

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

JULIANA BERTELI NORA

**Análise experimental do Concreto Têxtil como reforço à flexão de vigas de
concreto armado**

**PORTO ALEGRE
2018**

JULIANA BERTELI NORA

Análise experimental do Concreto Têxtil como reforço à flexão de vigas de concreto armado

Trabalho de Conclusão de Curso realizado como pré-requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientadores: Prof. Ph.D. Eng. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Prof. Dr. Eng. Vanessa Fátima Pasa Dutra

**PORTO ALEGRE
2018**

JULIANA BERTELI NORA

Análise experimental do Concreto Têxtil como reforço à flexão de vigas de concreto armado

Trabalho de Conclusão de Curso realizado como pré-requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientadores: Prof. Ph.D. Eng. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Prof. Dr. Eng. Vanessa Fátima Passa Dutra

Aprovada em: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ph.D. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Orientador

Prof. Dr. Eng. Vanessa Fátima Passa Dutra
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Orientadora

Prof. Ph.D. Ângela Gaio Graeff
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Relatora

Prof. Dr. Eng. Monica Regina Garcez
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia

Dedico este trabalho a todos que estiveram do meu lado durante esta caminhada rumo ao título de engenheira, especialmente meu pai Airton, minha mãe Rosane e minha irmã Gabriela.

AGRADECIMENTOS

Agradeço muito a minha orientadora Vanessa Pasa Dutra, que auxiliou durante todo o desenvolvimento do trabalho, lendo o texto, encontrando referências, conseguindo material e me indicando o melhor caminho a seguir, superando todas as minhas expectativas e tornando a execução do TCC muito mais fácil do que eu imaginava.

Ao meu orientador Luiz Carlos Pinto da Silva Filho e a minha relatora Ângela Gaio Graeff por todas as valiosas correções e dicas para continuidade do trabalho, que me ajudaram a tomar decisões importantes.

Aos bolsistas e técnicos do laboratório LEME, que foram incansáveis na construção efetiva do meu trabalho, criando novas soluções e botando a mão na massa. Sem eles e a estrutura do laboratório seria impossível executar este trabalho e por isso sou muito grata. Especialmente ao bolsista Felipe André Lauxen que esteve do meu lado em absolutamente todos os momentos, muitas vezes fazendo trabalhos por mim ou me ensinando como atuar no laboratório, muito obrigada.

A UFRGS e seus professores por proporcionar crescimento pessoal e profissional, oferecendo oportunidades como o intercâmbio que realizei. Sou privilegiada por estar finalizando um curso em uma Universidade como esta e por isso agradeço por todas as portas que foram abertas em virtude disto.

Aos amigos de Caxias, obrigada pelas palavras de apoio, pela companhia e pela amizade sempre verdadeira e sincera. Deixar o TCC de lado por alguns momentos para estar com vocês foi essencial para manter o foco e o entusiasmo.

Aos meus amigos do PET Engenharia Civil, obrigada pelo apoio durante todo o curso, o aprendizado e crescimento que tive atuando neste grupo foi essencial para meu desenvolvimento profissional e a amizade de vocês foi o melhor presente que recebi durante os anos de engenharia.

Ao meu namorado Kauê que foi a principal pessoa a ouvir as reclamações durante a execução do trabalho e me dizer que ficaria tudo bem. Obrigada pelo companheirismo e por me ajudar e permanecer animada.

Finalmente, obrigada a minha família por todo o amor e paciência. A minha irmã Gabriela que esteve muito presente durante todos os meus anos de engenharia, aturando minhas loucuras com provas, cozinhando quando eu não tinha tempo, revisando e formatando absolutamente todos os trabalhos da graduação e

sendo minha grande companheira. Aos meus pais, Rosane e Airton, por todo apoio emocional (e também financeiro) durante toda minha vida, mas especialmente durante a faculdade, apoiando a minha mudança de cidade e todas as minhas escolhas. Vocês sempre priorizaram muito minha educação e estar finalizando um curso de engenharia em uma Universidade federal é mérito de vocês também. Obrigada por estar sempre ao meu lado me proporcionando a oportunidade de poder ser engenheira.

Sempre tem um jeito

Violet Baudelaire

RESUMO

O Concreto Têxtil (CT) refere-se a um concreto de agregados finos reforçados com tecidos multiaxiais que podem ser constituídos de fibras de vidro, naturais, de basalto ou poliméricas. É um material ainda pouco pesquisado em relação à sua utilização como alternativa para o reforço estrutural. O presente trabalho visa a obtenção de resultados experimentais sobre a capacidade de carga de vigas de concreto armado reforçadas ensaiadas à flexão. Resultados iniciais dessa abordagem foram obtidos pela experimentação de doze vigas de concreto armado de tamanho reduzido, com comprimento de 130 cm (vão livre de 110 cm) e seção transversal retangular de 7cm por 14cm, reforçadas com diferentes configurações de camadas de concreto têxtil, fabricadas utilizando distintas malhas têxteis disponíveis no mercado brasileiro. Os resultados obtidos foram comparados a ensaios realizados regularmente no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) da UFRGS que utilizaram alternativas de reforço já consolidadas, tais como chapa colada com resina epóxi, armadura incorporada com argamassa e tecidos de fibra de carbono, motivo pelo qual a geometria de viga utilizada foi escolhida, sendo mantida igual àquela dos ensaios realizados. Também é apresentada uma metodologia de cálculo disponível na literatura, usada para verificação dos resultados experimentais, buscando averiguar se os mesmos são adequadamente quantificados através do modelo teórico adotado. Os reforços proporcionaram aumento de capacidade de carga, porém o têxtil brasileiro de fibra de vidro apresentou pior desempenho em relação ao suíço, de fibra carbono, resultado já esperado, uma vez que a malha brasileira tem uma densidade de material de reforço menor do que a suíça, além de ser constituído de um material de menor capacidade de carga. Além disso, o aumento de número de camadas proporcionou aumento de capacidade de carga e a efetividade da utilização de ancoragem não pode ser verificada, principalmente graças à configuração geométrica e comportamento da estrutura testada.

Palavras-chave: Concreto Têxtil. Reforço Estrutural. Análise Experimental.

ABSTRACT

Textile Concrete (TRC) refers to a fine aggregate concrete reinforced with multiaxial fabrics that may be comprised of glass, natural, basalt or polymer fibers. It is yet little investigated in regard to its utilization as an alternative for structural reinforcement. The present work aims at obtaining experimental results on the bending load capacity of strengthened RC. Initial results of this approach were obtained by the experimentation of twelve reinforced concrete beams of reduced size, with a length of 130 cm (free span of 110 cm) and rectangular cross section of 7cm by 14cm, reinforced with different configurations of fabric concrete layers using different textile meshes available in the Brazilian market. The results obtained were compared to tests carried out regularly in the Laboratory of Experimental and Structural Models (LEME) from UFRGS which employed other more traditional reinforcement solutions such as steel plate bonding with epoxy, reinforced mortar and fiber reinforced polymers, reason why the geometry of the beam was chosen, being kept equal to that of the tests performed. It is also presented a design methodology available in the literature, used to verify the experimental results, seeking to ascertain if they are adequately quantified through the theoretical model adopted. Reinforcement provided increased load capacity, but the Brazilian fiberglass fabric presented worse performance than the Swiss one, of carbon fiber, a result already expected, since the Brazilian mesh has a density of reinforcement material smaller than the Switzerland, in addition to being made of a material with lower load capacity. The increase in the number of layers provided an increase in load capacity and the effectiveness of the use of anchorage can not be verified, mainly thanks to the geometric configuration and behavior of the structure tested.

Keywords: Textile Reinforced Concrete. Structural Strengthening. Experimental Analysis.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Traços e slumps das vigas concretadas	30
Tabela 2: Análise dos dados dos ensaios	36
Tabela 3: Análise dos dados dos ensaios	40
Tabela 4: Resultados configuração 1	61
Tabela 5: Resultados da configuração 2	63
Tabela 6: Resultados configuração 3	66
Tabela 7: Propriedades do têxtil configuração 4	68
Tabela 8: Combinações de matriz e têxtil configuração 4	69
Tabela 9: Resultados configuração 4	69
Tabela 10: Resultados do f_{cj} do concreto (MPa)	74
Tabela 11: Resultados do f_{cj} da argamassa (MPa)	76
Tabela 12: Dados técnicos têxtil	77
Tabela 13: Configurações de reforço	79
Tabela 14: Resultados dos ensaios	89
Tabela 15: Comparação teórico x experimental	97
Tabela 16: Comparação qualitativa dos reforços	98
Tabela 17: Comparação de custo entre reforços	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma de trabalho	22
Figura 2: Exemplos reforço fibra carbono	25
Figura 3: ARMO-MESH na reforma do Maracanã.....	25
Figura 4: Execução reforço chapa colada.....	31
Figura 5: Rompimento reforço chapa colada 2017/1.....	31
Figura 6: Execução reforço armadura incorporada com argamassa.....	33
Figura 7: Rompimento reforço chapa colada 2017/1.....	33
Figura 8: Execução reforço de fibra carbono	34
Figura 9: Rompimento reforço chapa colada 2017/1.....	35
Figura 10: Detalhe e seção de fachada de CT.....	43
Figura 11: Construção de passarela em CT.....	43
Figura 12: Exemplos de têxtil feitos de vidros álcali-resistentes	47
Figura 13: Exemplo de camadas de reforço com CT	49
Figura 14: Tecidos ensaiados 1 e 2	51
Figura 15: Redução da área efetiva da matriz durante a instalação de várias camadas têxteis e deflexão do fluxo de força e devido ao deslocamento.....	54
Figura 16: Modelo de atuação de força na interface dos materiais	55
Figura 17: Modos de falha do reforço de CT.....	56
Figura 18: Comparação de deformação da interface CT e concreto antigo	56
Figura 19: Detalhe de viga e pontos fracos de reforço.....	58
Figura 20: Modos de falha do FRP	58
Figura 21: Modelos de ancoragem.....	59
Figura 22: Modelos de ancoragem – envoltória transversal.....	59
Figura 23: Viga e ensaio configuração 1	62
Figura 24: Viga da configuração 2	64
Figura 25: Tecido configuração 2.....	66
Figura 26: Viga configuração 3	66
Figura 27: Viga configuração 4	67
Figura 28: Tecido configuração 4	68
Figura 29: Reforço configuração 4	68
Figura 30: Detalhe da viga testemunho e vigas a serem reforçadas	71
Figura 31: Montagem das armaduras	71

Figura 32: Preparação das fôrmas	72
Figura 33: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone	73
Figura 34: Concretagem.....	73
Figura 35: Rompimento do CP de concreto	74
Figura 36: Ensaio de abatimento para verificação do índice de consistência	75
Figura 37: Têxteis utilizados.....	76
Figura 38: Apicoamento da superfície de reforço.....	78
Figura 39: Detalhe da rugosidade da superfície da viga	78
Figura 40 : Aplicação do reforço - superfície da viga	79
Figura 41: Aplicação do reforço - superfície da viga	80
Figura 42: Aplicação do reforço – imersão do têxtil ARMO MESH	81
Figura 43: Aplicação do reforço – imersão do têxtil FiberTEX	81
Figura 44: Execução da ancoragem	82
Figura 45: Execução da ancoragem	82
Figura 46: Esquema de aplicação de forças na seção da viga	84
Figura 47: Processo de iteração teórico.....	86

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Aumento de capacidade de carga do reforço de chapa colada com resina	32
Gráfico 2: Aumento de capacidade de carga do reforço de armadura incorporada com argamassa.....	34
Gráfico 3: Aumento de capacidade de carga do reforço de fibra carbono	35
Gráfico 4: Comparação teórico x experimental viga testemunho	37
Gráfico 5: Comparação teórico x experimental viga reforçada com chapa colada...	38
Gráfico 6: Comparação teórico x experimental viga reforçada com armadura incorporada com argamassa.....	39
Gráfico 7: Comparação teórico x experimental viga reforçada com fibra carbono ...	39
Gráfico 8: Curvas tensão e deformação cascas de concreto têxtil em teste de flexão estática.....	45
Gráfico 9: Tensão e deformação de têxteis impregnados	46
Gráfico 10: Linhas de tensão-deformação para CT	48
Gráfico 11: Aproximação trilinear das curvas tensão-deformação para CT	48
Gráfico 12: Curva não-linear do módulo de elasticidade da linha tensão-deformação	49
Gráfico 13: Taxa de matriz por resistência a tração adesiva.....	51
Gráfico 14: Influência do número de camadas.....	53
Gráfico 15: Resultados de deslocamento configuração 2	65
Gráfico 16: Resultados de deslocamento configuração 3	67
Gráfico 17: Resultados de deslocamento sem ancoragem FiberTEX.....	93
Gráfico 18: Resultados de deslocamento com ancoragem FiberTEX.....	93
Gráfico 19: Resultados de deslocamento ArmoMesh	95
Gráfico 20: Resultados 2013/1 em relação a FT e AM.....	100
Gráfico 21: Comparação de cargas e aumentos de capacidade de carga teórico e experimental.....	101
Gráfico 22: Comparação de cargas e aumentos de capacidade de carga teórico e experimental com ensaios internacionais.....	102

LISTA DE SIGLAS

AICA	Armadura incorporada com argamassa
AM	ArmoMesh
CC	Chapa colada
CT	Concreto têxtil
FC	Fibra carbono
FRCM	Fibre Reinforced Cementitious Matrix
FT	FiberTEX
LEME	Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais
PRF	Polímeros reforçados com fibras
PRFA	Polímeros reforçados com fibras de aramida
PRFC	Polímeros reforçados com fibras de carbono
PRFV	Polímeros reforçados com fibras de vidro
TEX	Número de gramas por 1000 metros de comprimento de fio
TRC	Textile Reinforced Concrete
TRM	Textile Reinforced Mortar
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	DIRETRIZES DA PESQUISA	19
2.1	QUESTÃO DA PESQUISA	19
2.2	OBJETIVOS.....	19
2.3	PRESSUPOSTO.....	19
2.4	HIPÓTESE	20
2.5	DELIMITAÇÕES	20
2.6	LIMITAÇÕES	21
2.7	DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	21
3	REFORÇO ESTRUTURAL	23
3.1	CHAPAS DE AÇO COLADAS COM RESINA EPÓXI	26
3.2	ARMADURA INCORPORADA COM ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA	27
3.3	FIBRA CARBONO	28
3.4	RESULTADOS DE 5 ANOS DE EXPERIMENTOS REALIZADOS NO LEME 29	
4	CONCRETO TÊXTIL	42
4.1	MATRIZ.....	43
4.2	TÊXTIL.....	45
4.3	CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO	47
4.4	REFORÇO	49
4.4.1	Abertura da Malha	50
4.4.2	Execução e Preparação da Superfície	52
4.4.3	Número de Camadas de Reforço	53
4.4.4	Interface	54
4.4.5	Ancoragem	57
4.5	COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO REFORÇADAS COM CT – ABORDAGEM EXPERIMENTAL	60
4.5.1	Experimento de Si Larbi, Agbossou e Hamelin	60
4.5.2	Experimento de Elsanadedy, Almusallam, Alsayed e Al-Salloum	62
4.5.3	Experimento de Truong, Bui, Limam, Si Larbi, Le Nguyen e Michel	65
4.5.4	Experimento de Escrig, Gil e Bernat-Maso	67

5	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	70
5.1	MATERIAIS.....	70
5.1.1	Dimensões da viga e armadura	70
5.1.2	Concreto e traço.....	72
5.1.3	Matriz do reforço	74
5.1.4	Têxtil do reforço	76
5.2	EXECUÇÃO DO REFORÇO.....	77
5.3	MÉTODO DE ENSAIO.....	83
5.4	MÉTODO DE CÁLCULO TEÓRICO	83
6	RESULTADOS	89
6.1	ANÁLISE QUALITATIVA.....	97
6.2	ANÁLISE COMPARATIVA EXPERIMENTAL E TEÓRICA.....	99
6.3	ANÁLISE DE PREÇOS DE MERCADO.....	102
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	105
	APÊNDICE A – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS DO LEME ...	107
	APÊNDICE B – RESULTADOS EXPERIMENTAIS	109
	REFERÊNCIAS	112

1 INTRODUÇÃO

Entre os materiais atualmente empregados para a execução de estruturas civis, destaca-se o concreto armado. Este material apresenta uma série de vantagens: é resistente, pode ser facilmente moldado, tem propriedades, comportamento e metodologia de cálculo consolidados e estabelecidos, seu aprimoramento através de pesquisas e novos desenvolvimentos têm sido mundialmente mantidos. Se estruturas de concreto armado forem bem projetadas e a sua manutenção for adequadamente realizada, é possível que o material tenha grande durabilidade e mantenha suas propriedades ao longo de sua vida útil. Entretanto sabe-se que em muitos países, inclusive no Brasil, grande parte das manutenções de estruturas ou não são feitas, ou os prazos recomendados não são cumpridos. Essa cultura de descuido faz com que as peças e estruturas se deteriorem e que sua capacidade de resistência seja perdida ao longo dos anos, causando falhas, manifestações patológicas ou em casos mais graves, colapsos.

