatorze vigas idênticas às que foram reforçadas, o que exigiria mais tempo e recursos, o que, infelizmente, não se dispunha naquele ;
- d) a rugosidade da superfície apicoada ou o jateamento não foram medidos;
- e) a deformação do têxtil na matriz durante os ensaios não foi monitorada;
- f) para facilitar a execução dos reforços, as vigas foram posicionadas com a face a ser reforçada para cima e estavam descarregadas, com posição e estado diferentes das vigas de concreto armado em estruturas reais.

2.6 DELINEAMENTO

Para a realização do trabalho, foram cumpridas algumas etapas, as quais são apresentadas na Figura 2 e descritas nos próximos parágrafos.

Figura 2 – Diagrama de etapas da pesquisa.



(Fonte: Elaborada pela autora)

Na primeira etapa, anterior à avaliação experimental do reforço à flexão de vigas em concreto armado com argamassa reforçada com têxteis de carbono e vidro álcali-resistente foi desenvolvida uma **revisão bibliográfica**. Essa revisão teve como principais aspectos: a) Reforço de elementos estruturais de concreto armado; b) Concreto têxtil; c) Reforço de elementos estruturais de concreto armado com concreto têxtil.

Na segunda etapa, foram definidos **materiais e métodos**, em que se delimitaram quais materiais e configurações de reforço seriam empregados. Foram escolhidos três fatores controláveis: o material do têxtil, o número de camadas têxteis e o tratamento do substrato de concreto das vigas.

Na terceira etapa, houve a **apresentação dos resultados**, na qual os dados de carga, flecha, deformações, fissuração, energia de deformação adquiridos durante os experimentos foram apresentados na forma de tabelas e gráficos. Além disso, os registros fotográficos foram relacionados com os dados obtidos.

Nas **considerações finais**, foram feitas análises que resultaram em conclusões dos experimentos e sugestões para trabalhos futuros.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nesta etapa do trabalho, serão apresentadas informações fundamentais acerca do reforço de elementos de concreto armado, como histórico, técnicas mais difundidas, técnicas novas, vantagens e desvantagens, materiais utilizados, limitações e esclarecimento sobre a necessidade de reforço nas estruturas de concreto armado. Também será descrita e analisada a trajetória do CT, um material inovador empregado na confecção de painéis de fachada e que vem sendo requerido como material de reforço em estruturas de concreto armado. Sendo assim, serão ressaltadas importantes propriedades desse material de uso almejado pela construção civil.

3.2 REFORÇO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE CONCRETO ARMADO

O concreto armado, por ser um material amplamente utilizado na construção civil, impulsionou estudos acerca de seu comportamento ao longo do tempo. Podem-se verificar, nos elementos de concreto armado, falhas decorrentes de erros de projeto, sinistros, mudanças de uso e deterioração natural. Segundo Beber (2003, p. 5),

durante a sua vida útil, os materiais, componentes e elementos empregados na construção civil interagem com o ambiente constituído, dentre outros, por agentes agressivos que apresentam variados níveis de agressividade.

Esses níveis de agressividade são essenciais, visto que um maior nível de agressividade, combinado com uma estrutura sem proteção aos agentes agressivos, causa envelhecimento precoce do concreto armado. Essa situação e a evolução das manifestações patológicas explicam o alto número de estruturas com problemas. Nesse sentido, alguns mecanismos podem ser destacados, e estes podem ser divididos em três grupos: relativos ao concreto, à armadura e à estrutura propriamente dita.

Podem-se dividir em três grupos os mecanismos de deterioração do concreto armado: relativos ao concreto, à armadura e à estrutura propriamente dita. Alguns mecanismos preponderantes de deterioração do concreto, conforme Helene (1997), são: lixiviação, expansão por ação de água e solos contaminados por sulfatos, reação álcali agregado e reações superficiais de certos agregados decorrentes de transformações de produtos ferruginosos. Ainda segundo o autor, dois mecanismos preponderantes de deterioração relativos à armadura são: despassivação por carbonatação e despassivação por íons cloreto. Os mecanismos de deterioração da estrutura propriamente dita são, de acordo com Helene (1997),

todos aqueles relacionados às ações mecânicas, movimentações de origem térmica, impactos, ações cíclicas (fadiga), deformação lenta (fluência), relaxação e outros

Como citado, um importante fenômeno de deterioração do concreto armado é a corrosão de armaduras. A corrosão do aço no concreto armado pode levar a danos tão severos que as estruturas deterioradas se tornam um risco aos usuários. A redução na área da seção transversal das barras de aço e a formação dos produtos da corrosão levam à redução da aderência entre o aço e o concreto, à fissuração, ao deslocamento do concreto (redução da seção transversal de concreto) e à perda da capacidade estrutural do elemento. É importante destacar, portanto, que a carbonatação e a entrada de íons cloreto no concreto levam à diminuição da vida útil das estruturas, pois facilitam o surgimento da corrosão (BOSSIO; LIGNOLA; PROTA, 2018).

Helene (1997, p. 45) ressalta que:

Prever a evolução da deterioração de estruturas de concreto armado viabiliza projetar para durabilidade e não somente para resistência mecânica.

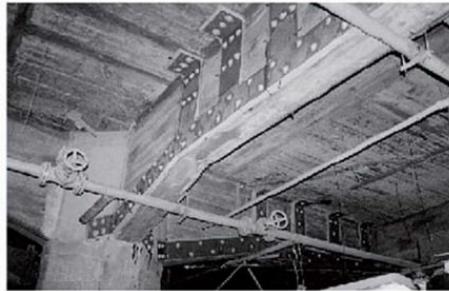
Quando algo, seja deterioração ou novo uso da estrutura de concreto armado, ameaça o atendimento às demandas de ocupação da edificação, três termos são importantes e compõem as ações dentro da reabilitação estrutural: reparo, reforço e *retrofit*. Reparo ou recuperação é quando um material é utilizado para consertar uma deficiência na estrutura, com o intuito de restaurar a capacidade original do componente; Reforço de estruturas acontece quando um material aumenta a capacidade de carga do componente; O termo *retrofit* é a adaptação realizada na estrutura para suportar tipos e magnitudes de cargas específicas, como os sismos (KARBHARI, 2006). O reforço estrutural é uma técnica de reabilitação muito usada nas estruturas de concreto armado, possibilitando, assim, a utilização de diversos materiais.

A demanda pela execução de reforços pode ter várias causas e não somente a deterioração prematura dos materiais (GARCEZ, 2007, p.1). A autora acrescenta que:

outros fatores contribuem para estabelecer a necessidade de um reforço estrutural e são: mudanças de utilização, processos de modernização das construções, erros de dimensionamento dos elementos estruturais na etapa de projeto e eventuais problemas que comprometam a segurança da estrutura.

Dessa forma, o reforço de elementos estruturais de concreto armado consiste em uma ação básica de conservação, e há décadas o reforço é empregado para reabilitar estruturas de prédios, de pontes, de viadutos e de diversas obras. Assim, destacam-se as principais técnicas de reforço de elementos de concreto armado: a colagem de chapa de aço, o aumento da seção do elemento com armaduras de aço e concreto, a protensão externa dos elementos e a colagem de reforço com fibras e matriz polimérica. Essas técnicas foram utilizadas em diversas construções pelo mundo. O reforço de elementos de concreto armado por colagem de chapa de aço com resina, representado na Figura 3, por exemplo, acontece desde 1960. Há registro de reforço com chapas de aço, em 1964, que ocorreu na estrutura de um edifício residencial em Durban, na África do Sul (HASSAN, 2015).

Figura 3 – Reforço por adição de chapas metálicas.



(Fonte: Souza e Ripper, 2009)

A técnica de colagem de chapa de aço é uma técnica frequentemente empregada pelo baixo custo, componentes de fácil aquisição, alta resistência à tração e ductilidade. Essa técnica é utilizada para reforçar tanto pontes quanto estruturas prediais. Algumas recomendações no que concerne à execução desse tipo de reforço são determinantes para que o sistema seja eficiente: a preparação da superfície do substrato de concreto (remoção da nata de concreto e exposição do agregado com o intuito de obter uma superfície rugosa) por jateamento de areia, água, granalha de aço ou por uso de martelo pneumático; o jateamento da chapa de aço, visando à

retirada de qualquer resquício de óleo que poderia interferir na aderência da chapa na resina; a proteção contra a corrosão durante o transporte da chapa de aço (uso de película plástica, que deveria ser retirada apenas antes da utilização) (AL-MAHAIDI; KALFAT, 2018). Sobre a matriz polimérica que compõe o reforço, essa resina sozinha não é capaz de suportar o peso do aço durante a cura da resina, por isso, são utilizados *parabolts*, parafusos autofixantes, que são colocados em furos previamente executados no elemento de concreto. Dessa forma, a não utilização dos parafusos, os quais servem para pressionar a chapa e comprimir a resina, pode gerar falhas devido à falta de aderência (AL-MAHAIDI; KALFAT, 2018).

Outra importante técnica de reforço de elementos de concreto armado é a protensão externa – uma técnica construtiva amplamente utilizada desde a década de 1950 (BEBER, 2003). Essa técnica, ainda segundo Beber (2003, p. 10 a 11),

contribui para a redução das deformações na estrutura existente, bem como para aumentar a capacidade portante dos elementos.

Ademais, a protensão externa interfere diretamente na durabilidade, visto que pode retardar o início da fissuração, fechar fissuras existentes e reduzir a flecha do elemento (AL-MAHAIDI; KALFAT, 2018). Essa técnica tem sido utilizada em elementos estruturais de aço, de concreto e de madeira (sobretudo em pontes), sendo, em geral, realizada com a utilização de cordoalhas ou barras de aço. Os componentes de aço são tensionados por macacos hidráulicos ou parafusos e podem ser instalados em curva (utilizando desviadores) ou retos. Dessa forma, a força resultante da protensão externa é transmitida aos elementos pelos desviadores e pelos pontos de ancoragem (onde acontece o tensionamento dos componentes) (AL-MAHAIDI; KALFAT, 2018).

A técnica de revestir (*jacketing*) elementos estruturais com concreto armado é uma alternativa viável para o reforço de elementos estruturais. Embora esse método não seja inovador e já tenha sido substituído pelas novas técnicas de reforço, como o FRP, ainda pode ser uma boa opção. Os elementos mais reforçados utilizando *jacketing* são os pilares e as vigas de concreto armado (AL-MAHAIDI; KALFAT, 2018). Essa técnica é considerada trabalhosa, resultando em elementos de grandes dimensões, o que pode comprometer as características arquitetônicas da estrutura, ressalta Al-Mahaidi *et al.* (2008). Alguns pontos que devem ser considerados no projeto e na instalação do revestimento de concreto armado são: conectar o revestimento de concreto com elemento a ser revestido (essa união faz a transferência dos esforços axiais,

cortantes e fletores e é executada com barras de aço embebidas em resina epóxi, que são colocadas em furos feitos previamente no elemento a ser reforçado); ancorar a armadura longitudinal do revestimento, quando o reforço for realizado passando por vigas ou lajes (esse vínculo deve garantir a continuidade do revestimento e a resistência ao cortante e ao momento fletor da viga ou laje, e pode ser executado colocando armaduras longitudinais em furos nas vigas ou lajes); preparar a superfície onde será aplicado o revestimento no elemento existente (aumento da rugosidade da superfície, retirando-se a nata de cimento por jateamento de areia ou água e uso de martelletes), devendo-se, também, limpar a poeira que restar na superfície; descarregar as colunas antes da instalação do revestimento, pois o reforço geralmente é realizado em estruturas carregadas, contribuindo para cargas adicionais (deve-se garantir, então, que o elemento existente resista e continue resistindo às cargas iniciais sem reforço da estrutura, e, no caso da estrutura estar próxima à sua capacidade de resistência, deve-se descarregar a estrutura por escoramento temporário) (JÚLIO; BRANCO; SILVA, 2003). As desvantagens desses métodos de reforço são o alto peso próprio do reforço e a necessidade de cobrimento.

Embora o foco deste trabalho seja as técnicas de reforço estrutural, é importante salientar que existem alguns métodos de prevenção e reparo de problemas nas estruturas de concreto armado, principalmente da corrosão de armaduras. Por exemplo, cita-se a proteção catódica, que consiste em ligar a armadura a um metal que corroa mais fácil do que o aço das barras. Esse metal agirá como ânodo e a corrosão da armadura será freada. Outra forma de barrar a corrosão seria com os inibidores de corrosão, que consistem em líquidos de baixa viscosidade que permitem a sua entrada nos poros do concreto e a proteção da armadura. Algumas literaturas indagam o quanto os inibidores de corrosão são eficientes e se de fato param ou significativamente reduzem a corrosão, ressaltando que, nos pontos onde o dano pela corrosão já existe, o resultado desses inibidores não se mostrou efetivo (NGALA; PAGE; PAGE, 2004). Todavia, o tipo de reparo mais comumente utilizado é feito por meio de remendos (*patch repair*). Esse método se fundamenta na retirada da camada de concreto danificada pela expansão do aço corroído, após, a superfície da barra de aço é escovada ou jateada – a fim de retirar o aço oxidado – e a camada de algum produto anticorrosão é aplicado. A finalização é feita pela aplicação de uma camada de argamassa estrutural (RAUPACH, 2006). Essa é a técnica mais utilizada nos casos de impacto baixo e localizado da corrosão. Nos pontos onde existe uma perda da seção de aço maior do que 10%, um reforço adicional deve ser implementado, para garantir integridade estrutural.

A técnica mais utilizada atualmente, devido à ampla variedade de estruturas que abrange e também pela facilidade do manuseio dos materiais, é o FRP. As resinas reforçadas com fibras são empregadas tradicionalmente nos setores industrial, automotivo, marítimo e aeroespacial. Algumas diferenças, no entanto, permeiam o uso dos FRPs na construção civil, entre elas: as diferenças de carregamento, o ambiente em que será aplicado e o tipo de materiais e processos que viabilizam a sua utilização (KARBHARI, 2006). Esse compósito, segundo o mesmo autor, pode ser o sonho ou o pesadelo dos projetistas, dado que o compósito possibilita atendimento às demandas de uso e de carga, mas encontrar, em meio a uma infinidade de manuais e fichas técnicas, a resina e a fibra mais apropriadas é um trabalho árduo.

No reforço com FRP (Figura 4), as fibras contínuas (vidro, carbono, aramida) são empregadas como armaduras não metálicas para a resina. O método de aplicação dos FRPs como reforço em elementos de concreto armado consiste em: aplicar uma camada de primer na superfície de concreto, já regularizada; após, aplica-se uma camada de resina e uma da manta de fibras contínuas, seguida por mais uma camada de resina, repetindo os dois últimos passos de acordo com a quantidade de camadas de fibras necessárias para resistir às cargas de projeto (JUVANDES, 1999). Nessa técnica, o baixo peso próprio e a flexibilidade do tecido facilitam o manuseio em campo e, além dessas, podem ser citadas outras vantagens: elevada resistência à tração, resistência à corrosão e elevada resistência à fadiga. Contudo, o comportamento final de um compósito FRP é muito dependente dos materiais que o constituem, da disposição das fibras principais de reforço e da interação entre os referidos materiais (JUVANDES, 1999). Algumas desvantagens a serem destacadas são: a mistura da resina com o endurecedor acontecer no momento da aplicação (podem ocorrer erros de dosagem e de mistura e entrada de impurezas); a aplicação da resina no tecido ser na hora da execução do reforço, possibilitando a não impregnação completa da manta pela resina, sendo que o desempenho do sistema é muito dependente do executante (JUVANDES, 1999). Outra desvantagem constatada são os espaços com bolhas de ar, os quais resultam em um ponto de possível deterioração precoce do reforço. O compósito geralmente é curado à temperatura ambiente. Por isso, deve-se também atentar para o clima em que está sendo aplicado o reforço, e como isso afetará o comportamento da resina (KARBHARI, 2006). Ainda segundo o autor, as experiências com o uso dos FRPs fornecem motivos para que se acredite que se trata de um material durável ao longo dos anos. Além disso, os custos com manutenção são mais baixos, comparando-se com os custos dos materiais convencionais. Porém, até a data desses estudos, dados atualizados sobre a

durabilidade dos FRPs eram esparsos, não bem documentados e de difícil acesso aos engenheiros civis.

Figura 4 – Aplicação de reforço com FRP.



(Fonte: Técnicas Especiais de Engenharia, 2016)

Entre os principais materiais desenvolvidos cientificamente e passíveis de serem manejados como reforço de estruturas de concreto armado se encontram os chamados concretos especiais de alto desempenho. Entre esses materiais se destacam: o “Concreto de Pós-Reativos” (CPR), com composição básica de cimento Portland, sílica ativa, pó-de-quartzo, agregado miúdo, água, aditivo superplastificante e, eventualmente, fibras metálicas (REGINATO, 2011); o FRC *Fiber Reinforced Concrete* (FRC), concreto que possui fibras dispersas em uma matriz cimentícia, como o *Engineered Cementitious Composite* (ECC), com característica mais comum de ser dúctil, obtendo capacidade de deformação maior de 2% (LI, 2010); e o *Textile Reinforced Concrete* (TRC), ou “Concreto Têxtil” (CT), concreto reforçado com tecido de filamentos orientados na direção do esforço principal e posicionados por fios secundários – objeto de estudo deste trabalho e que será apresentado com detalhes nos próximos itens.

3.3 CONCRETO TÊXTIL

O termo compósito é derivado do latim *compositus*, que, por sua vez, tem como raiz a palavra *componere*: com – junto – + ponere – colocar; ou seja, aglutinar, juntar (BEBER, 2003, p. 18).

Na construção civil, o material compósito de maior importância é o concreto armado, empregado na construção de estruturas e que une as propriedades do aço (resistência à tração, ductilidade) e do concreto (resistência à compressão, alcalinidade). Porém, não só esse tipo de concreto reforçado com aço é importante para a construção civil. Devido às limitações do concreto armado, outros compósitos – denominados concretos de alto desempenho, por possuírem materiais desenvolvidos para obter propriedades específicas – são estudados, visando à sua empregabilidade na construção civil.

O CT (TRC) é um material compósito, constituindo-se na sobreposição de camadas de matriz cimentícia com base em aglomerante hidráulico, agregados miúdos (com pequena dimensão máxima) e fibras dispersas de pequeno comprimento e de têxteis de fibras contínuas ordenadas de alta performance de vidro álcali-resistente, de carbono, de aramida ou de outros materiais (BRAMESHUBER; BROCKMANN, 2006). A principal vantagem adquirida com a formação desse compósito é a combinação da alta resistência à compressão do concreto e da alta resistência à tração das fibras com o baixo peso específico, mas algumas outras propriedades desse compósito serão estudadas nos próximos itens.

3.3.1 Têxteis

Os têxteis constituídos por fibras de alta performance, requisitadas para vários setores no cenário atual, são a principal inovação no CT. Antes de adentrar no universo dos têxteis cientificamente desenvolvidos, será feita uma breve explanação sobre a Indústria Têxtil de forma mais ampla.

A indústria têxtil transforma fibras em fios, fios em tecidos e tecidos em peças de vestuário, de mobiliário, de decoração, com aplicabilidade em diversas áreas, como medicina e construção. Há evidências da produção de têxteis desde 8000 a 7000 a.C., respectivamente na Mesopotâmia e na Turquia (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017). Segundo o mesmo autor, a indústria têxtil atual se diferencia da produção de tecidos antiga, tanto pelos processos (são em maior número e mais complexos) quanto pela matéria-prima utilizada. No passado, manipulavam-se exclusivamente as fibras naturais, como algodão, lã, linho e seda, e hoje se utilizam também

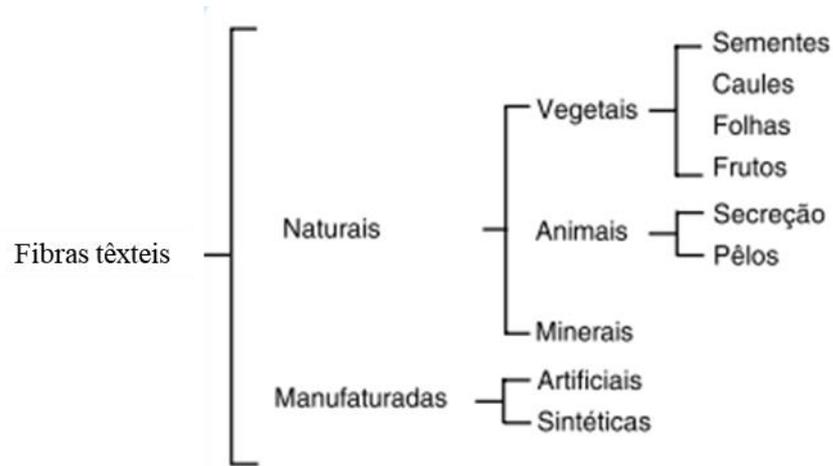
fibras manufaturadas, como a viscose, o acetato, o poliéster e o náilon. Na Figura 5, podem-se verificar as matérias-primas atuais e antigas na produção de tecidos.

Figura 5 – Matérias-primas da indústria têxtil.



(Fonte: store.textileexchange.org)

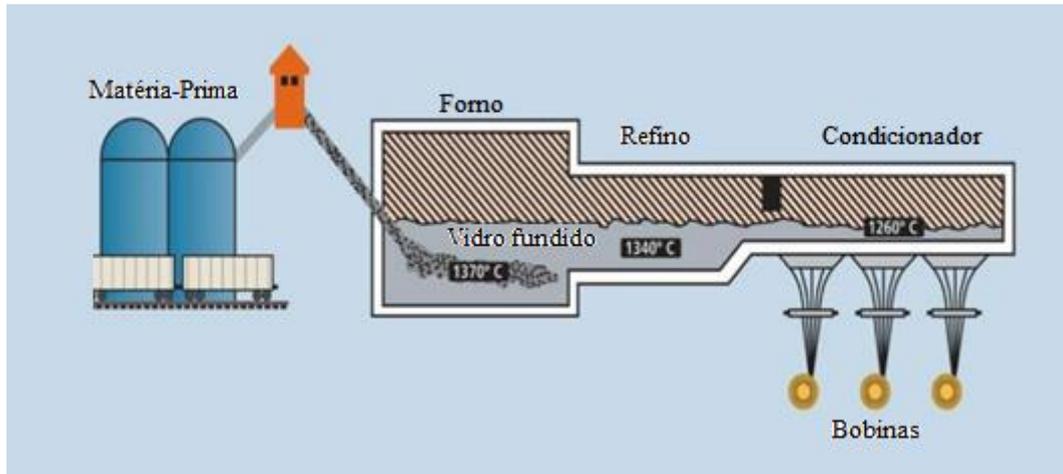
As fibras têxteis podem ser classificadas em função da origem e da constituição química. Há as fibras **naturais** – encontradas na natureza da composição que serão utilizadas – e as fibras **manufaturadas** – obtidas por algum processo químico (NBR 12744, 1992). As fibras naturais podem ser de diversos tipos e pertencer a diferentes reinos. Neste trabalho, vamos destacar as fibras manufaturadas, ou químicas, que se dividem em **artificiais** e **sintéticas**, segundo a mesma norma. As fibras artificiais “são fibras obtidas a partir de uma molécula ou macromolécula, já existente na natureza, que sofre uma transformação química e/ou mecânica” – há transformação química ou mecânica da matéria-prima natural – e as fibras sintéticas “são obtidas através de macromoléculas que precisam ser sintetizadas quimicamente” – produzidas a partir de polímeros derivados do petróleo. A Figura 6 apresenta um esquema elaborado com o intento de facilitar a compreensão sobre a classificação das fibras.

Figura 6 – Classificação das fibras têxteis.

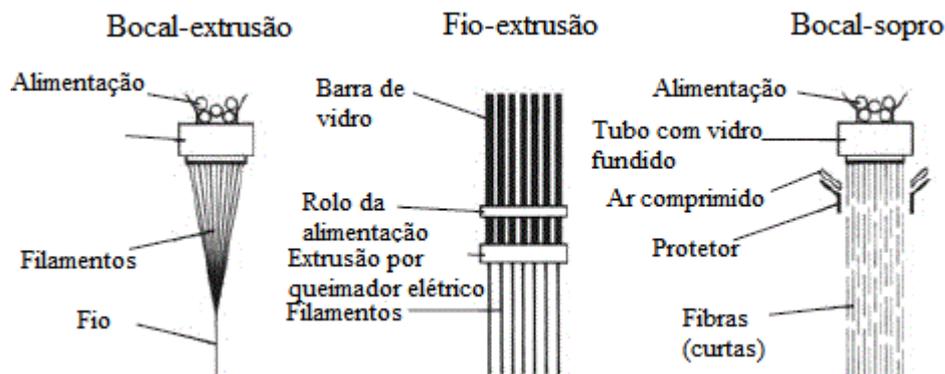
(Fonte: ABNT
NBR 12744)

As propriedades e os processos de produção dos principais têxteis empregados para produção do TRC e utilizados neste trabalho – têxteis de vidro álcali-resistente e de carbono – serão explicados nos próximos parágrafos.

As fibras de vidro são produzidas pela sílica da areia (SiO_2) que é fundida a temperaturas maiores do que $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Quando a sílica é aquecida a $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ e resfriada rapidamente, obtém-se sua estrutura atômica amorfa, conhecida como vidro. A produção das fibras de vidro (Figura 7) pode ser dividida em cinco etapas: mistura, fundição, formação da fibra, acabamento e cura/*packing*. Na mistura, pode-se utilizar somente sílica ou serem adicionados outros componentes para obter propriedades específicas, como condutividade elétrica, resistência alcalina, resistência à tração. Na fundição, um transportador pneumático leva a mistura para o forno ($1400\text{ }^{\circ}\text{C}$), o qual possui, tradicionalmente, três zonas por onde a mistura escoar: na primeira, a mistura é recebida e a fundição acontece, zona de fusão; na segunda, acontece o refino ou a homogeneização a $1370\text{ }^{\circ}\text{C}$; no terceiro, é o condicionamento, ou *forehearth*, onde há vários queimadores e abafadores, assegurando o controle da temperatura. No ponto de extração, a mistura fundida é extrusada (Figura 8), passando por vários orifícios, e é aquecida para controlar e manter a viscosidade do vidro. Jatos de água no local onde o vidro sai resfriam os filamentos que estavam a $1240\text{ }^{\circ}\text{C}$. Assim, acontece o processo de fiação e transformação do vidro fundido em filamentos. Um jato de ar em alta velocidade é direcionado aos filamentos para cortá-los, se necessário, ou os filamentos permanecem contínuos (GARDINER, 2020).

Figura 7 – Processo de produção da fibra de vidro.

(Fonte: OCV)

Figura 8 – Fiação das fibras de vidro.

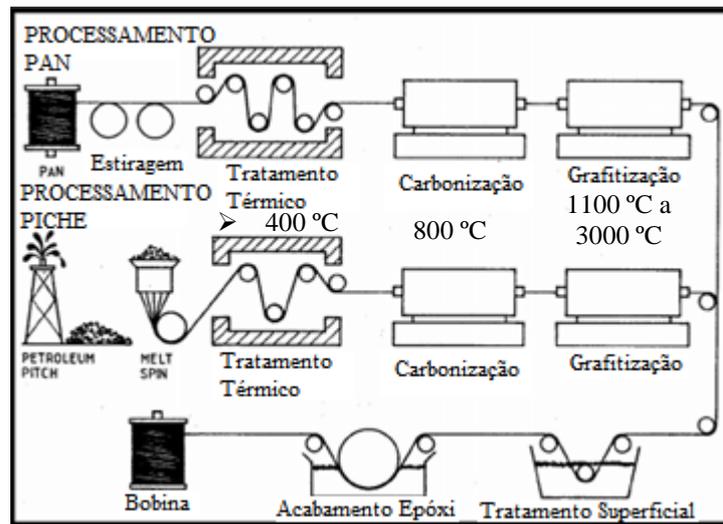
(Fonte: Texnoteblog)

A primeira fibra de carbono comercializada foi feita por Thomas Edison, no século XIX, quando o inventor submeteu a altas temperaturas fibras de algodão e bambu – basicamente, celulose, um polímero natural – e constatou o retorno, após a carbonização, ao material inicial: fibras de carbono com a mesma forma. Logo após, Edison encontrou no tungstênio uma melhor opção. A primeira fiação das fibras de carbono de alto desempenho – material com diversas vantagens, entre elas: ter baixo peso específico e alta capacidade de suportar cargas – foi desenvolvida por Roger Bacon, em 1958 (ACS, 2020).

As fibras de carbono são polímeros de grafite, um alótropo de carbono. As fibras são feitas a partir de um precursor, poliacrilato (PAN), ou piche de petróleo (Figura 9). Como aproximadamente 90% das fibras de carbono são feitas com PAN (uma fibra sintética pré-

fabricada), os processos que serão explanados são com esse precursor. No tratamento térmico, as fibras de PAN são esticadas e aquecidas para não fundir em outros processos a altas temperaturas; na carbonização, as fibras são aquecidas a 800 °C em um ambiente com oxigênio e as impurezas são removidas; na grafitação, as fibras são submetidas a temperaturas de 1100 a 3000 °C e são esticadas de 50 a 100% do seu comprimento, garantindo uma orientação cristalina preferencial; após a grafitação, as fibras têm uma superfície com baixa aderência. Por isso, tratamentos superficiais são realizados, promovendo melhores condições químicas, mecânicas de aderência e compatibilização com resinas. Os filamentos se transformam em fios contínuos e podem ser entrelaçados em tecidos, ou não, e geralmente são armazenados em bobinas (ACS, 2020).

Figura 9 - Processo produtivo da fibra de carbono.



(Fonte: Liu, 2010)

Como mencionado, as fibras foram e são bem exploradas pela humanidade. Fibras contínuas – utilizadas neste trabalho – consistem em filamentos de diâmetro de poucos micrômetros, e a relação comprimento-diâmetro tende ao infinito, pois não foram cortadas em menores comprimentos (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017). Um fio é constituído por centenas e até milhares de filamentos. Por isso, a finura do fio, indicada como *tex* (Figura 10) depende do número de filamentos, do diâmetro médio do filamento e da densidade da fibra. As fibras possuem alta tensão de ruptura e alto módulo de elasticidade, sendo bem maiores do que o material a granel, e essas propriedades apresentam-se combinadas com baixo peso específico e alta flexibilidade (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017). Fios, filamentos, cabos, tiras e

cordas são os têxteis lineares, e, além de serem classificados pelo tipo de matéria-prima, podem ser classificados pela densidade linear, torção e resistência à tração (NBR 13214, 1994 apud ABINT).

Figura 10 - Tex de um fio e de cada filamento do fio.



(Fonte: Elkágyé)

As fibras de vidro, após o processo de fiação, podem permanecer contínuas e serem enroladas em bobinas de mechas de filamentos enroladas paralelamente, sem torção, ou podem formar tecidos, obtidos pelo entrelaçamento dos fios. As fibras podem também ser picadas e armazenadas dispersas, ou em manta. Essas fibras picadas são distribuídas de maneira uniforme e aglutinadas por um ligante, compatível com resinas (Figura 11). As fibras de carbono são armazenadas em bobinas de filamentos contínuos unidos em um fio, ou em tecidos. Alguns fios possuem uma estrutura combinada com outros polímeros, por exemplo, fios de filamentos de vidro ou carbono combinados com resina epóxi, estabilizando a estrutural do têxtil, produzindo, assim, telas de têxtil.

Figura 11 – Manta, fibras dispersas, tecido e fio contínuo de vidro.