Além da falta de manutenção, outros fatores relevantes causadores de manifestações patológicas podem ser erros de projeto, má utilização da estrutura, mudança no seu uso ou má execução. A diminuição da resistência também pode acontecer pela ocorrência de algum sinistro, como incêndio ou sismo. Nesse cenário, o reforço estrutural assume grande relevância. Ele permite a manutenção ou o aumento da capacidade dos elementos da estrutura para resistir às solicitações das cargas, garantindo que esta possa continuar exercendo o papel para qual foi projetada, sem que precise sofrer demolição.

Diferentes soluções de reforço estrutural já são bem conhecidas, desenvolvidas e aplicadas mundialmente. Cada alternativa apresenta prós e contras dependendo das situações onde será utilizada, cabendo ao engenheiro decidir através de uma avaliação de custo-benefício, disponibilidade de material e de profissionais capacitados para sua execução, qual alternativa é mais apropriada.

Uma solução que pode ser empregada em reforço de estruturas e que é relativamente nova, sendo utilizada em países como a Alemanha, é o Concreto Têxtil (CT). Trata-se de um concreto de agregados finos reforçados com tecidos multiaxiais que podem ser constituídos de fibras de vidro, naturais, de basalto ou poliméricas. Entre as aplicações deste material, encontram-se a produção de fachada de edifícios, de elementos sanduíches, cascas, passarelas, sacadas, além

de reparos e reforços estruturais em elementos de concreto armado. O reforço com Concreto Têxtil é o tema a ser estudado e analisado no presente trabalho.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) formou em 2014 uma importante linha de pesquisa sobre Concreto Têxtil, a CONTEXT, cujo projeto busca viabilizar através dos estudos e desenvolvimentos, a construção de estruturas em concreto têxtil no Brasil. Até o presente momento, dois trabalhos de conclusão de curso foram realizados. O primeiro trabalho traz uma revisão da literatura sobre o Concreto Têxtil. Concretizado por Aline Denardi em 2016, ele reúne uma série de informações de estudos e aplicações já realizados e constitui um primeiro texto em português para divulgação desta tecnologia, impulsionando dos estudos, pesquisas e desenvolvimentos no país. O segundo trabalho, realizado por Daniel Salvadori Morassutti também em 2016, comparou as metodologias de cálculo empregadas no dimensionamento de uma passarela de concreto armado e as considerações que devem ser feitas ao se empregar o Concreto Têxtil.

A UFRGS também conta com uma linha de pesquisa bastante consolidada referente a reforço e recuperação de estruturas. Há pelo menos duas décadas diversos trabalhos de conclusão de curso, de mestrado, doutorado e pós-doutorado, além de consultorias, no contexto experimental e numérico, vem sendo desenvolvidos. Entre os trabalhos já desenvolvidos, destacam-se “Avaliação do desempenho de formulações epóxi visando a sua utilização como reforço de estruturas.” (CAMPAGNOLO, 1989), “Caracterização de argamassas com adições de sílica ativa como material para reparos e reforços de estruturas de concreto armado” (SCHULER, 1998), “Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono” (BEBER, 2003), “Alternativas para melhoria no desempenho de estruturas de concreto armado reforçadas pela colagem de polímeros reforçados com fibras” (GARCEZ, 2007), “Análise do comportamento à fadiga de vigas de concreto armado reforçadas com PRF de vidro, carbono e aramida” (MENEGETTI, 2007) e “Análise probabilística de vigas de concreto armado recuperadas à flexão, através do método de Monte Carlo utilizando um modelo de elementos finitos” (PALIGA, 2008).

O presente trabalho contará com uma revisão sobre os reforços estruturais atualmente utilizados, revisão bibliográfica sobre o concreto têxtil e sua aplicação como reforço, método de cálculo e comportamento identificado experimentalmente.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

A questão da pesquisa, seus objetivos, delimitações, limitações, seu delineamento, além da hipótese e pressuposto assumidos estão descritos neste capítulo.

2.1 QUESTÃO DA PESQUISA

A questão da pesquisa é: o Concreto Têxtil é uma alternativa de reforço à flexão tecnicamente viável e economicamente competitiva no Brasil?

2.2 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é a análise experimental do comportamento do Concreto Têxtil, quando aplicado como reforço de vigas à flexão, utilizando materiais constituintes encontrados para venda no Brasil. Essa análise tem como base o comportamento de uma viga de referência em concreto armado, comparada a vigas semelhantes reforçadas com configurações diferentes de CT, aplicadas de maneiras distintas nos elementos estruturais lineares.

Como objetivos secundários, foi calculado o aumento da capacidade de carga dos elementos graças à aplicação do reforço através de modelo teórico de cálculo, comparando com os dados experimentais obtidos. Além disso, foram feitas comparações desse tipo de reforço com outros existentes e utilizados mais comumente no país, a fim de avaliar a potencialidade do CT em relação a soluções mais conhecidas e consolidadas. As comparações foram quantitativas para viabilidade técnica considerando aumento de capacidade de carga e competitividade econômica em relação aos custos dos materiais e qualitativas para execução e viabilidade operacional.

2.3 PRESSUPOSTO

Entende-se que o CT pode ser uma alternativa viável para o emprego como reforço de estruturas, como já vem sendo comprovado por estudos de outros países,

e, nesse sentido, é relevante para a pesquisa e mercado brasileiros a comprovação desta hipótese através de experimentos.

2.4 HIPÓTESE

Pesquisas já realizadas mostram que o CT utilizado como reforço apresenta bons resultados de aumento de capacidade de carga de estruturas e nesse sentido é esperado que os resultados obtidos nesta pesquisa em relação a esta questão sejam também satisfatórios para os constituintes disponíveis no Brasil. Uma vez que o têxtil produzido no Brasil possui características e propriedades mecânicas inferiores em relação aos produzidos internacionalmente, além de não serem produzidos com a intenção de utilização como reforço estrutural, espera-se que os resultados sejam inferiores aos internacionais, mas que ainda assim possa ser observado um aumento da capacidade de carga ao utilizá-los.

Baseado em trabalhos internacionais já executados e no cálculo teórico, acredita-se na possibilidade de aumento de capacidade de carga em torno de 20%, dependendo da quantidade de camadas executadas. É esperado também que o CT seja de fácil execução e que, pelo a menos em longo prazo, possa se tornar um material viável economicamente, até por apresentar outros benefícios técnicos que serão citados ao longo do trabalho.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho se delimita a análise de elementos de viga de concreto armado reforçados com Concreto Têxtil e ensaiados à flexão. São doze elementos: duas das vigas não foram reforçadas, servindo como referência, duas foram reforçadas com têxtil nacional de fibra de vidro com ancoragem, sendo realizado 3 e 6 camadas de reforço têxtil, duas com o mesmo reforço anterior, porém sem ancoragem, e uma foi reforçada com têxtil importado e disponível no mercado brasileiro, de fibra carbono, com ancoragem e execução de 3 camadas.

2.6 LIMITAÇÕES

As vigas serão reforçadas apenas à flexão pela limitação de tempo imposta por um trabalho de conclusão de curso e também de material necessário para execução. Nesse sentido, não serão testados elementos de pilares submetidos à compressão, nem elementos de viga reforçados ao cisalhamento, podendo estes ser temas tratados em futuros trabalhos.

Outra limitação se dá em relação à comparação com outros tipos de reforços. Também pela questão de material e tempo, e por já existirem muitos estudos referentes aos outros tipos de reforço, não serão executadas vigas reforçadas com outros materiais como fibra carbono, chapa colada com resina epóxi e armadura incorporada com argamassa, sendo apenas executado reforço de CT. As comparações serão baseadas em referências bibliográficas e outros ensaios e estudos já realizados no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME). Assim, para que as comparações possam ser feitas de forma mais efetiva, serão utilizadas dimensões e geometria das vigas semelhantes, e traço de concreto e materiais o mais próximo possível.

Cabe salientar que a geometria adotada para as vigas possui seção bastante pequena, especialmente em relação à altura da linha neutra para parte comprimida do concreto, que deveria ser maior considerando a execução do reforço. Além disso, pode haver interferência nos resultados devido à disposição da malha do têxtil, uma vez que a base da peça é bastante pequena. Porém esta geometria permite comparações com resultados já disponíveis.

Finalmente, as malhas têxteis não serão caracterizadas no presente estudo. Seu comportamento será considerado através de dados fornecidos pelos próprios fabricantes, assim como as barras de aço empregadas na produção das vigas.

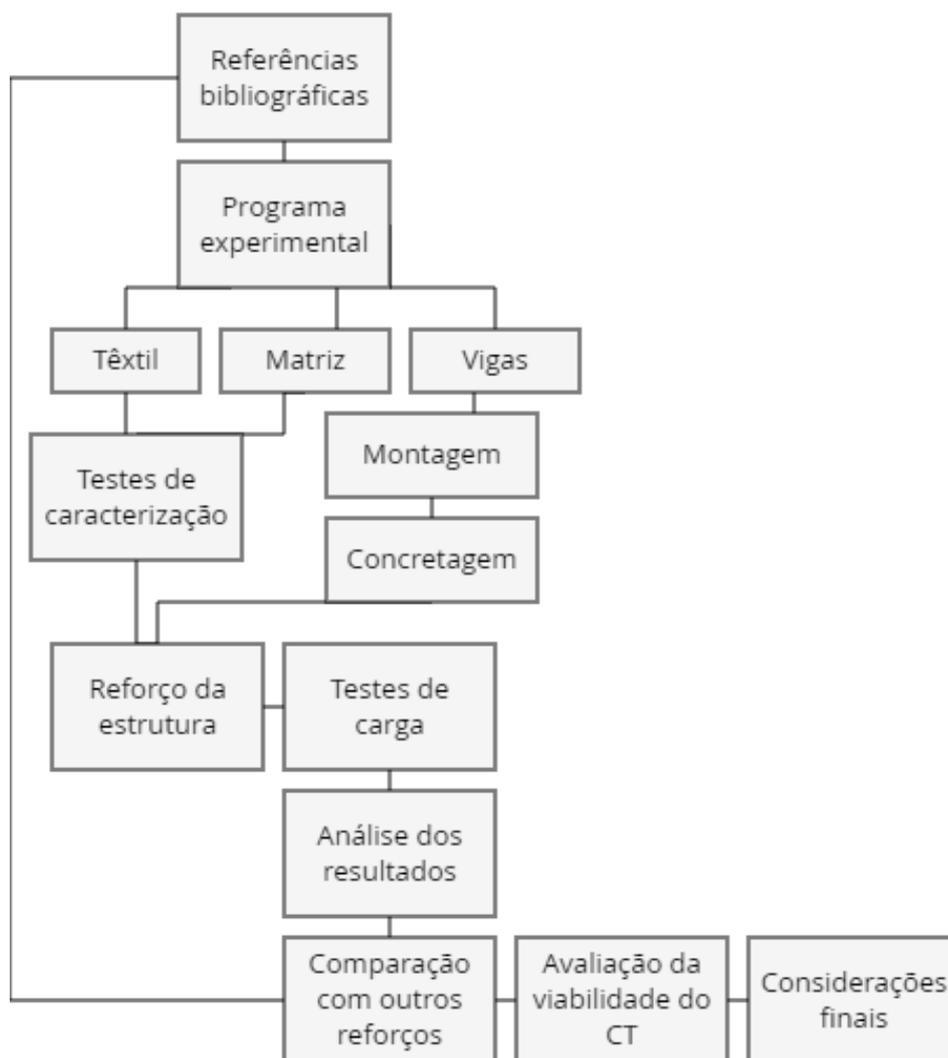
2.7 DELINEAMENTO DA PESQUISA

A pesquisa se dará em algumas etapas que seguirão o fluxograma de trabalho da Figura 1:

- a) Revisão bibliográfica;
- b) Obtenção do material;

- c) Montagem de vigas em concreto armado (fôrmas e armadura);
- d) Concretagem de vigas;
- e) Testes de caracterização da matriz (execução de corpos de prova para argamassa);
- f) Execução do reforço de Concreto Têxtil;
- g) Testes de carga;
- h) Análises dos resultados;
- i) Comparações com resultados de outros reforços;
- j) Avaliação da viabilidade do Concreto Têxtil;
- k) Considerações finais.

Figura 1: Fluxograma de trabalho



Fonte: Elaborado pela autora.

3 REFORÇO ESTRUTURAL

As estruturas ao longo de seu período de vida útil podem acabar sofrendo perda da capacidade da carga para a qual foram dimensionadas, seja por falta de manutenção, erro de projeto, planejamento ou execução, mudança no uso da edificação ou sua má utilização, ocorrência de um sinistro, ou ainda a ação combinada dos itens anteriores (FERRARI, 2002). Quando há ocorrência de alguma manifestação patológica, há comprometimento dos aspectos estéticos, e, geralmente, redução da capacidade resistente, podendo chegar ao colapso parcial ou total da estrutura (HELENE, 1992).

Para que não seja necessária uma medida como a demolição, é preciso que seja tomada alguma ação para promover a manutenção da estrutura. Dependendo do diagnóstico da manifestação, pode ser escolhida a proteção da superfície para prevenir maior deterioração, reparação da estrutura para que se mantenha sua capacidade de carga melhore sua funcionalidade, ou reforço, para que a capacidade aumente (HELENE, 1992). Reforçar e reparar estruturas é geralmente mais econômico e certamente mais sustentável, já que há menos consumo de cimento e recursos naturais como a areia e a brita, bem como menor produção de gás carbônico do que haveria caso fosse necessária demolição e reconstrução.

Para decisão da execução de alguma dessas medidas, é preciso que se avalie a condição em que se encontra a estrutura. As etapas são descritas por Santos (2006, p. 1):

As etapas do projeto de reparo/reforço constituem-se em: fazer o diagnóstico do problema e tomar as medidas emergenciais necessárias; verificar a viabilidade técnica e econômica do projeto; investigar o estado da estrutura; definir a melhor técnica, bem como materiais a utilizar; projetar, calcular e detalhar o reforço e, por fim, executar o trabalho com um adequado controle de qualidade.

O reforço deve estar coerente com o tipo de manifestação patológica existente após o diagnóstico do problema encontrado. Para o correto entendimento podem ser necessários a ensaios de campo e laboratório (HELENE, 1992). Após a avaliação, escolhe-se o tipo de reforço a ser executado, levando-se em conta os tipos de materiais e técnicas conhecidos e disponíveis, as razões históricas e sociais que possam existir em relação à edificação, desempenho e durabilidade do reforço,

mas, principalmente o tempo disponível para execução e a relação custo-benefício da utilização da solução escolhida (BEBER, 2003).

O reforço deve ser dimensionado para o tipo de esforço ao qual será submetido. Os elementos que compõem a estrutura, sendo elas vigas, pilares e fundações, poderão estar submetidos a esforços de flexão, cisalhamento, compressão ou tração, dependendo da sua função e da distribuição de carregamento. As vigas, as quais serão objeto de estudo do trabalho, estão submetidas principalmente a esforços de cisalhamento e flexão. Quando estão mal dimensionadas, especialmente por falta de armadura ou má execução da mesma, temos falhas. Os esforços iniciam gerando fissuras que podem ir aumentando ao longo do tempo, e, nesse sentido, a utilização do reforço é interessante, já que pode aumentar a capacidade de carga da viga muito antes do rompimento.

Já existem muitos reforços amplamente estudados, testados e executados no Brasil. Dentre as principais metodologias de reforço externo temos a colagem de chapa de aço com resina epóxi, aplicação de materiais compósitos a base de fibras, aumento da seção transversal com a colocação de uma camada adicional de concreto ou argamassa armada e protensão externa (PALIGA, 2008). Em relação às fibras são utilizados “[...] compósitos de tecido ou de laminados de polímeros reforçados com fibras (PRF) de aramida (PRFA), de carbono (PRFC) e de vidro (PRFV) colados externamente com resina epóxi [...]” (MARQUES, 2016, p.19).

Neste capítulo serão abordadas três formas de reforço que não o CT, sendo elas: armaduras incorporadas com argamassa, fibra carbono e chapa de aço. Estas soluções constituem-se em técnicas já consolidadas no Brasil com uma série de obras já executadas e seu comportamento será posteriormente comparado com o do CT. As informações sobre cada método serão referentes à forma de execução, materiais utilizados, disponibilidade e tempo de execução, este último de forma qualitativa. A escolha por estes reforços se dá em virtude dos conhecimentos adquiridos e já consolidados no Brasil e principalmente no LEME na UFRGS que servirão de apoio para comparação das alternativas posteriormente.

No Brasil existem algumas empresas que trabalham com reforço estrutural, como ECOM (São Paulo), Reforço Engenharia e Recuperação (São Paulo), Padoin & Sachs (Rio Grande do Sul), Escale (São Paulo), Aprumo (Santa Catarina), Recuperação Engenharia (São Paulo), ETA Tecnologia de Materiais (Rio Grande de Sul), Equilibrata (São Paulo), Matisse (São Paulo), etc. A figura 2 mostra um

exemplo de realização de reforço estrutural em laje de concreto com a utilização de solução mista fibras de carbono e estrutura metálica.

Figura 2: Exemplos reforço fibra carbono



Fonte: Matisse Reforço e Recuperação de Estrutura

A empresa S & P Clever Reinforcement (S & P CR) é Suíça e em 2010 iniciou no Brasil, para comercialização do material produzido. Um dos materiais comercializados pela S & P CR é o têxtil ARMO-MESH, o qual será utilizado neste trabalho. O ARMO-MESH foi utilizado na obra do Maracanã como reforço estrutural de pilares com matriz de concreto projetado, conforme observa-se na Figura 3.

Figura 3: ARMO-MESH na reforma do Maracanã



Fonte: S&P Clever Reinforcement Brasil

3.1 CHAPAS DE AÇO COLADAS COM RESINA EPÓXI

Uma das técnicas mais antigas e mais conhecidas é a colagem de chapa de aço ao concreto utilizando resina epóxi. Nessa técnica efetua-se a colagem de chapa com poucos milímetros de espessura na região da viga solicitada à tração. O material utilizado para colagem geralmente é a resina epóxi, que traz alta resistência em um curto período de secagem, sendo desta forma “[...] uma opção muito eficiente e de rápida execução, recomendada principalmente para situações que requerem emergência ou não permitem grandes alterações na geometria das peças” (SOUZA, RIPPER, 1998, p. 148).

Para que o reforço funcione é necessário que haja adesão suficiente entre os materiais. Nesse sentido, é preciso que o substrato seja preparado, através de apicoamento do concreto, retirando toda a nata de cimento e tomando cuidado com as arestas. Porém a superfície não deve apresentar rugosidade tão alta, como dito por Souza e Ripper (1998, p. 149):

Uma superfície muito rugosa tornará difícil a aplicação da resina, podendo levar a descontinuidades na película de cola, com a formação localizada de bolhas de ar que nada mais serão do que o resultado do desprendimento da resina pela ação de seu próprio peso - excesso pontual de espessura de cola - uma contrariedade imposta pela lei da gravidade às tensões de aderência.

Após realiza-se a limpeza do pó da estrutura e a limpeza da chapa, que deve receber jato de areia e escovação com cerdas metálicas, além de limpeza com substância desengordurante. O último passo é a aplicação da resina; deve-se pressionar uniformemente para que os excessos sejam expulsos, já que uma camada espessa de resina pode resultar em perda de resistência (CAMPAGNOLO, SILVA FILHO, 1989). Normalmente se utiliza, para melhor fixação da chapa, parafusos do tipo parabolts, garantindo desta forma também o maior extravasamento da resina.

A chapa atuando como reforço já em sua posição na estrutura não pode ficar desprotegida; por ser feita de aço, pode ocorrer corrosão e nesse sentido é necessário protegê-la. Além disso, é preciso que sejam adotadas medidas contra incêndio, “[...] dada à suscetibilidade das formulações epóxi a danos causados por

temperaturas elevadas, especialmente quando as mesmas superam o patamar dos 250°C". (CAMPAGNOLO, DAL MOLIN, SILVA FILHO, 2003).

3.2 ARMADURA INCORPORADA COM ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA

O reforço com argamassa consiste na aplicação de nova armadura longitudinal na parte inferior da viga, onde ocorrem os efeitos dos esforços de tração. Para isso, é necessário que estribos sejam fixados a viga original e a nova armadura longitudinal. Por muitas vezes é necessário que se execute este tipo de serviço em que há o aumento do número de barras existentes, como descrito por Souza e Ripper (1998, p. 142):

seja como reforço, casos em que se pretenderá adequar ou ampliar a capacidade resistente da peça, seja como recuperação, quando, por corrosão, geralmente as barras existentes perdem parte de sua seção original e necessitam de complementação para que as condições de segurança e desempenho sejam restabelecidas.

Na hora da execução, a viga, além de ser apicoada, deve ser talhada nas regiões onde o novo estribo será inserido, junto aos apoios e, se possível, deve-se furar a parte superior para que eles sejam encaixados. A armadura longitudinal será amarrada a estes estribos e após será aplicada a argamassa, da forma comum, com a energia necessária para que não fiquem vazios, fazendo todo o cobrimento da nova armadura.

Esse método implica no aumento de seção da peça, fato que muitas vezes impossibilita a execução do reforço, dependendo da localização do elemento. Também existe a implicação da espera do tempo de cura da argamassa até que a estrutura possa ser utilizada novamente. Segundo Campagnolo, Dal Molin e Silva Filho (2003):

Este tipo de reforço apresenta como vantagens a rapidez de execução, o baixo custo e o conhecimento do comportamento dos materiais empregados, e como desvantagem principal a necessidade de aumento da seção transversal da peça a ser reforçada, equivalente à espessura de cobrimento das armaduras.

Assim, a relevância nesse tipo de reforço se dá principalmente no fato de que a mão de obra não precisa ser especializada. A rapidez comentada nem sempre se

torna real na hora da execução, especialmente em comparação com outros tipos de reforço.

Na UFRGS, desde 1991, a maior parte das pesquisas buscou apresentar a solução de adição de sílica ativa na argamassa de cimento Portland para melhora de algumas propriedades do concreto. Segundo Schuler (1998, p. 108-109), “[...] em termos de suas resistências [...] observou-se através dos outros ensaios realizados que nem sempre a adição de sílica ativa atua sobre as mesmas, a justificativa para a adição ainda se mantém pelos benefícios que ela pode trazer em termos de durabilidade do reparo ou reforço executado.” A sílica ativa é um subproduto de indústrias de ligas ferrosas e sua utilização tende a “[...] aumentar a coesão da argamassa no estado fresco e reduzir o tamanho dos poros da argamassa no estado endurecido, proporcionando efeitos benéficos em propriedades relacionadas com a durabilidade [...]” (CAMPAGNOLO, DAL MOLIN, SILVA FILHO, 2003).

3.3 FIBRA CARBONO

O reforço de fibra carbono, ou PRFC teve seu uso inicialmente na indústria automobilística, naval e aeronáutica e começou a ser utilizado no concreto armado por ser bastante resistente, ter baixo peso próprio, alta durabilidade e capacidade de assumir formas complexas (BEBER, CAMPOS FILHO, 2006). Segundo Souza e Ripper (1998, p. 154):

Os compósitos de fibras de carbono em matrizes de resina epoxídica apresentam, em comparação com o aço de construção, para uma mesma espessura, um quarto do peso e resistência à tração oito a dez vezes maior, para o mesmo módulo de elasticidade. A curva comportamental destes compósitos até a ruptura é linear, característica de um comportamento frágil na ruptura, sendo as tensões últimas da ordem dos 3.500 MPa, para correspondentes alongamentos de 1,5%.

Existem diferentes formas de aplicação de fibra, sendo a mais utilizada a de “[...] tecidos pré-impregnados, com espessura similar à do papel de parede, que são colados sobre a superfície do concreto com resina, seguindo exatamente a curvatura do elemento e permitindo a aplicação em cantos vivos.” (CAMPAGNOLO, DAL MOLIN, SILVA FILHO, 2003). Esse tecido é aplicado com resina à superfície tracionada do concreto e por apresentar alto desempenho, pode ser realizado em

espessuras muito finas, praticamente não aumentando a seção da peça. Segundo Beber e Campos Filho, (2006, p. 3157) “o reforço divide a resultante das tensões de tração com a armadura longitudinal, permitindo reduções consideráveis nas deformações específicas da armadura longitudinal das vigas reforçadas”.

Segundo Marques, (2016, p. 27), o processo de execução do reforço externamente consiste na: “a) preparação da superfície com politriz; b) aplicação de camada de primer; c) aplicação da primeira camada de resina epóxi; d) aplicação do tecido ou do laminado de PRF; e) aplicação da última camada de resina epóxi”. Esse processo de execução considera apenas uma camada, porém a fibra permite que sejam utilizadas várias camadas, repetindo-se os passos c) e d).

É importante também que seja aplicada apenas a resina necessária para a colagem, para que as características dos compósitos não sejam alteradas. Ela deve ser resistente para que transfira os esforços do concreto para o tecido, ao mesmo tempo em que deve ter certa ductilidade para que não haja ruptura frágil entre os dois componentes (CAMPAGNOLO, DAL MOLIN, SILVA FILHO, 2003).

O reforço de PRFC é leve e de rápida execução e muitas vezes não traz a necessidade de escoramento da estrutura, o que pode ser um facilitador para diversas situações de obra. Por outro lado, por ser utilizada resina, da mesma forma que a chapa colada, seria necessária a execução de proteção em relação à situação de incêndio, já que a resina evapora em altas temperaturas. Outra desvantagem se relaciona “à intolerância dos materiais compósitos a uma superfície não regular, o que pode ocasionar *peeling off*, ou seja, a possibilidade de modos de ruptura frágeis.” (CAMPAGNOLO, DAL MOLIN, SILVA FILHO, 2003)

3.4 RESULTADOS DE 5 ANOS DE EXPERIMENTOS REALIZADOS NO LEME

Neste item serão apresentados resultados dos ensaios de flexão obtidos a partir de 2013 na disciplina de Patologia e Instrumentação das Construções, ministrada pelo professor João Luiz Campagnolo no LEME/UFRGS. Na disciplina mencionada são executados e testados os três reforços citados neste trabalho nos itens 3.1 a 3.3, por grupos distintos de alunos, com ajuda dos técnicos do laboratório.

As vigas reforçadas têm dimensões de 1,30 metros (m) de comprimento e seção de 7 centímetros (cm) de base por 14 cm de altura. A armadura utilizada

possui estribos de diâmetro 4,2 milímetros (mm) espaçados a cada 6 cm, aço CA-60. A armadura superior é formada por duas barras de aço CA-60 de diâmetro 4,2 mm. A armadura inferior é formada por duas barras longitudinais de aço CA-50, sendo diâmetro 8 mm em 2017/1 e 2016/2 e 6,3 mm no restante dos semestres, com prolongamentos verticais de 7 cm perto dos apoios. O cobrimento desta armadura é 1 cm. O cimento utilizado é sempre CPV ARI.

Os traços e slumps dos concretos utilizados para produção das vigas a serem reforçadas variam em cada semestre, conforme se observa na Tabela 1. A viga testemunho, concretada em todos os semestres para comparação com aquelas reforçadas, possui, entretanto, cargas de ruptura semelhantes.

O ensaio realizado para todas as vigas foi o de 4 pontos. Todos os elementos de viga passaram por uma preparação da superfície, sendo apicoados para os casos de reforço com chapa colada e armadura incorporada com argamassa e lixados com disco diamantado para reforço de fibra carbono.

Tabela 1: Traços e slumps das vigas concretadas

Semestre	Traço	a/c	Slump (cm)	F _{ci} médio (MPa)
2013/1	1:2,12:2,88	0,5	11	48,00
2013/2	1:2,12:2,88	0,5	8	51,00
2014/1	1:2,1:2,88	0,5	13	45,10
2014/2	1:2,12:2,88	0,5	8	45,10
2015/1	1:3,5:4	0,65	10	24,14
2015/2	1:2,12:2,88	0,5	8,3	40,72
2016/1	1:3,03:4,11	0,56	3,5	41,00
2016/2	1:3:4	0,5	4,5	40,80
2017/1	1:3:4	0,58	8	26,62

Fonte: Elaborado pela autora.

Todos os ensaios foram feitos até que se atingissem as rupturas, as quais se deram por esmagamento do concreto (compressão). Mesmo atingida a carga máxima a aplicação de carga foi continuada para se verificar também a forma de ruptura do reforço. Os gráficos de resultados de deslocamentos por carga das vigas testemunhos e cada configuração de reforço encontram-se no Apêndice A deste trabalho.

O ensaio de chapa colada com resina epóxi é feito com uma chapa de aço de 0,28 cm de espessura, 1,10 m de comprimento e 7 cm de largura, cobrindo toda a

largura da viga e deixando os apoios livres. A chapa é fixada com resina e também parabolts de diâmetro de $\frac{1}{4}$ polegadas e comprimento de $2\frac{1}{4}$ polegadas. A marca da resina variou ao longo dos anos, sendo em sua maioria Sikadur 32. São executados furos nas vigas a cada 7 cm, para que a chapa seja fixada com os parabolts, presos na sequência por arruelas. A espessura de resina deve ser de 1 mm. A figura 4 mostra o processo de execução do reforço e a figura 5 a ruptura no semestre 2017/1.