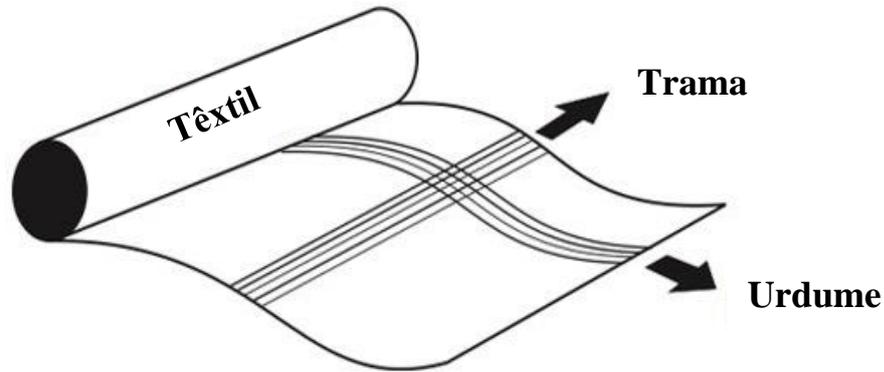


(Fonte: Scompositos)

O uso das fibras de vidro pode ser feito em processos de: pultrusão, um dos processos mais utilizados e que permite aplicar resina nos filamentos em equipamentos que as mantêm esticadas durante o tempo de cura, resultando em perfis ou outras formas que, quando endurecidas, possuem diversas aplicações; de aspersão (*spray-up*), que consiste na aplicação de fibras picadas simultaneamente com a resina em um molde e finalizando com a passagem de um rolo para acomodar as fibras no molde e retirar as bolhas de ar; de laminação, que acontece com mantas ou tecidos de fibra de vidro sobrepondo camadas e aplicando-se resina (DIPROFIBER, 2020; OWENSCORNING, 2020).

Na tecelagem, outra importante área da indústria têxtil, surge uma necessidade, a de conhecer o significado de fios de trama e fios de urdume. A Figura 12 mostra a posição de cada um dos fios no tecido.

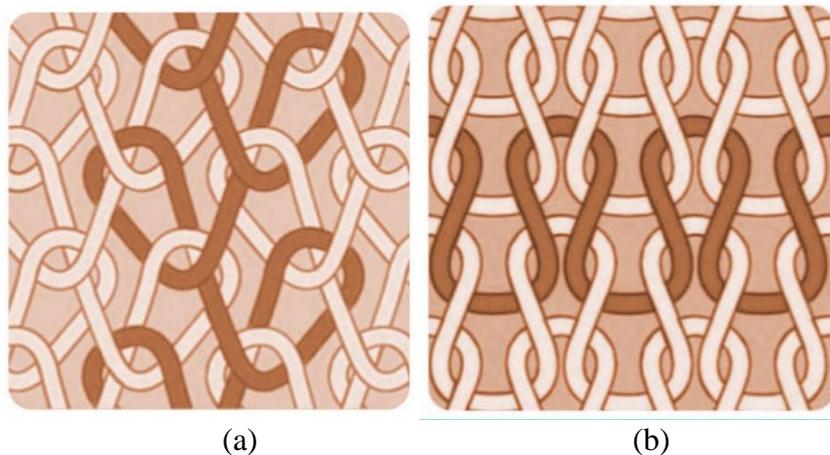
Figura 12 – Identificação dos fios no tecido.



(Fonte: nivitex.com)

Três importantes termos são destacados na tecelagem: tecidos planos, malhas e não tecidos. Segundo o site da ABINT e as normas NBR 10588, 13460, 11912, 14727: tecidos planos são resultantes do entrelaçamento de fios de trama e fios de urdume, a um ângulo aproximado de 90 °; os não tecidos são estrutura plana flexível e porosa, consolidada por processo de fricção, adesão, coesão ou a combinação destes; tecidos de malha são de dois tipos, trama ou urdume, dependendo se o têxtil é resultante do entrelaçamento de fios de trama ou de urdume, sentido da largura ou do comprimento, respectivamente, como na Figura 13 (a e b).

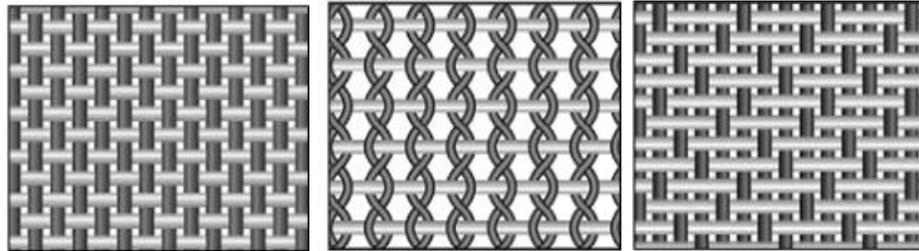
Figura 13 – (a) Malha por trama e (b) Malha por urdume.



(Fonte: adina.com.br)

Os tipos de *fabrics*, ou tecidos de malha, podem ser diferenciados por sua gramatura, densidade de fios por centímetro, ou ligamento entre os fios (tipo de trama resistente à tração), e acabamento (HEXFORCE REINFORCEMENTS, 2010). São apresentados, a seguir, na Figura 14, alguns tipos de tecidos, com diferentes tramas.

Figura 14 – Tecido plano, *leno weave*, *crowfoot*.



(Fonte: Adaptada de Hexcel, 2010)

Conforme (GRIES *et al.*, 2006), apesar da variedade de têxteis e da diversidade dos processos de fabricação, a utilização no TRC se restringe a têxteis que possuem estrutura estável, em relação ao movimento entre fios de trama e de urdume, e aberta, com espaços maiores entre fios consecutivos de urdume e fios consecutivos de trama, quando comparados a tecidos a serem impregnados por resinas. Dessa forma, nos têxteis utilizados no TRC, utilizam-se grelhas ou telas (planas, circulares) produzidas com a sobreposição de fios com ou sem pontos de fixação, *warp knits* (planas, três dimensões, circular) e os *woven*.

Na história dos materiais compósitos, a primeira fibra utilizada como reforço e que se tem registro foram as fibras de palha, utilizadas para reforçar blocos de argila, evitando a fissuração (PELED; BENTUR; MOBASHER, 2017). Atentando-se para as fibras utilizadas atualmente, as fibras de vidro foram utilizadas pela primeira vez como reforço de uma matriz de resina em 1930 (EUA). O desenvolvimento de novas fibras, como carbono e aramida, desde 1970, ocasionou o crescimento na utilização de compósitos.

Em destaque no TRC estão os têxteis de fibra de carbono, aramida e vidro álcali-resistente e também utilizados, mas de forma mais pontual, os têxteis de basalto, de polietileno e tecidos produzidos a partir de fibras naturais. Cada aplicabilidade do compósito determina o tipo de têxtil e a configuração (RAMBO, 2016). Segundo o mesmo autor, p.7,

tecidos planos reforçados em duas ou mais direções são tipicamente empregados na produção de laminados finos, ou ainda reforço/reparo de estruturas e tecidos 3D são produzidos com a finalidade de reforçar elementos estruturais.

O têxtil empregado como reforço no TRC (tipo de fibra, arranjo espacial, volume de fibras, presença de revestimento) possui grande influência nas características do compósito (RAMBO, 2016). Podem-se citar algumas propriedades requeridas às fibras utilizadas no TRC, entre elas: pequena relaxação sob carga permanente, boa e constante aderência na matriz, alta tenacidade e alongamento na ruptura, módulo de elasticidade significativamente mais alto do que o da matriz cimentícia e capacidade de manter a alcalinidade sem perder suas propriedades (fibras imersas no concreto, altamente alcalino) (GRIES *et al.*, 2006). Deve-se também garantir que a posição dos fios permanece a mesma durante o processo de produção do TRC. Jayaraman e Park (2002) destacam que métodos suplementares de fixação, como revestimento, impregnação ou inserção de uma sustentação adicional, são importantes nos têxteis utilizados para o TRC, devido à necessidade de manter os têxteis na posição onde serão solicitados. A determinação do diâmetro de um filamento, segundo os mesmos autores, é importante para a determinação de resistência à tração, a espessura dos fios dos tecidos é determinada por equipamentos que possuem orientações da legislação técnica alemã, assim como a medição da densidade do material e o comportamento da tensão/deformação do material. Além disso, outros dois requisitos importantes para que as fibras sejam usuais na construção civil são: o baixo custo e a possibilidade de produção dessas fibras em locais de fácil transporte para onde serão utilizadas.

3.3.2 Matriz

As matrizes utilizadas no TRC possuem requisitos especiais acerca da produção, das propriedades mecânicas e da durabilidade. Essa situação corrobora para a alta qualidade do TRC e sua aplicação nas construções. Destacam-se quatro importantes itens do projeto de uma matriz de TRC: consistência adequada para a penetração total da matriz nos espaços entre fios do têxtil; processo de produção utilizado; compatibilidade química com o têxtil; propriedades mecânicas requeridas do elemento de TRC (BRAMESHUBER *et al.*, 2006).

Sabe-se que as propriedades da matriz fresca são muito importantes para garantir as propriedades mecânicas planejadas para a matriz endurecida. Dessa forma, a matriz do TRC é projetada para que haja penetração total nos espaçamentos entre fios no estado fresco,

garantindo que o reforço esteja ancorado na matriz. Isso possibilita um comportamento conjunto dos materiais quando submetidos a carregamentos no estado endurecido. Na maioria das matrizes de TRC, a dimensão máxima dos agregados é de dois milímetros (*mortar*). As matrizes que são reforçadas com têxteis de pequeno espaçamento entre fios requerem maior fluidez (BRAMESHUBER *et al.*, 2006). A proporção de água e aglomerante para a produção de matrizes de TRC é entre 0,3 e 0,4, com um percentual de aglomerante de 40 a 50% do volume (MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, W., 2016).

De acordo com Mechtcherine; Schneider; Brameshuber, W., (2016), requisitos adicionais da matriz fresca do TRC acontecem devido à produção em grande escala de painéis para a qual foi necessário desenvolver matrizes com a capacidade de escoar e nivelar-se facilmente, penetrar o espaçamento entre fios de uma, ou mais, camadas têxteis e envelopar os fios. Alguns traços que preenchem os requisitos destacados possuem diâmetro de espalhamento 340 milímetros medido com um tronco de cone. Além disso, Brameshuber *et al.* (2006) destacam que, na produção industrial em série, são necessários alta resistência inicial e curto período de cura.

Algumas importantes propriedades do concreto do TRC no estado fresco são a quantidade de ar na mistura, a densidade, a trabalhabilidade e as propriedades reológicas (BRAMESHUBER *et al.*, 2006).

Os processos de produção são dependentes da composição da mistura, e entre eles, podem-se citar: laminação, placas protendidas, *spraying*, *pultrusão* (BRAMESHUBER *et al.*, 2006). Duas propriedades são importantes na aplicação do compósito por *spraying* em superfícies inclinadas ou verticais, ou de baixo para cima – caso de reparo e reforço em vigas –, isto é, a matriz precisa conferir boa estabilidade na aplicação e boa aderência ao substrato (MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, W., 2016).

A tendência é que têxteis com maior espaçamento entre fios sejam mais frequentes no TRC e, com isso, o diâmetro máximo dos agregados permitido na matriz é maior. Isso acontece porque há uma maior área para penetração da matriz nas aberturas do têxtil. Dessa forma, o concreto do TRC aproxima-se do concreto convencional utilizado no concreto armado. Contudo, destacam-se duas importantes diferenças: na matriz do TRC, a alcalinidade da matriz do concreto convencional, fundamental para a proteção da armadura de contra a corrosão, torna a matriz extremamente agressiva ao reforço de vidro, basalto e revestimentos poliméricos das

fibras de vidro, basalto e carbono. Por isso, a mudança da matriz deve acontecer considerando os requisitos que a tornam eficiente para cada tipo de reforço (MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, W., 2016).

Como mencionado, há um alto teor de cimento nas matrizes do TRC. Isso é necessário para que ocorra a aderência entre os filamentos e a matriz e para que a trabalhabilidade da mistura fresca atenda aos requisitos para a produção de elementos de TRC (MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, W., 2016). O aglomerante utilizado depende das características que se deseja para a matriz, e o percentual de aglomerante na mistura é alto. Em muitos casos, são utilizadas matrizes com base mineral, como o Cimento Portland, adições (cinza volante, metacaulim e sílica fume) e aditivos já consolidados, como os superplastificantes. Contudo, ressalta-se o uso de aglomerantes alternativos, como cimentos ricos em aluminatos de cálcio, por exemplo, que são utilizados para melhorar o comportamento do compósito a altas temperaturas. Além disso, é muito comum o uso de polímeros modificados e de fibras (curtas) dispersas na matriz do TRC (BRAMESHUBER *et al.*, 2006).

Nos dias atuais a tecnologia do cimento está bem ligada às adições, principalmente de pozolanas, que, além de ter o papel de *filler*, reage com o hidróxido de cálcio e diminui a alcalinidade da matriz, processo benéfico aos reforços não metálicos. Ainda assim, alguns cuidados devem ser tomados com o uso das pozolanas que em concentrações baixas, tem baixa demanda do conjunto cimento e pozolana, devido ao efeito de *filler*. Contudo, em concentrações acima de 5% da massa de cimento, essa situação se inverte, causando o aumento da demanda de água (MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, W., 2016).

As matrizes também devem ser pensadas respeitando-se a compatibilidade química dos materiais. Sendo assim, as pozolanas também são utilizadas como um agente de estabilidade química da matriz do TRC, principalmente a sílica fume, visto que, com a substituição de parte do Cimento Portland por essa pozolana, há a reação do hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$ com o SiO_2 , formando silicatos de cálcio hidratado. Contudo, devem-se cuidar os níveis de sílica fume nessa mistura, tendo em vista que altos percentuais de sílica fume impedem uma consistência fluida, necessária para a matriz de TRC (BRAMESHUBER *et al.*, 2006).

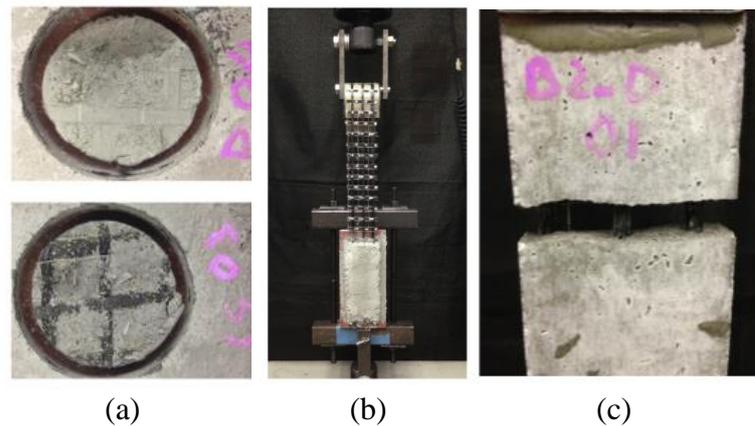
Os autores salientam que, em geral, a resistência à tração e a compressão, o módulo de elasticidade e a retração são as propriedades analisadas na matriz de TRC. Porém, algumas

outras propriedades mecânicas de uma matriz no estado endurecido são citadas, como a carbonatação, a alcalinidade nos poros da matriz e a resistência à fratura. Em alguns casos, é necessária uma alta resistência à compressão da matriz. Um exemplo disso é a zona comprida dos perfis I e U. Por isso, o projeto da matriz deve levar em consideração a aplicação do TRC. Ademais, a retração e a fluência da matriz a ser utilizada são fatores importantes para a durabilidade do compósito. Alguns dos requisitos das matrizes de TRC são conflitantes. Por isso, é necessário analisar as melhores alternativas para o estado fresco, o estado endurecido e a durabilidade (MECHTCHERINE; SCHNEIDER; BRAMESHUBER, 2016).

3.3.3 Ligação

O estudo da ligação entre os constituintes do TRC inicia pelo conhecimento acerca dos materiais base. Os fios da malha têxtil são constituídos por filamentos, e estes podem ser externos ou internos. Os filamentos externos estão conectados com a matriz cimentícia, e os internos não possuem contato direto com a matriz. Quando os fios são impregnados com resina na sua produção, os filamentos encontram-se completamente juntos (REINHARDT *et al.*, 2006). Os principais testes para conferir a ligação entre os têxteis e a matriz são: arrancamento ou *pull-off*, cisalhamento duplo, ou *double-shear*, e ensaio de tração (Figura 15 a, b, c). Todos os ensaios são realizados com os fios na matriz cimentícia (DONNINI; CORINALDESI; NANNI, 2016). Nos dois últimos ensaios citados, o modo de ruptura mais frequente é o deslizamento do têxtil na matriz, sendo que no ensaio de cisalhamento duplo, também é comum a ruptura da fibra.

Figura 15 – (a) Corpo de prova do ensaio de arrancamento, (b) Ensaio de cisalhamento duplo e (c) Corpo de prova do ensaio de tração direta.

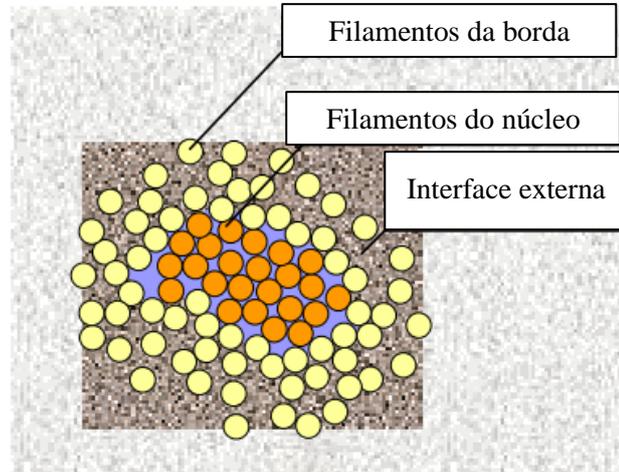


(Fonte: Donnini, Corinaldesi, Nanni, 2016)

Como todo material compósito, as propriedades dos materiais constituintes do TRC analisadas somente de forma isolada (material não estando no compósito) não determinam o comportamento da união desses materiais, devendo-se levar em conta a ligação entre eles. Segundo Donnini, Corinaldesi, Nanni (2016), todos os compósitos consistem em dois ou mais materiais e uma região de interface. O mesmo autor destaca algumas informações fundamentais em relação às condições de ligação entre os materiais de um compósito. Pode-se dizer que se essa ligação for fraca, tem-se um compósito resultante dúctil, e se for forte, o resultado é um compósito frágil.

No TRC, os autores Reinhardt *et al.* (2006) designam que a condição de ligação se difere pela seção transversal do fio de têxtil não ser homogênea – a condição de ligação dos filamentos externos é diretamente no concreto –, ao passo que nos filamentos internos, ocorre de forma indireta devido à separação da matriz cimentícia pelos filamentos externos. Constata-se tal situação na Figura 16.

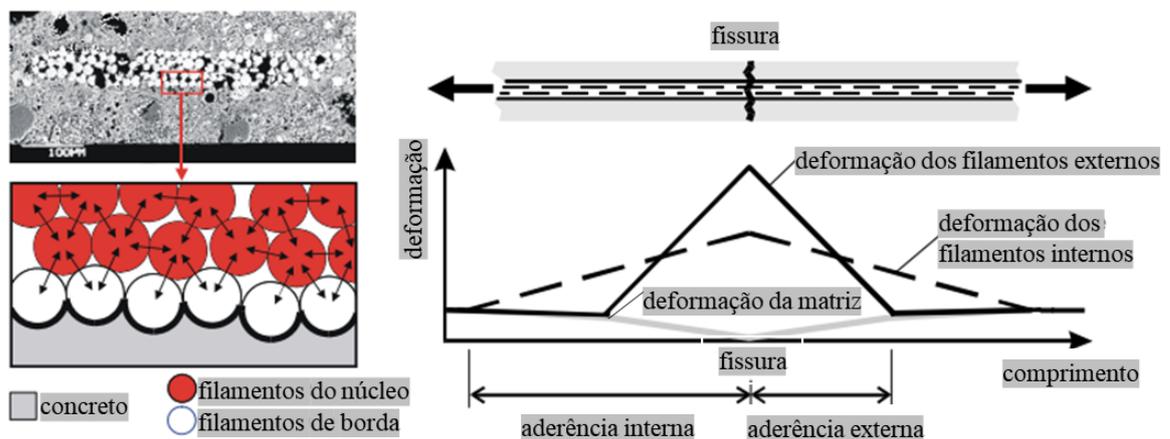
Figura 16 – Filamentos externos e internos de um fio de têxtil não impregnado com resina em uma matriz cimentícia.



(Fonte: Reinhardt *et al.*, 2006)

Não sendo a seção transversal do fio do têxtil uniforme, ela possui diferentes condições de ligação no TRC. Assim, ocorrendo uma fissura na matriz reforçada com têxtil submetida a um momento fletor, a distribuição de tensões resultante é não uniforme. Isso é exemplificado pela Figura 17.

Figura 17 – Distribuição de tensões no fio do têxtil de TRC.

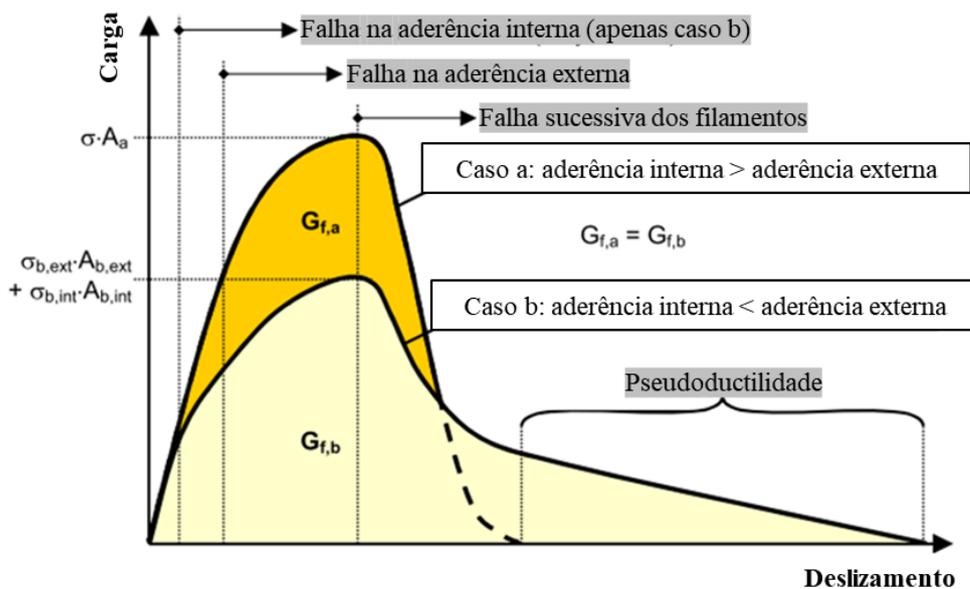


(Fonte: Reinhardt *et al.*, 2006)

No diagrama carga *versus* deslizamento da Figura 18, a menor curva representa a situação em que há dois tipos de ligação em um mesmo fio – filamentos internos sem vínculo direto com a

matriz e os externos com vínculo direto com o concreto –, e a curva possui menor amplitude. Porém, constata-se uma longa cauda devido à alta capacidade de deslizamento dos fios internos. Essa situação é chamada de pseudoductilidade. No caso representado pela maior curva, têm-se os filamentos impregnados por resina, formando uma seção monolítica (Figura 19), e o vínculo entre os filamentos (internos e externos) é mais forte quando se compara com o fio não impregnado. Constata-se, portanto, maior resistência ao deslizamento e não há pseudoductilidade. Assim, o tratamento dado aos fios de um têxtil influi na aderência entre os próprios filamentos e entre os filamentos e a matriz. Isso implica comportamentos diversos de uma matriz reforçada com o têxtil quando ela é submetida, por exemplo, a carregamento de tração.

Figura 18 – Diagrama carga *versus* deslizamento



(Fonte: Reinhardt *et al.*, 2006)

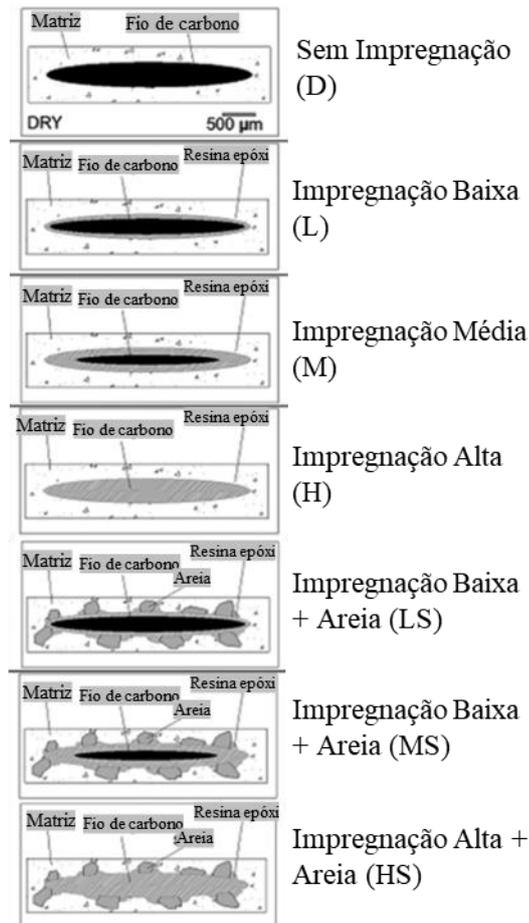
Figura 19 – Seção monolítica de um fio de têxtil impregnado com resina.



(Fonte: Reinhardt *et al.*, 2006)

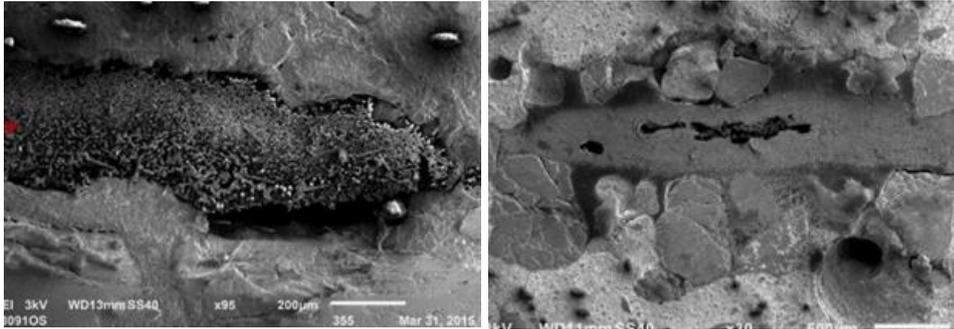
No trabalho de Donnini, Corinaldesi, Nanni (2016), foram executados diversos testes em FRCM. Nesses testes, foram estudados diferentes tipos e quantidades de revestimentos orgânicos para tecidos de carbono. O objetivo do estudo foi analisar como os diferentes revestimentos afetam a condição de ligação entre o tecido e a matriz. Os ensaios realizados foram: tração direta, arrancamento e duplo cisalhamento. Foram utilizados diferentes níveis de impregnação do tecido com uma resina flexível, usando-se areia como variável para os níveis de impregnação (Figura 20), e foram ensaiadas três diferentes matrizes cimentícias (com resistência à compressão de 15, 30 e 45 MPa).

Figura 20 – Seção do tecido de carbono em relação à impregnação.



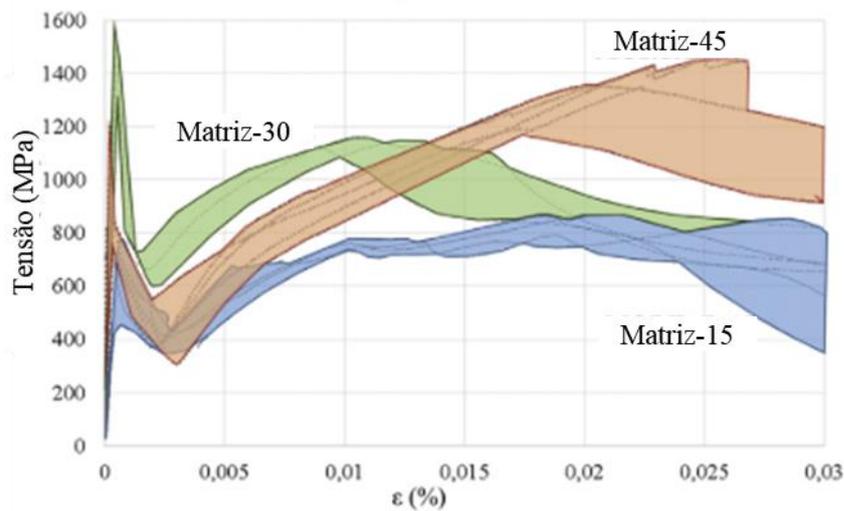
(Fonte: Donnini, Corinaldesi, Nanni, 2016)

Nos ensaios de tração direta do trabalho em questão, com o aumento do nível de impregnação dos fios (sem resina a completamente impregnados), na maioria dos casos, houve um aumento da carga última de ruptura dos elementos de TRC, mesmo sem a utilização de areia. Isso acontece, pois, na situação sem impregnação, apenas os filamentos externos dos fios – em contato com a matriz – suportam a carga aplicada, visto que os filamentos internos, quando solicitados, deslizam facilmente pela baixa aderência com os fios externos (pouca fricção). Esse fenômeno foi explicado a partir de fotos da seção transversal dos FRCM com tecidos sem impregnação e nível médio de impregnação (DONNINI; CORINALDESI; NANNI, 2016). Pode-se verificar, na Figura 21, uma maior uniformidade na ligação entre tecido e matriz.

Figura 21 – Seção transversal FRCM.

(Fonte: Donnini, Corinaldesi, Nanni, 2016)

Outro importante comportamento constatado nos ensaios de tração direta é que a matriz influencia diretamente o desempenho do FRCM no início dos ensaios, zona linear inicial antes da fissuração da matriz (Figura 22). Após a primeira fissura, a carga cai (devido à pequena quantidade de tecido, em relação à seção de concreto, que não é capaz de absorver a energia da primeira fissura). Os autores destacam que quanto maior a resistência à tração da matriz, maior é a queda da carga na primeira fissura (DONNINI; CORINALDESI; NANNI, 2016).

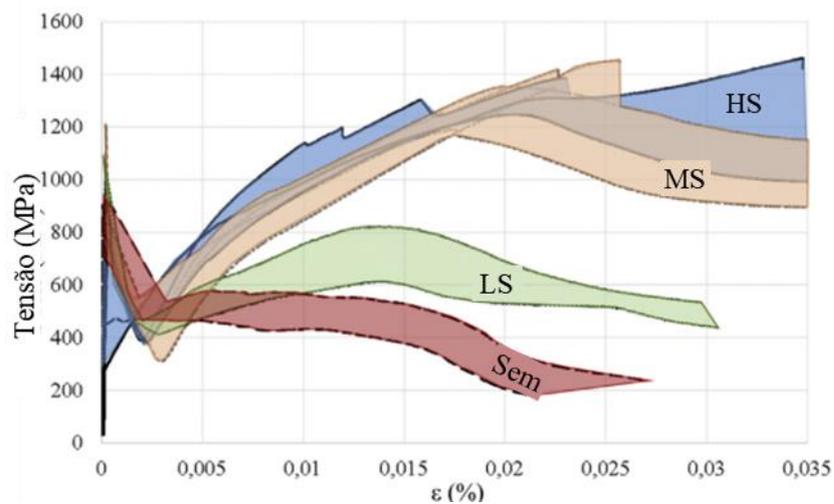
Figura 22 – Ensaio de tração direta: comparação entre diferentes matrizes.

(Fonte: Donnini, Corinaldesi, Nanni, 2016)

Na Figura 23, após a primeira fissura, pode-se notar que há uma atenuação – *softening* – na curva do tecido não impregnado, e um enrijecimento – *hardening* – do tecido impregnado. A inclinação da curva e a carga última de ruptura aumentam quando há impregnação média ou alta do tecido e há aumento na pseudoductilidade. O tipo de ruptura mais frequente em FRCM

é o escorregamento dos fios na matriz, contudo, a impregnação com resina epóxy flexível e a adição de areia como revestimento dos fios melhoram a ligação entre o tecido e a matriz, levando as fibras à ruptura e minimizando o deslizamento na matriz (DONNINI; CORINALDESI; NANNI, 2016).

Figura 23 – Ensaio de tração direta dos diferentes níveis de impregnação.



(Fonte: Donnini, Corinaldesi, Nanni, 2016)

Nos ensaios de arrancamento, ou *pull off*, o modo predominante de ruptura foi na interface matriz-tecido. Os diferentes tipos de revestimento não mudaram o modo de ruptura. Em alguns casos, altos níveis de impregnação tiveram pior comportamento, porque o tecido atuou como uma interrupção na ligação de duas camadas de matriz (DONNINI; CORINALDESI; NANNI, 2016).

Os revestimentos propostos pelos autores obtiveram bons resultados nos ensaios de tração direta e cisalhamento duplo. Todavia, é crucial salientar que resinas epóxy rígidas podem ter um impacto negativo, devido às dificuldades de aplicação e por não ter um bom desempenho em relação à resistência ao fogo.

3.3.4 Durabilidade

Sabe-se que o prolongamento da vida útil das estruturas deve envolver ações multidisciplinares e ser resultado de ações coordenadas e realizadas em todas as etapas do processo construtivo:

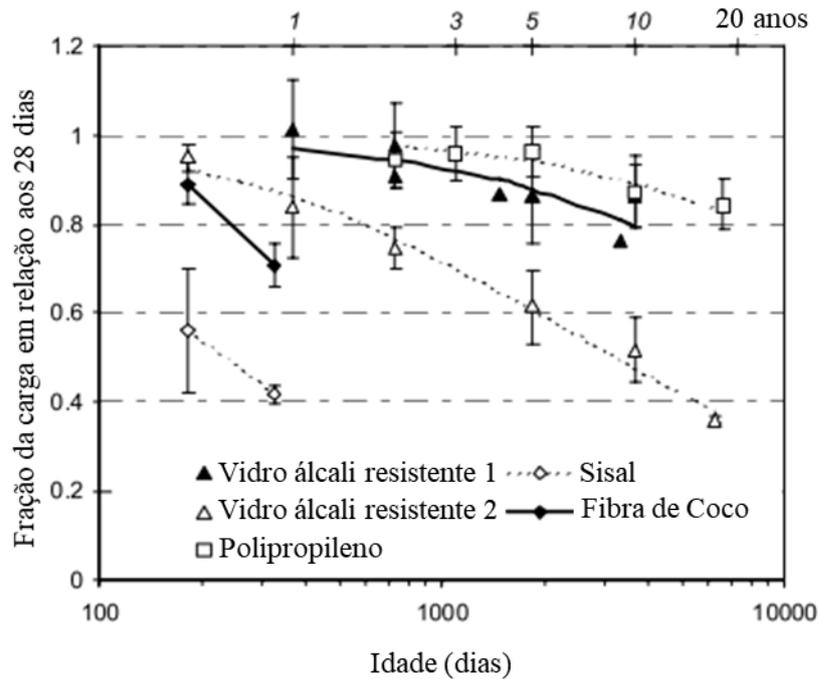
concepção, planejamento, projeto, fabricação de materiais e componentes, execução propriamente dita e, sobretudo, durante a etapa de uso da estrutura.

Quando se discute a durabilidade dos concretos reforçados com armadura não metálica se observam algumas lacunas, pois consiste em um material aplicado há menos de 20 anos na construção civil e ainda com muitos estudos determinantes sendo realizados. Brameshuber *et al.*, 2006, destaca, acerca da durabilidade do FRC, aspectos determinantes: a estabilidade química, as mudanças microestruturais, o comportamento sob baixas e altas temperaturas, o comportamento sob impactos e outras demandas externas que interfiram na estrutura e o envelhecimento em si (métodos de aceleração do envelhecimento de corpos de prova).

Sendo já complexo o estudo das matrizes isoladas de FRC, quando se estuda o compósito (matriz e fibra), essa complexidade é aumentada. As propriedades do FRC variam no ciclo de vida: a tensão de tração na flexão, a tenacidade e a deformação diminuem consideravelmente (PURNELL *et al.*, 2006). Segundo os mesmos autores, isso acontece devido à falha na interface matriz-fibra, onde a matriz não penetrou completamente. Por isso, descarta-se a ideia de aproximar o comportamento do FRC do FRP pela diferença que, no FRP, se consideram as fibras encapsuladas pela resina (matriz).

Cada combinação matriz-fibra tem um comportamento em relação ao tempo. Por isso, a durabilidade de compósitos deve ser cuidadosamente analisada ao surgirem novas combinações. A Figura 24 mostra, em termos de resistência à flexão aos 28 dias, como se comportam cinco formulações de FRC exposto ao longo de 20 anos a um ambiente externo. Foram utilizadas fibras de vidro álcali-resistentes, polipropileno, sisal e fibra de coco em matriz de *Ordinary Portland Cement* (OPC) (PURNELL *et al.*, 2006). Ainda na Figura 24, pode-se notar que são significativas as perdas de resistência à flexão no tempo e que, para cada formulação, essa perda tem um nível, sendo que cada sistema deve ser individualmente estudado. Contudo, no estudo, o melhor comportamento (menor perda de resistência) foi do FRC com fibra de polipropileno, e o pior foi das fibras naturais (sisal e coco).

Figura 24 – Gráfico resistência *versus* tempo de FRC.



(Fonte: Purnell *et al.*, 2006)

Acredita-se que as fibras de carbono sejam imunes a álcali – deterioração, mas os dados sobre a durabilidade das fibras de carbono utilizadas como reforço de matrizes cimentícias em estruturas reais ainda são escassos (PURNELL *et al.*, 2006).

As causas da perda de propriedade das fibras, independentemente do tipo de fibra, estão divididas em duas categorias: corrosão e hidratação continuada da pasta de cimento (PURNELL *et al.*, 2006). Ainda segundo os mesmos autores, a matéria-prima do cimento é a argila e o xisto, os quais possuem impurezas álcali-metálicas; essa matéria-prima é transformada a altas temperaturas em *clinker*, o qual é moído e misturado com adições, transformando-se em cimento. Durante a mistura do concreto, também segundo Purnell *et al.* (2006), esses álcalis altamente solúveis são liberados aumentando o PH da mistura; com o endurecimento do cimento, os álcalis são concentrados nos poros da solução, e essa situação é prejudicial a algumas fibras. Por isso, a perda de resistência de FRC por corrosão da fibra é um importante mecanismo a ser considerado. Os autores destacam que isso também deve ser considerado para fibras que supostamente seriam imunes ao ataque álcali, como as de carbono, já que o tempo de vida dos componentes FRC é maior do que do tempo de exposição das primeiras aplicações estudadas (há duas décadas).

Em segundo lugar, segundo Purnell *et al.* (2006), a hidratação continuada da matriz também tem potencial de causar a degradação do compósito. Devido à contínua disponibilidade de água, o cimento residual não hidratado continuará hidratando, e a fase hidratada continuará lentamente a desenvolver-se, já que contém fases metaestáveis. Embora essa situação envolva uma pequena parcela da pasta de cimento, os efeitos podem ser profundos na interação matriz-fibra. A hidratação continuada tende a tornar mais densa a interface matriz-fibra. Logo depois da moldagem, a zona de interface é porosa e fraca, o que é um ponto benéfico para o compósito, pois as fissuras desviarão através dessa zona fraca. Com o envelhecimento da matriz, a zona de interface aumenta sua resistência e rigidez, pela redução da porosidade causada pela hidratação continuada que preenche os espaços nessa zona, causando maior tensão nos filamentos.

A ligação entre os filamentos externos de um fio vai aumentar conforme a zona de interface se torna mais densa pela hidratação continuada. Contudo, muitos FRCs são projetados para que a falha aconteça por deslizamento da fibra na matriz, tendo maior tenacidade do que pela ruptura desta. À medida que se aumenta a ligação da fibra na matriz, a falha do compósito por ruptura da fibra torna-se mais provável e, apesar da resistência máxima obtida possivelmente ser maior, a tenacidade será menor. Nos FRCs com pouca idade, há áreas onde a matriz não preenche completamente os fios, sendo que os filamentos internos, pela interação uns com os outros, conferem tenacidade ao sistema. Contudo, com o envelhecimento do compósito, alguns produtos da hidratação continuada impedem essa interação entre filamentos, e a tenacidade pode ser comprometida (PURNELL *et al.*, 2006).

Devido à falta de dados acerca do comportamento do FRC ao longo do tempo, uma das alternativas que os pesquisadores utilizam para comprovar as supostas melhorias é a aceleração do envelhecimento. Purnell *et al.* (2006), por exemplo, ressaltam dois métodos de aceleração do envelhecimento: em água quente e cíclico. Os processos são descritos nos trabalhos dos autores e categorizados como satisfatórios (cíclicos) ou preditivos (em água quente), dependendo se interferem ou não no comportamento ao longo do tempo em longo prazo.

Os autores Purnell *et al.* (2006) ainda destacam que abordagens que visam aumentar a durabilidade do FRC envolvem tanto melhorar a resistência das fibras contra o ataque químico quanto utilizar uma matriz modificada que seja menos prejudicial às fibras (menos alcalina ou com reduzida precipitação de produtos de hidratação na interface matriz-fibra).

3.4 REFORÇO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE CONCRETO ARMADO COM CONCRETO TÊXTIL

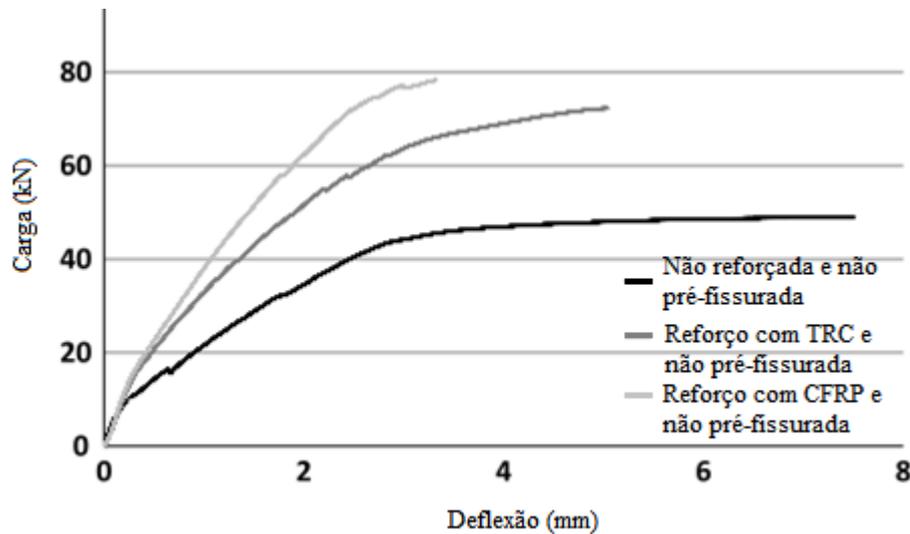
O uso dos sistemas de reforço e reparo estrutural se desenvolveu muito com as técnicas construtivas, as quais visam ao melhor aproveitamento das estruturas existentes em detrimento da construção de novas. Uma das técnicas consolidadas é o reforço de estruturas com os FRPs, já bem conhecida por suas propriedades mecânicas e por sua facilidade de aplicação. Contudo, o uso de resinas poliméricas e a utilização de grandes quantidades de carbono são desfavoráveis em relação aos impactos causados no meio ambiente (VERBRUGGEN; TYSMANS; WASTIELS, 2014). Tais características – o alto custo desse sistema de reforço e o mau desempenho das resinas a altas temperaturas – possibilitaram que emergissem novos sistemas de reparo e reforço de elementos estruturais. Os compósitos não deixaram de ser os materiais mais requeridos para as intervenções em estruturas existentes, e as fibras de alta performance também continuaram em foco, mas a matriz a ser reforçada passou a ser a cimentícia.

Há diversos estudos comparando a utilização de CFRP e de TRC como reforço de elementos estruturais. Verbrugen, Tysmans e Wastiels (2014) e Verbrugen *et al.* (2014) realizaram experimentos visando à comparação entre o comportamento, principalmente a fissuração na flexão, das duas técnicas de reforço. Nos dois trabalhos, foram realizados ensaios com vigas sem reforço e vigas reforçadas com TRC e CFRP, bem como ensaiadas vigas reforçadas pré-fissuradas e reforçadas não fissuradas.

Os têxteis empregados em TRC são geralmente de malha aberta, ou seja, o percentual de fibras está entre 2 e 5%. Nos trabalhos em questão, os autores usam um percentual de fibras mais alto: uma fração de 20% do volume da mistura em fibra foi utilizada por Verbrugen, Tysmans e Wastiels (2014); Verbrugen *et al.* (2014) utilizaram 25% do volume da mistura de fibras, adaptando as técnicas de produção e a matriz cimentícia. Foram empregados altos teores de fibras para viabilizar a comparação do reforço de TRC com o de CFRP. Os autores salientam que cada alteração no material empregado no TRC apresenta diferenças nas propriedades do compósito, como é o caso do alto teor de fibras, que está ligado à retenção da rigidez no estado anterior à fissuração (Figura 25), bem como à maior rigidez após a fissuração nos ensaios de flexão (VERBRUGGEN; TYSMANS; WASTIELS, 2014). Outra importante informação em

relação aos ensaios dos pesquisadores foi que a maior rigidez pós-fissuras é advinda do reforço com CFRP.

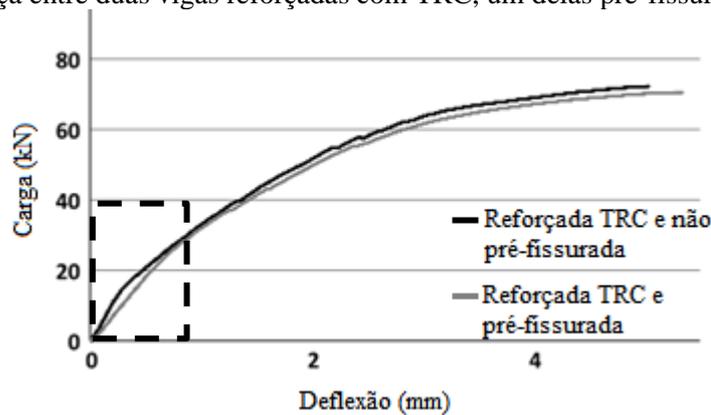
Figura 25 – Retenção da rigidez inicial das vigas reforçadas com TRC e CFRP.



(Fonte: Verbruggen, Tysmans e Wastiels, 2014)

Muitos estudos envolvem a aplicação de uma camada de TRC em um elemento de concreto armado íntegro, e sabe-se que há uma melhora no comportamento à tração dos elementos (REMY; WASTIELS, 2008). Porém, além dessas constatações, surgiram dúvidas quanto ao reforço de elementos estruturais reais, com a superfície de concreto fissurada e com o aço tendo sido submetido a uma tensão prévia. Por isso, as conclusões sobre a comparação de vigas reforçadas pré-fissuradas ou não são importantes e dão respaldo aos estudos realizados até o momento e a futuros estudos realizados com elementos não fissurados. A pré-fissuração não influencia o comportamento geral das vigas reforçadas com TRC (não afeta tipo de ruptura, carga última, número total de fissuras e espessura das fissuras), segundo os autores Verbruggen, Tysmans e Wastiels (2014) e Verbruggen *et al.* (2014). A pré-fissuração anterior ao reforço das vigas, ainda conforme os autores, apresentou uma única diferença no instante da reabertura das fissuras existentes, resultando em uma perda da rigidez inicial da viga (antes do início da fissuração), apresentada pelo gráfico na Figura 26. Portanto, destaca-se a grande valia dos estudos em vigas íntegras reforçadas sem terem sido submetidas a uma pré-fissuração.

Figura 26 – Diferença entre duas vigas reforçadas com TRC, um delas pré-fissurada, e outra, não.

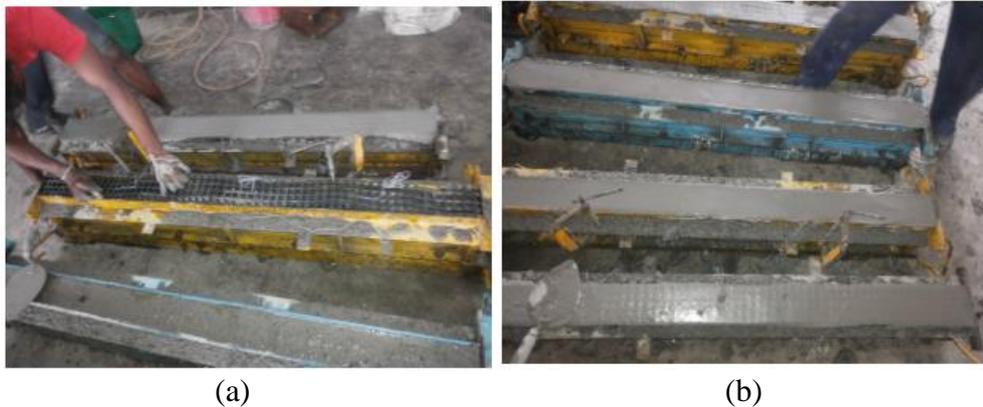


(Fonte: Verbruggen, Tysmans e Wastiels, 2014)

A matriz cimentícia empregada nos três trabalhos citados foi *Inorganic Phosphate Cement* (IPC) – cimento desenvolvido pela Universidade Livre de Bruxelas –, que é chamado de comercialmente de *Vubonite*, e os têxteis utilizados nos TRCs são de fibras de vidro álcálistes. O IPC é constituído por um componente líquido: o fosfato inorgânico, e um componente sólido: silicato de cálcio, que resultam em um cimento com pH neutro após o endurecimento, evitando o ataque às fibras de vidro (REMY; WASTIELS, 2008).

O TRC como reforço apresenta algumas características, entre elas, a já citada retenção da rigidez anterior à fissuração e aumento da resistência à tração. Além disso, após a fissuração, as espessuras das fissuras são menores e com menor espaçamento, o que resulta na melhora da capacidade da viga em suportar esforços após o surgimento dessas fissuras (GOPINATH *et al.*, 2016). Por isso, muitos autores ressaltam a melhora no comportamento no estado limite de serviço e durabilidade das estruturas reforçadas com TRC. Gopinath *et al.* (2016) realizaram um trabalho experimental, onde foram reforçadas vigas de concreto armado com TRC de fibras de vidro álcali-resistentes. As vigas desse estudo são mostradas na Figura 27 (a e b).

Figura 27 – (a) Tira de têxtil sendo posicionada na camada de reforço da viga e (b) Vigas com o reforço de TRC fresco.



(Fonte: Gopinath *et al.*, 2016)

No trabalho dos autores Gopinath *et al.* (2016), as vigas (com dimensões de 1500 x 200 x 100 mm) e o reforço foram curados por 28 dias. O estudo ainda contou com duas vigas de controle, não reforçadas. A fração do volume de têxtil utilizada junto com o número de camadas de têxtil e espessura das camadas de compósito de cada viga são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Fração do volume de fibras, número de camadas de têxtil e espessura da camada de reforço,.

Identificação do corpo de prova	Cobrimento (mm)	Número de camadas de tecido	Fração do volume de tecido (%)
T1	15	6	0.39
T2	15	8	0.53
T3	25	6	0.25
T4	25	8	0.31

(Fonte: Gopinath *et al.*, 2016)

A armadura de aço das vigas, de Gopinath *et al.* (2016), são duas barras de 10 milímetros de diâmetro para a zona comprimida e outras duas barras iguais para a zona tracionada. Para o esforço cortante, foram utilizados estribos de 6 milímetros de diâmetro espaçados de centro a centro por 10 milímetros. A velocidade de ensaio utilizada foi de 0,5 mm/min, e o rompimento aconteceu em um atuador hidráulico. *Strain gauges* foram colados na superfície do concreto, no têxtil e na superfície do reforço, e as vigas foram pintadas de branco antes da ruptura para traçar as fissuras. A flecha do centro do vão foi medida por um LVDT. Os dados de deformação,

a carga e o deslocamento foram registrados e armazenados automaticamente por um *data logger* (GOPINATH *et al.*, 2016). A Tabela 2 mostra os resultados de carga de fissuração, de abertura de fissuras e de ruptura de cada viga, e o gráfico da Figura 28 mostra carga *versus* flecha das vigas T2, T3 e T4.

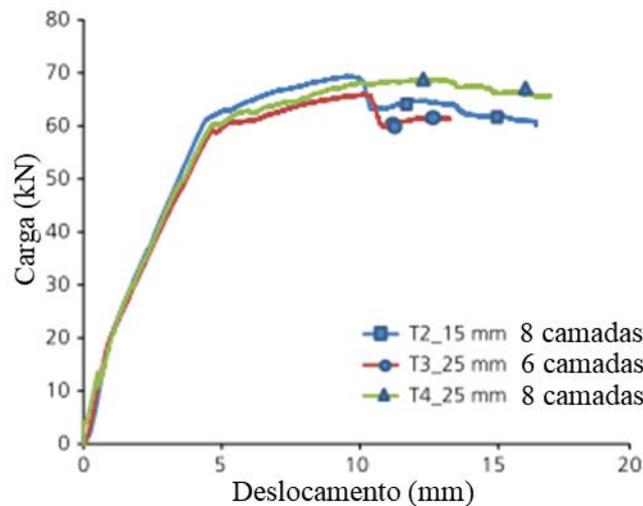
Tabela 2 – Cargas de fissuração, abertura de fissuras e de ruptura dos experimentos,.

Vigas	P_{cr} : kN	P_y : kN	P_u : kN
T1	26.21	60.65	67.78
T2	28.85	62.83	70.03
T3	30.7	61.74	67.88
T4	30.0	59.88	69.89

Resultados dos ensaios

(Fonte: Gopinath *et al.*, 2016)

Figura 28 – Gráfico carga *versus* deslocamento das vigas,.



(Fonte: Gopinath *et al.*, 2016)

As vigas T1 e T2 – com as maiores frações do volume de fibras 0,39% (6 camadas de têxtil) e 0,53% (8 camadas de têxtil), respectivamente – falharam por escoamento do aço, seguida por ruptura do têxtil e, por fim, ruptura do concreto. Em duas vigas, T3 e T4 – com as menores frações do volume de fibras, respectivamente 0,246% (6 camadas de têxtil) e 0,31% (8 camadas de têxtil) –, a ruptura do têxtil não ocorreu, e a falha aconteceu por esmagamento do concreto. Nesse trabalho, também se constatou a menor espessura total de fissuras nas vigas reforçadas

quando comparada às vigas de controle, o que já foi apresentado por outros autores. Sobre a fração de volume de fibras, Gopinath *et al.* (2016) relatam que o acréscimo de carga nas vigas com maiores frações de fibras foi insignificante do ponto de vista estrutural, o que prova que as frações de volume utilizadas não foram suficientes para a análise do aumento das cargas últimas nos experimentos.

Outro efeito analisado por Gopinath *et al.* (2016) foi o da influência da espessura das camadas de TRC. O estudo delimitou que a espessura da camada possui influência no comportamento dúctil das vigas de concreto armado. Os autores elaboraram a Tabela 3, que apresenta o índice de ductilidade μ_{Δ} – relação entre flecha na carga última Δ_u e na carga de escoamento Δ_y – e o incremento de ductilidade em relação à viga-testemunho, que apresentou um índice (μ_{Δ}) de 1,849. O estudo constatou que a ductilidade das vigas de concreto armado reforçadas com TRC é diretamente afetada pelo volume de fibras utilizadas na camada de reforço – quanto maior, mais dúctil será a ruptura das vigas. As vigas com maiores frações do volume de têxtil, T2 e T4, tiveram melhor comportamento em relação à ductilidade do que as vigas T1 e T3.

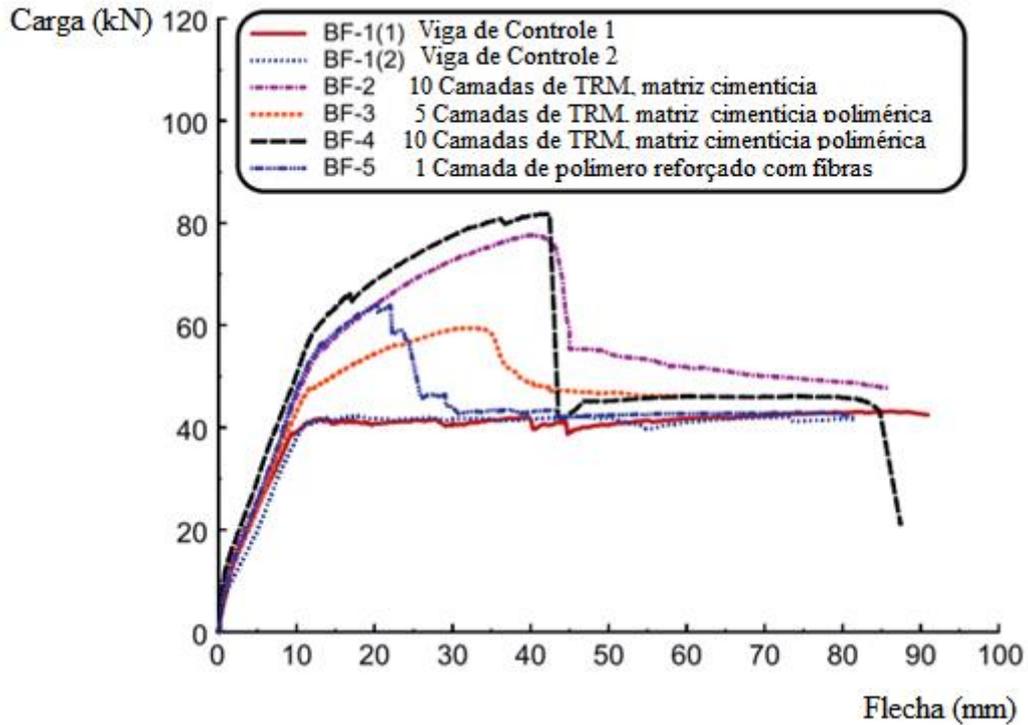
Tabela 3 – Ductilidade das vigas reforçadas, de.

Vigas	Δ_u : mm	Δ_y : mm	μ_{Δ}	Incremento de ductilidade (%)
T1	14.121	7.402	1.907	10.936
T2	10.541	4.137	2.548	48.225
T3	10.552	6.142	1.718	5.759
T4	14.353	5.689	2.523	8.144

(Fonte: Gopinath *et al.*, 2016)

Outros trabalhos experimentais que contemplam o uso de TRC como reforço de elementos de concreto armado obtiveram importantes características do comportamento desse sistema de reforço estrutural, como o de Elsanadedy *et al.* (2013). No trabalho citado, foram desenvolvidos ensaios que resultaram no gráfico da Figura 29.

Figura 29 – Gráfico resultante dos ensaios de flexão nas vigas.



(Fonte: Elsanadedy *et al.*, 2013)

O gráfico apresenta o comportamento de duas vigas de controle, não reforçadas, três vigas reforçadas com TRM e uma viga reforçada com FRP. É importante destacar que as vigas sem reforço tiveram uma ruptura padrão de vigas subdimensionadas com uma trinca no centro do vão e com modo de ruptura final por esmagamento do concreto (Figura 30). A carga média de ruptura das vigas foi de 42,75 kN, com um índice de ductilidade de 9,48 (ELSANADEDY *et al.*, 2013).

Figura 30 – Viga rompida, sem reforço externo.



(Fonte: Elsanadedy *et al.*, 2013)

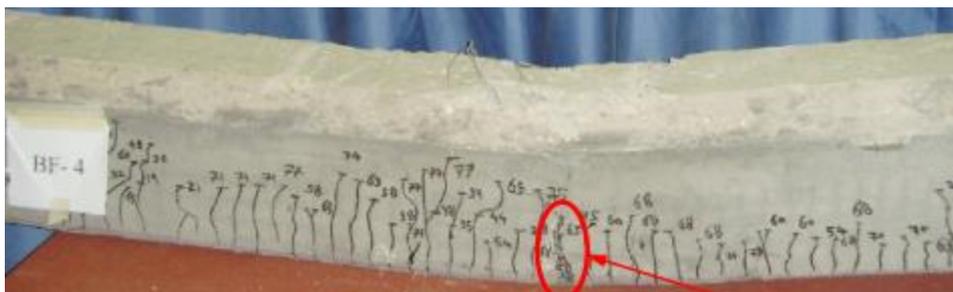
É importante salientar o comportamento das vigas reforçadas com dez camadas de TRM e distintas matrizes, uma com matriz cimentícia polimérica e outra com matriz cimentícia. A viga com matriz cimentícia rompeu com carga máxima de 77,63 kN, e a ruptura aconteceu na interface entre o TRM e o concreto (Figura 31). Na outra viga, ocorreu a ruptura do têxtil próximo ao centro do vão (Figura 32), alcançando carga de 81,75 kN (ELSANADEDY *et al.*, 2013). Ainda segundo os autores, com a queda brusca da capacidade de carga, após a carga máxima, as vigas obtiveram o modo final de ruptura por esmagamento do concreto na zona comprimida. A ductilidade na flecha das duas vigas foi, respectivamente, de 4,05 e 4,63. Destaca-se o melhor comportamento em relação à aderência ao substrato da viga com matriz cimentícia polimérica, pois esta garantiu a aderência do TRM ao substrato de concreto da viga e teve a maior resistência à flexão e ductilidade na flecha.

Figura 31 – Viga reforçada com TRM rompida por falta de aderência entre substrato de concreto e TRM.



(Fonte: Elsanadedy *et al.*, 2013)

Figura 32 – Viga reforçada com TRM rompida por ruptura do têxtil no centro do vão.



(Fonte: Elsanadedy *et al.*, 2013)

Além disso, Elsanadedy *et al.* (2013) projetaram duas vigas que deveriam possuir a mesma capacidade de resistência à flexão, uma com TRM (cinco camadas e matriz cimentícia) e outra com FRP (uma camada). A curva de carga por flecha do centro do vão dessas duas vigas é apresentada na Figura 32. Apesar das duas vigas terem se rompido, devido à ruptura das fibras

próxima ao centro do vão, e a carga ter caído até esmagar o concreto, três importantes diferenças foram constatadas nos ensaios das duas vigas: a viga reforçada com TRM apresentou-se 61% mais eficaz em termos de ductilidade pela flecha; o “escoamento” começou a uma carga mais baixa; e a carga última foi significativamente menor (7,2% menos eficaz em termos de resistência à flexão) (ELSANADEDY *et al.*, 2013).

Nos ensaios citados, algumas características do comportamento de vigas reforçadas com TRC à tração na flexão foram apresentadas. Importante salientar os principais aspectos analisados pelos autores: carga máxima, carga de início de “escoamento”, fissuração, modo de ruptura e ductilidade (flecha).

Alguns autores, interessados em constatar a eficácia da utilização de TRM também como reforço ao cisalhamento em elementos de concreto armado, alicerçaram seus trabalhos nesse assunto. No trabalho de Triantafillou e Papanicolaou (2005), foram realizados ensaios de flexão a quatro pontos em seis vigas com insuficiência de armadura transversal (com grande espaçamento de estribos na zona submetida ao esforço cortante). As vigas possuíam 2,6 metros de comprimento e seção transversal de 105 x 300 milímetros. Os ensaios foram realizados com carregamento estático (4 vigas) ou cíclico (2 vigas). O estudo comparou três parâmetros: a matriz (resina ou argamassa), o número de camadas de têxteis (uma ou duas) e o posicionamento do têxtil, forma convencional ou em espiral (envolvendo a viga na zona de cortante não nulo). O agente de ligação é a matriz de resina ou de argamassa que foi aplicada em camadas da superfície do concreto, entre as camadas de têxtil e no topo das camadas. Entre as vigas, uma não foi reforçada e rompeu, como esperado, pela formação de fissuras diagonais no trecho de cortante não nulo (TRANTAFILLOU; PAPANICOLAOU, 2005).

Algumas conclusões importantes são destacadas pelos autores no estudo: o envolvimento das vigas com TRM resultou, como esperado, em um aumento na resistência ao cisalhamento nas vigas. Os elementos com maior capacidade de resistir ao esforço cortante romperam pelo escoamento do aço na zona de tração da viga fletida. Mostrou-se também que uma camada de têxtil foi menos efetiva que duas, mas ainda promoveu um aumento à resistência ao cisalhamento suficiente (cerca de 40 kN a mais do que na viga de controle, sem reforço, correspondendo a uma mobilização de 0,8% da fibra de carbono utilizada) (TRANTAFILLOU; PAPANICOLAOU, 2005). Os autores ainda ressaltam que o uso de TRM é uma solução promissora para aumentar a resistência ao cisalhamento de elementos de

concreto, porém foi feita a ressalva de que eram necessários mais estudos, incluindo a otimização das propriedades da argamassa e o aumento de fontes de dados experimentais, o que ocorreu nos anos seguintes.