Figura 4: Execução reforço chapa colada



Fonte: Imagens disponibilizadas pelos alunos da disciplina.

Figura 5: Rompimento reforço chapa colada 2017/1

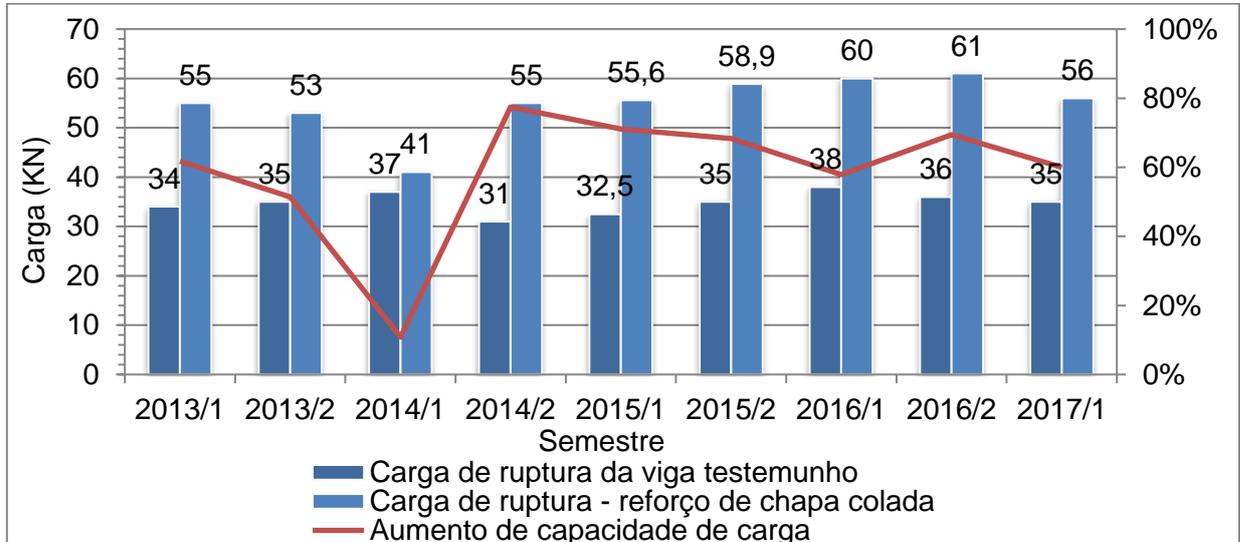


Fonte: Imagem disponibilizada pelos alunos da disciplina.

As falhas ocorreram por ruptura na parte comprimida do concreto. No semestre de 2014/1 ocorreu só *peeling-off* do reforço, causando uma diminuição na

capacidade de carga em relação aos demais semestres. O gráfico 1 apresenta a carga de ruptura da viga testemunho em relação a viga reforçada com chapa.

Gráfico 1: Aumento de capacidade de carga do reforço de chapa colada com resina



Fonte: Elaborado pela autora.

O ensaio de viga reforçada com argamassa aditivada e estribos externos utiliza duas barras longitudinais novas de aço CA-50, de diâmetro 8 mm em 2017/1 e 2016/2 e 6,3 mm no restante dos semestres. Estas barras são fixadas a viga com 6 estribos próximo aos apoios, com distanciamento de 5 cm entre si.

As vigas são furadas a $\frac{2}{3}$ da altura da viga para inserção dos estribos, simulando a presença de uma laje. Nos anos de 2016/1 e 2013/2 os alunos optaram por envolver os estribos em toda altura da viga. O cobrimento com a nova armadura inserida é de 2 cm. A argamassa utilizada possui traço 1:3 com adição de 10% em sílica ativa. O fator água/aglomerante é igual a 0,5. A figura 6 mostra o processo de execução do reforço e a figura 7 a ruptura no semestre 2017/1.

Figura 6: Execução reforço armadura incorporada com argamassa



Fonte: Imagens disponibilizadas pelos alunos da disciplina.

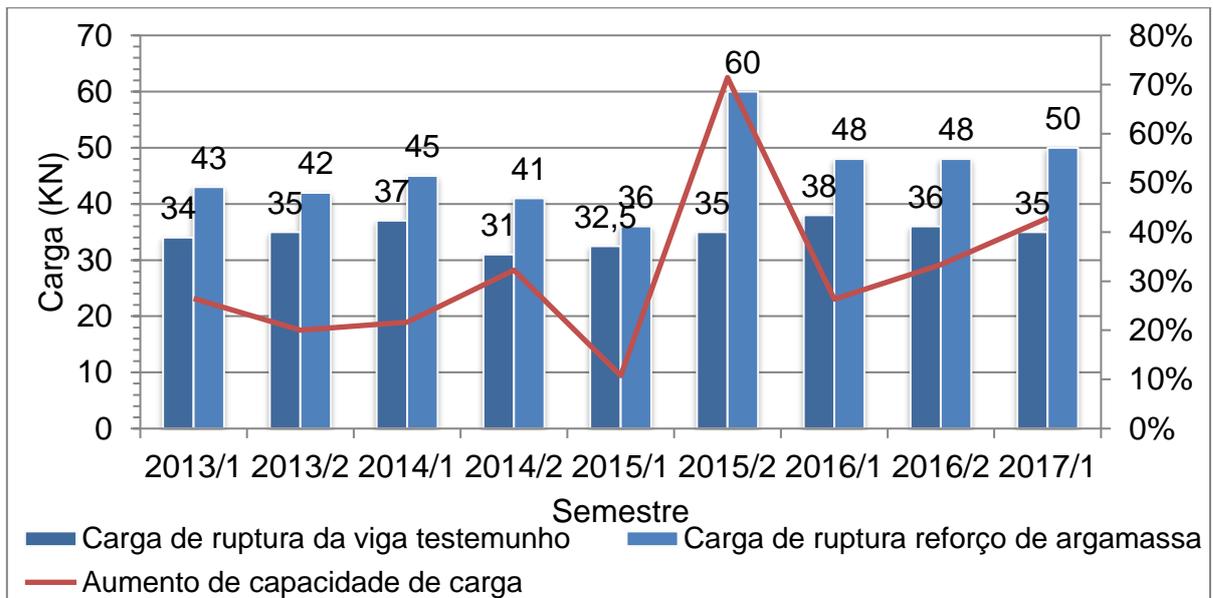
Figura 7: Rompimento reforço chapa colada 2017/1



Fonte: Imagem disponibilizada pelos alunos da disciplina.

Os rompimentos ocorreram pela ruptura do concreto na parte comprimida e após por perda de aderência entre o concreto e parte do reforço. O único semestre em que não houve perda de aderência e o reforço rompeu conjuntamente ao concreto foi 2015/2, que trouxe o melhor resultado. O gráfico 2 apresenta a carga de ruptura da viga testemunho em relação a viga reforçada com argamassa.

Gráfico 2: Aumento de capacidade de carga do reforço de armadura incorporada com argamassa



Fonte: Elaborado pela autora.

O reforço de fibra de carbono possui comprimento de 1,10 m e largura de 7 cm. Ele é fixado com resina, além de possuir duas faixas de 25 cm de largura próximas aos apoios envolvendo a faixa longitudinal e subindo 9 cm na altura da viga para contribuir com a ancoragem do reforço ao elemento. Em todos os semestres foi aplicado primer e após resina, havendo variação de marca ao longo dos anos, apenas em 2017/1 não foi utilizado primer, pois a marca de resina utilizada não recomendava seu uso. Também foram executadas sempre duas camadas de fibra. A figura 8 mostra o processo de execução do reforço e a figura 9 a ruptura no semestre 2017/1.

Figura 8: Execução reforço de fibra carbono



Fonte: Imagens disponibilizadas pelos alunos da disciplina.

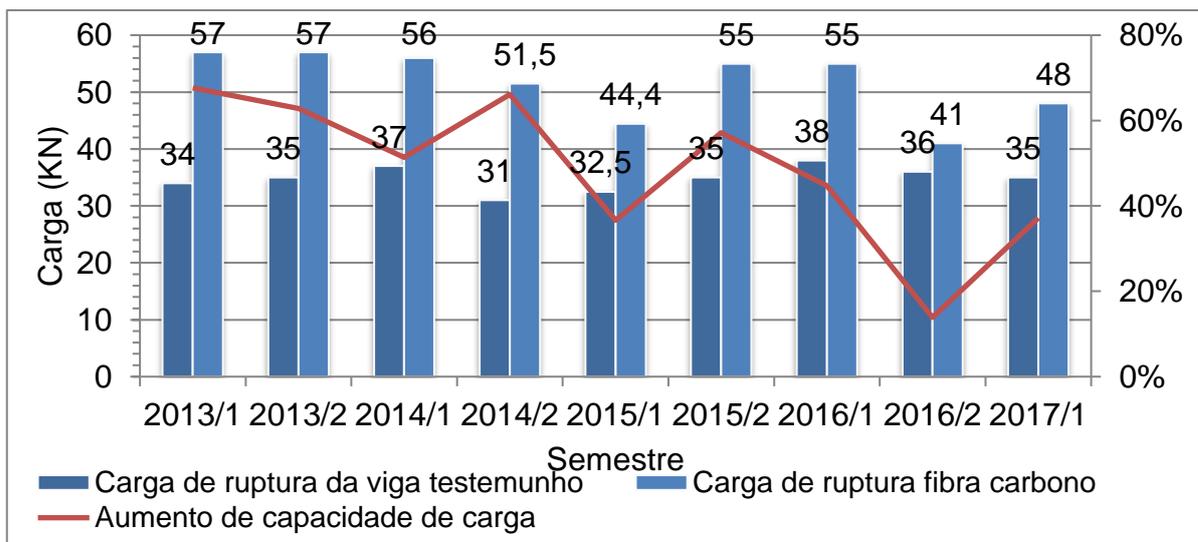
Figura 9: Rompimento reforço chapa colada 2017/1



Fonte: Imagem disponibilizada pelos alunos da disciplina.

As falhas ocorreram por ruptura da parte comprimida do concreto. No ano de 2016/2 ocorreu apenas *peeling-off* do reforço junto a ancoragem. O grupo executor atribuiu o ocorrido ao fato de a resina utilizada estar vencida. O gráfico 3 apresenta a carga de ruptura da viga testemunho em relação a viga reforçada com fibra carbono.

Gráfico 3: Aumento de capacidade de carga do reforço de fibra carbono



Fonte: Elaborado pela autora.

O cálculo de capacidade carga última teórica de cada reforço foi feito considerando a área total de reforço e desconsiderando a matriz na qual está inserido, no caso argamassa ou resina. Para a fibra carbono (FC) foi considerado

módulo de elasticidade igual a 250 GPa, espessura de 0,176 mm e densidade 1,82 g/cm³, que são dados fornecidos pelo fabricante. Para a chapa colada (CC), considerou-se área 1,96 cm² e resistência a tração de 340 MPa, que são os dados da chapa usualmente utilizada na disciplina. Para a armadura incorporada com argamassa (AICA) foi considerado duas barras longitudinais de aço CA-50 com área de 0,623 cm² ou 1,005 cm², conforme aplicação do semestre. Os dados do concreto e disposição da armadura foram sendo variados a cada semestre. A metodologia de cálculo utilizada para fibra carbono é de Beber (2003) e para chapa e argamassa é descrita por Souza e Ripper (p. 194, 1998), através do Método de Campagnolo.

Considerando que não há média definida esperada para os resultados, a análise estatística dos dados obtidos foi através de intervalo de confiança com variância desconhecida e nível de significância de 95% utilizando a tabela *t-student* bicaudal. Foram analisados os resultados de ruptura experimental (E) e teórica (T) das vigas testemunhos e reforços conforme tabela 2. As vigas testemunhos foram divididas até 2016/1 por haver diferença de armadura longitudinal, sendo realizada apenas média para os dois últimos semestres.

Tabela 2: Análise dos dados dos ensaios

Ano	2013/1	2013/2	2014/1	2014/2	2015/1	2015/2	2016/1	2016/2	2017/1
E VT (kN)	34	35	37	31	32,5	35	38	36	35
T VT (kN)	20,10	20,11	20,08	20,08	19,88	20,04	20,05	31,61	31,4
IC E VT até 2016/1	IC (34,83;0,95)=[32,57;36,72]			IC T VT até 2016/1			IC (21,93;0,95)=[20,24;24,95]		
IC E VT 2016/2 e 2017/1	Média=35,5			IC T VT 2016/2 e 2017/1			Média=31,5		
EFC (kN)	57	57	56	51,5	44,4	55	55	41	48
T FC (kN)	66,53	68,60	64,47	64,47	46,95	61,52	60,77	65,20	52,92
IC E FC	IC (51,66;0,95)=[47,21;56,10]			IC T FC			IC (61,27;0,95)=[55,99;66,55]		
E AICA (kN)	43	42	45	41	36	60	48	48	50
T AICA (kN)	40,44	40,47	40,41	40,41	40,07	40,36	40,36	49,40	49,06
IC E AICA	IC (45,89;0,95)=[40,75;51,02]			IC T AICA			IC (42,33;0,95)=[39,38;45,28]		
E CC (kN)	55	53	41	55	55,6	58,9	60	61	56
T CC (kN)	54,99	55,04	54,93	54,93	54,32	54,83	54,84	58,65	58,16
IC E CC	IC (55,06;0,95)=[50,61;59,50]			IC T CC			IC (55,63;0,95)=[54,43;56,83]		

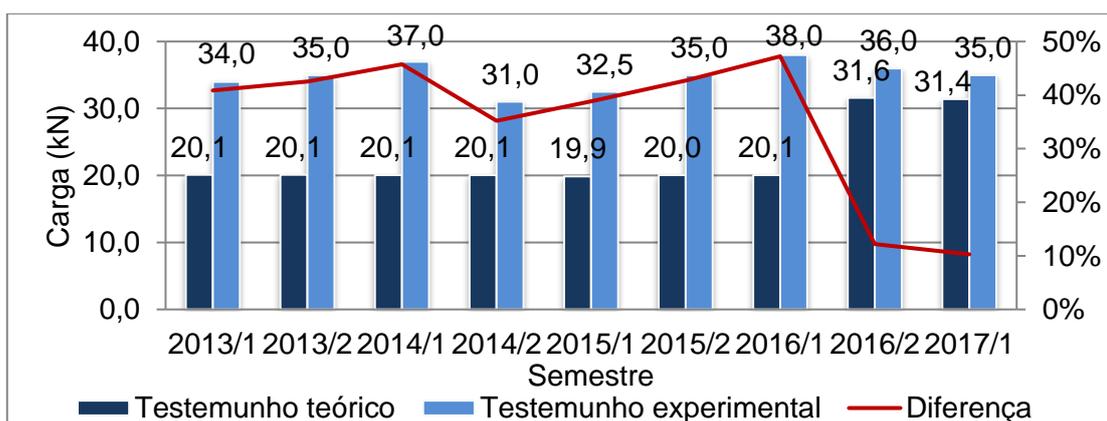
Fonte: Elaborado pela autora

Nota-se que os intervalos de confiança tiveram diferença de aproximadamente 10 MPa entre o maior e o menor valor para os valores experimentais, em todos os reforços, o que demonstra que há grande variação nos ensaios e resultados. Os intervalos de confiança dos dados teóricos foram um pouco menores, comportamento esperado, uma vez que o modelo teórico considera sempre os mesmos fenômenos envolvidos e na prática distintos fenômenos se combinam a cada experimento realizado. Resultados diversos eram esperados, uma vez ocorrem variações como diferença de traço de concreto, $f_{c,j}$, armadura utilizada e especialmente, execução e executores ao longo dos anos. A variável da execução é especialmente relevante já que os reforços são realizados por vários alunos do curso de engenharia civil da UFRGS que não têm experiência na execução de vigas e de seus reforços, proporcionando uma grande variabilidade de resultados.