Além do comportamento na flexão, outros estudos, como o de Bournas (2009), mostram as características de pilares de concreto armado confinados com TRM (Figura 33). Os autores visam a comprovar a viabilidade de reforçar com TRM pilares antigos – com capacidade de carga limitada, pela flambagem das armaduras ou pela falha da ancoragem destas –, os quais foram representados experimentalmente em escala real. Além disso, foram feitas comparações com elementos idênticos reforçados com FRP de mesma rigidez e resistência dos elementos reforçados com TRM, com a finalidade de obter a eficácia do reforço de TRM *versus* de FRP. Ademais, os ensaios realizados em treze corpos de prova vinculados em uma das extremidades foram executados tanto com armadura longitudinal contínua quanto com sobreposição de barras ao nível do solo (BOURNAS; TRIANTAFILLOU; PAPANICOLAOU, 2009).

Figura 33 – Execução do reforço de pilar de concreto armado com TRM.

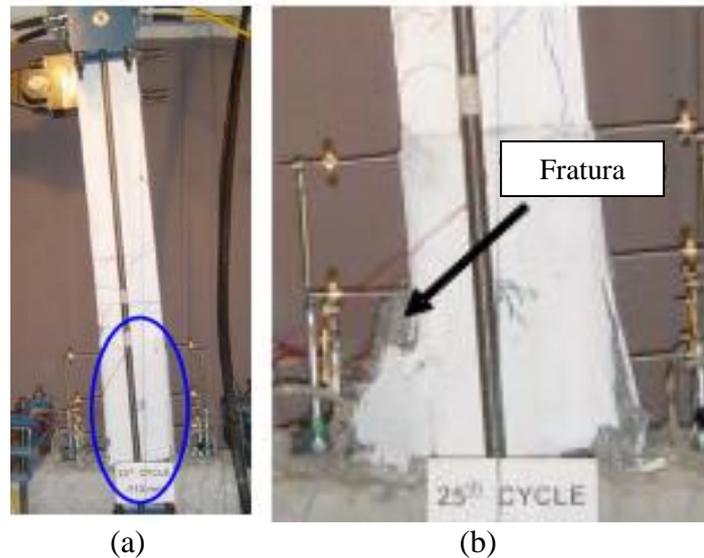


(Fonte: Bournas, Triantafillou, Papanicolaou, 2009)

Os resultados mostram que o revestimento de pilares com TRM é eficaz. Foi constatado que o reforço retardou a flambagem das barras e preveniu a desvinculação destas nos pilares com sobreposição (emendas) de barras, outro parâmetro avaliado pelos autores. Em comparação aos pilares reforçadas com FRP, os pilares reforçados com TRM foram igualmente eficazes em relação ao aumento de resistência e capacidade de deformação (BOURNAS; TRIANTAFILLOU; PAPANICOLAOU, 2009). É necessário destacar que a zona reforçada do

pilar com TRM de fibra de carbono permaneceu intacta até o final do ensaio e a zona reforçada do pilar com TRM de fibra de vidro falhou, como mostra a Figura 34.

Figura 34 – Pilares reforçados com TRM de fibra de carbono (a) e de vidro (b) após a ruptura.



(Fonte: Bournas, Triantafillou, Papanicolaou, 2009)

O reforço com TRC em elementos de concreto armado são uma alternativa de reforço ou de recuperação de estruturas. Testes mostram que o comportamento desse compósito, como reforço de elementos de concreto armado, inclui, principalmente, o aumento da resistência à tração e a redução da flecha e da espessura total das fissuras (BRÜCKNER; ORTLEPP; CURBACH, 2006). Por isso, em um cenário no qual as estruturas foram projetadas para resistência mecânica e não durabilidade (HELENE, 1997), um sistema de reforço estrutural que atenda às demandas de durabilidade requeridas por estruturas deterioradas deve ser considerado. Exemplos de estruturas que já estão sendo projetados reforços com TRC são as vigas e as lajes de pontes. Na Alemanha, por exemplo, muitas delas não foram dimensionadas para o tráfego que suportam hoje e também não se considerou – devido às deficiências dos códigos de dimensionamento – o esforço cortante, causando um grave processo de deterioração nessas estruturas (HERBRAND *et al.*, 2017). Essa recuperação torna possível manter as pontes em funcionamento e atende às demandas da população. No Brasil, também há exemplos de utilização de TRC como reforço de estruturas de concreto armado, como o pilar durante a reforma do estádio Maracanã, conforme mostra a Figura 35. Assim, as decisões acerca do sistema de reforço a ser utilizado devem considerar o TRC como uma alternativa, verificando-

se os requisitos para a concepção, o planejamento, o projeto, os materiais e os componentes, a execução propriamente dita e a etapa de uso do reforço acoplado à estrutura.

Figura 35 – Pilar reforçado com TRC na reforma do estádio Maracanã.



(Fonte: <http://www.sp-reinforcement.com.br/armo-mesh/>)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho serão apresentados nos próximos itens. Cada material foi empregado visando à maior eficiência do CT no reforço de elementos estruturais de concreto armado. Além disso, serão apresentados os resultados da caracterização da argamassa (matriz), dos têxteis de vidro álcali-resistente e de carbono, do concreto e do aço das vigas.

4.1.1 Matriz experimental

A matriz experimental do trabalho foi elaborada com o intuito de fornecer informações acerca do uso dos têxteis como reforço à flexão de vigas de concreto armado. O trabalho foi precedido por GIESE (2019), que foi precursora do estudo de vigas reforçadas à flexão com concreto têxtil no LEME. Por isso, analisaram-se vigas de concreto armado, reforçadas externamente com CT. Há três fatores variáveis nos reforços das vigas: o número de camadas (três ou quatro camadas de têxtil); o preparo do substrato de concreto (retirada da nata por apicoamento ou jateamento); e o material do têxtil (fibras de vidro ou de carbono). Há uma viga-referência que não foi reforçada. Assim, respeitando as restrições em termos de materiais e equipamentos disponíveis, chegou-se à matriz experimental da Figura 36.

Figura 36 – Matriz experimental do trabalho.

		3 camadas		4 camadas	
		Jateada	Apicoada	Jateada	Apicoada
Vidro		J3V1	A3V1	J4V1	A4V1
		-	A3V2	-	A4V2
Carbono		J3C1	A3C1	J4C1	A4C1
		J3C2	A3C2	J4C2	A4C2
VT	Viga Testemunho				
	J4C2	Erro na aquisição de dados			
	-	Não foi realizada repetição			

Foram, então, utilizadas as seguintes abreviaturas durante este trabalho:

VT – Viga testemunho ou de controle (não reforçada);

J3V1 – Viga 1 com superfície jateada e três camadas de reforço com têxtil de vidro;

J3C1 – Viga 1 com superfície jateada e três camadas de reforço com têxtil de carbono;

J3C2 – Viga 2 com superfície jateada e três camadas de reforço com têxtil de carbono;

A3V1 – Viga 1 com superfície apicoada e três camadas de reforço com têxtil de vidro;

A3V2 – Viga 2 com superfície apicoada e três camadas de reforço com têxtil de vidro;

A3C1 – Viga 1 com superfície apicoada e três camadas de reforço com têxtil de carbono;

A3C2 – Viga 2 com superfície apicoada e três camadas de reforço com têxtil de carbono;

J4V1 – Viga 1 com superfície jateada e quatro camadas de reforço com têxtil de vidro;

J4C1 – Viga 1 com superfície jateada e quatro camadas de reforço com têxtil de carbono;

J4C2 – Viga 2 com superfície jateada e quatro camadas de reforço com têxtil de carbono;

A4V1 – Viga 1 com superfície jateada e quatro camadas de reforço com têxtil de carbono;

A4V2 – Viga 2 com superfície jateada e quatro camadas de reforço com têxtil de carbono;

A4C1 – Viga 1 com superfície apicoada e quatro camadas de reforço com têxtil de carbono;

A4C2 – Viga 2 com superfície apicoada e quatro camadas de reforço com têxtil de carbono.

Embora pelo menos uma repetição para cada configuração de reforço fosse o ideal, não foi empregada a repetição de duas configurações: viga jateada reforçada com três camadas de têxtil de vidro e viga jateada reforçada com quatro camadas de têxtil de vidro. No trabalho de Giese (2019), o objetivo foi o estudo do comportamento de vigas de concreto armado reforçadas com concreto têxtil de vidro, usando-se os mesmos materiais, processo de produção e condições de ensaio. Não houve necessidade de repetição, visto que o comportamento constatado foi igual ao das vigas ensaiadas por Giese (2019), incluindo cargas máximas semelhantes. O mesmo ocorreu com a viga testemunho Assim como as vigas testemunho do trabalho de Giese (2019)

e havendo comportamento semelhante dessas vigas no ensaio, não foi feita repetição, com ensaio de apenas uma viga sem reforço, que foi a viga de controle deste trabalho.

Conhecendo as possíveis configurações de reforço e os materiais necessários, iniciaram-se os ensaios de caracterização dos materiais.

4.1.2 Concreto

As vigas de concreto foram concretadas previamente no mês de novembro de 2018 (Giese, 2019). Parte do lote não utilizada no trabalho citado constitui o conjunto de vigas utilizadas neste trabalho. Dias antes da ruptura das vigas reforçadas, realizou-se uma nova caracterização do concreto. A resistência à compressão média dos corpos de prova foi de 35,4 Mpa, e o módulo de elasticidade estático médio foi de 34,6 GPa. A resistência à compressão foi obtida por ensaio à compressão simples, seguindo as recomendações da NBR 5739 (2017), e o módulo de elasticidade estático seguiu a NBR 8522 (2017).

As dimensões das vigas foram definidas de acordo com as limitações de suporte, execução, movimentação e testes no laboratório. Assim, foram definidos comprimento de 150 centímetros e base de 12 centímetros. A altura da viga foi definida pela

análise de sensibilidade dessas variáveis, buscando a situação que proporcionasse a maior solicitação do têxtil e, assim, permitisse uma melhor compreensão do potencial de contribuição do reforço (GIESE, 2019, p. 72).

Dessa forma, concluiu-se que a seção final consistiu em 120 x 200 mm. O aço utilizado como reforço será descrito no próximo item.

4.1.3 Matriz cimentícia

A matriz utilizada consiste em uma argamassa industrializada polimérica de reparo estrutural da empresa *ZENTRIFIX*. A argamassa foi caracterizada por GIESE (2019). No entanto, com o objetivo de assegurar que as propriedades mecânicas do material se mantivessem, foram retiradas amostras de cada mistura manipulada nos ensaios, sendo moldados corpos de prova cilíndricos e posteriormente ensaiados à compressão, conforme a ABNT NBR 7215. A resistência à compressão média da argamassa, obtida pelos corpos de prova cilíndricos, foi igual a 55,4 Mpa, e a média do módulo de elasticidade estático foi igual a 36,4 GPa, conforme a

ABNT NBR 8522. As Tabelas 4 e 5 apresentam os valores de média e desvio-padrão dos resultados de resistência à compressão e de módulo de elasticidade estático.

Tabela 4 – Valores de média e desvio-padrão da resistência à compressão simples dos corpos de prova da matriz cimentícia utilizada.

Resistência à Compressão Simples		
Nº de Corpos de Prova Ensaçados	Média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)
42	56,33	8,09

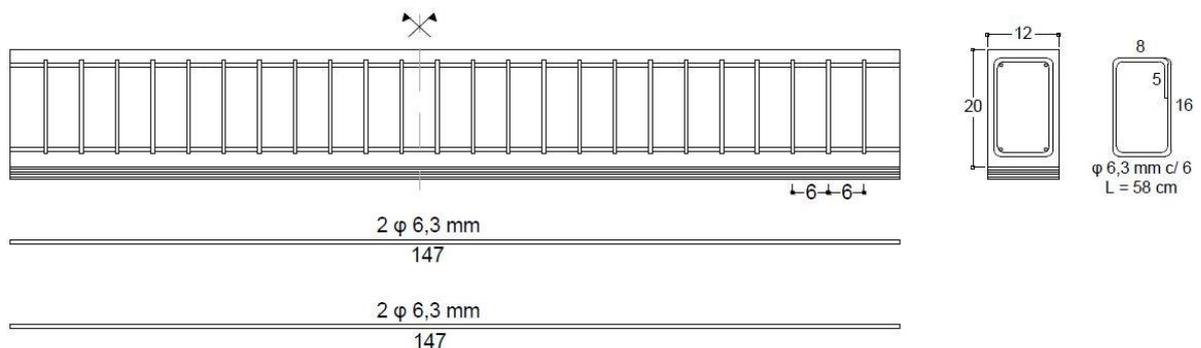
Tabela 5 – Valores de média e desvio-padrão do módulo de elasticidade estático dos corpos de prova da matriz cimentícia utilizada.

Módulo de Elasticidade		
Nº de Corpos de Prova Ensaçados	Média (MPa)	Desvio-Padrão (MPa)
2	36,45	0,43

4.1.4 Armadura

As armaduras metálicas utilizadas nas vigas foram quatro barras de 6,3 milímetros de diâmetro, duas para a zona tracionada e duas para a zona comprimida. As vigas possuem estribos espaçados a cada 6 centímetros. O detalhamento do aço das vigas é apresentado na Figura 37.

Figura 37 – Detalhamento das armaduras de aço das vigas.



O aço utilizado, tanto para os estribos quanto para as barras longitudinais, possui resistência à tração de 753,9 MPa, determinada de acordo com a NBR ISO 6892-1 (2013). Registros das

barras, antes e após a ruptura, são mostrados na Figura 38 (a e b). Os dados de deformação das barras de aço foram obtidos com a instalação de *strain gauges* KYOWA. Os dados e o gráfico obtidos nos ensaios estão apresentados, respectivamente, na Tabela 6 e no gráfico da Figura 39.

Figura 38 – (a) *Strain gauges* colados nas barras e (b) Região de ruptura de uma das barras.

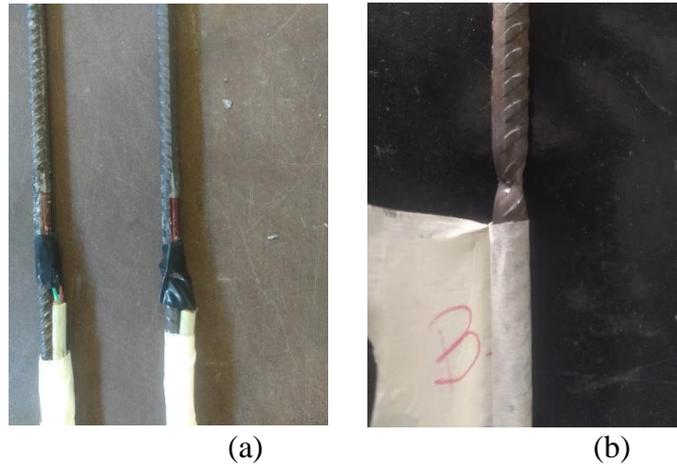
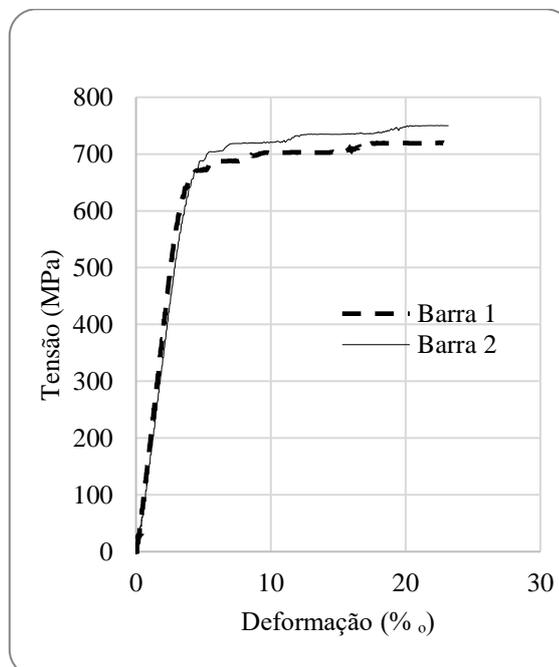


Figura 39 – Gráfico com a curva de tensão *versus* deformação do aço utilizado nas armaduras.



Destaca-se que, no gráfico da Figura 39, a curva termina antes de atingir as tensões máximas e de ruptura das barras, pois o *strain gauge* rompeu devido à deformação da barra de aço, impossibilitando registrar deformações maiores do que 23% .

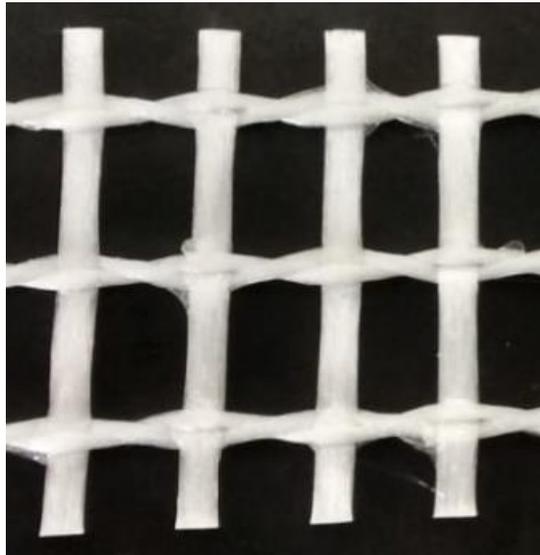
Tabela 6 – Dados dos ensaios de caracterização do aço conforme NBR ISO 6892-1.

	Barra 1	Barra 2
Diâmetro Nominal (mm)	6,3	6,3
Resistência ao Escoamento Superior (MPa)	671,5	688,2
Resistência ao Escoamento Inferior (MPa)	671,2	687,8
Resistência à Tração (MPa)	751,0	761,3

4.1.5 Têxteis

No intuito de caracterizar os têxteis, foram realizados diversos ensaios nos têxteis empregados como reforço nas vigas. As fibras foram analisadas por um estereomicroscópio, por um microscópio eletrônico de varredura (MEV), e as propriedades mecânicas foram avaliadas através do ensaio de tração direta em uma máquina universal de aplicação de carga com capacidade de 100 kN.

Os têxteis utilizados como reforço das vigas são de dois tipos. Um deles é da empresa nacional *TEXIGLASS*, fabricado com fibra de vidro álcali-resistente (Figura 40), de 2400 *tex* (2400 gramas em 1 quilômetro de fio), na direção principal, e 2400 *tex*, na direção secundária. As características desse têxtil estão apresentadas na Tabela 7.

Figura 40 – Têxtil de vidro álcali-resistente.**Tabela 7** – Tabela de informações técnicas do têxtil de vidro álcali-resistente fornecida pelo fabricante.

TEXIGLASS AR-360-RA-04-1,30m		
Tipo de tecelagem	–	Giro inglês
Peso	g/m ²	360
Número de Fios de Urdume	Fios/cm	0,75
Número de Fios de Trama	Fios/cm	0,75
Título de Fio de Urdume	Tex	2400
Título de Fio de Trama	Tex	2400
Largura	cm	130
Comprimento do Rolo	m	100
Tamanho Total do Rolo	m ²	130
Espessura sem Resina	mm	0,55
Espessura Resinada	mm	1,15
Carga de Ruptura Teórica do Urdume	Kgf/cm	54
Carga de Ruptura Teórica da Trama	Kgf/cm	54
Porcentagem de Resina em Peso	%	20

(Fonte: TEXIGLASS)

O outro têxtil utilizado é o *ARMO – mesh L500* –, comercializado, no Brasil, pela empresa suíça *S&P Clever Reinforcement*. O têxtil é formado por filamentos de carbono na direção principal e filamento de vidro na direção secundária (Figura 41). As características do têxtil estão apresentadas na Tabela 8.

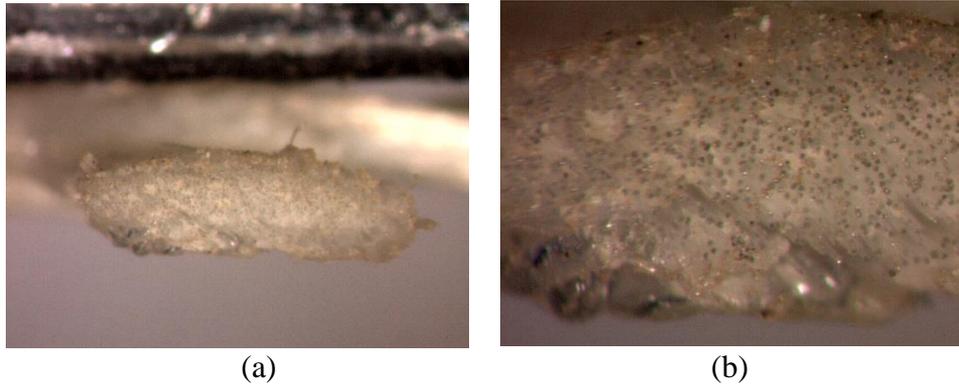
Figura 41 – Têxtil ARMO – mesh L500.**Tabela 8** – Tabela de informações técnicas do têxtil de carbono fornecida pelo fabricante.

ARMO-mesh L500		
Módulo de Elasticidade (teórico)	kN/mm ²	240
Fator De Redução do Módulo de Elasticidade Devido À Aplicação	-	1,5
Módulo Elástico (Reduzido) de Cálculo	kN/mm ²	160
Resistência à Tração Última C-Fibra	N/mm ²	4300
Gramagem da C-Fibra na Direção Principal	g/cm ²	200
Densidade C-Fibra	g/cm ³	1,7
Alongamento de Ruptura (Teórico)	%	1,75
Espessura (Teórica) de Cálculo da C-Fibra Gramagem T+ Densidade		0,117
Seção Transversal Teórica de Cálculo C-Fibra	mm ² /m	117
Força de Tração Última 1,75% (Teórica)	kN/m	500
Força de Tração de Cálculo		
Flexão (800N/Mm ²) Limite de Extensão Estado Último 0,5%	kN/m	93,6
Axial (640 N/Mm ²) Limite de Extensão Estado Último 0,4%	kN/m	74,8
Largura/Comprimento do Rolo	m	2,00 /

(Fonte: S&P Clever Reinforcement)

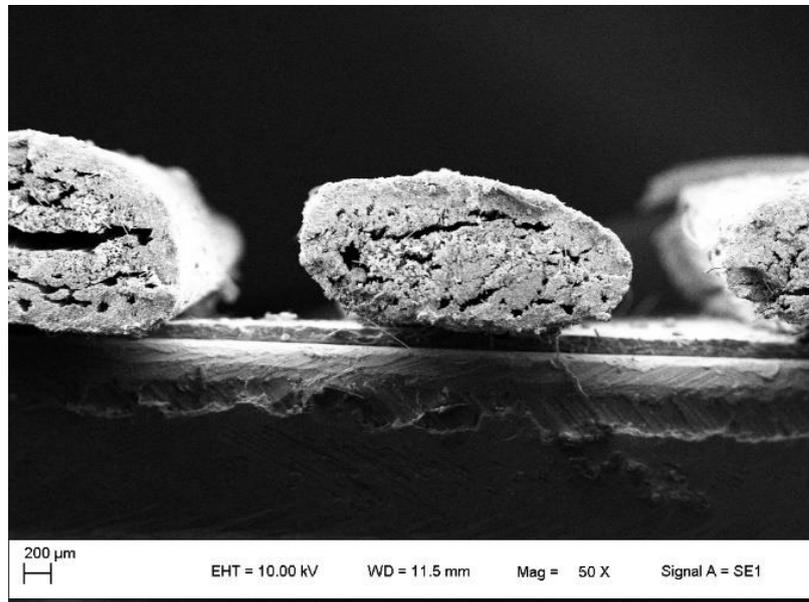
A primeira constatação visual foi realizada no esteromicroscópio. O fio principal de têxtil de fibra de vidro foi colocado sob a lente do microscópio com um aumento de 79 vezes e 225 vezes Figura 42 (a e b, respectivamente). A partir dessas imagens, decidiu-se analisar as fibras no MEV, na tentativa de verificar o diâmetro das fibras e do fio dos têxteis de carbono e de vidro álcali-resistente.

Figura 42 – Registros do têxtil de vidro no estereomicroscópio: Aumento de 79 vezes (a) e Aumento de 225 vezes (b).



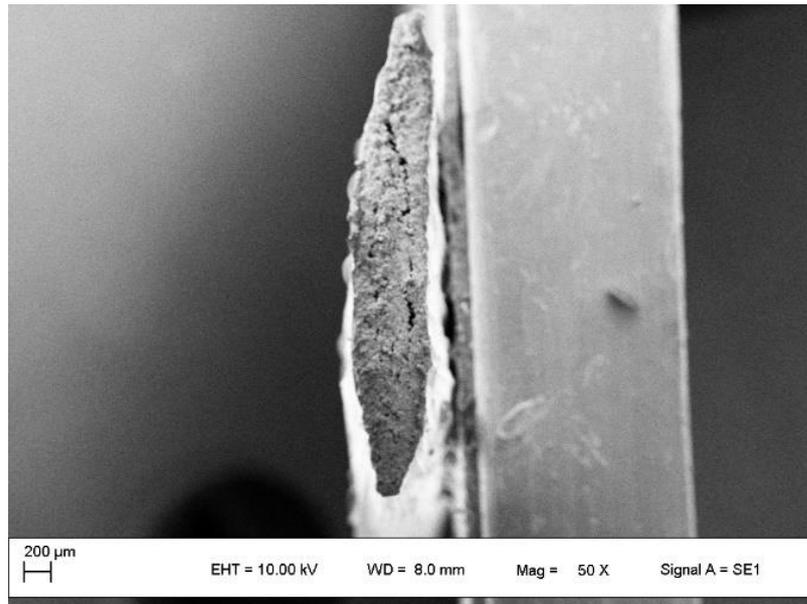
No MEV, os dois têxteis foram analisados, tanto os fios longitudinais (urdumes) quanto os transversais (trama). Aqui somente serão apresentadas as imagens dos fios de urdume. Os registros obtidos são da seção transversal dos fios de urdume, com aumento de 50 vezes do têxtil de carbono (Figura 43) e do têxtil de vidro (Figura 44).

Figura 43 – Registro do têxtil de carbono no MEV, com aumento de 50 vezes.



(Fonte: Marcia Machado)

Figura 44 – Registro do têxtil de vidro no MEV, com aumento de 50 vezes.

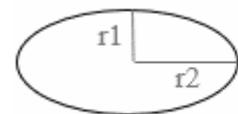


(Fonte: Marcia Machado)

Na tentativa de verificar o diâmetro dos fios, foram medidos os dois diâmetros, o maior e o menor, de diversos fios de urdume dos dois têxteis. Assim, fazendo a média das medidas de diversos diâmetros maiores e de diversos diâmetros menores do fio principal do têxtil de carbono e do fio principal do têxtil de vidro, foi calculada a área desses fios, de duas formas. A primeira forma foi pelo cálculo da área da elipse, e a segunda forma foi pelo *software Autocad*, desenhando a área do fio sobre a foto, em escala, e constatando a área apresentada, obtendo-se a Tabela 9.

Tabela 9 – Áreas e diâmetros dos fios de urdume.

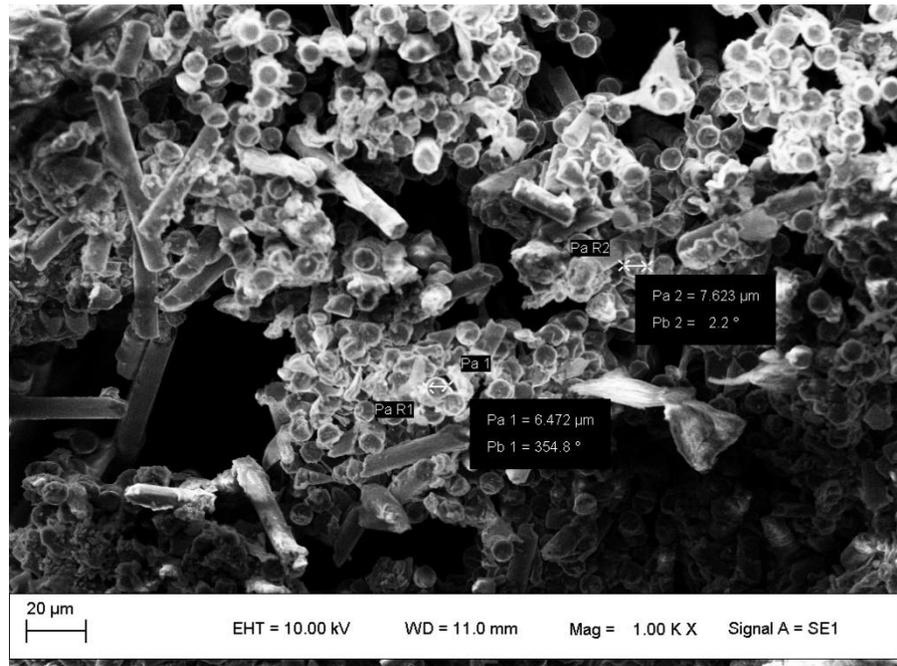
	1/2 Urdume de Carbono	1 Urdume de Vidro
ø1 médio MEV	2,4 mm	3,7 mm
ø2 médio MEV	1,1 mm	0,6 mm
Área Calculada	2,0 mm ²	1,8 mm ²
Área Autocad	2,2 mm ²	1,7 mm ²



$$\text{Área calculada} = \pi \cdot r1 \cdot r2$$

Da mesma forma, foram medidos os diâmetros das seções transversais de vários filamentos de vidro e de carbono. Para a averiguação dos diâmetros dos filamentos de carbono (Figura 45), foi utilizado aumento de 1000 vezes, e para as fibras de vidro (Figura 46), foi de 2000 vezes.

Figura 45 – Registro da seção transversal dos filamentos de carbono no MEV.



(Fonte: Marcia Machado)

Figura 46 – Registro da seção transversal dos filamentos de vidro no MEV.



(Fonte: Marcia Machado)

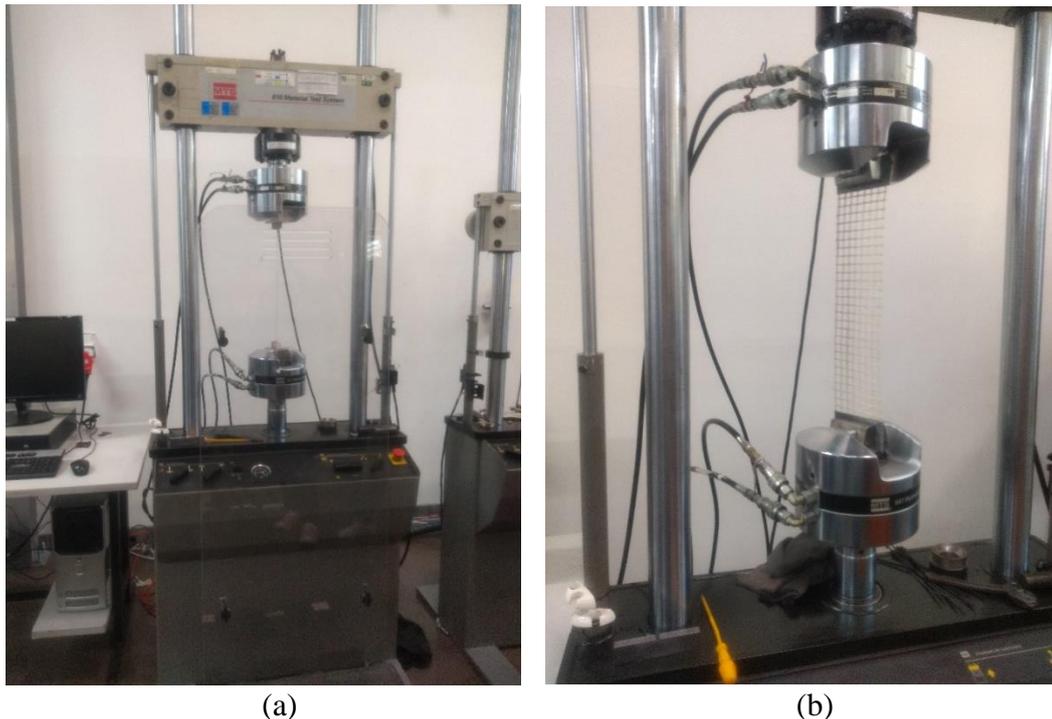
A partir de diversas medidas, foi possível estimar o diâmetro das fibras constituintes do fio do têxtil de carbono e do têxtil de vidro, realizando a média dos diâmetros medidos, apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Diâmetros dos filamentos.

	Um Filamento de Carbono	Um Filamento de Vidro
ϕ médio MEV	6,8 μm	26,0 μm
Área média	36,7 μm^2	531 μm^2
$\phi 1$	6,7 μm	27,0 μm
$\phi 2$	6,5 μm	26,4 μm
$\phi 3$	7,6 μm	26,5 μm
$\phi 4$	6,5 μm	24,2 μm

Além dos ensaios de características superficiais, foram realizados ensaios para averiguação das propriedades mecânicas dos têxteis. Os ensaios à tração direta (Figura 47, a e b) foram manejados em uma máquina universal de aplicação de carga *MTS*, com capacidade máxima de 100 kN, sendo que alguns procedimentos pré-ensaios foram necessários.

Figura 47 – (a) Máquina de ensaio à tração direta e (b) Corpo de prova de têxtil de vidro posicionado nas garras.



O comprimento dos corpos de prova dos têxteis era limitado devido à amplitude do equipamento de ensaio. Determinou-se que o comprimento livre dos corpos de prova, excluída a região pressionada pelas garras, seria de 20 centímetros (Figura 48a). As duas extremidades dos trechos de têxteis ensaiados foram revestidos com resina epóxi *Sikadur* entre duas placas

de papel cartão (Figura 48b), a fim de que a área onde as garras atuassem fosse maior, evitando deslizamento.

Figura 48 – (a) Corpos de prova do têxtil de vidro e (b) Corpos de prova do têxtil de vidro com o preparo nas extremidades.



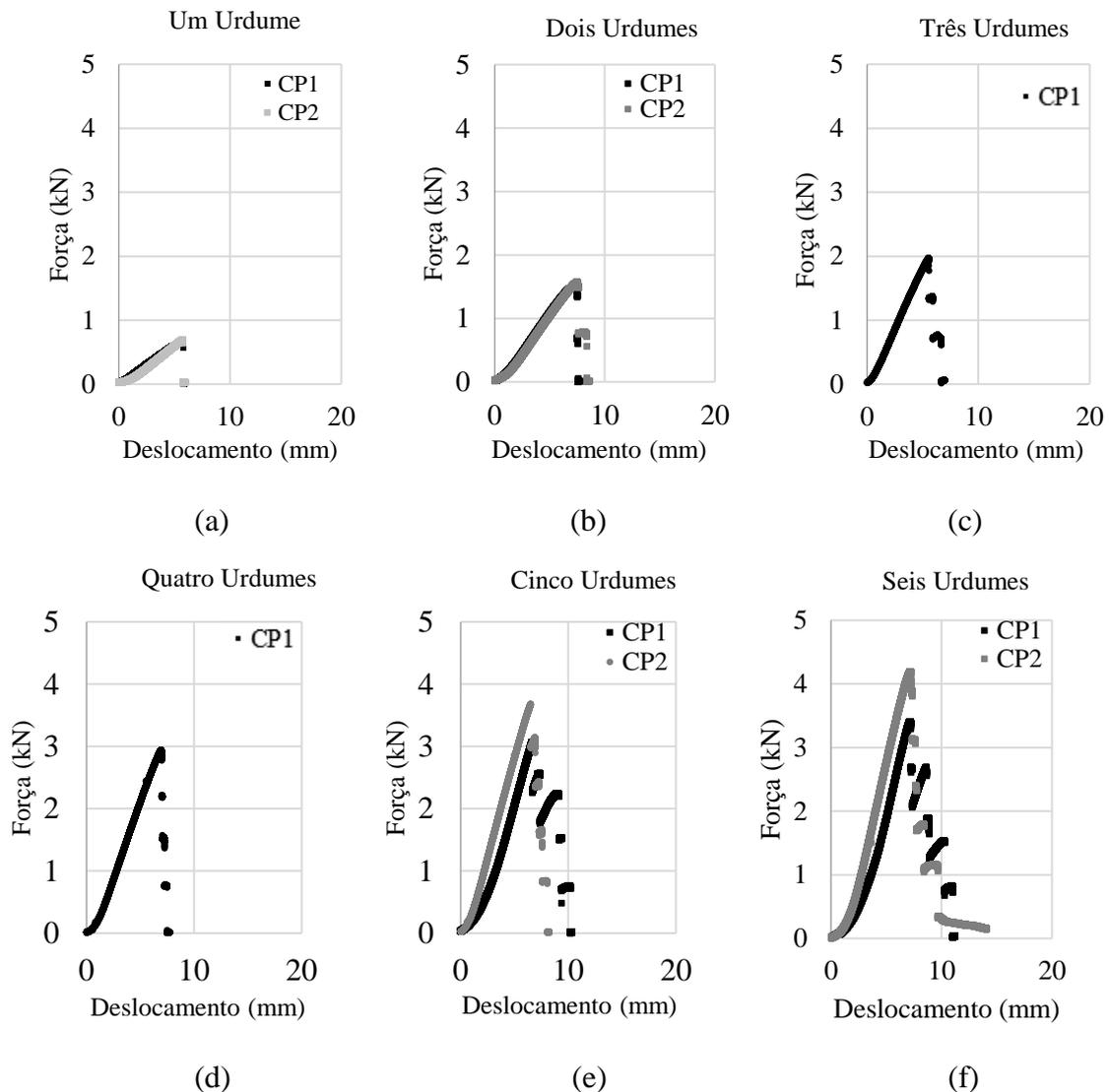
A resina da *Sikadur* funcionou adequadamente para o têxtil de vidro, sendo constatado, mesmo com uma pressão de 10 MPa, deslizamento do têxtil de carbono. Dessa forma, estão apresentados os resultados obtidos para os trechos de têxtil de vidro, na Tabela 11, e os gráficos de carga *versus* deslocamento do equipamento, na Figura 49. Os gráficos são diferenciados pelo número de fios de urdume que havia no trecho ensaiado, sendo um urdume 49(a), dois urdumes 49(b), três urdumes 49(c), quatro urdumes 49(d), cinco urdumes e seis urdumes 49(d), e a quantidade máxima de seis urdumes foi limitada pela largura da garra de 7,5 cm.

Tabela 11 – Cargas de ruptura dos urdumes do têxtil de vidro.

Nº Urdumes	Carga de Ruptura do Têxtil (kN)	CP1 (kN)	CP2 (kN)
1	0,66	0,64	0,68
2	1,52	1,49	1,55

3	1,97	1,97	–
4	2,92	2,92	–
5	3,36	3,07	3,65
6	3,77	3,37	4,17

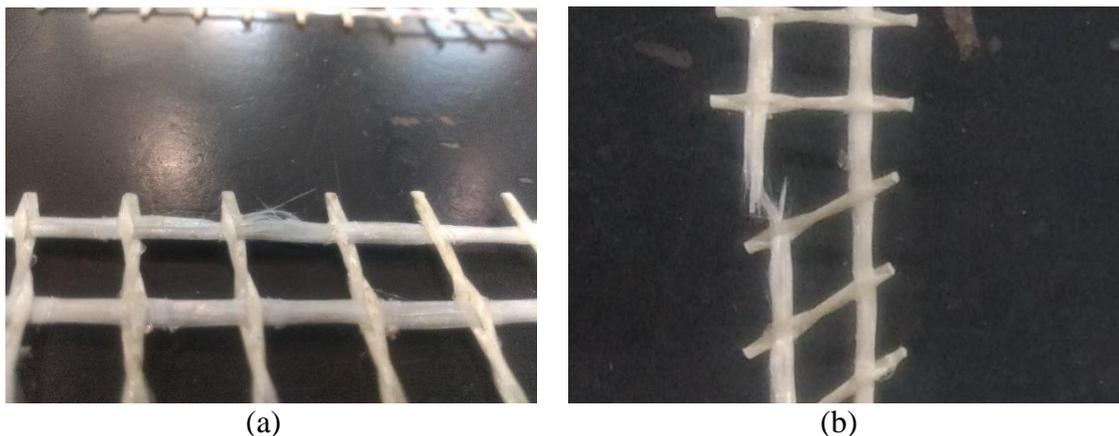
Figura 49 – Gráfico do carregamento dos trechos de têxtil com: (a) Um fio de urdume, (b) Dois fios de urdume, (c) Três fios de urdume, (d) Quatro fios de urdume, (e) Cinco fios de urdume, (f) Seis fios de urdume.



Embora as fibras de vidro tenham mostrado compatibilidade com a resina da *Sikadur*, alguns corpos de prova ainda deslizaram na região próxima às garras e, por isso, esses resultados foram descartados. Pode-se observar, como esperado, que quanto maior a quantidade de fios de urdume (maior a área de fibras de vidro na direção de aplicação da carga), maior a carga de ruptura. Porém, a não uniformidade de carga em todos os urdumes, devido às imperfeições no

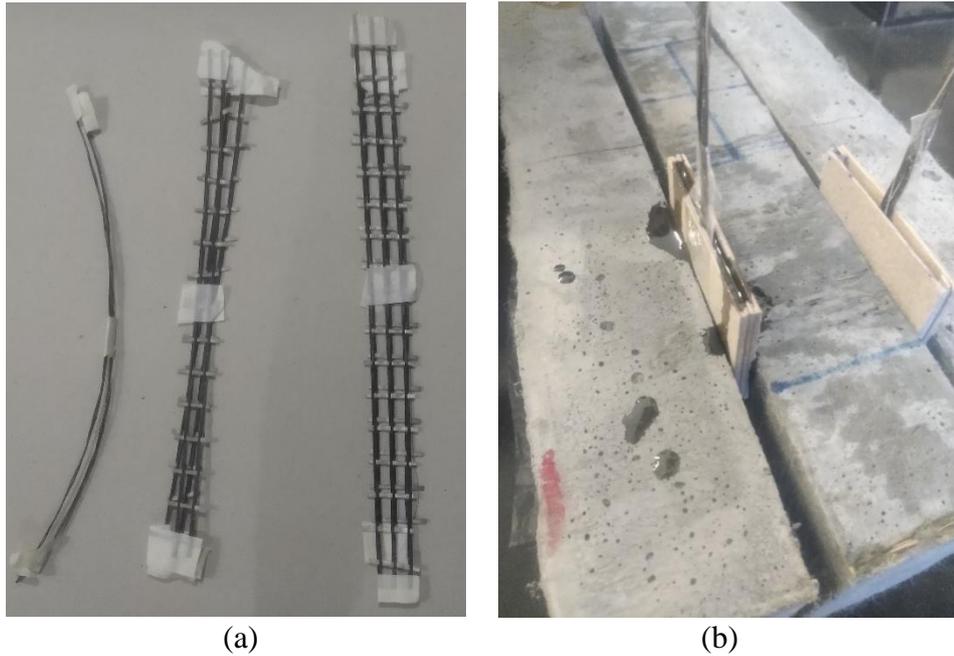
preparo das extremidades comprimidas pelas garras e à própria variabilidade do têxtil de vidro, ocasionou a não proporcionalidade de carga suportada em relação a um urdume. Essa não proporcionalidade era mais difícil de ser suprimida devido a uma maior quantidade de urdumes no trecho ensaiado. A ruptura, portanto, ocorria primeiro, majoritariamente, em um dos fios de urdume dos trechos ensaiados (Figura 50a), mas rompiam também alguns filamentos dos outros fios, aumentando a carga de ruptura conforme o maior número de fios por trecho ensaiado. Após a ruptura do primeiro fio, os outros fios rompiam um após o outro, mas não chegavam à carga do primeiro, pois já não havia a mesma quantidade de filamentos íntegros nos fios remanescentes. Essa situação é verificada com gráficos de carga *versus* deslocamento do equipamento apresentados. Alguns registros da ruptura do têxtil de vidro são apresentados na Figura 50 (a e b).

Figura 50 – Rupturas dos têxteis de vidro álcali-resistente (a e b).



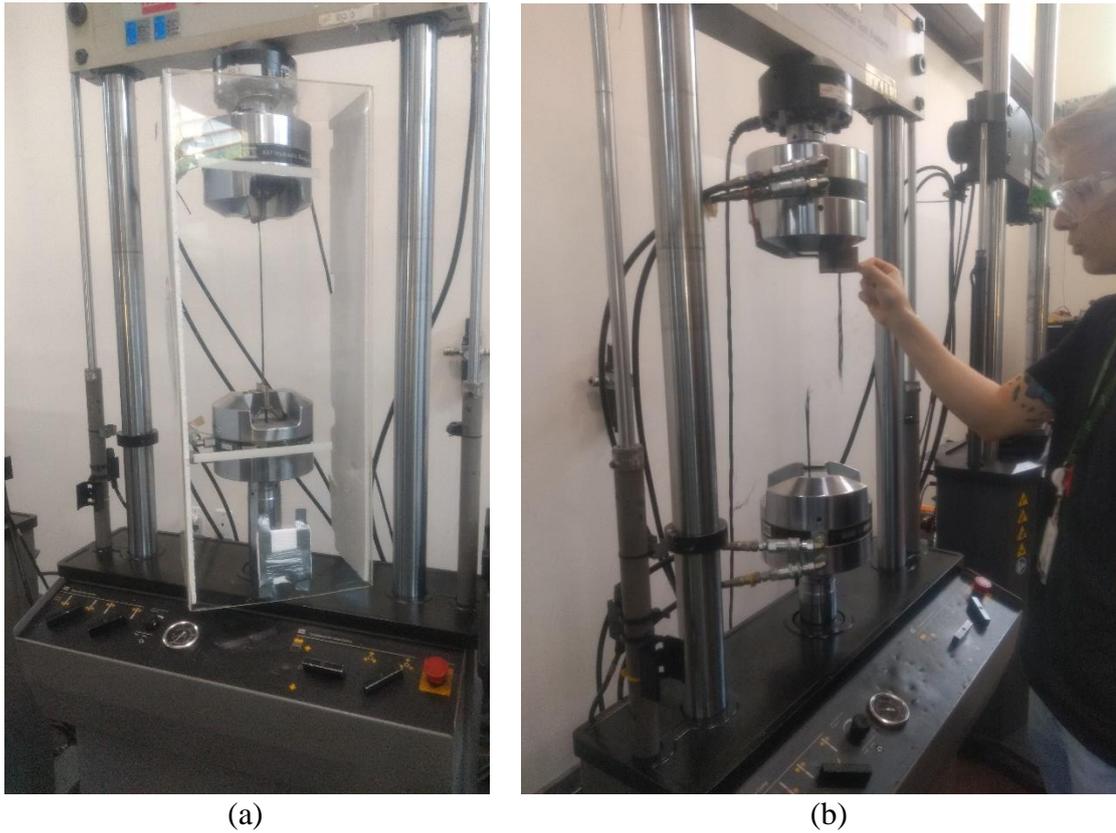
A resina *Sikadur* e o papel acartonado apresentaram um bom comportamento nas fibras de vidro. Entretanto, para o têxtil de carbono, houve escorregamento dos fios no sistema de ancoragem (resina e papel cartão). Por isso, utilizou-se uma resina epóxi com maior fluidez, utilizada para reforço de CFRP. Essa resina possui baixa viscosidade, e o procedimento de preparo precisou ser ajustado. O preparo da superfície em contato com a garra foi realizado pela confecção de caixas, do mesmo papel utilizado anteriormente, que foram preenchidas com resina com a extremidade dos fios de dentro (Figura 51, a e b).

Figura 51 – (a) Corpo de prova do têxtil de carbono e (b) Preparo das extremidades do têxtil.



Com o procedimento de preparo das extremidades empregado, garantiu-se a ruptura, sem deslizamento de trechos do têxtil de carbono, com metade do fio e um fio de urdume. O registro do ensaio do fio de carbono está na Figura 52a, e o registro do têxtil rompido, na imagem 52b.

Figura 52 – (a) Ensaio à tração direta do têxtil de carbono e (b) Ruptura de um fio do têxtil.



Os resultados dos fios de carbono ensaiados são mostrados na Tabela 12, e os gráficos de carga vs. deslocamento do equipamento estão apresentados na Figura 53 (a e b).

Figura 53 – (a) Carregamento em um urdume do têxtil de carbono e (b) Carregamento em metade do urdume do têxtil.

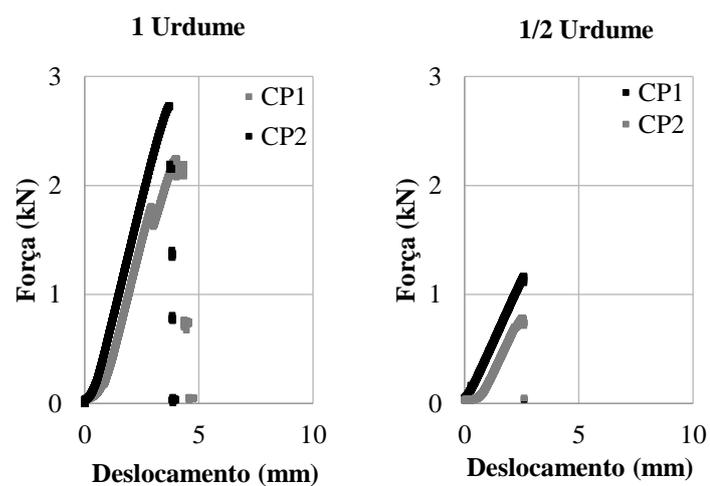


Tabela 12 – Cargas do ensaio à tração direta no têxtil de carbono.

Carga de ruptura do Têxtil de Carbono		
Nº Urdumes	CP1 (kN)	CP2 (kN)
1/2	1,1	0,75
1	2,24	2,71

Os resultados obtidos nos ensaios de tração foram fundamentais para o cálculo da carga teórica de ruptura das vigas ensaiadas.

4.1.6 Execução dos reforços

O reforço das vigas foi executado no LEME. Organizou-se esta fase do programa experimental em três etapas, e, a partir disso, foi possível planejar, programar e realizar cada etapa.

4.1.6.1 Preparo da superfície das vigas

O reforço iniciou com a preparação da superfície a ser reforçada. Foram utilizadas duas técnicas de preparo da superfície: o apicoamento mecânico e o jateamento com granalha de aço. Escolheram-se duas técnicas diferentes para comparar a influência de aderência de cada técnica ao aplicar o reforço nas vigas. As técnicas utilizadas visaram à retirada da nata de cimento (pouco aderente, devido à exsudação da água, o que aumenta a relação a/c na camada mais externa), prejudicial à aderência da argamassa matriz do reforço no substrato de concreto. Além disso, destaca-se como importante diferença entre as duas técnicas o menor custo associado a maior facilidade de execução do apicoamento em relação ao jateamento. Das quinze vigas do programa experimental, as superfícies inferiores de oito delas foram apicoadas e as superfícies de seis foram jateadas.

O procedimento de preparo da superfície inicia pela delimitação da área a ser preparada. Demarcou-se 10 centímetros de afastamento das laterais ao centro da viga, alinhado com o comprimento desta, e a área interna a essa delimitação foi preparada, como mostra a Figura 54. Se toda a superfície inferior da viga fosse apicoada, as regiões onde a viga fosse apoiada ficariam rugosas, causando irregularidades na transmissão de cargas dos ensaios. O mesmo foi realizado para demarcação da região a ser jateada. O jateamento de seis das quinze vigas deste trabalho foi realizado anteriormente, na primeira dissertação sobre o concreto têxtil no LEME (Giese, 2019). O jateamento com granalha de aço foi realizado por uma empresa especializada. As Figuras 55 e 56 apresentam as superfícies com os distintos tratamentos superficiais.

Figura 54 – Superfície apicoada das vigas.



Figura 55 – Superfície jateada.



Figura 56 – Superfície apicoada.



O apicoamento de oito das quinze vigas a serem reforçadas neste estudo foi executado no LEME, usando-se martetele elétrico. O procedimento foi realizado em dois dias por dois operadores diferentes. Pode-se verificar um registro do preparo da superfície das vigas apicoadas na Figura 57.

Figura 57 – Apicoamento da superfície das vigas.



4.1.6.2 Preparo das tiras de têxtil

Optou-se por utilizar uma tesoura de chapa de aço para o corte das tiras na dimensão necessária para o reforço. Devido ao chanfro existente nas arestas longitudinais das vigas, a largura da tira de têxtil foi igual a 9,5 centímetros, e o comprimento se manteve em 1,3 metros. Em vista disso, atentando para que a direção do fio principal coincidisse com a direção longitudinal da viga, foram cortadas as tiras de têxtil, como mostrado na Figura 58. O corte do têxtil de fibra de carbono foi feito comportando seis fios de urdume, com espaçamento de 1,5 centímetros entre fios. O corte da fibra de vidro comportou sete fios de fibra de vidro, com espaçamento de 1 centímetro entre urdumes.

Figura 58 – Corte das tiras de têxtil.

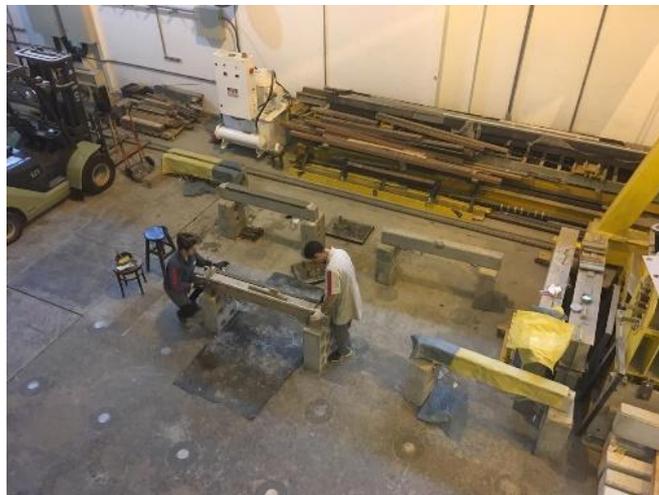


4.1.6.3 Execução das camadas do reforço

Esta etapa teve início com o posicionamento das vigas aonde elas seriam reforçadas, destacando que é permitido movimentar essas vigas em diversas posições por se tratarem de elementos isolados. Essa movimentação não é possível em uma viga pertencente a uma estrutura real.

Antes de cada turno de reforço, eram posicionadas quatro vigas, de acordo com a limitação de espaço e de suporte no laboratório. Pode-se verificar o posicionamento das vigas na Figura 59

Figura 59 – Posicionamento das vigas.



(Fonte: Débora Marx)

Após o posicionamento das quatro vigas, era instalado o sistema de limitação de espessura de camadas na primeira viga a ser reforçada. O procedimento de instalação será descrito a seguir.

O sistema de limitação da espessura das camadas possui seis componentes: dois grampos sargentos, duas chapas de compensado, com dois parafusos acoplados em cada uma, sendo que

um disposto de referência da espessura das camadas foi confeccionado pelo técnico Eurípedes Fontes. O sistema tinha como objetivo limitar em cinco milímetros a espessura de cada camada de argamassa. O funcionamento deste sistema consistia em colocar na altura desejada (de 5 a 25 milímetros) o dispositivo de referência, posicionar o dispositivo na região do apoio da viga (região não reforçada), afrouxar os sargentos e ajustar os parafusos, e, ao elevar as chapas de compensado, fez com que estas se encontrassem com o dispositivo de referência. O funcionamento do sistema de limitação da espessura das camadas foi demonstrado pelas Figuras 60, 61, 62 e 63. A numeração das figuras segue a sequência de utilização dos componentes. Assim, foram garantidos 5 milímetros para a espessura da argamassa matriz do reforço em cada camada.

Figura 60 – Dispositivo de referência.



Figura 61 – Posicionamento do dispositivo de referência.



Figura 62 – Afrouxamento dos sargentos.



Figura 63 – Afrouxamento dos sargentos.



Após o posicionamento das vigas e do sistema limitador de camadas, dava-se início à etapa de preparação da mistura. A umidade, a temperatura do ambiente e outras informações, como horário de início e de fim da mistura e do reforço, foram registradas.

A mistura foi realizada na argamassadeira (Figura 64). A argamassa utilizada foi caracterizada, e os resultados estão descritos no item 4.1.3. Foi acrescentada, primeiramente, a argamassa industrializada seca na cuba e depois a água (Figura 65). Foi usada uma relação de água e argamassa seca de 0,14. O fabricante indicava de três a cinco minutos de mistura. Como se verificou que com três minutos a mistura já apresentava fluidez se optou por esse tempo de mistura.

Figura 64 – Argamassadeira.



Figura 65 – Adição de água na argamassa seca.



Após três minutos de mistura, parava-se o procedimento e, com uma parte da mistura, eram realizados os testes de índice de consistência (NBR 13276, 2016), os diâmetros estão apresentados na Tabela 13. Além disso, era realizada a moldagem dos corpos de prova cilíndricos utilizados no ensaio de resistência à compressão. A Figura 66 (a e b) mostra os procedimentos de ensaio de determinação do índice de consistência.

Figura 66 – (a) Preenchimento do molde para ensaio de índice de consistência e (b) Ensaio de índice de consistência de argamassa.



Tabela 13 – Diâmetros do ensaio de determinação do índice de consistência.

Identificação da Viga	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Índice de Consistência (mm)
A3V1	250	247	250,6	249,2
A3V2	260	266	260	262,0
A4V1	275	273	265	271,0
A4V2	270	273	265	269,3
J3V1	258	263	265	262,0
J4V1	270	265	267	267,3
A3C1	295	290	285	290,0
A3C2	279	281	282	280,7
A4C1	272	280	268	273,3
A4C2	287	283	280	283,3
J3C1	279	277	280	278,7
J3C2	276	275	273	274,7
J4C1	270	275	273	272,7
J4C2	265	260	255	260,0

Em seguida, levava-se a outra parte da mistura até o local onde estavam posicionadas as vigas e dava-se início ao reforço. Previamente à aplicação da primeira camada de argamassa, a poeira foi retirada com um pincel, e a superfície da viga, umedecida. A primeira camada de argamassa foi arremessada na superfície da viga, assim como cada camada seguinte. A quantidade necessária para cada camada era arremessada em pequenas quantidades, as quais foram pressionadas contra a viga (Figuras 67 e 68). Após o preenchimento, nivelou-se a camada com uma desempenadeira de madeira para a acomodação da camada no limite de cinco milímetros.

Figura 67 – Argamassa arremessada e pressionada.



Figura 68 – Argamassa sendo pressionada contra a viga.



Após a aplicação e o nivelamento da primeira camada de argamassa, posicionava-se uma tira de têxtil sobre esta (Figura 69), e com uma peça de metal, eram dados leves golpes na área com o têxtil para que a argamassa penetrasse nos vazios da malha. Assim, o sistema limitador de camadas era elevado para limitar a camada seguinte (Figura 70), sendo aplicada a camada de argamassa seguinte.

Figura 69 – Posicionamento da tira de têxtil na camada de argamassa.



Figura 70 – Elevação do sistema limitador de camadas.



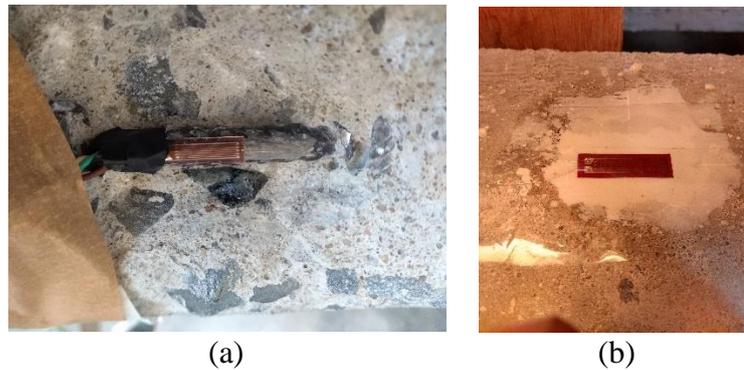
Os procedimentos – de elevar o sistema limitador de camadas, arremessar a argamassa, pressionar as pequenas quantidades de mistura, nivelar a camada, posicionar a fibra, pressionar com leves golpes, aplicar a camada seguinte – foram realizados até a última camada de argamassa.

4.1.7 Instrumentação

Para a coleta de dados, utilizou-se o LVDT, para a obtenção dos dados de deslocamento no centro das vigas. Os dois transdutores de deslocamento foram posicionados na parte superior na viga. Os dados de deformação do aço, Figura 71(a), e do concreto, Figura 71(b), foram obtidos com a instalação de *strain gauges* KYOWA. As informações foram registradas e

armazenadas em um sistema de aquisição de dados *QUANTUM*, que permite o acompanhamento dos resultados em tempo real.

Figura 71 – (a) *Strain gauge* colado em uma das barras de aço das vigas e conectado aos cabos do sistema de aquisição de dados e (b) *Strain gauge* colado na face comprimida do concreto.



A Figura 72 consiste em um registro do ensaio da viga A3C2 à flexão a quatro pontos. A instrumentação foi igual à usada nas quatorze vigas.

Figura 72 – Instrumentação completa do ensaio à flexão a quatro pontos.

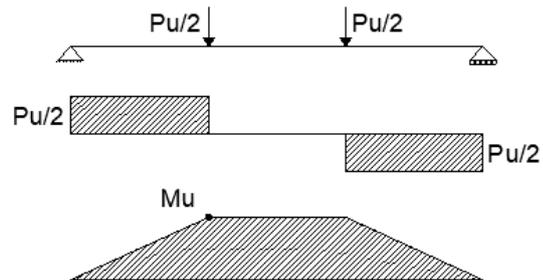


4.1.8 Procedimento de ensaio

Aos 28 dias completos da execução do reforço, as vigas foram ensaiadas à flexão. O ensaio foi realizado em uma prensa servo-hidráulica *SHIMADZU*, tendo capacidade máxima de 2000 kN, com monitoramento de deslocamento. A posição de ensaio das vigas foi escolhida respeitando

as dimensões da mesa do equipamento de 1,40 metros de comprimento e 85 centímetros de largura. Dessa forma, cada viga com comprimento de 1,5 metros foi posicionada na diagonal da mesa em dois apoios: um livre e um fixo, atingindo a situação de equilíbrio do sistema, como apresentado pelos diagramas da Figura 73, utilizados para o cálculo da carga e do momento últimos teóricos.

Figura 73 – Diagramas das vigas ensaiadas.



Atentou-se para que as vigas fossem posicionadas no centro coincidindo com o centro de aplicação de carga do equipamento (Figura 74), evitando, assim, cargas excêntricas.

Figura 74 – Posicionamento da viga testemunho na mesa de ensaio.



Os ensaios realizados foram de flexão a quatro pontos, com velocidade de aplicação de carga de 1 mm/min. O ensaio foi registrado por vídeos em uma câmera fotográfica, acompanhando-se o desenvolvimento da fissuração do reforço e da viga pela marcação das fissuras.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste item, serão apresentados os resultados dos experimentos: carga, deslocamento no centro do vão, deformação, modo de ruptura e fissuração. A partir dos resultados, avaliou-se a modificação no comportamento das vigas em relação à viga testemunho.

5.2 CARGA MÁXIMA

A aplicação do CT como reforço à flexão consiste em integrar o compósito à face inferior (tracionada) da viga submetida ao carregamento. Devido à adição do material, é esperado um aumento da capacidade resistente do elemento. Para isso, a primeira análise dos resultados obtidos nos ensaios foi a da carga máxima atingida pelas vigas. Os resultados estão dispostos na segunda coluna da Tabela 14, que também apresenta o número de camadas de têxtil, a espessura do compósito de cada configuração de reforço e o tratamento superficial empregado em viga reforçada. Além disso, a coluna seis mostra o incremento de carga conferido pelo reforço.

Tabela 14 – Carga máxima e incremento de carga das vigas ensaiadas.