Entretanto, é possível dizer que se forem estabelecidas as mesmas condições para os ensaios, considerando 5% de erro, os valores de aumento de carga atingidos estarão dentro dos valores estabelecidos pelo intervalo de confiança descrito. Alguns valores dos ensaios anteriores já se encontram fora do intervalo, o que sugere falha de execução mais significativa ou rompimento diferenciado.

O gráfico 4 compara os resultados de carga de ruptura teórica a ruptura experimental das vigas testemunho, demonstrando a diferença entre experimentos e cálculo. Na teoria, todos os reforços se encontram no domínio 2. Até 2016/1 utilizava-se aço de diâmetro 6,3 mm, sendo após trocado para 8 mm. Como se observa, os resultados teóricos para a segunda configuração de aço ficam muito mais próximos da realidade.

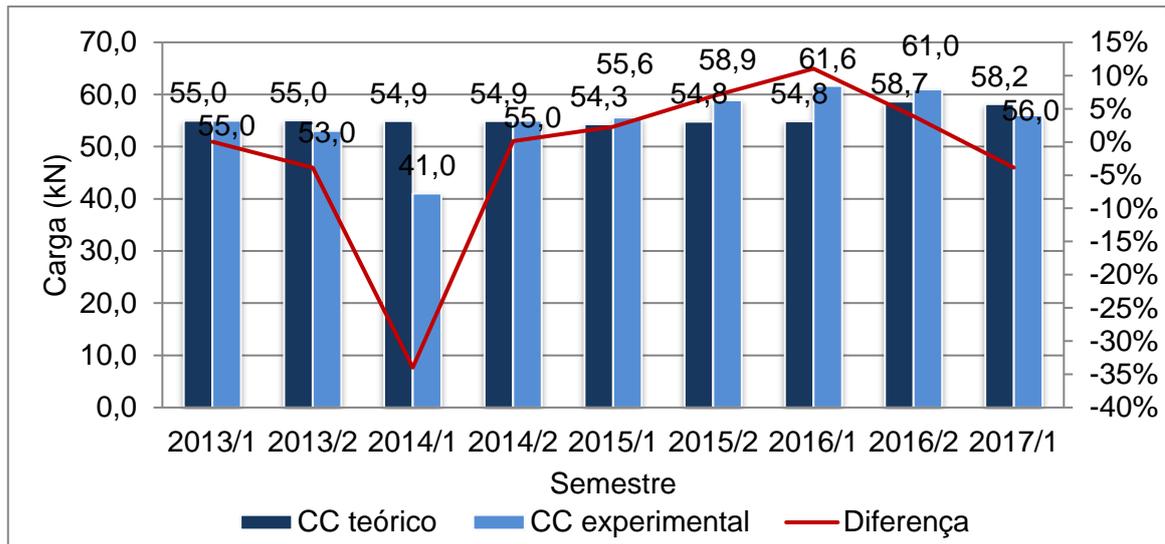
Gráfico 4: Comparação teórico x experimental viga testemunho



Fonte: Elaborado pela autora.

Como mencionado, no semestre de 2014/1 houve *peeling-off* do reforço de chapada colada, causando uma maior diferença em relação ao cálculo teórico (gráfico 5). Descontando este resultado, observa-se uma tendência aos resultados experimentais estarem entre 10% acima e 4% abaixo do valor esperado teoricamente, o que é bem próximo da realidade.

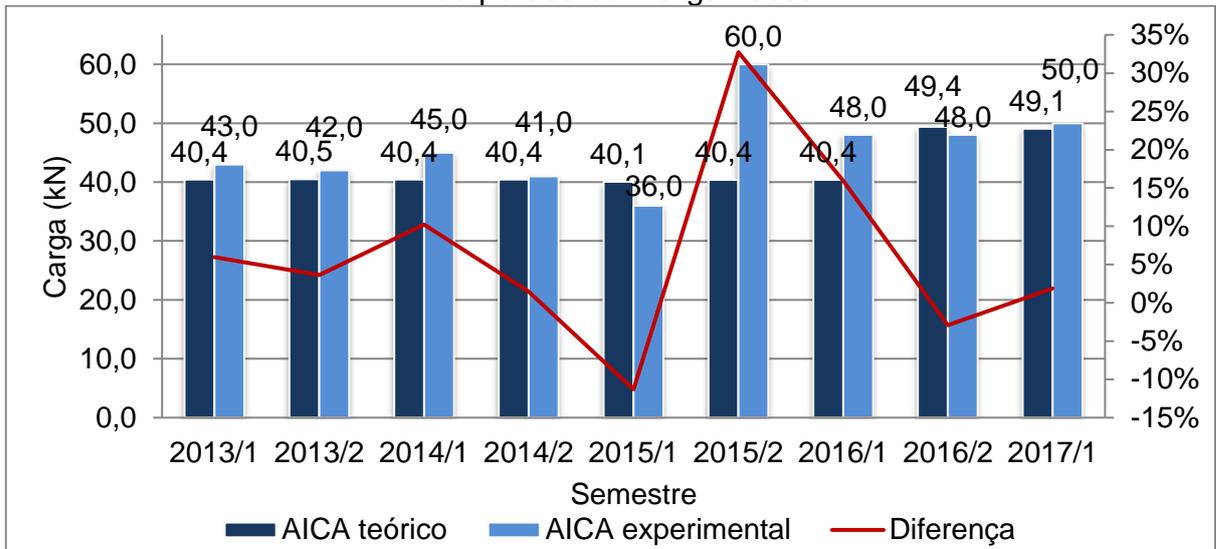
Gráfico 5: Comparação teórico x experimental viga reforçada com chapa colada



Fonte: Elaborado pela autora.

O reforço de argamassa, diferente dos outros reforços, apresentou como seu maior ponto fora da curva, em 2015/2, um valor experimental mais alto do que o teórico (gráfico 6). Isso ocorreu, como já mencionado, por ter havido a melhor aderência possível entre reforço e concreto antigo, fazendo com que o reforço rompesse conjuntamente ao concreto. Porém ainda assim este é um resultado inesperado, uma vez que, teoricamente, a aderência é considerada perfeita. Os resultados estiveram entre 15% acima e 11% abaixo dos valores teóricos, mostrando que o modelo é adaptado aos resultados reais.

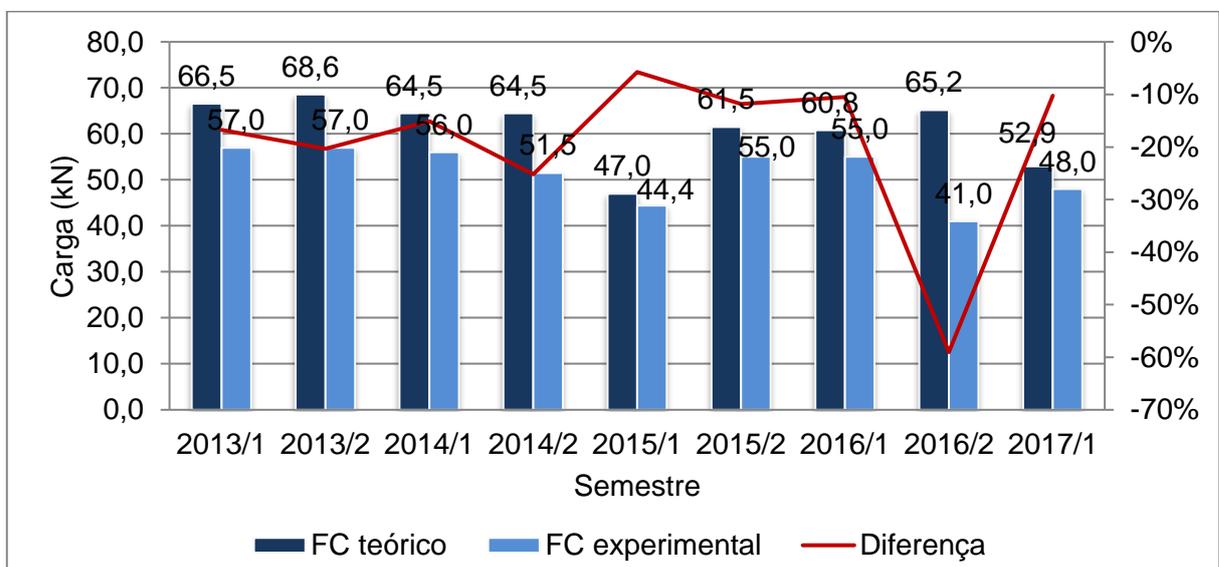
Gráfico 6: Comparação teórico x experimental viga reforçada com armadura incorporada com argamassa



Fonte: Elaborado pela autora.

Para fibra carbono no semestre de 2016/2 houve *peeling-off* do reforço, causando uma maior diferença em relação ao cálculo teórico (gráfico 7). Porém de forma geral é possível observar uma tendência aos resultados experimentais estarem entre 10% e 20% abaixo do valor esperado teoricamente, o que pode ser explicado por falha de execução e mudança de resina ao longo dos semestres.

Gráfico 7: Comparação teórico x experimental viga reforçada com fibra carbono



Fonte: Elaborado pela autora.

Verifica-se que para grande parte dos dados, a teoria apresentou resultados inferiores aos experimentos, o que indica que os modelos teóricos empregados estão a favor da segurança. No caso das vigas reforçadas com fibras de carbono, em todos os semestres, os experimentos indicaram valores abaixo do modelo teórico. Este é um indicativo de que o modelo empregado não captura todos fenômenos que ocorrem nestes experimentos em específico

É necessário pontuar também que os resultados apresentados nos ensaios foram obtidos considerando certo reforço executado, e estes diferentes tipos de reforços não foram dimensionados para que os resultados de aumento de capacidade de carga fossem iguais para todos (tabela 3). Isso implica que o reforço de chapa colada, por exemplo, pode ter mais material do que o de fibra carbono precisaria ter para atingir o mesmo aumento. As médias foram calculadas desconsiderando os valores mais baixos da fibra carbono e chapa colada e valor mais alto da armadura incorporada com argamassa, já houveram rupturas diferentes nestes semestres indicados.

Tabela 3: Análise dos dados dos ensaios

Reforço	Semestre	Aumento teórico	Média	Aumento experimental	Média
FC*	2013/1	95,68	76,26	67,65	52,95
	2013/2	96		62,86	
	2014/1	74,24		51,35	
	2014/2	107,97		66,13	
	2015/1	44,46		36,62	
	2015/2	75,77		57,14	
	2016/1	59,92		44,74	
	2016/2	81,11		13,89	
	2017/1	51,2		37,14	
AICA**	2013/1	18,94	21,82	26,47	26,70
	2013/2	15,63		20	
	2014/1	9,22		21,62	
	2014/2	30,35		32,26	
	2015/1	23,29		10,77	
	2015/2	15,31		71,43	
	2016/1	6,21		26,32	
	2016/2	37,22		33,33	
	2017/1	40,17		42,86	
CC**	2013/1	61,74	60,21	61,76	65,20
	2013/2	57,26		51,43	

	2014/1	48,46		10,81	
	2014/2	77,19		77,42	
	2015/1	67,14		71,08	
	2015/2	56,66		68,29	
	2016/1	44,32		62,21	
	2016/2	62,92		69,44	
	2017/1	66,17		60	

* Método de Beber (2003)

** Método de Campagnolo, descrito em Souza e Ripper (p. 194, 1998)

Fonte: Elaborado pela autora

Os aumentos foram calculados em relação aos resultados experimentais das vigas testemunho, tanto aumento teórico como experimental, pois há menor variação entre os resultados. Os materiais e dimensões de reforços utilizados não atingem a mesma carga, como pode ser visto, e, portanto, não podem ser diretamente comparados aos dados obtidos por este trabalho. A área utilizada para o reforço não foi dimensionada para atingir o mesmo nível de aumento de capacidade de carga e por isso a comparação direta seria injusta com os novos reforços.

4 CONCRETO TÊXTIL

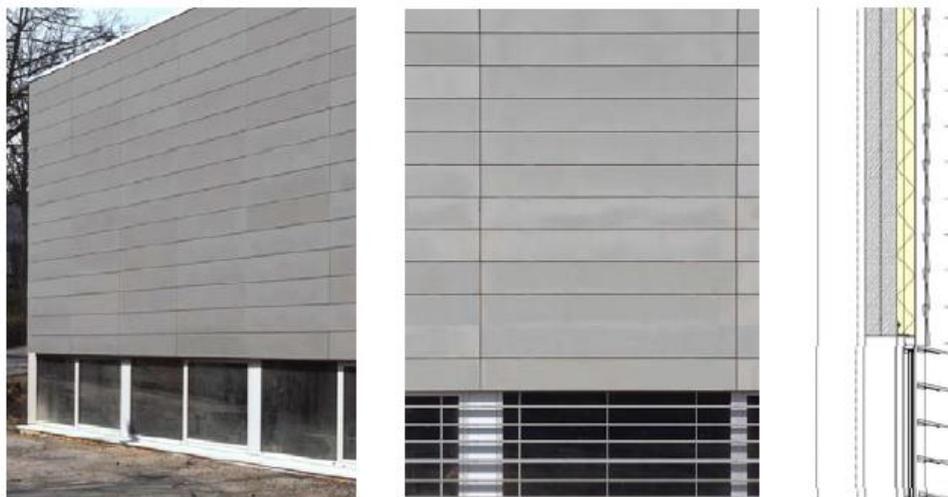
O Concreto Têxtil é um compósito conhecido internacionalmente como *Textile Reinforced Concrete* (TRC), especialmente na Europa, e *Fibre Reinforced Cementitious Matrix* (FRCM) na América do Norte. Nas primeiras pesquisas não houve uma definição clara para a nomenclatura e definição do material CT, sendo inclusive comparado com o ferrocimento, que já é uma tecnologia bastante amadurecida. Muitos estudos com características semelhantes poderão ser encontrados também com o nome de *Textile Reinforced Mortar* (TRM), já que não há clara definição entre concreto e argamassa referente ao tamanho de agregados, porém tendo utilização diferente do TRC. Considerando a nomenclatura atual, o CT pode ser definido segundo Naaman (2010, p. 5, tradução livre):

[...] concreto têxtil é um tipo de concreto reforçado geralmente constituído de uma matriz de cimento hidráulica reforçada com diversas camadas de têxteis bidimensionais espaçadas próximas umas às outras ou uma ou várias camadas de têxteis tridimensionais. No mínimo uma camada de têxtil deve ser colocada próxima às duas superfícies externas da estrutura resultante. Os têxteis podem ser polímeros, sintéticos, metálicos, orgânicos ou de outro material adequado. A granulometria do agregado da matriz de cimento e sua composição deve ser compatível com o sistema de armadura têxtil e esse deve ser envolvido por ela. A matriz pode também conter fibras descontínuas ou microfibras de dimensões apropriadas.