Identificação da Viga	Carga Máxima (kN)	Número de Camadas de	Espessura CT	Tratamento Superficial	Incremento (%)
Testemunho	34,2	–	–	–	–
A3V1	46,8	3	2,0 cm	Apicoamento	36,8%
A3V2	30,5	3	2,0 cm	Apicoamento	–
A4V1	27,6	4	2,5 cm	Apicoamento	–
A4V2	18,9	4	2,5 cm	Apicoamento	–
J3V1	46,6	3	2,0 cm	Jateamento	36,3%
J4V1	50,6	3	2,0 cm	Jateamento	48,0%
A3C1	32,0	3	2,0 cm	Apicoamento	–
A3C2	44,8	3	2,0 cm	Apicoamento	30,8%
A4C1	37,5	4	2,5 cm	Apicoamento	9,6%
A4C2	31,6	4	2,5 cm	Apicoamento	–
J3C1	63,5	3	2,0 cm	Jateamento	85,5%
J3C2	57,7	3	2,0 cm	Jateamento	68,5%
J4C1	53,0	4	2,5 cm	Jateamento	54,9%
J4C2	56,0	4	2,5 cm	Jateamento	63,7%

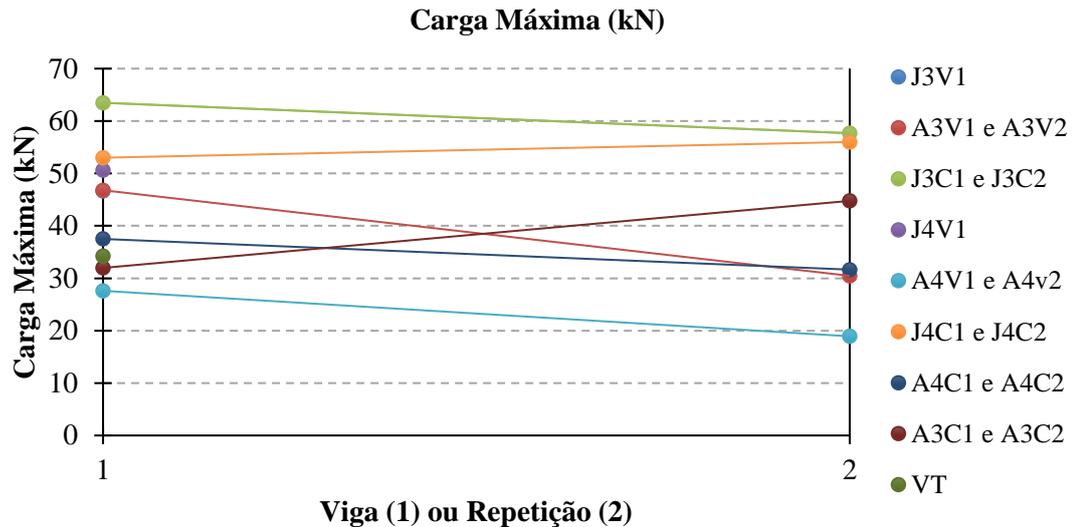
A avaliação dos resultados de carga máxima e dos incrementos de carga mostrou que a integração do compósito como camada de reforço, apesar de haver uma grande variabilidade dos resultados, aumentou a resistência das vigas em até 85,5%. Contudo, a variabilidade dos resultados foi notadamente alta. Para verificar o erro contido nos experimentos, foi desenvolvida a análise de variância da carga máxima das vigas, que é apresentada no próximo item.

5.2.1 Análise de variância

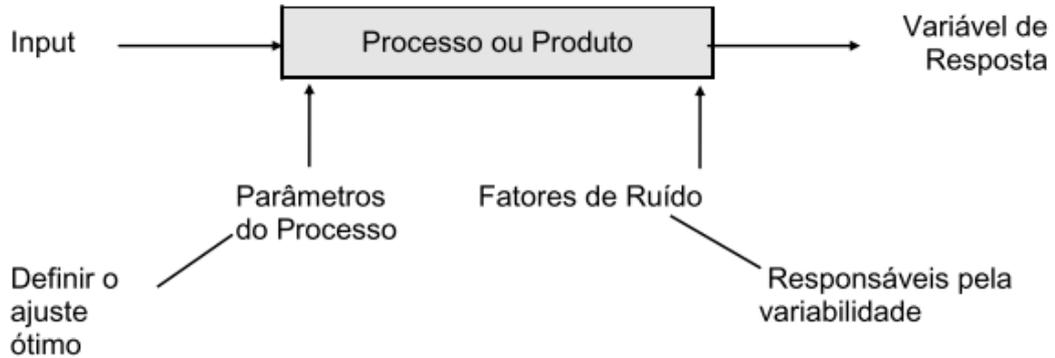
A partir da capacidade resistente dos elementos, foi realizada a análise de variância (ANOVA). Primeiramente, foram elaborados gráficos, como o da Figura 75, os quais auxiliaram na visualização da diferença de carga máxima nas repetições das configurações de reforço em relação à primeira viga da configuração. Este gráfico apresenta as cargas máximas no eixo y, e no eixo x, a representação se há repetição ou não das vigas, sendo que a repetição foi

representada pelo “2” no eixo x. Assim, no gráfico da Figura 75, estão apresentadas as capacidades resistentes das vigas e das repetições. Esse gráfico mostra, como esperado, a existência de ruídos (fatores não controláveis) nos experimentos.

Figura 75 – Gráfico comparativo das cargas atingidas pelas repetições das configurações de reforço.



Os parâmetros do processo são “todas as variáveis da linha de produção que podem ser alteradas e que talvez tenham um efeito sobre as variáveis de resposta” (RIBEIRO; TEN CATEN, 2011). Dentre os parâmetros deste trabalho, foram definidos três fatores controláveis – que foram estudados em dois níveis –, sendo eles o número de camadas de têxtil, o têxtil utilizado e o procedimento de preparo da superfície das vigas reforçadas. Ainda entre os parâmetros do processo, há os fatores que foram mantidos constantes entre eles: a matriz, o processo de produção e a largura do têxtil. A Figura 76 apresenta um esquema, elaborado por Ribeiro e Ten Caten (2011), para a compreensão dos componentes da análise a ser realizada. A variável de resposta deste trabalho consiste na capacidade resistente das vigas ensaiadas.

Figura 76 – Relação entre fatores controláveis e resposta.

Os ensaios, conforme preconizado pelos autores Ribeiro e Ten Caten (2011), foram executados de forma aleatória. Os três fatores controláveis e seus respectivos níveis estão apresentados na Tabela 15. Elaborou-se a Tabela 16 com as cargas máximas das vigas ensaiadas, a fim de facilitar o cálculo da análise de variância. Uma planilha eletrônica, desenvolvida no software Excel®, com as formulações a serem apresentadas nos próximos parágrafos, foi elaborada para a realização dos cálculos. No Anexo A, é apresentada visualmente a planilha confeccionada.

Tabela 15 – Níveis dos três fatores variáveis utilizados na ANOVA.

Fator Controlável	Nível 1		Nível 2
A	Tipo de fibra	Vidro	Carbono
B	Número de Camadas	Três	Quatro
C	Superfície	Jateada	Apicoada

Tabela 16 – Carga máxima das vigas reforçadas.

Carga Máxima (kN)				
3 camadas			4 camadas	
	Jateada	Apicoada	Jateada	Apicoada
Vidro	46,6	46,8	50,6	27,6
	–	30,5	–	18,9
Carbono	63,5	32,0	53,0	37,5
	57,7	44,8	56,0	31,6

Os cálculos foram realizados a partir do modelo estatístico, para vários fatores com vários níveis apresentados por Ribeiro e Ten Caten (2011), e que consiste na equação (1).

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (1)$$

$$i = 1, a; j = 1, b; k = 1, c; l = 1, n.$$

Onde,

μ : é a média igual;

T_i : é o efeito do i -ésimo nível de A;

β_j : é o efeito do j -ésimo nível de B;

$(\tau\beta_{ij})$: é o efeito da interação AB;

ε_{ijkl} : é o erro aleatório.

Suposições: $\varepsilon_{ijkl} \rightarrow N(0, \sigma)$

Seguindo o modelo estatístico, foram adotadas as seguintes hipóteses: cada fator controlável tem efeito no comportamento das vigas reforçadas e há interação entre os fatores, o que também causa efeitos significativos nos resultados. Assim, foi aplicada a formulação dada por Ribeiro e Ten Caten (2011), sendo apresentada pelas equações de 2 a 12.

$$TC = \frac{(T \dots)^2}{abcn} \quad (2)$$

$$SQA = \frac{\sum(T_i \dots)^2}{bcn} - TC \quad (3)$$

$$SQB = \frac{\sum(T_{.j \dots})^2}{acn} - TC \quad (4)$$

$$SQC = \frac{\sum(T_{..k})^2}{abn} - TC \quad (5)$$

$$SQAB = \frac{\sum(T_{ij..})^2}{cn} - TC - SQA - SQB \quad (6)$$

$$SQAC = \frac{\sum(T_{i.k.})^2}{abn} - TC - SQA - SQC \quad (7)$$

$$SQBC = \frac{\sum(T_{.jk.})^2}{an} - TC - SQB - SQC \quad (8)$$

$$SQABC = \frac{\sum(T_{ijk.})^2}{n} - TC - SQA - SQB - SQC - SQAB - SQAC - SQBC \quad (9)$$

$$SQR = \sum y^2_{ijkl} - \frac{\sum(T_{ijk.})^2}{n} \quad (10)$$

$$SQT = \sum y^2_{ijkl} - TC \quad (11)$$

Verificação:

$$SQT = SQA + SQB + SQC + SQAB + \dots + SQR \quad (12)$$

A partir da formulação, pode-se elaborar a Tabela ANOVA, apresentada na Tabela 17, e verificar se os efeitos dos fatores controláveis foram significativos ou não.

Tabela 17 – Tabela ANOVA com os dados de carga máxima das vigas.

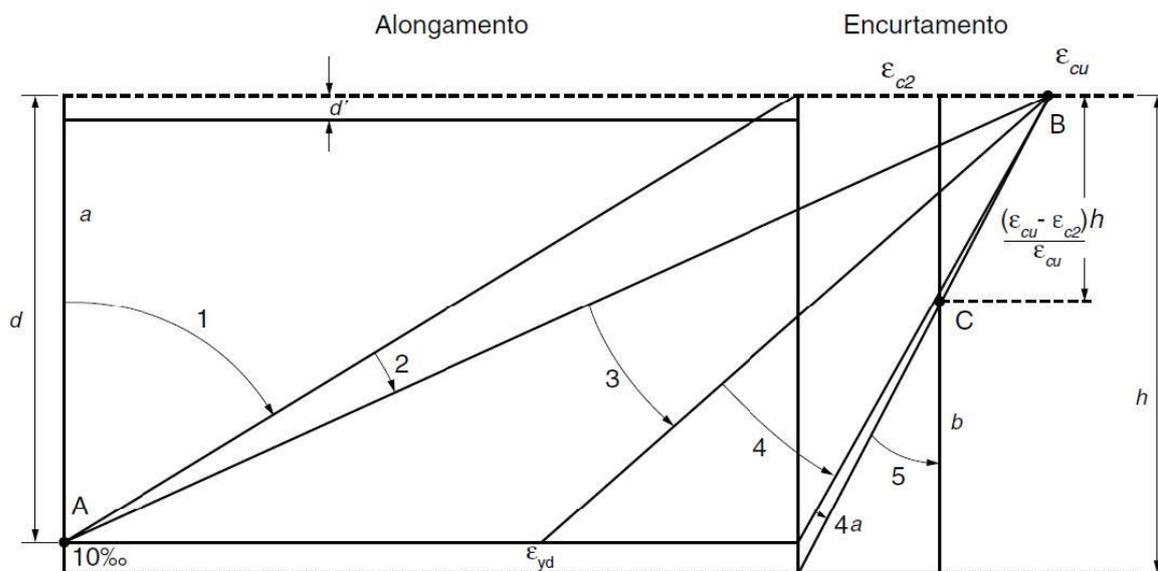
SQ						
TC	30135,3					
SQT	2316,5	GDL	MQ	Test	Probabilidade	Significativo ou Não
A	208,1	1	208,1	5,7	4,4%	S
B	113,0	1	113,0	3,1	11,6%	NS
C	1502,2	1	1502,2	41,2	0,0%	S
AB	0,6	1	0,6	0,0	90,4%	NS
AC	11,4	1	11,4	0,3	59,1%	NS
BC	72,8	1	72,8	2,0	19,5%	NS
ABC	116,9	1	116,9	3,2	11,1%	NS
Erro	291,5	8	36,4			
Total	2316,5	15				

A partir da análise da Tabela 17, têm-se que os efeitos do tipo de fibra e do preparo da superfície são significativos, ao passo que o efeito do número de camadas de têxtil apresentou-se como não significativo.

5.2.2 Carga máxima teórica

Na NBR 6118 (2014), o estado-limite último é caracterizado quando “a distribuição das deformações na seção transversal pertencer a um dos domínios”, definidos na Figura 77. Portanto, a viga submetida à flexão atinge a carga máxima teórica imediatamente antes da ruptura – ou uma deformação plástica – de um de seus componentes: aço, concreto ou material de reforço.

Figura 77 – Domínios de estado-limite último de uma seção transversal.

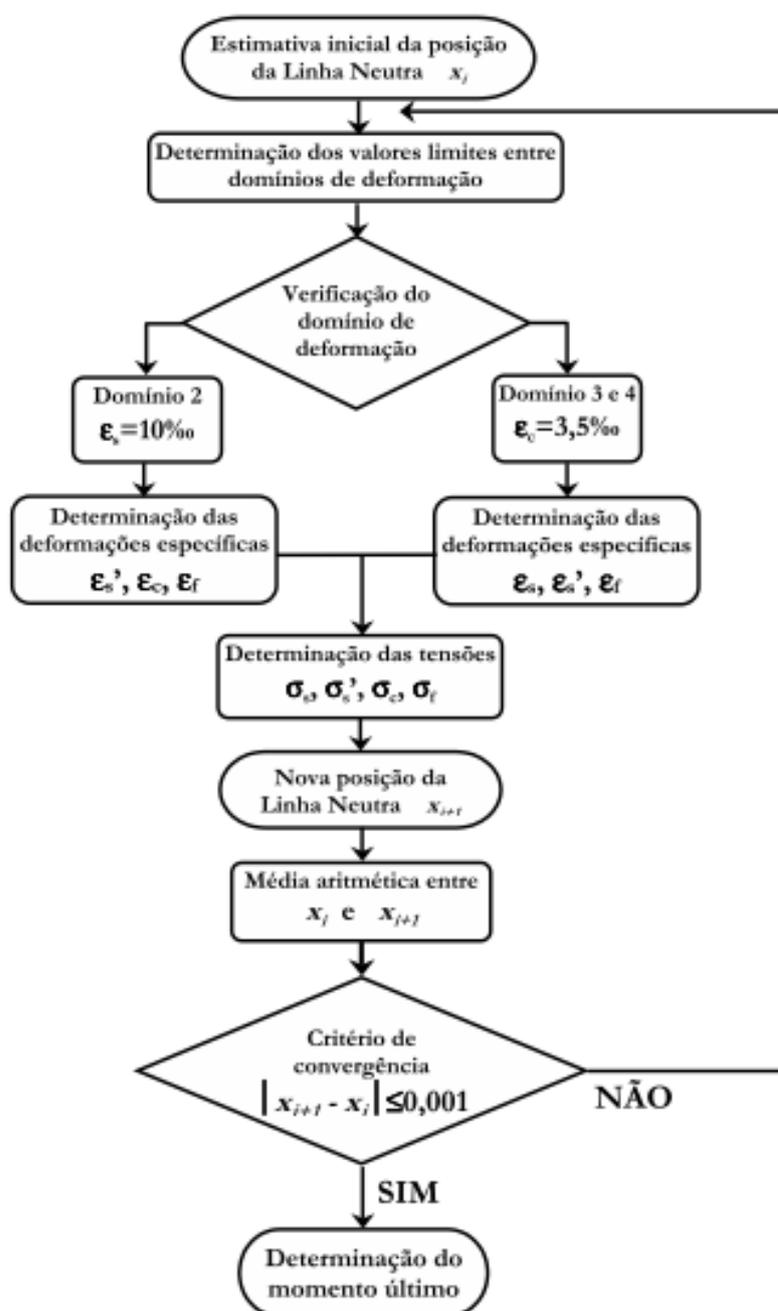


(Fonte: NBR 6118, 2014)

Foram adotadas as hipóteses recomendadas pela NBR 6118 (2014): seções transversais permanecem planas, aderência perfeita entre as barras e o concreto das vigas, desprezadas as tensões de tração do concreto, diagrama de distribuição de tensões no concreto é substituído por um retângulo com profundidade $y = \lambda x$, onde λ igual à 0,8 ($f_{ck} \leq 50$ MPa). A tensão nas armaduras é obtida a partir dos diagramas tensão-deformação. Em adição a essas hipóteses, foram consideradas que as ligações da superfície da viga-reforço e da matriz-fibra foram

O cálculo aconteceu de forma iterativa, seguindo o fluxograma de Beber (2003) (Figura 79). O valor inicial de “x” foi calculado pelas tensões máximas resistidas pelos materiais (caracterização mostrada no Capítulo 4). Após, verificou-se em qual domínio se encontrava a posição da linha neutra.

Figura 79 – Fluxograma de cálculo iterativo da linha neutra.



(Fonte: Beber, 2003)

Para verificação de em qual domínio se encontrava o x , foram postulados os limites pela formulação da NBR 6118, estando eles apresentados nas equações de 18 a 20.

$$\text{Se } x \leq 0,259 \cdot d = \frac{3,5\%}{3,5\% + 10\%} \cdot d - \text{DOMÍNIO 2} \quad (18)$$

$$\text{Se } 0,259d < x \leq 0,510 \cdot d = \frac{3,5\%}{3,5\% + \varepsilon_y} \cdot d - \text{DOMÍNIO 3} \quad (19)$$

$$\text{Se } 0,510 \cdot d < x - \text{DOMÍNIO 4} \quad (20)$$

Além dos limites dos estados limites da NBR 6118, aplicou-se o limite de deformação recomendado pela ACI 549.4R (2020), equação 21.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} = \varepsilon_{fu} \leq 0,012 \quad (21)$$

Constatado o domínio do primeiro cálculo de x , recalculavam-se as deformações específicas seguindo as equações de compatibilidade de deformação de 22 a 25. Após, foram recalculadas as tensões nos materiais e um novo valor de x , que consiste na média aritmética do valor anterior e o recém-calculado. Faz-se esse processo até a convergência do valor de x . Determinado o valor de x , calculou-se o momento da seção transversal e a carga aplicada, equação 26.

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_s}{d - x} \Rightarrow \varepsilon_c = \left(\frac{x}{d - x} \right) \varepsilon_s \quad (22)$$

$$\frac{\varepsilon_s}{d - x} = \frac{\varepsilon_s'}{x - d'} \Rightarrow \varepsilon_s' = \left(\frac{x - d'}{d - x} \right) \varepsilon_s \quad (23)$$

$$\frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_s}{d - x} \Rightarrow \varepsilon_s = \left(\frac{d - x}{x} \right) \varepsilon_c \quad (24)$$

$$\frac{\varepsilon_s}{d - x} = \frac{\varepsilon_f}{d_f - x} \Rightarrow \varepsilon_f = \left(\frac{d_f - x}{d - x} \right) \varepsilon_s \quad (25)$$

Onde,

ε_s = deformação específica na armadura longitudinal;

ε_s' = deformação específica na armadura longitudinal;

- ϵ_c = deformação específica no concreto;
 ϵ_f = deformação específica no reforço;
 d = distância entre a fibra comprimida e o centro da armadura tracionada;
 d' = distância entre a fibra comprimida e o centro da armadura comprimida;
 d_s = altura útil do reforço.

$$M_u = \sigma_s A_s d + \sigma_f A_f d_f - 0,32 b_w f_c x^2 - \sigma'_s A'_s d' \quad (26)$$

Assim, os momentos últimos das quatro diferentes seções transversais reforçadas neste trabalho estão descritos na Tabela 18. O momento último e a carga última teóricos das vigas testemunho foram, respectivamente, 651,8 kN.cm e 27,9 kN. Não foram considerados, por falta de base teórica, os tratamentos superficiais como parâmetros de cálculo.

Tabela 18 – Carga máxima teórica.

Material do Têxtil	Número de Camadas de Têxtil	Mu (kN.cm)	Pu (kN)
Testemunho	–	663,9	28,5
Vidro	3	943,9	40,5
Vidro	4	1038,2	44,5
Carbono	3	1521,9	65,2
Carbono	4	1809,8	77,6

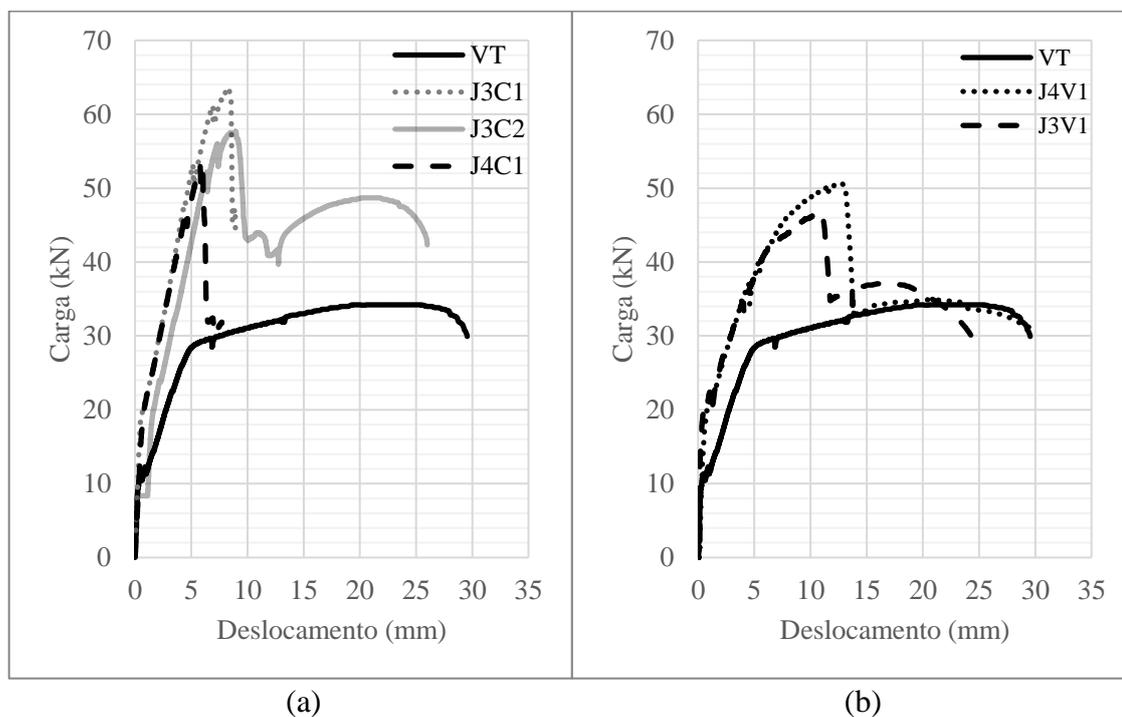
Após o cálculo de carga máxima teórica das vigas, foram analisados os resultados experimentais de carga e rigidez.

5.3 CARGA E RIGIDEZ

Foram elaborados os gráficos de carga vs. deslocamento das vigas, com o intuito de verificar a influência do reforço na rigidez dos elementos. O gráfico da Figura 80(a) mostra os resultados para as vigas jateadas reforçadas com têxtil de carbono, e o gráfico da Figura 80(b), os

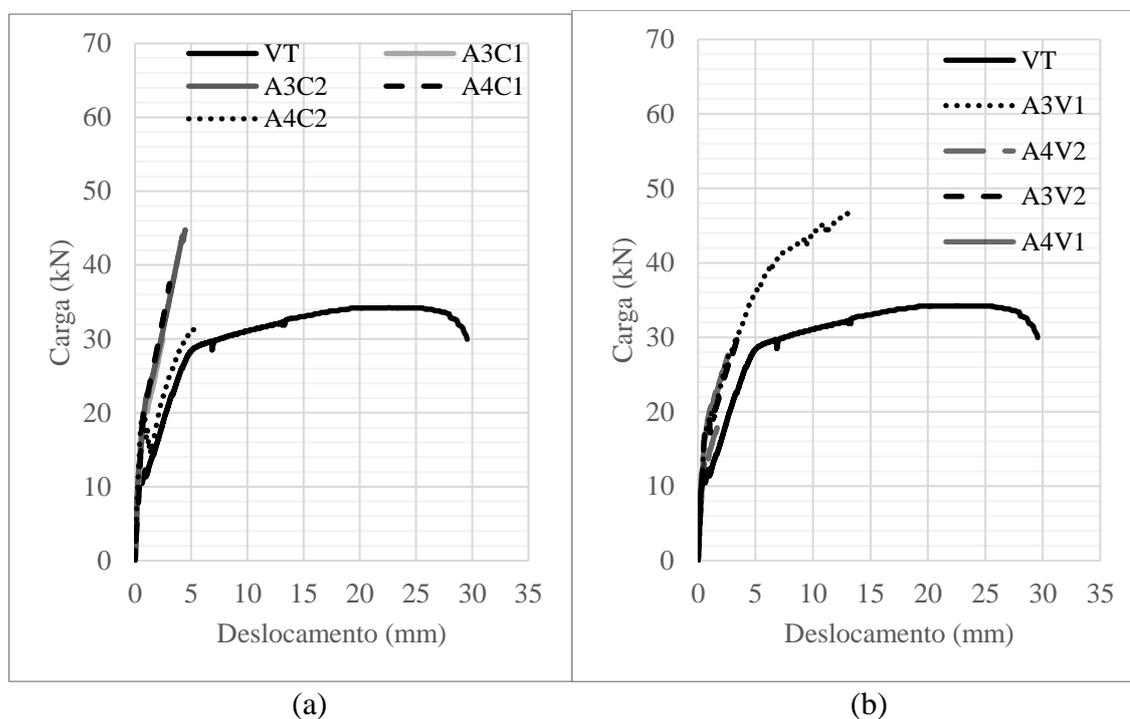
resultados das vigas jateadas reforçadas com reforço de têxtil de vidro. Em cada gráfico, também está apresentada a curva da viga testemunho.

Figura 80 – (a) Gráfico de carga vs. deslocamento das vigas reforçadas com têxtil de carbono e jateadas (b) Gráfico de carga vs. deslocamento das vigas reforçadas com têxtil de vidro álcali-resistente e jateadas.



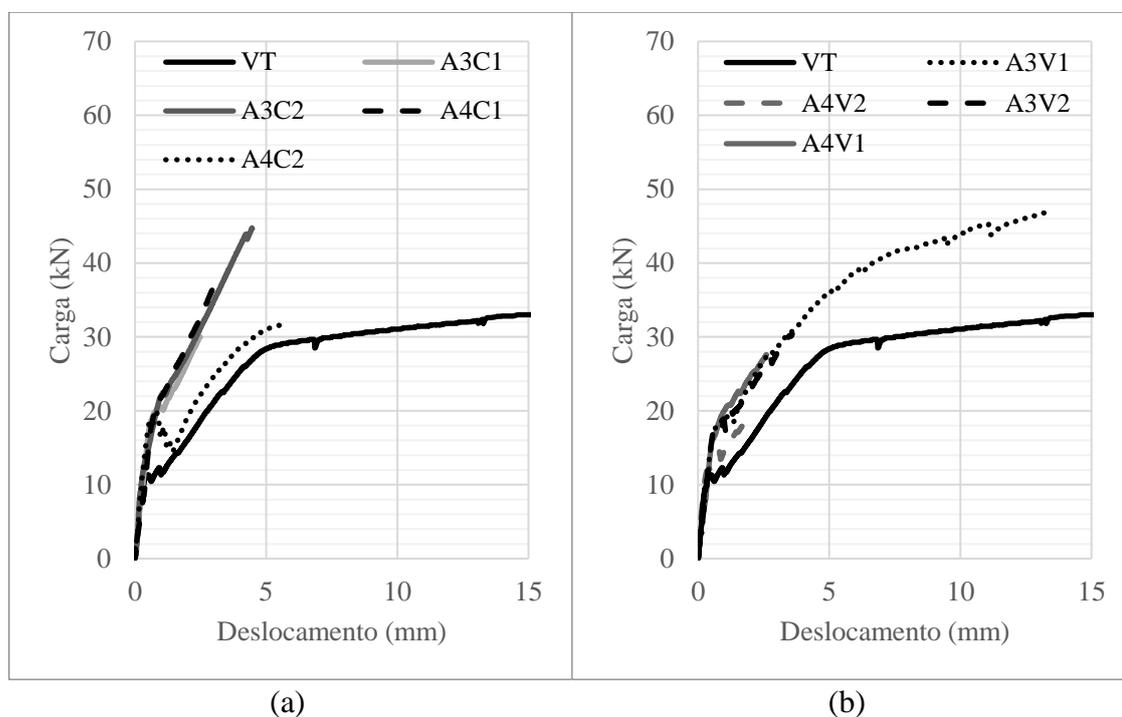
Os resultados das vigas apicoadas estão apresentados na Figura 81(a), vigas reforçadas com têxtil de carbono, e Figura 81(b), vigas reforçadas com têxtil de vidro. Em cada gráfico, também está apresentada a curva da viga testemunho.

Figura 81 – (a) Gráfico de carga vs. deslocamento das vigas reforçadas com têxtil de carbono e apicoadas (b) Gráfico de carga vs. deslocamento das vigas reforçadas com têxtil de vidro álcali-resistente e apicoadas.

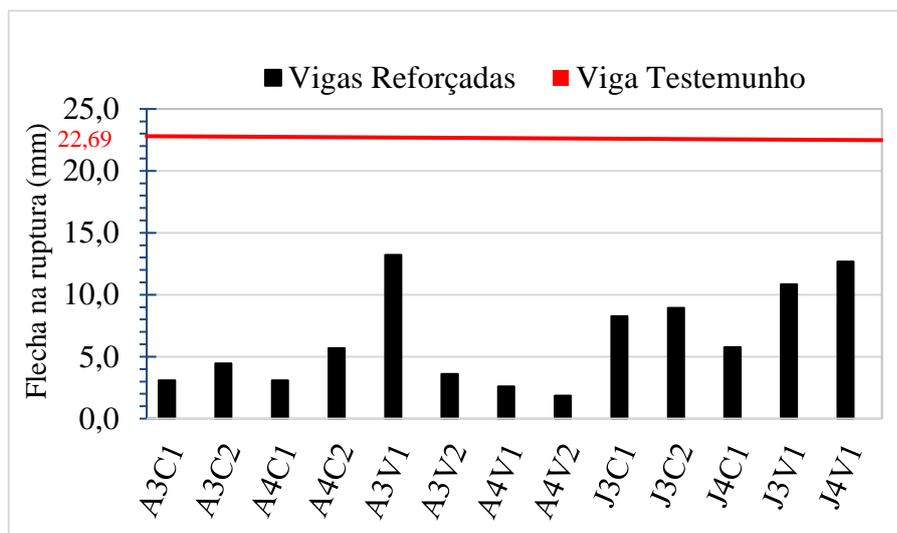


A eficácia do tratamento superficial evitou a ruptura precoce das vigas jateadas, possibilitando o incremento da carga. O eixo x dos gráficos das vigas apicoadas foi alterado para facilitar a visualização da região onde ocorreu o descolamento das vigas apicoadas, como mostra a Figura 82 (a e b).

Figura 82 – (a) Ruptura precoce das vigas apicoadas reforçadas com têxtil de carbono e (b) Ruptura precoce das vigas apicoadas reforçadas com têxtil de vidro.



Foi constatado um deslocamento na ruptura de 23 milímetros no centro do vão da viga testemunho. Os deslocamentos das vigas reforçadas jateadas J3C1, J3C2, J4C1, J4V1 e J3V1 foram, respectivamente: 8, 9, 6, 6, 11, 13. As vigas reforçadas apicoadas, A3C1, A3C2, A4C1, A4C2, A3V1, A3V2, A4V1, A4V2, tiveram deslocamentos verticais de, respectivamente, 3, 5, 3,6, 13, 4, 3 e 2. Esses valores de deslocamento das vigas estão apresentados em forma de um gráfico de colunas (Figura 83). O gráfico apresenta conjunto de duas colunas, sendo a primeira de uma das vigas reforçadas, e a segunda, da viga de controle (23 milímetros).

Figura 83 – Gráfico de flecha na ruptura de cada viga reforçada.