O CT é formado por tecidos multiaxiais, que podem ser tridimensionais, combinados com concreto de agregados finos, permitindo a criação de estruturas bastante esbeltas que são resistentes tanto em compressão como à tração (BRAMESHUBER, BROCKMANN, 2006). Os tecidos são posicionados na direção de maior tensão do compósito e podem ser produzidos com diversos materiais.

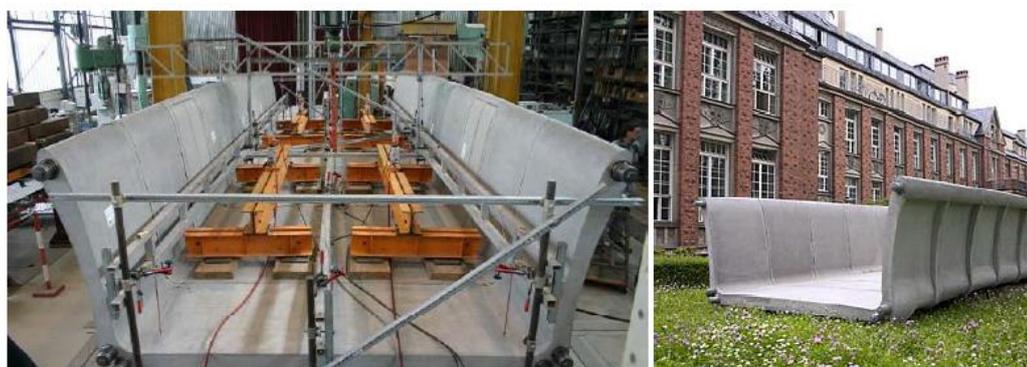
As maiores pesquisas referentes ao material ocorrem na Alemanha, onde foi criado em 2007 o Centro Alemão de Concreto Têxtil. O material pode possuir diversos usos, como na produção de fachada de edifícios (figura 10), de elementos sanduíches, cascas, passarelas (figura 11), sacadas, varandas e reparos e reforços estruturais em elementos de concreto armado (DENARDI, 2016), este último sendo o objeto de estudo deste trabalho. Maiores referências de aplicações podem ser encontradas em Hegger, 2006 e no capítulo 11 de Peled, Mobasher e Bentur, 2017.

Figura 10: Detalhe e seção de fachada de CT



Fonte: Hegger (2006, p. 239)

Figura 11: Construção de passarela em CT



Fonte: Hegger (2006, p. 267)

4.1 MATRIZ

As matrizes utilizadas para o concreto têxtil demandam diferentes propriedades mecânicas e de durabilidade dependendo de sua utilização e devem estar adequadas ao tipo de tecido que está sendo utilizado, sua geometria e seu processo de produção (BRAMESHUBER et al., 2006). São geralmente compostas de cimento, agregados finos, aditivos ou materiais que substituam o cimento, tendo uma baixa relação água aglomerante (PORTAL, THRANE, LUNDGREN, 2016). Segundo Brameshuber (et al., 2006, p.29, tradução livre), “um aspecto essencial é que [a matriz] penetre totalmente no tecido para que se garanta uma boa aderência assim como um bom comportamento no carregamento”.

Nesse sentido, quando estamos definindo a composição da mistura, é importante atingir um material que possa penetrar o tecido. Menores tamanhos de agregado favorecem essa propriedade, porém podem aumentar a retração da matriz e assim ser necessário maior uso de cimento (PORTAL, THRANE, LUNDGREN, 2016).

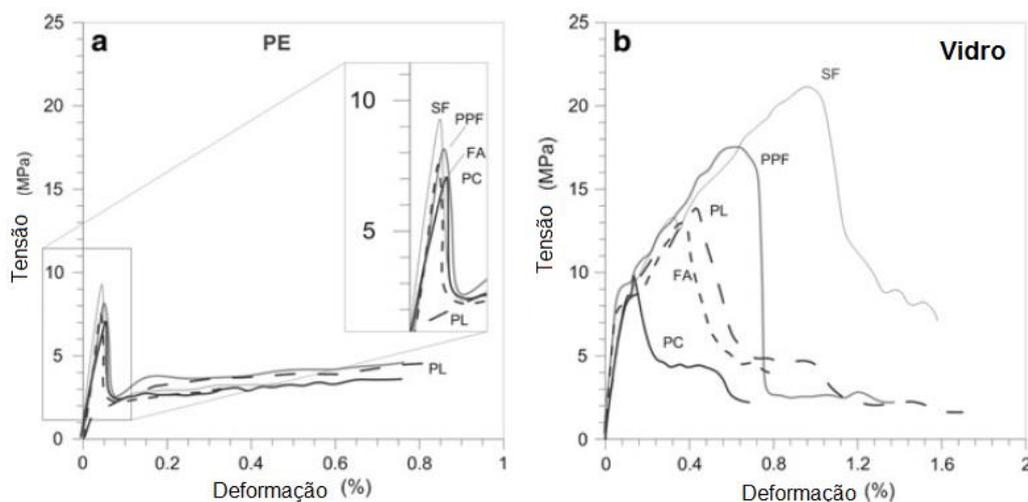
Os aditivos e traços utilizados, além de dependerem do tecido e suas características também dependem da forma de aplicação do CT. Para alguns usos, como estrutural, devem ser mais fluídos, para reforços, provavelmente mais plásticos. Podem ser utilizados superplastificantes, metacaulim, sílica ativa, cinza volante, estabilizantes, etc., de forma a tornar a execução mais fácil e melhorar propriedades. Além disso, como dito por Brameshuber e Brockmann (2003, p. 95 *apud* Denardi, 2016, p.52): “Devido ao alto teor de aglomerante, concretos de finas granulometrias apresentam baixo módulo de Young e deformações maiores que concretos comuns para mesma resistência à compressão”. Esse fator deve ser levado em conta especialmente para a definição de matriz que será utilizada como reforço estrutural.

Deve-se levar em conta também o concreto que está sendo recuperado. Segundo Truong (2017, p. 827, tradução livre): “A matriz formulada deve ter um módulo relativamente baixo comparado ao concreto e flexibilidade para acompanhar a deformação do suporte, garantindo que não aconteçam danos e que os locais com fissuras sejam selados”.

Durante a execução, é importante destacar que os feixes não revestidos ou não impregnados devem ser saturados de concreto antes de serem moldados e ensaiados, pois possuem alta capilaridade e tem grande influência na relação água/cimento. (KRÜGER et al., 2001 *apud* DENARDI, 2016).

Tsesarsky (et al., 2013), testou diferentes matrizes para reforço com aditivos, ensaiados a flexão através de pêndulo. Todas partiram de uma massa de cimento, onde foram adicionados polímero acrílico (PL), fibras cortadas de polipropileno (PPF), cinza volante tipo F (FA) e sílica ativa (SF). Os testes foram realizados com fibras têxteis de polietileno (PE) e vidro álcali-resistente (*AR-Glass*). Os resultados encontram-se no gráfico 8.

Gráfico 8: Curvas tensão e deformação cascas de concreto têxtil em teste de flexão estática



Fonte: Tsesarsky (2013, tradução livre).

Especialmente a fibra de vidro obteve resultados que dependiam grandemente da matriz em que estava inserida. Um dos melhores resultados obtidos se deu com o uso de sílica ativa.

4.2 TÊXTIL

Os têxteis são formados de diversos filamentos de diâmetro da ordem de alguns micrômetros, que, quando processados de forma a se tornarem estruturas planas, permitem a produção de um material resistente a cargas que pode ser utilizado conjuntamente com o concreto. (ORTLEPP, 2007).

A unidade básica contínua do têxtil é o filamento que pode possuir entre 5 a 30 μm de diâmetro, dependendo do material (KULAS, 2015). Segundo Raupach (2006, p.77, tradução livre):

Conjuntos de filamentos formam os fios e os feixes, que são agrupamentos de filamentos. Eles são principalmente de vidro álcali-resistente, de carbono e de aramida. A unidade de medida do feixe é dada por tex, cujo significado é grama por quilômetro e pode ser calculado em função do seu diâmetro e da sua massa específica.

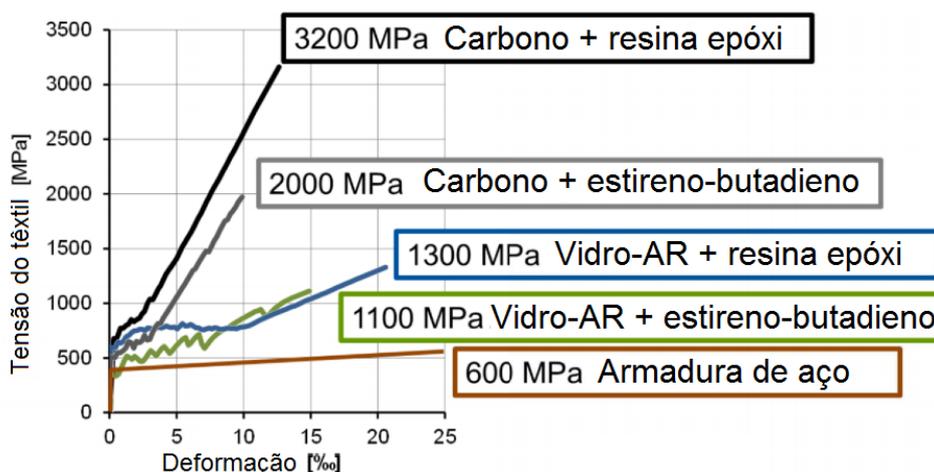
Os têxteis de vidro álcali-resistentes foram desenvolvidos especialmente para o uso com o concreto que utiliza cimento comum, pois ele é um meio alcalino que

poderia danificar outros tipos de materiais. O carbono também é utilizado, mas não apresenta adesão tão eficiente ao concreto como a fibra de vidro. As fibras de aramida têm menor densidade e maior resistência ao impacto, e ainda não existem tantos estudos que utilizam este material para o CT (GRIES et al, 2006). As propriedades das fibras podem ser encontradas no capítulo 2 de Peled, Bentur e Mobasher, 2017.

Para que os têxteis funcionem de forma eficiente eles devem ser impregnados. A resina epóxi ou borracha de estireno-butadieno provaram aumentar a qualidade do têxtil. Estes materiais são bem mais finos que o concreto e desta forma conseguem impregnar todo o material (KULAS, 2015).

O gráfico 9 mostra a resposta de tensão versus deformação de materiais têxteis mais comuns impregnados com os compostos mais utilizados quando ensaiados a tração. Nota-se que os têxteis podem alcançar tensões de ruptura na tração 5 vezes maiores que o concreto armado com aço.

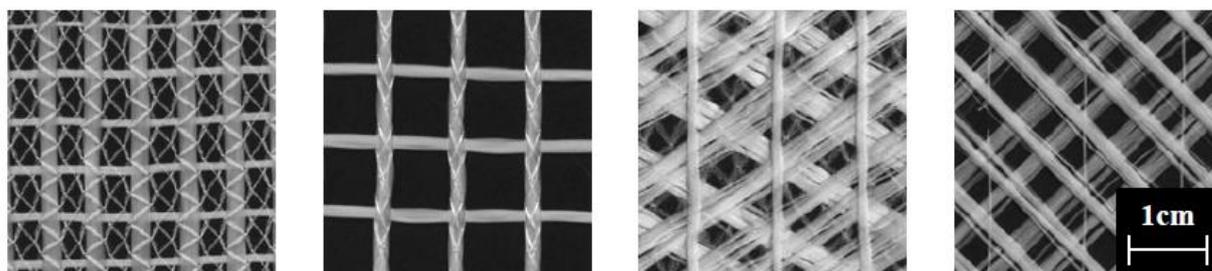
Gráfico 9: Tensão e deformação de têxteis impregnados



Fonte: Kulas (2015, p.4, tradução livre).

Os têxteis podem ter diversas configurações dependendo da forma como são fabricados. Os mais comuns são a bi-axial e multi-axial, uma vez que oferecem uma grande flexibilidade de propriedades e são adequados para muitos usos (GRIES et al, 2006). No caso da utilização do têxtil para flexão, utilizam-se estruturas bidimensionais, conforme figura 12.

Figura 12: Exemplos de têxtil feitos de vidros ákali-resistentes



a) Estruturas de têxtil biaxial para reforço a flexão

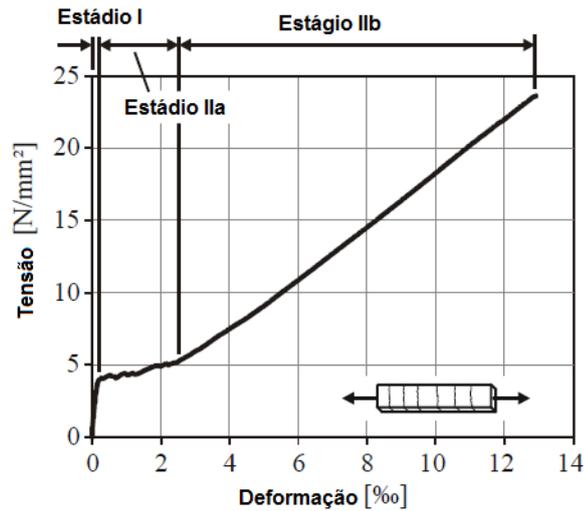
b) Estruturas de têxtil multiaxial para reforço a torção e esforço lateral

Fonte: Ortlepp (2007, p. 30, tradução livre).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO

O CT, em relação ao comportamento de tensão-deformação, comporta-se de forma semelhante ao concreto armado convencional. Considerando um corpo de prova submetido ao ensaio de tração, temos as seguintes fases: na região do estágio I, o CT se comporta como concreto convencional, não apresentando praticamente nenhuma deformação; no estágio II, a resistência à tração do concreto é excedida e ocorrem fissuras; no estágio IIb a formação de fissuras é completa e a rigidez volta a aumentar, e a relação de tensão-deformação passa a ser linear até a ruptura. Esse comportamento pode ser observado no gráfico 10. Diferente do concreto armado, quando há utilização de vidro ákali-resistente ou fibra carbono, não há estágio III, e nesse sentido ocorre uma ruptura súbita e frágil no CT (ORTLEPP, 2007).

Gráfico 10: Linhas de tensão-deformação para CT

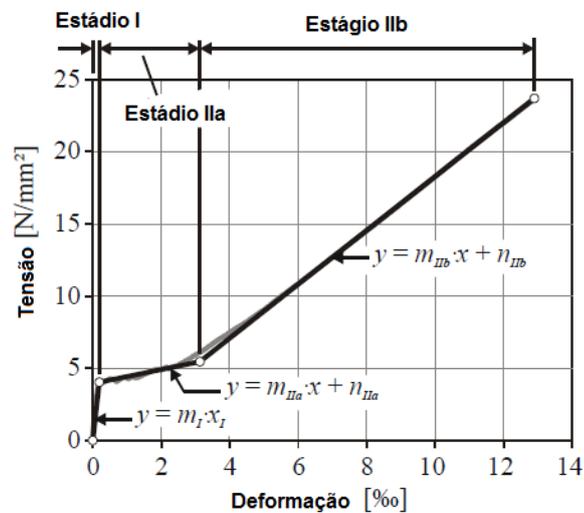


Fonte: Ortlepp (2007, p.33, tradução livre).

As curvas de cada estágio, que podem ser observadas no gráfico 11, foram aproximadas por equações lineares por Jesse (*apud* Ortlepp, 2007, tradução livre):

O aumento mIIb da linha tensão-deformação após a conclusão da formação de fissuras corresponde à capacidade de carga dos filamentos do núcleo utilizados como reforço, uma vez que os filamentos de borda já falham durante a formação de fissuras múltiplas.

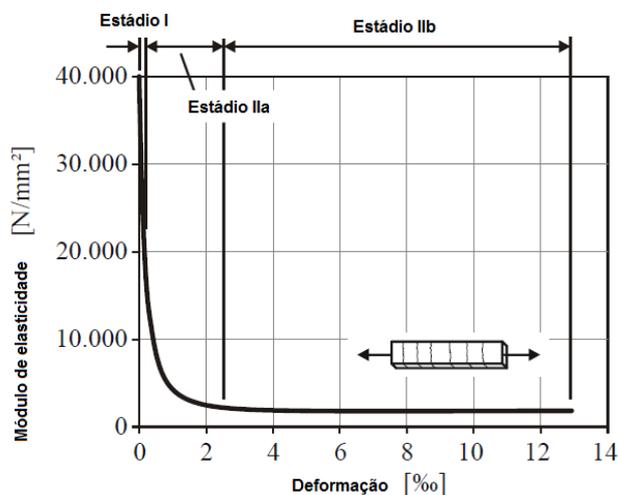
Gráfico 11: Aproximação trilinear das curvas tensão-deformação para CT



Fonte: Jesse (*apud* Ortlepp, 2007, p.33, tradução livre).

Por apresentar comportamento não-linear, o módulo de elasticidade do CT varia conforme a sua deformação, tornando a fórmula de relação tensão-deformação uma função da deformação $\sigma = E(\epsilon) \cdot \epsilon$. Essa função pode ser observada no gráfico 12.

Gráfico 12: Curva não-linear do módulo de elasticidade da linha tensão-deformação



Fonte: Jesse (*apud* Ortlepp, 2007, p.34, tradução livre).

4.4 REFORÇO

O uso do concreto têxtil para reforço começou a ser estudado considerando que outros tipos de reforços existentes no mercado não possuem alguns detalhes de execução ou comportamento que o CT possui que trazem benefícios à estrutura. A figura 13 apresenta a forma de execução das camadas de reforço em uma viga modelo.

Figura 13: Exemplo de camadas de reforço com CT



Fonte: Ortlepp, Humpel, Curbach (2006, p. 590).

Por exemplo, no caso de reforços que utilizam resina, como chapa colada e fibra carbono, a resistência em situação de incêndio acaba sendo muito prejudicada já que em temperaturas mais altas, geralmente menos de 100°C, a resina evapora. O CT não tem esse problema já que utiliza concreto como material colante de reforço.

O reforço de argamassa armada exige um aumento muito grande de seção para que haja aumento de capacidade de carga, e em muitas situações de obra isso pode inclusive impossibilitar a execução. O CT quando utilizado como reforço tem espessuras finais que podem chegar a um centímetro (ORTLEPP, HUMPEL, CURBACH, 2006). Como o concreto utilizado entre as camadas de têxtil ajuda a proteger o material, não é necessário tanto cobrimento como seria para a proteção ao fogo ou a corrosão nos outros reforços, e, portanto dessa forma a seção como um todo acaba praticamente não aumentando.

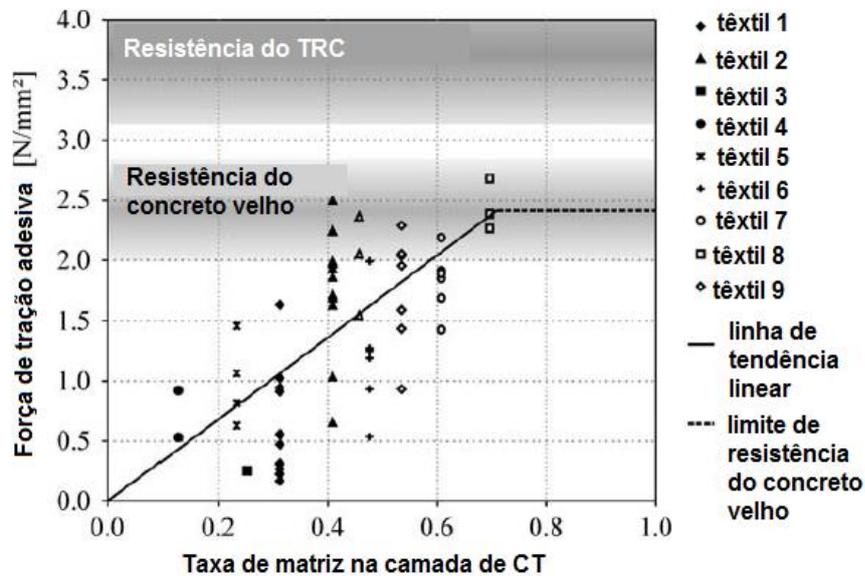
Além disso, também vem sendo testados concretos reforçados com fibras curtas, que seriam uma boa escolha quanto ao comportamento frente ao fogo, mas que não apresentam grande taxa de aumento de resistência, além de causarem diminuição da trabalhabilidade na hora da execução e não possibilitarem o controle da orientação das fibras. Já o CT, tem suas fibras orientadas de forma a se adaptar melhor às cargas que estão sendo aplicadas e às necessidades de projetos, aumentando a taxa de resistência. (SI LARBI, AGBOSSOU, HAMELIN, 2012).

Diversos fatores influenciam a eficiência do reforço de CT, como o número de camadas, a natureza do têxtil escolhido e as modificações na matriz cimentícia (PELED, BENTUR, MOBASHER, 2017). Alguns destes e outros fatores serão discutidos neste capítulo.

4.4.1 Abertura da Malha

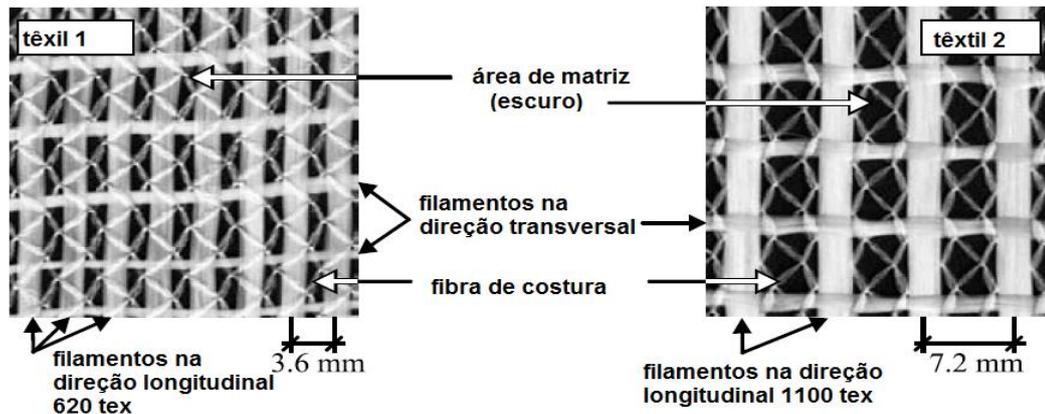
A distância entre as fibras do concreto têxtil tem grande influência na capacidade de carga da camada. Aberturas maiores entre fibras levam a uma maior área de matriz cimentícia. Como apenas a matriz é capaz de resistir aos esforços de descolamento do reforço, a taxa de área é crucial para o aumento da capacidade de carga do reforço (ORTLEPP et al, 2004). No gráfico 13 vemos que quanto maior a área de matriz no tecido, maior a resistência à tração adesiva. Um exemplo dos tecidos ensaiados encontra-se na figura 14.

Gráfico 13: Taxa de matriz por resistência a tração adesiva



Fonte: Ortlepp et al. (2004, p. 1487, tradução livre)

Figura 14: Tecidos ensaiados 1 e 2



Fonte: Ortlepp et al. (2004, p. 1487, tradução livre).

Os testes mostraram que a matriz carrega praticamente toda a tensão adesiva, já que o tecido praticamente não suporta tensão perpendicular ao seu plano. Isso se torna especialmente importante para a execução de reforço já que um dos modos de falha mais fáceis de ocorrer são devidos ao “*peeling-off*”.

Como dito por Ortlepp et al. (2004, p. 1487, tradução livre):

[...] têxteis com malhas e feixes comparativamente maiores, que cubram a área de matriz de concreto de agregados finos o menos possível, são especialmente adequadas. Se a resistência à tração adesiva na camada de têxtil é maior que a resistência do concreto

antigo, a falha não ocorre mais na camada de têxtil, porque a carga de ruptura da superfície de concreto antigo é atingida antes.

4.4.2 Execução e Preparação da Superfície

Para a execução do reforço de CT sobre o concreto antigo, podem ser utilizadas algumas formas de aplicação, sendo as mais simples execução de lâminas de matriz sobre os têxteis e a aplicação da matriz com concreto projetado. A influência destas duas formas de aplicação foi testada por Ortlepp (2007) e, apesar de haver algumas diferenças na questão de cura dos elementos durante seus testes, a aplicação do concreto em forma de lâminas trouxe resultados levemente mais satisfatórios. Isso ocorre porque a matriz provavelmente consegue ser melhor incorporada ao têxtil com esta forma de execução. Porém a diferença não foi tão grande e a escolha da forma de aplicação do material também dependerá do local onde o reforço será executado, a disponibilidade de maquinário e pessoal e o tempo de execução.

A preparação do substrato do concreto antigo também tem influência na resistência do reforço como um todo. Porém, mesmo pequenas profundidades de rugosidade já são suficientes para garantir que o concreto não rompa na interface dos materiais. Os testes realizados por Ortlepp (2007) mostram que profundidades de um milímetro já são suficientes, correspondendo a uma rugosidade que deixa os agregados do concreto antigo a mostra, removendo a nata de cimento. Isso pode ser atingido utilizando-se jateamento de areia, por exemplo.

Uma forma usual de tratamento de superfície e execução de reforço foi detalhada por D'Ambrisi e Focacci (2011). Foram realizadas diversas configurações de reforço de CT, melhor detalhadas no item 4.4.5, utilizando o seguinte procedimento de preparação e execução do reforço (tradução livre):

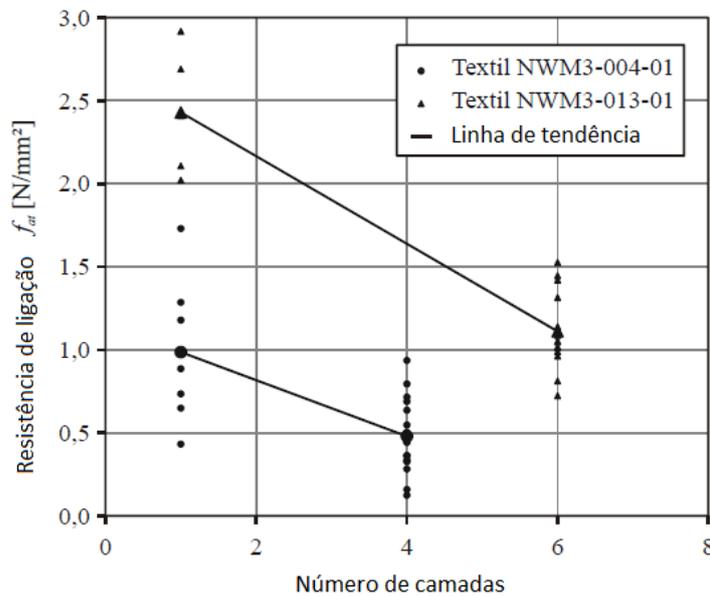
- Jato de areia seca na superfície do concreto;
- Umedecimento da superfície do concreto;
- Aplicação de uma camada de matriz cimentícia (espessura de 3-4mm);
- Aplicação de uma malha de têxtil dentro da matriz fresca; e
- Revestimento da superfície com uma segunda camada de matriz cimentícia (espessura de 3-4mm).

4.4.3 Número de Camadas de Reforço

De forma geral, a capacidade de carga do reforço aumenta com o aumento do número de camadas executadas, conforme poderá ser identificado através dos dados de distintos trabalhos já realizados e apresentados no capítulo 4.5. Entretanto, existe um limite para este aumento, bem como influência de alguns fatores que devem ser levados em conta na hora da execução.

Nos testes realizados por Ortlepp (2007), foram executados reforços com 4 e 6 camadas, com têxteis diferentes (gráfico 14). Como a falha sempre ocorre no ponto mais fraco, a camada com a menor tensão adesiva irá determinar a falha do sistema. Por isso, quanto mais camadas existirem no reforço maior será a chance de ocorrer esta falha.

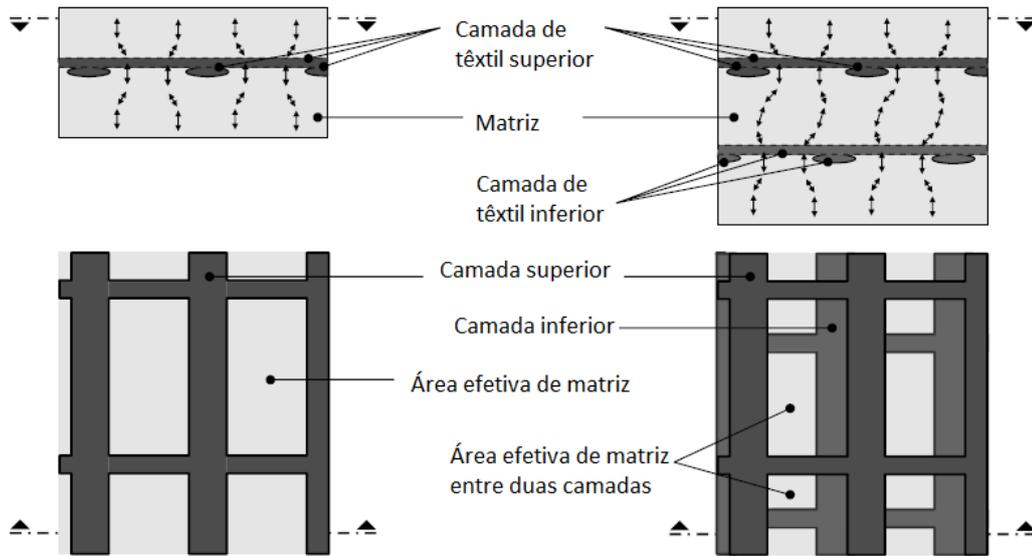
Gráfico 14: Influência do número de camadas



Fonte: Ortlepp (2007, p. 83, tradução livre)

Além disso, os filamentos de têxtil acabam não ficando sobrepostos uns aos outros durante a execução das camadas, conforme esquematizado na figura 15. Este fato faz com que a área efetiva de matriz diminua. A sobreposição dos têxteis também provoca uma deflexão no fluxo de força.

Figura 15: Redução da área efetiva da matriz durante a instalação de várias camadas têxteis e deflexão do fluxo de força e devido ao deslocamento



Fonte: Ortlepp (2007, p. 83, tradução livre).

É preciso que seja definida a melhor forma de execução e também o ponto onde o aumento de camadas não influencia mais na rigidez da peça e pode começar a trazer problemas para sua resistência. Para isso é necessário que ocorram maiores experimentações.