Observa-se pelo gráfico que todas as vigas reforçadas obtiveram uma menor flecha na ruptura do que a viga testemunho. Entretanto, as vigas apicoadas romperam precocemente, causando um deslocamento no centro do vão muito inferior devido a uma menor carga atingida, com exceção da viga A3V1. Destacam-se as vigas jateadas que apresentaram rigidezes consideravelmente menores do que a rigidez da viga de controle. A redução na rigidez das vigas jateadas em relação à viga testemunho foi de 74,6%. A Tabela 19 apresenta a redução na rigidez provocada em cada viga jateada devido ao reforço.

Tabela 19 – Redução na rigidez das vigas reforçadas.

Viga	Redução na Rigidez
J3C1	63,5%
J3C2	60,6%
J4C1	74,6%
J3V1	52,2%
J4V1	44,1%

5.4 MODO DE RUPTURA E DEFORMAÇÃO

O modo de ruptura das vigas foi definido pelos dados de deformação obtidos pelos *strain gauges* e pela visualização dos registros dos ensaios. A Tabela 20 mostra as cargas nas quais as vigas atingiram as deformações de entrada no estado plástico e de ruptura, respectivamente, igual a 2,07‰ e 10‰, para o aço, e igual a 2‰ e 3,5‰, para o concreto. Foi considerada a deformação positiva como tração, e a negativa, como compressão.

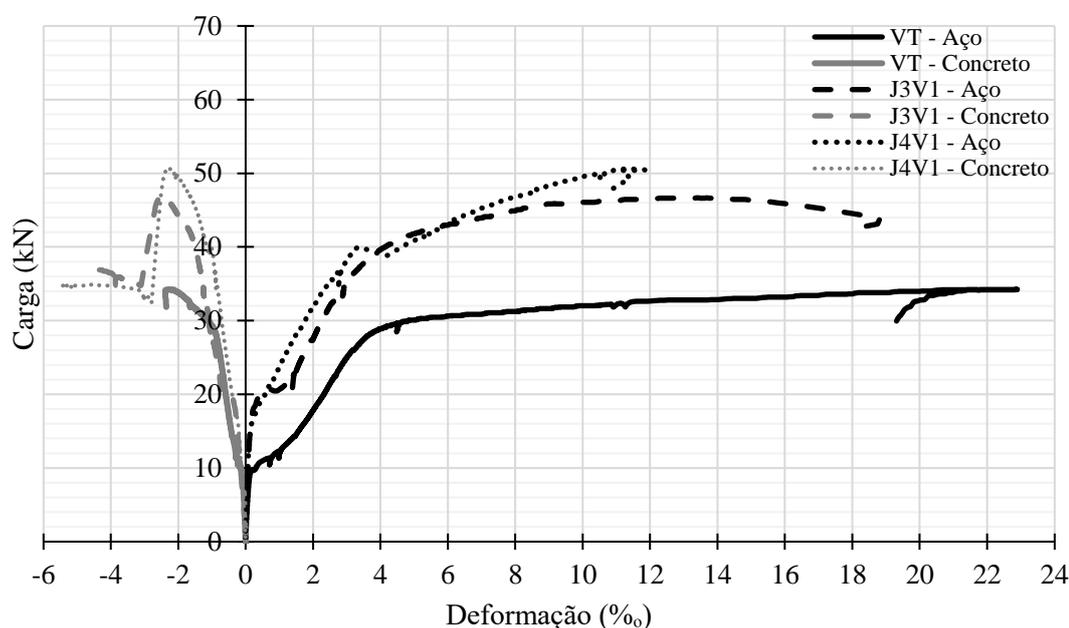
Tabela 20 – Cargas nas deformações específicas do aço e do concreto.

	Carga (kN)			
	$\epsilon_{aço}=2,07‰$	$\epsilon_{aço}=10‰$	$\epsilon_{concreto}= - 2‰$	$\epsilon_{concreto}= - 3,5‰$
Testemunho	18,3	32,0	33,8	–
A3C1	–	–	–	–
A3C2	35,0	–	–	–
A4C1	–	–	–	–
A4C2	23,0	–	–	–
J3C1	41,1	–	–	–
J3C2	38,2	–	–	–
J4C1	39,7	–	–	–
J4C2	–	–	–	–
A3V1	26,2	–	–	–
A3V2	37,5	–	–	–
A4V1	25,1	–	–	–
A4V2	–	–	–	–
J3V1	28,2	46,1	44,28	35,52
J4V1	32,0	49,5	49,56	34,54

Da análise da Tabela 20, foram feitas as seguintes constatações: o estado limite da viga sem reforço ocorreu pela deformação excessiva ($\epsilon > 10‰$) da armadura tracionada; a maioria das vigas apicoadas não atingiram os quatro limites postulados na tabela, sendo que as vigas A4C2, A3V1, A3V2 e A4V1 atingiram o estado limite de escoamento do aço; as vigas J3V1 e J4V1

atingiram o estado limite de ruptura do aço e de esmagamento do concreto. Com o intuito de verificar qual dos estados limites das vigas J3V1 e J4V1 foram atingidos antes, foi elaborado o gráfico de carga vs. deformação (Figura 84). Constatou-se que na carga máxima, aproximadamente 46 kN para a viga J3V1 e 50 kN para a viga J4V1, a deformação do concreto era inferior à do aço. Como a deformação dos dois materiais continuou em ascensão, o aço atingiu a sua deformação máxima antes do esmagamento do concreto.

Figura 84 – Gráfico de carga vs. deformação do concreto e do aço das vigas J3V1 e J4V1.



No estado limite último, segundo Beber (2003), os possíveis modos de ruptura de uma viga em concreto armado reforçada à flexão com compósitos são de dois tipos: modo de ruptura sem problemas de aderência na interface superfície da viga-reforço e modo de ruptura precoce com falha na ligação viga-reforço. O mesmo autor ainda ressalta que o primeiro tipo de ruptura, o que garante a aderência na interface entre a viga e o compósito, acontece por esmagamento do concreto ou por ruptura do reforço à tração. Beber (2003) estudou os compósitos que empregam resina como matriz, quando se consideram compósitos com matriz cimentícia. A norma ACI 549.4R-20 apresenta os possíveis tipos de ruptura: esmagamento do concreto na zona de compressão antes do escoamento do aço; escoamento do aço tracionado e consecutivo esmagamento do concreto, laminação por cisalhamento/tensionamento do cobrimento do concreto, descolamento do CT do substrato de concreto, deslizamento do têxtil na matriz

cimentícia e ruptura à tração do têxtil. Neste trabalho, foram verificados quatro desses modos de ruptura nas vigas reforçadas.

A viga testemunho apresentou o comportamento esperado para uma viga dimensionada no estágio II: ruptura por deformação excessiva do aço da armadura tracionada (Figura 85). A ruptura foi precedida pelo aparecimento de fissuras no terço médio da viga e pela progressão dessas fissuras devido à deformação excessiva das armaduras.

Figura 85 – Viga testemunho após ruptura por deformação excessiva da armadura.



As vigas com tratamento superficial por apicoamento apresentaram o mesmo modo de ruptura: descolamento do CT do substrato de concreto. As vigas apicoadas rompidas estão apresentadas nas Figuras 86 a 93. Quando se verificava a falha na interface entre o reforço e a viga, o ensaio era interrompido, pois o reforço não estava mais ativo (resistindo aos esforços de tração).

Figura 86 – Viga A3C1 após ruptura por falha na interface reforço-viga.



Figura 87 – Viga A3C2 após ruptura por falha na interface reforço-viga.



Figura 88 – Viga A4C1 após ruptura por falha na interface reforço-viga.



Figura 89 – Viga A4C2 após ruptura por falha na interface reforço-viga.



Figura 90 – Viga A3V1 após ruptura por falha na interface reforço-viga.



Figura 91 – Viga A3V2 após ruptura por falha na interface reforço-viga.



Figura 92 – Viga A4V1 após ruptura por falha na interface reforço-viga.



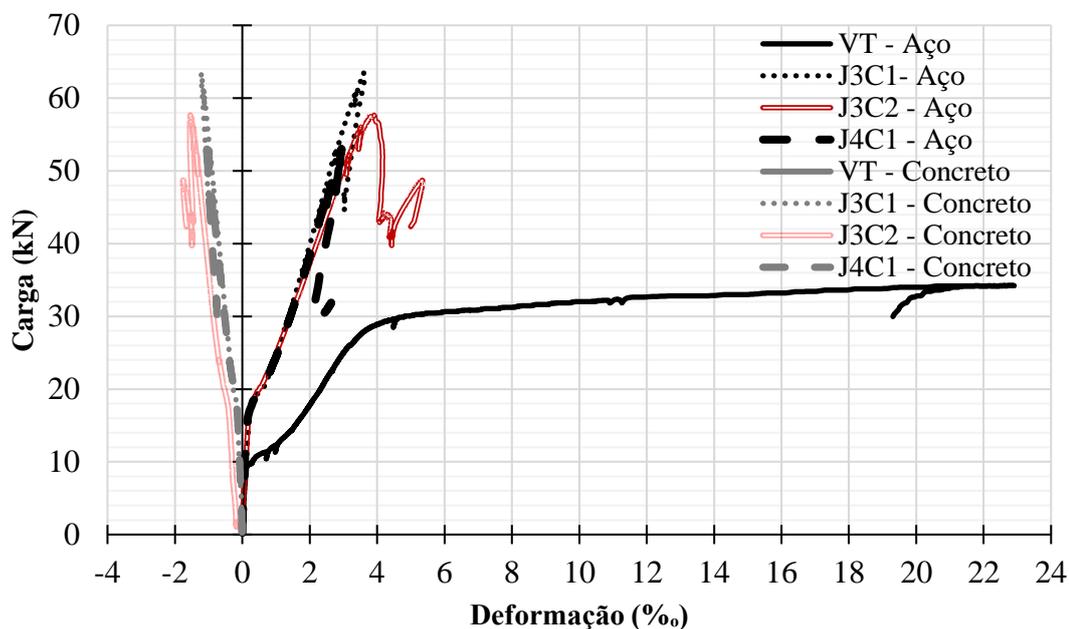
Figura 93 – Viga A4V2 após ruptura por falha na interface reforço-viga.



As vigas apicoadas romperam precocemente devido ao tratamento superficial, o qual não garantiu a aderência entre o CT e o substrato da viga, justificando as cargas máximas significativamente mais baixas em relação às vigas com superfície jateada. A variabilidade demonstrada no item 5.2.1, pela análise de variância, ocorreu devido ao descolamento parcial do reforço. Em algumas vigas, a camada de reforço inteira descolou repentinamente, mas, em outras, houve o descolamento de uma das extremidades, porém parte do reforço ainda permaneceu aderida, suportando as cargas. Nas vigas onde houve descolamento parcial, a contribuição do reforço ainda aderido foi variável, resultando na dispersão dos resultados de carga máxima.

Nas vigas com o substrato de concreto jateado, a aderência das vigas foi eficaz e não houve ruptura precoce. O gráfico da Figura 94 mostra que, ao alcançarem as cargas de ruptura, as vigas reforçadas com têxtil de carbono e superfície jateada não atingiram as deformações de estados limites do aço ou do concreto. Portanto, a ruptura pode ter ocorrido devido à falha no reforço (descolamento da superfície de concreto, deslizamento do têxtil na matriz ou ruptura do têxtil) ou à laminação do cobrimento do concreto.

Figura 94 – Gráfico de carga vs. deformação do concreto e do aço das vigas J3C1, J3C2 e J4C1.



Os registros apresentados nas imagens das Figuras 95 a 100 foram analisados com a intenção de determinar qual é o tipo de ruptura das vigas jateadas.

Figura 95 – Viga J3C1 após a ruptura por laminação do cobrimento do concreto.



Figura 96 – Viga J3C2 após a ruptura por deslizamento do têxtil na matriz.



Figura 97 – Viga J4C1 após ruptura por laminação do cobrimento do concreto.



Figura 98 – Viga J4C2 após ruptura por laminação do cobrimento do concreto.



Figura 99 – Viga J3V1 após ruptura por deslizamento do têxtil na matriz e ruptura do têxtil.



Figura 100 – Viga J4V1 após ruptura por deslizamento do têxtil na matriz e ruptura do têxtil.



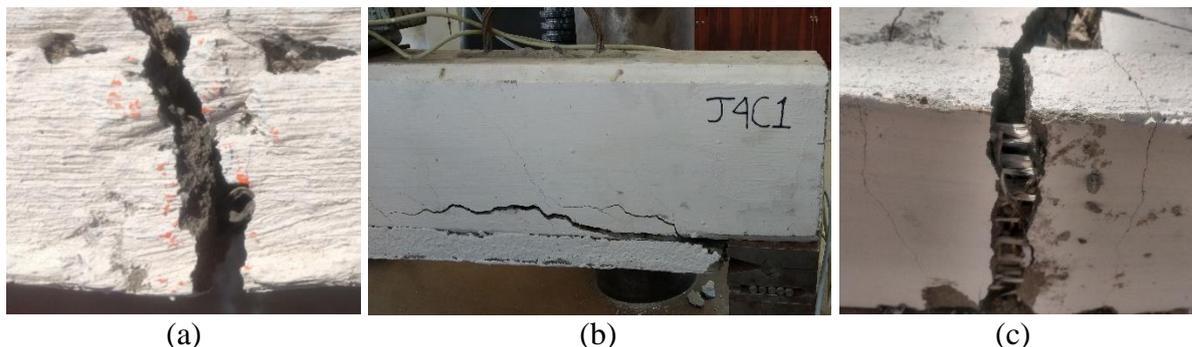
Com a finalidade de apresentar o modo de ruptura das vigas, foi elaborada a Tabela 21. A Figura 101 (a, b e c) apresenta as rupturas, respectivamente, por deslizamento do têxtil na matriz,

laminação do cobrimento do concreto e ruptura do têxtil. A ruptura por laminação do cobrimento ocorreu pela falta de ancoragem do reforço.

Tabela 21 – Modo de ruptura das vigas ensaiadas.

Identificação da Viga	Modo de ruptura
Testemunho	Escoamento excessivo da armadura
A3C1	Descolamento do CT do substrato de concreto
A3C2	Descolamento do CT do substrato de concreto
A4C1	Descolamento do CT do substrato de concreto
A4C2	Descolamento do CT do substrato de concreto
J3C1	Laminação do cobrimento do concreto
J3C2	Deslizamento do têxtil na matriz
J4C1	Laminação do cobrimento do concreto
J4C2	Laminação do cobrimento do concreto
A3V1	Descolamento do CT do substrato de concreto
A3V2	Descolamento do CT do substrato de concreto
A4V1	Descolamento do CT do substrato de concreto
A4V2	Descolamento do CT do substrato de concreto
J3V1	Deslizamento do têxtil na matriz e ruptura do têxtil
J4V1	Deslizamento do têxtil na matriz e Ruptura do têxtil

Figura 101 – (a) Ruptura por deslizamento do têxtil na matriz (b) Ruptura por laminação do cobrimento de concreto e (c) Ruptura do têxtil na matriz.

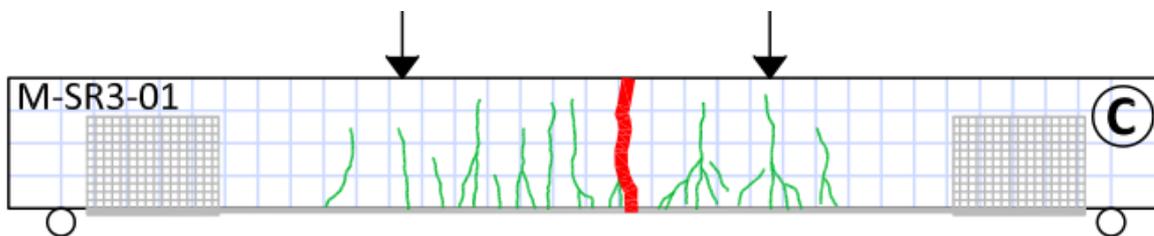


5.5 FISSURAÇÃO

A fissuração nos elementos de concreto armado reforçados com concreto têxtil é muito estudada, pois representa a principal diferença entre o comportamento do reforço com esse compósito e os FRPs.

Vários autores dedicaram-se ao comportamento do CT quanto às fissuras. Entre eles destacam-se Escrig, Gil e Bernat-Maso (2017), que encontraram três padrões de fissuração nas vigas experimentais de concreto armado reforçadas com CT. Os padrões de fissuração apresentados pelos autores foram: aparecimento e abertura de várias fissuras equidistante aproximadamente em 300 mm umas das outras e desenvolvimento de uma fissura principal no final do carregamento; o segundo padrão descrito foi o aparecimento de várias fissuras, em que apenas duas abriram e uma delas tornou-se a fissura principal; o último padrão de fissuração identificado foi o aparecimento de várias fissuras e posterior abertura de uma fissura, que consistiu na fissura principal (ESCRIG; GIL; BERNAT-MASO, 2017). Os autores, além de identificarem, também ilustraram os padrões de fissuração. Destaca-se que, no estudo de Escrig, Gil e Bernat-Maso (2017), as vigas possuíam ancoragem, como na viga ilustrada na Figura 102.

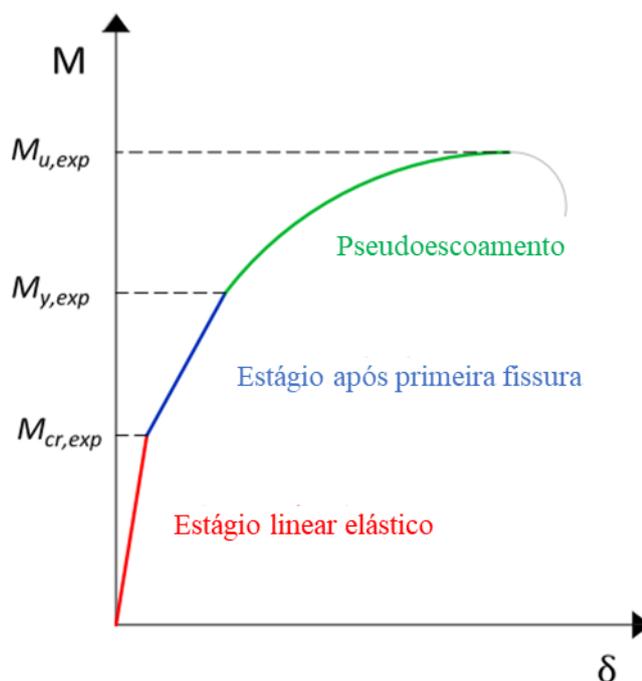
Figura 102 – Padrão de fissuração C, de Escrig, Gil e Bernat-Maso (2017).



(Fonte: Escrig, Gil e Bernat-Maso, 2017)

Nas vigas reforçadas, esperava-se um comportamento trilinear do reforço, já descrito por diversos autores: uma região elástica-linear, uma região de pós-primeira fissura e uma região de abertura de fissuras (pseudoductilidade do CT), representadas graficamente na Figura 103.

Figura 103 – Comportamento trilinear do reforço de concreto têxtil.



(Fonte: Escrig, Gil e Bernat-Maso, 2017)

Assim, devido à importância da fissuração dos compósitos de matriz cimentícia, realizou-se a análise da fissuração das vigas ensaiadas. A partir dos registros dos ensaios das vigas e dos dados de carga e deslocamento do centro do vão, foram elaborados gráficos ilustrados pela fissuração. Os gráficos das vigas reforçadas com têxtil de vidro que não tiveram ruptura precoce estão apresentados nas Figuras 104 e 105, sendo empregado o momento no eixo y, seguindo o que foi realizado por Escrig, Gil e Bernat-Maso (2017).

Figura 104 – Gráfico de momento vs. deslocamento do centro do vão da viga J3V1.

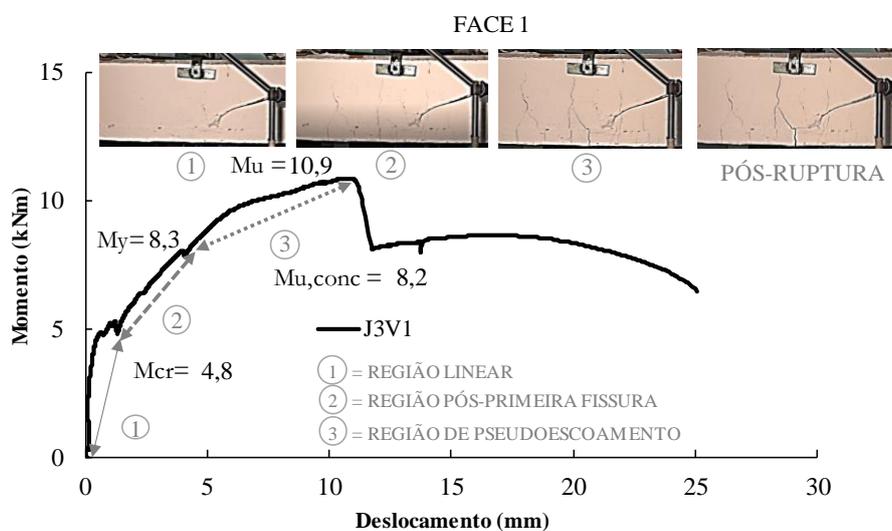
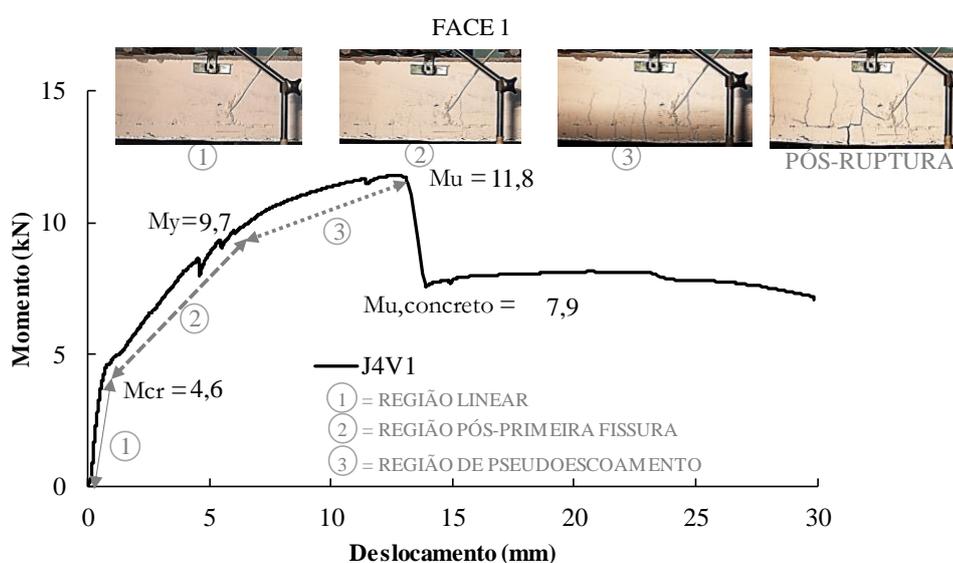


Figura 105 – Gráfico de momento vs. deslocamento do centro do vão da viga J4V1.



Nas figuras apresentadas, observa-se que o comportamento do reforço segue o descrito pelos autores e que as duas vigas apresentam comportamento e fissuração semelhantes. Destaca-se que o terço central das vigas foi mostrado nos registros devido à grande quantidade de fissuras nessa região.

O comportamento das vigas reforçadas com têxtil de carbono é mostrado nas Figuras 106, 107 e 108. Cada um dos gráficos de momento *versus* deslocamento está ilustrado pelos registros das vigas durante cada região demonstrada no gráfico.

Figura 106 – Gráfico de momento vs. deslocamento do centro do vão da viga J3C1.

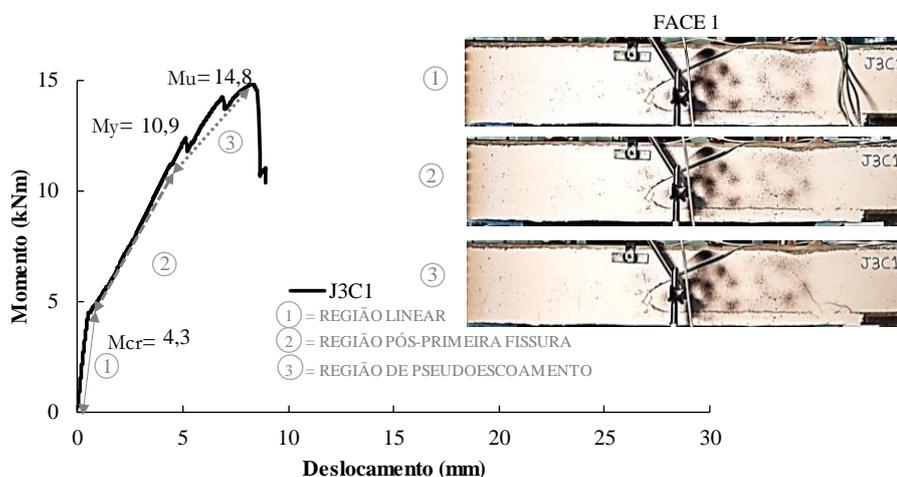


Figura 107 – Gráfico de momento vs. deslocamento do centro do vão da viga J3C2.

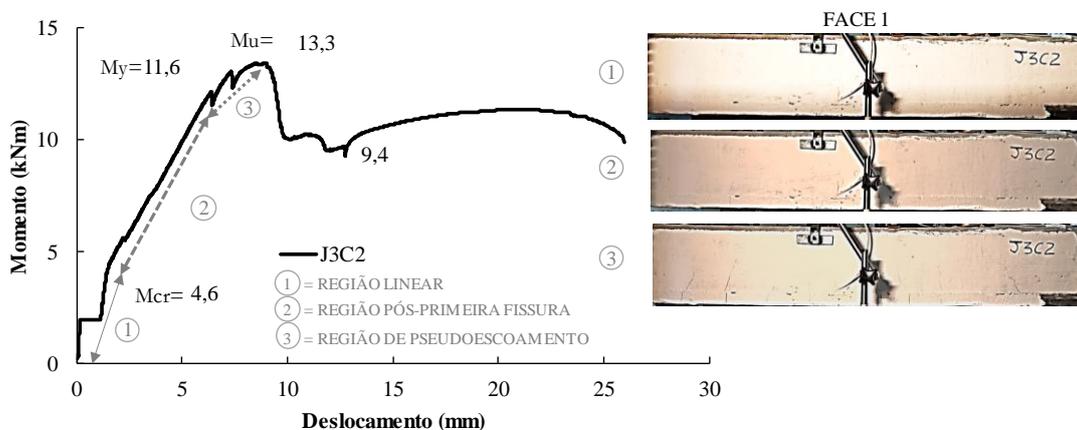
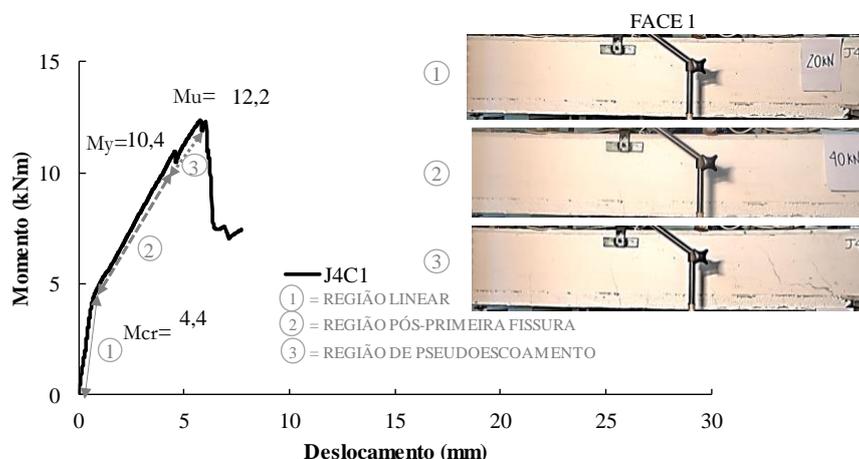


Figura 108 – Gráfico de momento vs. deslocamento do centro do vão da viga J4C1.



Primeiramente, verifica-se que as vigas reforçadas com têxtil de carbono apresentaram fissuras mais dispersas, pelo comprimento das vigas, diferentemente das vigas reforçadas com vidro, que apresentaram uma maior quantidade de fissuras no centro do vão. Dessa forma, os registros das vigas reforçadas com têxtil de carbono mostram todo o comprimento das vigas. Além disso, os gráficos mostram que as vigas com reforço de CT com fibra de vidro apresentaram uma região de pseudoductilidade maior do que as vigas reforçadas com têxtil de carbono.

Foram identificados três momentos importantes que delimitam o fim de uma região e início de outra. Os três momentos foram descritos por Escrig, Gil e Bernat-Maso (2017): momentos experimentais de fissuração (M_{cr}), de pseudoescoamento (M_y) e de ruptura (M_u) do reforço, destacados nos gráficos e ordenados na Tabela 22.

Tabela 22 – Momentos de fissuração, de pseudoescoamento e de ruptura das vigas jateadas.

	Mcr	My (kNm)	Mu (kNm)
J3C1	4,35	10,9	14,8
J3C2	4,6	11,6	13,3
J4C1	4,4	10,4	12,2
J3V1	4,8	8,3	10,9
J4V1	4,6	9,7	11,8

Além dos gráficos gerados a partir dos registros de vídeo e dos dados de momento vs. deslocamento, o controle da fissuração também foi feito por inspeção visual: ao atingir o limite inferior do intervalo de cargas da primeira coluna da Tabela 23, a cor do intervalo era identificada e se marcavam as fissuras que apareciam em uma face da viga. A partir de imagens da face na qual foram marcadas as fissuras nas vigas, foram desenhados os contornos dessas fissuras no programa *Autocad*.

Tabela 23 – Legenda da fissuração demarcada das vigas durante os ensaios.

Intervalo de Carga (kN)	Intervalo de Momento (kNm)	Cor das Fissuras
0-4	0-0,9	
5-9	1,2-2,1	
10-14	2,3-3,3	
15-19	3,5-4,4	
20-24	4,7-5,6	
25-29	5,8-6,8	
30-39	7-9,1	
40-49	9,3-11,4	
50-59	11,7-13,8	
60-70	14-16,3	

A inspeção visual auxiliou na identificação do padrão de fissuração das vigas e do reforço, iniciada pelos gráficos de momento vs. deslocamento. A face representada pelos desenhos das fissuras é a oposta à face dos registros mostrados nos gráficos de momento vs. deslocamento. Faz-se a ressalva de que uma parte da face na qual as fissuras foram demarcadas estava atrás de um componente da máquina de ensaio, como mostra a Figura 108. Essa situação impediu que as fissuras fossem acompanhadas naquela face, o que foi possível somente pelos registros feitos pelos vídeos dos ensaios. Os desenhos das vigas fissuradas estão apresentados nas Figuras 109 a 112, e cada viga está representada por três desenhos, os quais mostram a fissuração nas três regiões citadas.

Figura 109 – Região não demarcada devido à limitação do equipamento.

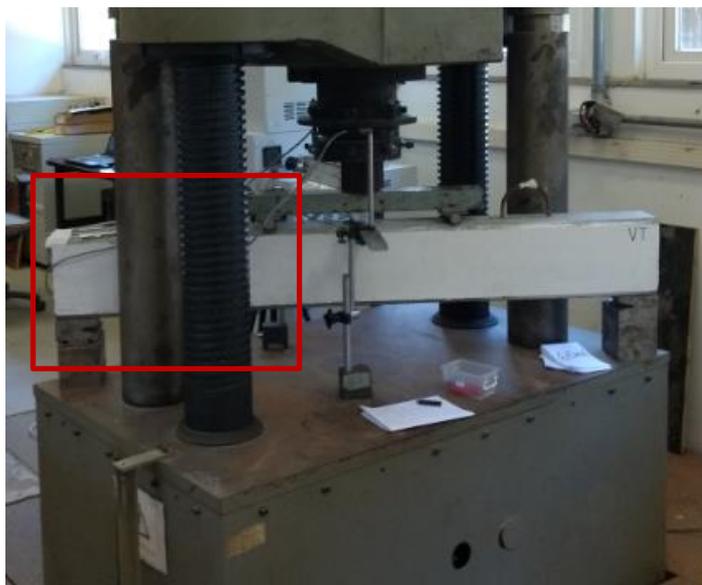


Figura 110 – Fissuração da viga J3C1 e modelo utilizado para apresentação da evolução das fissuras.

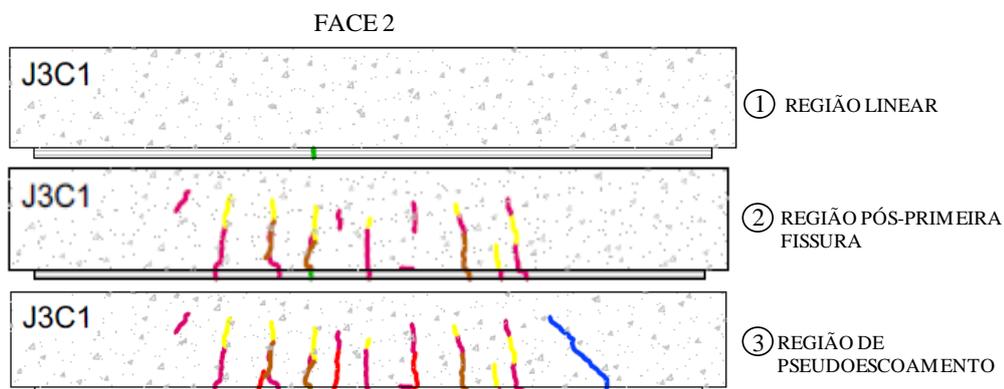


Figura 111 – Fissuração das vigas J3C2 e J4C1.

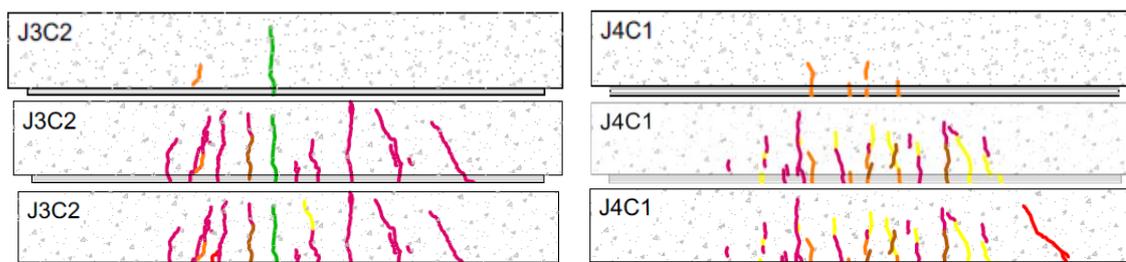
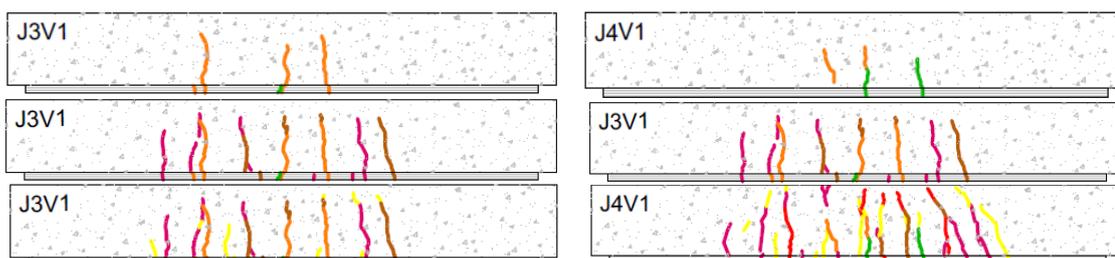


Figura 112 – Fissuração das vigas J3V1 e J4V1.

As marcações foram feitas por dois pesquisadores diferentes, cada qual com uma rapidez para identificar as fissuras, o que gerou um atraso na identificação de algumas fissuras. Por conseguinte, podem ocorrer variações na cor de uma fissura que foi identificada em um intervalo posterior ao que apareceu no gráfico.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, estão apresentadas as considerações finais deste trabalho. Além disso, foram feitas recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

Os estudos que versam sobre reforço em elementos estruturais de concreto armado têm aumentado a cada ano, e isso se comprova pelo número de artigos publicados por ano. Nesse contexto, novos materiais são introduzidos como alternativa de sistema de reforço, visando atender a demandas de resistência ao fogo, sustentabilidade, disponibilidade de materiais, resistência mecânica, entre outras.

Os compósitos são materiais já muito utilizados em diversas áreas da engenharia civil. Tais materiais foram introduzidos há décadas funcionando como uma camada externa integrada aos elementos, para aumentar ou recuperar a capacidade resistente dos elementos. Um dos compósitos mais eficientes empregados como sistema de reforço estrutural são os FRPs, mas as limitações de temperatura de sua matriz abriram espaço aos compósitos de matrizes cimentícias.

As fibras de alto desempenho – a indústria têxtil em geral – estão se consolidando no mercado e oferecendo materiais cada vez mais cientificamente elaborados. Contudo, por ser uma tecnologia nova, a disponibilidade de informações sobre os produtos é escassa, surgindo ainda uma ramificação na pesquisa sobre o CT: a caracterização dos têxteis utilizados.

A caracterização dos têxteis técnicos utilizados nos experimentos é muito importante e permite algumas previsões de capacidade resistente, além de ser fundamental conhecer o material de revestimento dos filamentos, devido à durabilidade. Portanto, a realização de ensaios de caracterização do têxtil empregado é de suma importância. Sendo assim, neste trabalho, foram produzidos ensaios de caracterização dos dois têxteis utilizados, obtendo resultados de carga média de ruptura bem elevadas. Isso potencializaria a utilização desses têxteis como reforços de matrizes cimentícias aplicados em conjunto como reforço à flexão de vigas em concreto armado.

Verificar a aplicabilidade do CT como reforço à flexão de vigas de concreto armado foi o objetivo deste trabalho, pois, além da resistência à tração do têxtil, é fundamental conhecer o

comportamento deste quando impregnado pela matriz e acoplado a um elemento estrutural. Podem-se destacar algumas vantagens na análise dos resultados dos experimentos.

A viga que apresentou maior incremento de carga foi a J3C1 (85,5%). Pode-se confirmar o melhor desempenho das vigas reforçadas com têxtil de carbono em relação às reforçadas com têxtil de vidro nas cargas máximas atingidas, visto que, nas vigas com reforço de vidro, o maior incremento de carga na viga J4V2 foi de 47%.

Outro ponto em que se constatou diferença entre os reforços com diferentes têxteis foi na deformação das armaduras de aço das vigas. Nas vigas reforçadas com têxtil de vidro que não tiveram ruptura precoce, as deformações do aço na ruptura ultrapassaram o estado limite de escoamento, o que não ocorreu nas vigas reforçadas com têxtil de carbono.

Nas vigas apicoadas, os resultados apresentaram muita variabilidade devido à falha na interface superfície das vigas-reforço. O martetele elétrico de 850 Watt utilizado é uma provável causa deste descolamento. Acredita-se que o martetele possa ter danificado a camada externa das vigas, causando microfissuras que se tornaram pontos de fragilidade quando o sistema viga-reforço foi solicitado.

A diferença entre o resultado do cálculo das cargas teóricas das vigas e o resultado experimental destaca a importância de considerar os mecanismos de falha na ligação entre os materiais constituintes do reforço, pois a maioria das vigas rompeu por falha na interface.

O comportamento de carga vs. o deslocamento das vigas reforçadas apresentaram deslocamentos na ruptura menores do que o da viga testemunho. As vigas jateadas com reforço com têxtil de carbono tiveram aumento na rigidez maior do que as vigas jateadas com têxtil de vidro.

As diferenças entre quatro ou três camadas de têxtil no reforço não foram significativas. Por isso, é aconselhável que se faça um número maior de corpos de prova com maior controle do tratamento superficial, a fim de constatar as diferenças relativas a essa variável de controle.

Em relação à energia de deformação, nota-se que a viga testemunho apresentou a maior energia de deformação, ou seja, armazenou mais energia até a ruptura. As vigas reforçadas obtiveram menores energias de deformação e, entre elas, destaca-se a viga com a superfície jateada e

reforçada com CT de fibras de vidro, que apresentou a maior energia de deformação até a ruptura.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação – NBR 7480. Rio de Janeiro. p. 1-17, 2008.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão – NBR 13279. Rio de Janeiro. p. 1-13, 2005.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência – NBR 13276. Rio de Janeiro. p. 1-6, 2016.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos-NBR 7215. Rio de Janeiro. p. 1-12, 2019.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão – NBR 8522. Rio de Janeiro. p. 26, 2017.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos – NBR 5738. Rio de Janeiro. p. 1-13, 2015.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova – NBR 5739. Rio de Janeiro. p. 1-13, 2018.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Fibras Têxteis – NBR 12744. Rio de Janeiro. p.1-9, 1992.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais têxteis – Determinação do título dos fios – NBR 13214. Rio de Janeiro. p. 1-256, 1994.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento – NBR 6118. Rio de Janeiro. p. 3, 2014.
- ACI (American Concrete Institute). (2020). Guide to design and construction of externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix and steel-reinforced grout systems for repair and strengthening of concrete structures. ACI 549.4 R-20. ACI Committee 549, Farmington, MI.
- ACS. High performance carbon fibers: national historic chemical landmark. American Chemical Society, Parma, Ohio, set. 2020. Disponível em:
<<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1092295>>.
- AL-MAHAIDI, R.; KALFAT, R. Methods of Structural Rehabilitation and Strengthening. In: **Rehabilitation of Concrete Structures with Fiber-Reinforced Polymer**. 1st. ed. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2018. p. 7-13.

BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. 2003. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

BOURNAS, D. A.; TRIANTAFILLOU, T. C.; PAPANICOLAOU, C. G. Retrofit of Seismically Deficient RC Columns with Textile-Reinforced Mortar (TRM) Jackets. In: 4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4), Dresden, Alemanha. **Anais...** Dresden, Alemanha, 2009.

BRAMESHUBER, W. et al. 4 Concrete / matrix. **State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC: Textile Reinforced Concrete**, p. 29-59, 2006.

BRAMESHUBER, W.; BROCKMANN, T. Introduction. **State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC: Textile Reinforced Concrete**, p. 1-3, 2006.

BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M. Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 39, n. 292, p. 741-748, 2006.

DONNINI, J.; CORINALDESI, V.; NANNI, A. Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different coating treatments. **Composites Part B: Engineering**, v. 88, p. 220-228, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.012>>.

ELSANADEDY, H. M. et al. Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar - Experimental and numerical study. **Composite Structures**, v. 97, p. 40-55, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.053>>.

ESCRIG, C.; GIL, L.; BERNAT-MASO, E. Experimental comparison of reinforced concrete beams strengthened against bending with different types of cementitious-matrix composite materials. **Construction and Building Materials**, v. 137, p. 317-329, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.106>>.

GARCEZ, M. R. Alternativas para Melhoria no Desempenho de Estruturas de Concreto Armado Reforçadas pela Colagem de Polímeros Reforçados com Fibras. p. 267, 2007.

GIESE, A. C. H. Utilização de argamassa reforçada com têxtil de fibra de vidro álcali-resistente para reforço à flexão de vigas de concreto armado. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2019.

GOPINATH, S. et al. Investigations on textile-reinforced concrete as cover for RC beams. **Magazine of Concrete Research**, v. 68, n. 20, p. 1040-1050, 2016.

GRIES, T. et al. E-textiles. **State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC: Textile Reinforced Concrete**, p. 11-27, 2006.

HASSAN, S. A. Universiti T. M. **Data • October 2015**. 2015. 2015.

HEGGER, J. et al. Applications of textile reinforced concrete. **State-of-the-art Report of RILEM TC 201-TRC**, p. 237-270, 2006.

HELENE, P. R. do L. **Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto armado** Ambiente Construído, 1997.

HERBRAND, M. et al. Strengthening of existing bridge structures for shear and bending with carbon textile-reinforced mortar. **Materials**, v. 10, n. 9, 2017.

HEXFORCE REINFORCEMENTS. **Technical Fabric Handbook**. [s.l: s.n.]

JÚLIO, E. S.; BRANCO, F.; SILVA, V. D. Structural rehabilitation of columns with reinforced concrete jacketing. **Progress in Structural Engineering and Materials**, v. 5, n. 1, p. 29-37, 2003.

JUVANDES, L. F. P. Reforço e Reabilitação de Estruturas de Betão Usando Materiais Compósitos de " CFRP ". **Luís Filipe Pereira Juvandes**, p. 396, 1999.

KARBHARI, V. M. Rehabilitation of civil structures using advanced polymer composites. In: WU, H. C. (Ed.). **Advanced Civil Infrastructure Materials: Science, Mechanics and Applications**. 1st. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2006. p. 203-234.

LI, V. C. **Engineered Cementitious Composites - Bendable Concrete for Sustainable and Resilient Infrastructure**. Berlin: Springer, 2010. v. 2164.

LIU, C. **Mesophase Pitch-based Carbon Fiber and Its Composites: Preparation and Characterization**. 2010. Dissertação (Mestrado), The University of Tennessee, 2010. Disponível em: <https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/3649>.

MECHTCHERINE, V.; SCHNEIDER, K.; BRAMESHUBER, W. Mineral-based matrices for textile-reinforced concrete. **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**, 1 jan. 2016.

Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782424468000033?via%3Dihub>>.

Acesso em: 29 jan. 2020.

NBR 12744, A. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – Fibras têxteis. n. 1, p. 1-9, 1992.

NGALA, V. T.; PAGE, C. L.; PAGE, M. M. Investigations of an ethanolamine-based corrosion inhibitor system for surface treatment of reinforced concrete. **Materials and Corrosion**, v. 55, n. 7, p. 511-519, 2004.

PELED, A.; BENTUR, A.; MOBASHER, B. **Textile Reinforced Concrete**. 1st. ed. New York: CRC Press, 2017.

PURNELL, P. et al. 6.3 Durability. **State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC: Textile Reinforced Concrete**, p. 187-210, 2006.

RAMBO, D. A. S. **Efeito Da Temperatura No Comportamento Mecânico De Compósitos Refratários Reforçados Com Tecidos De Basalto E Carbono**. 2016. Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

RAUPACH, M. Patch repairs on reinforced concrete structures – Model investigations on the

required size and practical consequences. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 8, p. 679-684, 2006.

REGINATO, L. A. **Emprego do Modelo Teórico de Empacotamento de Partículas para Dosagens de Concreto de Pós Reativos e Análise das Propriedades Mecânicas**. 2011. Universidade do Oeste de Santa Catarina, 2011.

REINHARDT, H. W. et al. 6.1 Bond. **State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC: Textile Reinforced Concrete**, p. 49, 2006.

REMY, O.; WASTIELS, J. High Performance Textile Reinforced Cements : Tensile Hardening Behaviour and Modeling. **Challenges for Civil Construction**, p. 11, 2008.

RIBEIRO, J. L. D.; TEN CATEN, C. S. Projeto de Experimentos. **Série Monográfica Qualidade**, p. 153, 2011.

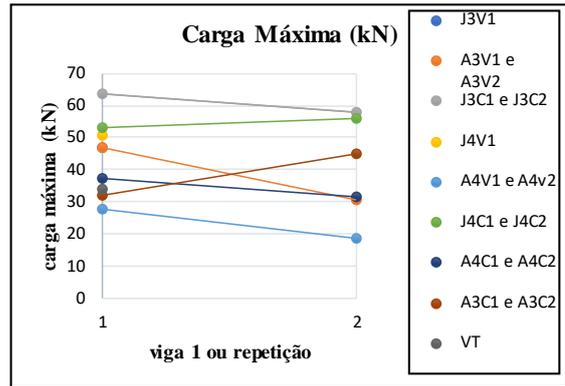
TRIANAFILLOU, T. C.; PAPANICOLAOU, C. G. Textile Reinforced Mortars (TRM) versus Fibre Reinforced Polymers (FRP) as strengthening materials of concrete structures. In: Seventh International Symposium of the Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS), ii, **Anais...2005**. Disponível em: <[http://quakewrap.com/frp_papers/TextileReinforcedMortars\(TRM\)versusFiberReinforcedPolymer\(FRP\)asStrengtheningMaterialsofConcreteStructures.pdf](http://quakewrap.com/frp_papers/TextileReinforcedMortars(TRM)versusFiberReinforcedPolymer(FRP)asStrengtheningMaterialsofConcreteStructures.pdf)>.

VERBRUGGEN, S. et al. Bending of beams externally reinforced with TRC and CFRP monitored by DIC and AE. **Composite Structures**, v. 112, n. 1, p. 113-121, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.02.006>>.

VERBRUGGEN, S.; TYSMANS, T.; WASTIELS, J. TRC or CFRP strengthening for reinforced concrete beams: An experimental study of the cracking behaviour. **Engineering Structures**, v. 77, p. 49-56, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.07.040>>.

ANEXO A – ANOVA
(Planilhas utilizadas no cálculo)

		Carga Máxima (kN)		
			1	2
*Média	46,64478714	*J3V1	45,6	47,6
*Média	50,62722833	*J4V1	49,6	51,6
*Sem as repetições os valores adotados foram tais que a média entre os dois é o valor da carga máxima da		J3C1 e J3C2	63,5	57,7
		A3V1 e A3V2	46,8	30,5
		A3C1 e A3C2	32,0	44,8
		J4C1 e J4C2	53,0	56,0
		A4V1 e A4v2	27,6	18,9
		A4C1 e A4C2	37,5	31,6
		VT	34,2	



		Carga Máxima (kN)				
		3 camadas		4 camadas		
		Jateada	Apicoada	Jateada	Apicoada	
Vidro		45,6	46,8	49,6	27,6	318,3
		47,6	30,5	51,6	18,9	
Carbono		63,5	32,0	53,0	37,5	376,0
		57,7	44,8	56,0	31,6	
		368,4		325,9		694,4

	3 camadas	4 camadas
Vidro	170,5	147,8
Carbono	197,9	178,1

TJ	424,7	TA	269,7
----	-------	----	-------

	Jateada	Apicoada
Vidro	194,5	123,8
Carbono	230,2	145,9

A	Tipo de fibra
B	Nº de camadas
C	Superfície

	3 camadas	4 camadas
Jateada	214,4	210,3
Apicoada	154,0	115,7

SQ							
TC	30134,9						
SQT	2320,5	GDL	MQ	Teste F	Probabilidade	Significativo ou Não	
A	208,1	1	208,1	5,6	4,5%	s	
B	112,9	1	112,9	3,1	11,9%	ns	
C	1502,1	1	1502,1	40,7	0,0%	s	
AB	0,6	1	0,6	0,0	90,4%	ns	
AC	11,4	1	11,4	0,3	59,3%	ns	
BC	72,8	1	72,8	2,0	19,8%	ns	
ABC	116,9	1	116,9	3,2	11,3%	ns	
Erro	295,5	8	36,9				
Total	2320,5	15					

A	Tipo de fibra	a1-vidro	a2-carbono
B	Nº de camadas	b1-3 camadas	b2-4 camadas
C	Superfície	c1- jateada	c2-apicoada

ya1-	39,79202149
ya2-	47,00507975
yb1-	46,0553809
yb2-	40,74172034
yc1-	53,08793805
yc2-	33,70916319
ya1b1-	42,63742748
ya1b2-	36,94661549
ya2b1-	49,47333431
ya2b2-	44,53682518
ya1c1-	48,63600774
ya1c2-	30,94803524
ya2c1-	57,53986835
ya2c2-	36,47029114
yb1c1-	53,61160294
yb1c2-	38,49915886
yb2c1-	52,56427316
yb2c2-	28,91916752
ya1b1c1-	46,64478714
ya1b2c1-	50,62722833
ya2b1c1-	60,57841873
ya2b2c1-	54,50131798
ya1b1c2-	38,63006783
ya1b2c2-	23,26600266
ya2b1c2-	38,36824989
ya2b2c2-	34,57233238

y--	43,39855062		
43,39855062	43,39855062	43,39855062	43,39855062
43,39855062	43,39855062	43,39855062	43,39855062
43,39855062	43,39855062	43,39855062	43,39855062
43,39855062	43,39855062	43,39855062	43,39855062

desvios de A	SQA	208,1128377	GL	1
-3,60652913	-3,606529129	-3,60652913	-3,606529129	
-3,60652913	-3,606529129	-3,60652913	-3,606529129	
3,606529129	3,606529129	3,606529129	3,606529129	
3,606529129	3,606529129	3,606529129	3,606529129	
desvios de B	SQB	112,9399542	GL	1
2,65683028	2,65683028	-2,65683028	-2,65683028	
2,65683028	2,65683028	-2,65683028	-2,65683028	
2,65683028	2,65683028	-2,65683028	-2,65683028	
2,65683028	2,65683028	-2,65683028	-2,65683028	
desvios de C	SQC	1502,14766	GL	1
9,689387428	-9,689387428	9,689387428	-9,689387428	
9,689387428	-9,689387428	9,689387428	-9,689387428	
9,689387428	-9,689387428	9,689387428	-9,689387428	
9,689387428	-9,689387428	9,689387428	-9,689387428	
desvios AB	SQAB	0,568972799	GL	0
0,188575714	0,188575714	-0,18857571	-0,188575714	
0,188575714	0,188575714	-0,18857571	-0,188575714	
-0,18857571	-0,188575714	0,188575714	0,188575714	
-0,18857571	-0,188575714	0,188575714	0,188575714	
desvios BC	SQBC	72,8063133	GL	0
-2,13316539	2,13316539	2,13316539	-2,13316539	
-2,13316539	2,13316539	2,13316539	-2,13316539	
-2,13316539	2,13316539	2,13316539	-2,13316539	
-2,13316539	2,13316539	2,13316539	-2,13316539	
desvios AC	SQAC	11,43525049	GL	0
-0,84540118	0,84540118	-0,84540118	0,84540118	
-0,84540118	0,84540118	-0,84540118	0,84540118	
0,84540118	-0,84540118	0,84540118	-0,84540118	
0,84540118	-0,84540118	0,84540118	-0,84540118	
desvios ABC	SQAC	116,9392394	GL	0
-2,7034612	2,703461201	2,703461201	-2,703461201	
-2,7034612	2,703461201	2,703461201	-2,703461201	
2,703461201	-2,703461201	-2,7034612	2,703461201	
2,703461201	-2,703461201	-2,7034612	2,703461201	
desvios erro	SQR	295,5297982	GL	12
-0,99521286	8,1674366	-0,99977167	4,339237213	
0,99521286	-8,1674366	0,999771667	-4,339237213	
2,910385132	-6,399564743	-1,49868202	2,927129745	
-2,91038513	6,399564743	1,498682022	-2,927129745	

ANEXO B – Carga teórica
(planilha utilizada no cálculo)

Resistência à flexão com reforço 4 camadas vidro					
bw	12,00 cm	fcm	3,54kN/cm ²	35,40 MPa	
h	20,00 cm	Econc	3460,00kN/cm ²	34,60 GPa	
d	17,06 cm				
h-d	2,95 cm	Ast	0,623 cm ²		
cobrimento	2,00 cm	ast	65,00kN/cm ²	650,00 MPa	
d'	2,95 cm	Es	21000,00kN/cm ²	210,00 GPa	
h'	21,00 cm	Asc	0,000 cm ²		
Øestribo	0,63 cm	asc	65,00kN/cm ²	650,00 MPa	
nº estribos	3,00				
Øarmadura +	0,63 cm	f 1urdume	2,45 kN		
nº armadura +	2	Ar fio	0,0420 cm ²	100%	
Øarmadura -	0,00 cm	ory (tensão 1 urdume)	58,33kN/cm ²		
nº armadura -	0	Ar (Área fios)	1,01 cm ²		
		Er	24000,00kN/cm ²	240,00 GPa	
		nºurdumes	6		
lútil	140,00 cm	nºcam. Têxtil	4		
eArg	0,50 cm				
nºcam.Arg	4				

PRIMEIRO CÁLCULO DE X		Retorna valores	x (cm)	Domínio	Múltimo (kN.cm)	Carga (kN)
Rcc	99,32 kN	ITERAÇÃO 1	2,92 cm	2	1809,8	77,6
Rst	40,52 kN	ITERAÇÃO 2	2,92 cm	2	1809,8	77,6
Rsc	0,00 kN	ITERAÇÃO 3	2,92 cm	2	1809,8	77,6
Rrt	58,80 kN	ITERAÇÃO 4	2,92 cm	2	1809,8	77,6
1º x:	2,92 cm	ITERAÇÃO 5	2,92 cm	2	1809,8	77,6
DOM:	2	ITERAÇÃO 6	2,92 cm	2	1809,8	77,6
		ITERAÇÃO 7	2,92 cm	2	1809,8	77,6
		ITERAÇÃO 8	2,92 cm	2	1809,8	77,6
		ITERAÇÃO 9	2,92 cm	2	1809,8	77,6
		ITERAÇÃO 10	2,92 cm	2	1809,8	77,6

DOM 2						
est	0,01	10,00 ‰				
ec	0	0,00 ‰	βx	0	x	0
	0,0035	3,50 ‰		0,26		4,42
DOM 3						
est	0,01	10,00 ‰	βx	0,26	x	4,42
	0,003095238	εyd		0,53		9,05
ec	0,0035	3,50 ‰				
DOM 4						
est	0,003095238	εyd	βx	0,53	x	9,05
	0	0,00 ‰		1,00		17,06
ec	0,0035	3,50 ‰				

ANEXO C – Dados dos ensaios
(planilhas de dados)

VT	Carga (kN)	SG AÇO ‰	CONCRETO ‰	Lm (mm)	Tempo (s)	
Carga Máxima (kN)	34,2	22,9	-2,3	22,7	960,5	
L/250 (1400/250=5,6)	29,1	4,1	-1,0	5,6	433,0	
L/350 (1400/350=4)	25,4	3,1	-0,8	4,0	334,5	
VIGA A3C1	Carga (kN)	SG AÇO ‰	CONCRETO ‰	Lm (mm)	Tempo (s)	SG AÇO 2 ‰
Carga Máxima (kN)	32,0	1,6	-0,7	3,1	32,0	-
L/250 (1400/250=5,6)	0,0	0,0	0,0	NÃO ATINGIU	0,0	0,0
L/350 (1400/350=4)	0,0	0,0	0,0	NÃO ATINGIU	0,0	0,0
VIGA A3C2	Carga (kN)	SG AÇO ‰	CONCRETO ‰	Lm (mm)	Tempo (s)	SG AÇO 2 ‰
Carga Máxima (kN)	44,8	2,8	-1,2	4,5	-	0,0
L/250 (1400/250=5,6)	0,0	0,0	0,0	NÃO ATINGIU	0,0	0,0
L/350 (1400/350=4)	42,3	2,6	-1,1	4,0	-	-
VIGA A4C1	Carga (kN)	SG AÇO ‰	CONCRETO ‰	Lm (mm)	Tempo (s)	SG AÇO 2 ‰
Carga Máxima (kN)	37,5	1,9	-0,7	3,1	-	-
L/250 (1400/250=5,6)	0,0	0,0	0,0	NÃO ATINGIU	0,0	0,0
L/350 (1400/350=4)	0,0	0,0	0,0	NÃO ATINGIU	0,0	0,0
VIGA A4C2	Carga (kN)	SG AÇO ‰	CONCRETO ‰	Lm (mm)	Tempo (s)	SG AÇO 2 ‰
Carga Máxima (kN)	31,6	5,3	-0,8	5,7	539,0	-
L/250 (1400/250=5,6)	31,6	5,2	-0,8	5,6	534,0	-
L/350 (1400/350=4)	28,6	3,6	-0,6	4,0	447,0	-
VIGA J3C1	Carga (kN)	SG AÇO ‰	CONCRETO ‰	Lm (mm)	Tempo (s)	SG AÇO 2 ‰
Carga Máxima (kN)	63,5	3,6	-1,2	8,3	650,5	-
L/250 (1400/250=5,6)	53,3	2,8	-1,0	5,6	479,5	-
L/350 (1400/350=4)	53,3	2,3	-0,8	4,0	374,0	-
VIGA J3C2	Carga (kN)	SG AÇO ‰	CONCRETO ‰	Lm (mm)	Tempo (s)	SG AÇO 2 ‰
Carga Máxima (kN)	57,7	3,9	-1,5	8,9	703,5	-
L/250 (1400/250=5,6)	47,1	2,7	-1,2	5,6	489,5	-
L/350 (1400/350=4)	35,2	1,8	-1,0	4,0	384,0	-
VIGA J4C1	Carga (kN)	SG AÇO ‰	CONCRETO ‰	Lm (mm)	Tempo (s)	SG AÇO 2 ‰
Carga Máxima (kN)	53,0	2,9	-1,1	5,8	476,0	2,9
L/250 (1400/250=5,6)	52,2	2,9	-1,0	5,6	466,0	2,9
L/350 (1400/350=4)	43,0	2,3	-0,8	4,0	361,5	2,3
VIGA J4C2-1	Carga (kN)	SG AÇO ‰	CONCRETO ‰	Lm (mm)	Tempo (s)	SG AÇO 2 ‰
Carga Máxima (kN)	39,3	-0,9	2,5	4,6	306,0	-
L/250 (1400/250=5,6)	34,8	-0,8	2,4	5,6	364,0	-
L/350 (1400/350=4)	34,5	-0,8	2,3	4,0	265,5	-

VIDEO J4C2 CARGA MÁXIMA 56

Testemunho	Carga (kN)	SG AÇO ‰	CONCRETO ‰	Lm (mm)	Tempo (s)	
Carga Máxima (kN)	34,2	22,9	-2,3	22,7	960,5	
L/250 (1400/250=5,6)	29,1	4,1	-1,0	5,6	433,0	
L/350 (1400/350=4)	25,4	3,1	-0,8	4,0	334,5	
A3V1	Carga (kN)	SG AÇO ‰	CONCRETO ‰	Lm (mm)	Tempo (s)	SG AÇO 2 ‰
Carga Máxima (kN)	46,8	9,4	-1,9	13,2	-	-
L/250 (1400/250=5,6)	37,6	4,1	-0,9	5,6	-	-
L/350 (1400/350=4)	32,4	3,0	-0,8	4,0	406,0	0,0
A3V2	Carga (kN)	SG AÇO ‰	CONCRETO ‰	Lm (mm)	Tempo (s)	SG AÇO 2 ‰
Carga Máxima (kN)	30,5	2,4	-0,6	3,6	-	-
L/250 (1400/250=5,6)	0,0	0,0	0,0	NÃO ATINGIU	0,0	0,0
L/350 (1400/350=4)	25,2	3,5	-0,6	4,0	318,5	-
A4V1	Carga (kN)	SG AÇO ‰	CONCRETO ‰	Lm (mm)	Tempo (s)	SG AÇO 2 ‰
Carga Máxima (kN)	27,6	2,4	-0,6	2,6	243,5	-
L/250 (1400/250=5,6)	0,0	0,0	0,0	NÃO ATINGIU	0,0	0,0
L/350 (1400/350=4)	0,0	0,0	0,0	NÃO ATINGIU	0,0	0,0
A4V2	Carga (kN)	SG AÇO ‰	CONCRETO ‰	Lm (mm)	Tempo (s)	SG AÇO 2 ‰
Carga Máxima (kN)	18,9	1,2	-0,4	1,9	168,5	-
L/250 (1400/250=5,6)	0,0	0,0	0,0	NÃO ATINGIU	0,0	0,0
L/350 (1400/350=4)	0,0	0,0	0,0	NÃO ATINGIU	0,0	0,0
J3V1	Carga (kN)	SG AÇO ‰	CONCRETO ‰	Lm (mm)	Tempo (s)	SG AÇO 2 ‰
Carga Máxima (kN)	46,6	13,4	-2,5	10,8	-	-
L/250 (1400/250=5,6)	40,2	4,2	-1,5	5,6	-	-
L/350 (1400/350=4)	34,5	2,9	-1,3	4,0	423,5	-
J4V1	Carga (kN)	SG AÇO ‰	CONCRETO ‰	Lm (mm)	Tempo (s)	SG AÇO 2 ‰
Carga Máxima (kN)	50,6	11,4	-2,3	12,7	946,0	-
L/250 (1400/250=5,6)	39,6	4,5	-1,1	5,6	546,0	-
L/350 (1400/350=4)	35,1	2,5	-0,9	4,0	447,5	-