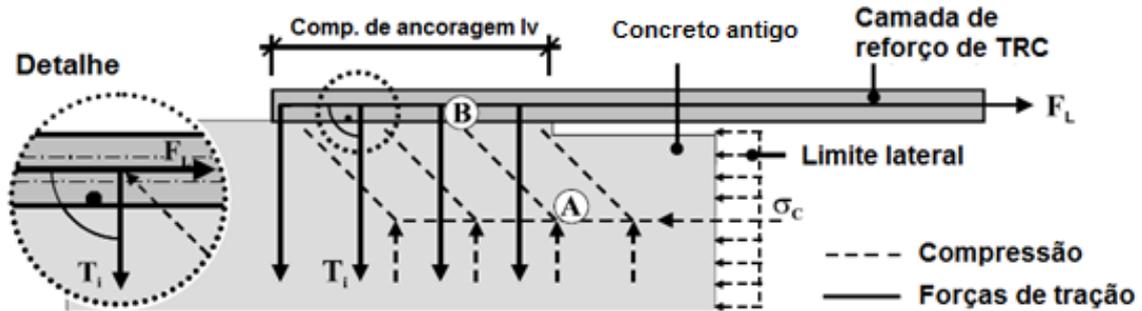
4.4.4 Interface

O Concreto têxtil é um compósito assim como o concreto armado. Desta forma quando o primeiro é utilizado para reforço do segundo, temos dois compósitos com características e comportamentos distintos que podem causar falhas tanto na interface dos materiais quanto em cada uma das partes.

Para o entendimento dos mecanismos de atuação das forças, especialmente na interface entre os materiais, Ortlepp utilizou o modelo de bielas e tirantes¹, que pode ser melhor analisado na figura 5.

¹ Do inglês: strut-and-tie

Figura 16: Modelo de atuação de força na interface dos materiais

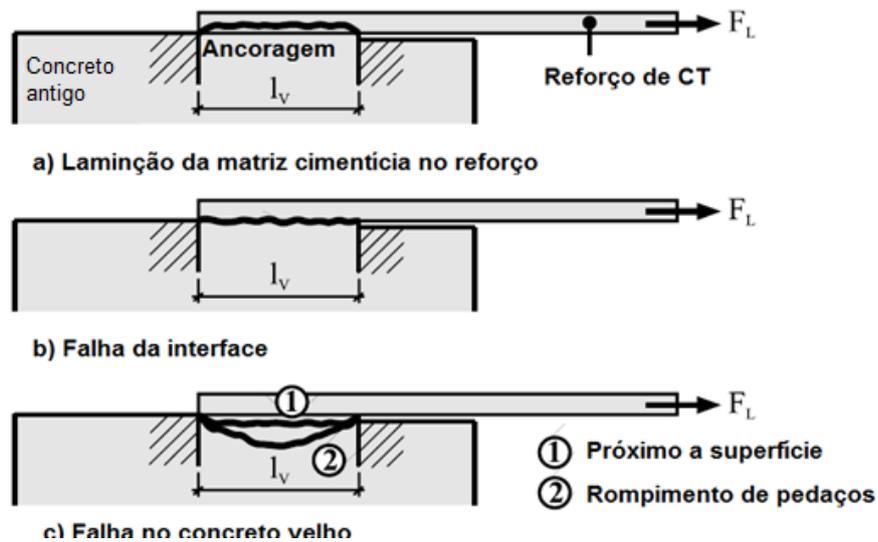


Fonte: Ortellepp et al. (2004, p. 1485, tradução livre).

Quando o CT está carregado por uma força FF_L que tem de ser transferida para o concreto antigo, uma reação de pressão correspondente atua no concreto, sendo direcionada para região da interface. Para que as forças fiquem equilibradas no ponto A, forças de reação de compressão são necessários perpendicularmente. O concreto antigo pode suportar isso sem maiores problemas. Porém é preciso que se garanta que o prolongamento das forças no ponto B também esteja equilibrado e para isso uma força de tração T_i é necessária. Essa força perpendicular tende a levantar a camada de reforço, sendo descolado do concreto antigo. Esse tipo de falha é chamado de “*peeling-off*”. Todas as suas camadas devem suportar totalmente essas forças de tração geradas, tendo resistência maior para que não ocorra o descolamento (ORTLEPP et al, 2004).

Existem basicamente três tipos de falha que podem ocorrer no reforço de concreto têxtil, conforme figura 17: a) laminação do reforço, b) falha na interface do reforço e c) ruptura do concreto antigo. Na opção da ruptura do concreto antigo podem ocorrer falhas apenas na região próxima à superfície ou desprendimento de pedaços com maior profundidade (ORTLEPP et al, 2004).

Figura 17: Modos de falha do reforço de CT

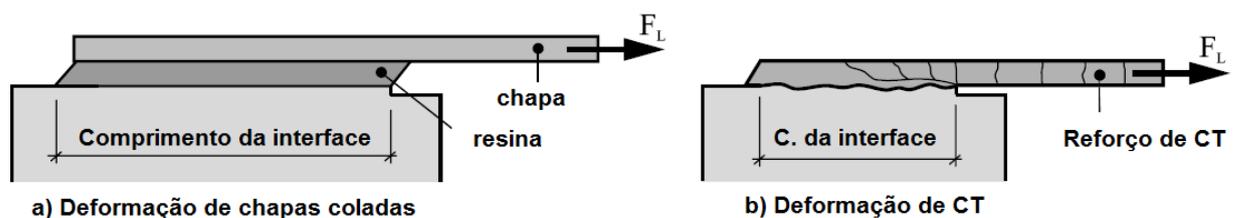


Fonte: Ortlepp (2004, p. 1486, tradução livre).

Ainda pode existir um quarto tipo de falha, que não diz respeito à interação entre concreto velho e CT, e sim apenas ao CT, quando o têxtil desliza na matriz, e ocorre especialmente quando os filamentos do têxtil são muito grossos ou tem tamanho inadequado (ORTLEPP, CURBACHT *apud* ORTLEPP, 2007).

Outro ponto a ser levado em consideração em relação à interface do reforço é a sua deformação. Os reforços mais comuns como chapa colada e fibra carbono utilizam resina e nesse sentido acabam tendo deformações lentas e contínuas que são consideradas lineares para fins de cálculo. O concreto têxtil apresenta um comportamento não-linear, pois durante sua deformação começa a apresentar fissuras que são descontínuas e não acontecem em intervalos regulares. A figura 18 trás um esquema desta comparação.

Figura 18: Comparação de deformação da interface CT e concreto antigo



Fonte: Ortlepp et al. (2004, p. 1491, tradução livre).

Raouf, Koutas e Bournas (2016) realizaram 80 ensaios nos moldes das figuras 17 e 18, onde o reforço, caracterizado neste caso como argamassa têxtil² foi realizado na parte superior de um prisma. O reforço era colado em cada uma das extremidades e descolado no centro. Uma das extremidades era fixa e a outra móvel, desta forma os corpos de prova foram ensaiados ao cisalhamento. Analisou-se o número de camadas, de 1 a 4, o comprimento de ancoragem, de 50 mm a 450 mm, a preparação da superfície do concreto, a resistência à compressão do concreto base, o revestimento do têxtil e a ancoragem através de envoltória transversal.

Os resultados encontrados por Raouf, Koutas e Bournas (2016), de suma relevância para qualquer tipo de pesquisa com concreto ou argamassa têxtil, foram os seguintes (tradução livre, p. 350):

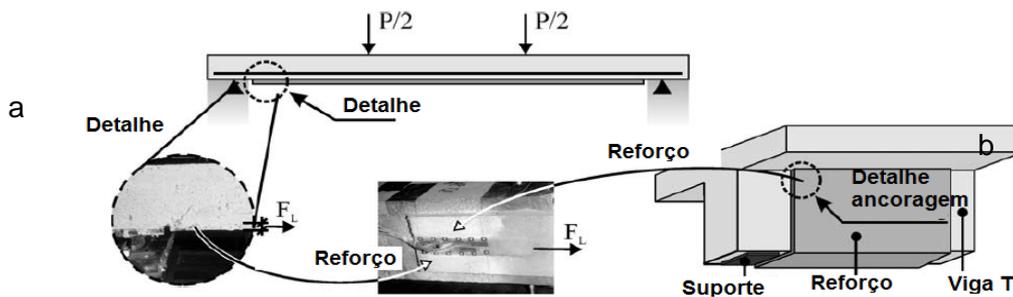
- a) Depois de um certo comprimento de ancoragem (entre 200mm e 300mm para qualquer número de camadas) a resistência da ligação aumenta marginalmente;
- b) Aumentando o número de camadas a capacidade de carga da ligação aumenta de forma desproporcional, enquanto o modo de falha é alterado;
- c) Jato de areia é equivalente a apicoamento nos termos de capacidade de carga da ligação e modo de falha;
- d) Resistência a compressão do concreto tem pouca influência na resistência da ligação;
- e) O uso de têxteis revestidos altera o modo de falha de e aumenta significativamente a capacidade de carga da ligação;
- f) Ancoragem através da envoltória aumenta substancialmente a capacidade carga última.

4.4.5 Ancoragem

Na prática, o reforço é sempre fixado à viga quando ela já se encontra inserida no sistema estrutural a qual faz parte. Desta forma, ele acaba terminando antes dos pilares que suportam a viga (Figura 19a). Para situação de vigas que precisam de reforço ao cisalhamento o problema é mais relevante, já que em situação de obra onde temos vigas “T”, o reforço não atinge a parte comprimida do elemento (Figura 19a). (CURBACH, ORTLEPP, 2006).

² Do inglês: Textile Reinforced Mortar - TRM

Figura 19: Detalhe de viga e pontos fracos de reforço

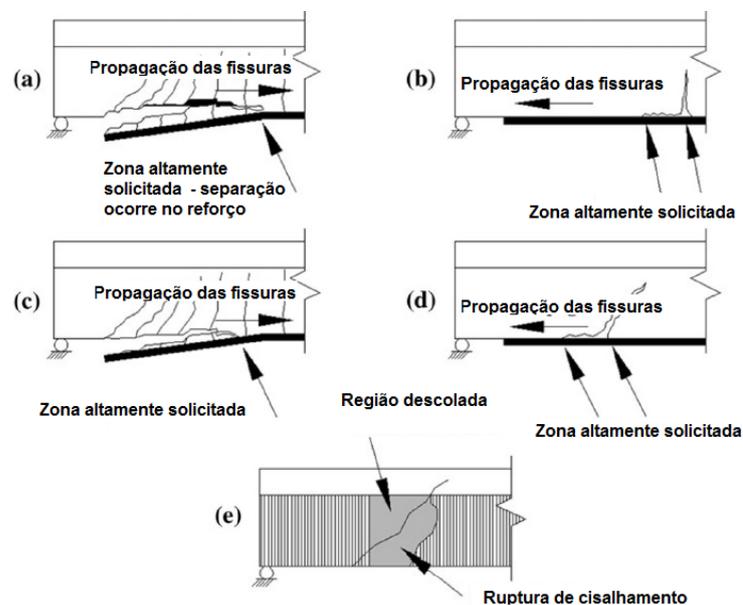


Fonte: Curbach; Ortlepp (2006, p. 221, tradução livre).

É necessário que haja uma ancoragem mínima, pois de outra forma apenas parte do carregamento é ancorado à superfície e assim os elementos romperão na interface entre o concreto antigo e o reforço. (ORTLEPP et al., 2004).

As formas de ancoragem de CT ainda não são bem definidas, mas é possível considerar semelhanças com, por exemplo, polímeros reforçados com fibra³ colados externamente às vigas. As ancoragens geralmente tem o sentido de prevenir que ocorram as falhas descritas na figura 20, diminuindo ou atrasando a abertura de fissuras, aumentando a transferência de tensão de cisalhamento na interface ou fornecendo um mecanismo de transferência de cargas onde não existe comprimento de ancoragem além da seção crítica (GRELLE, SNEED, 2013).

Figura 20: Modos de falha do FRP

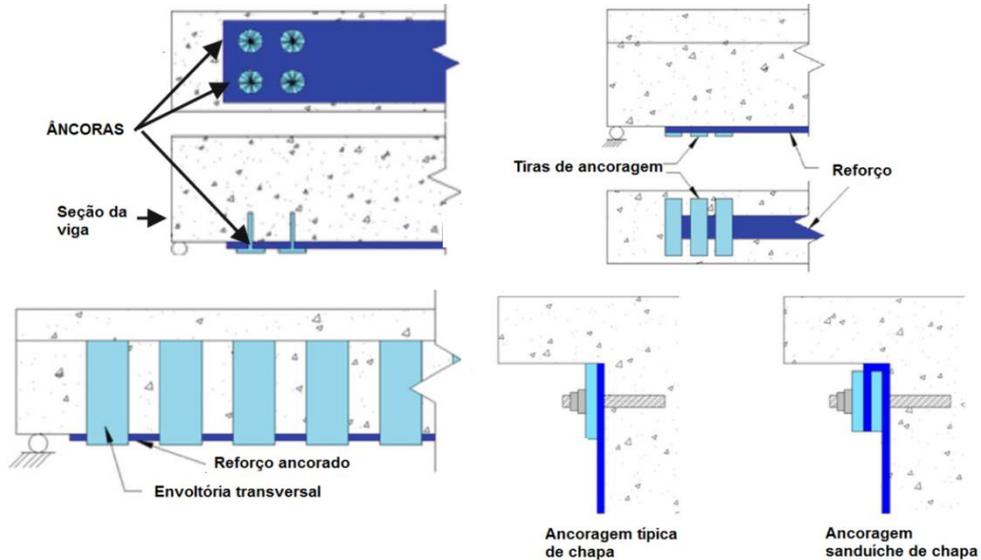


Fonte: Teng et al. (2002 *apud* Grelle, Sneed, 2013, p.18, tradução livre).

³ Do inglês: fiber reinforced polymer (FRP)

Algumas formas já estudadas foram apresentadas por Grelle e Sneed (2013) em uma revisão de sistemas de ancoragem. A figura 21 demonstra alguns modelos que poderiam ser facilmente adaptados ao CT.

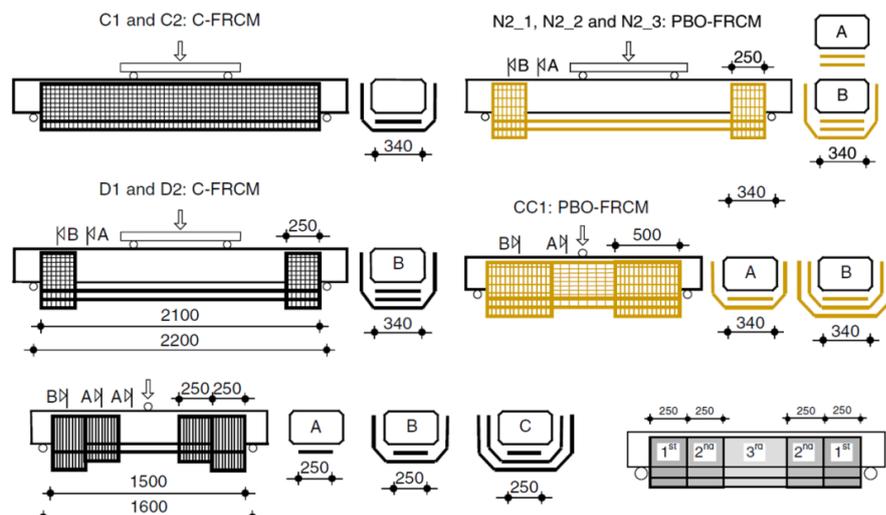
Figura 21: Modelos de ancoragem



Fonte: Adaptado de Grelle, Sneed (2013, tradução livre).

D'Ambrisi e Focacci (2011) realizaram diversos modelos de reforço de CT através da envoltória transversal, considerando a forma U em toda a seção, apenas nas extremidades, como mais de uma camada, entre outros. Alguns dos modelos são exemplificados na figura 22.

Figura 22: Modelos de ancoragem – envoltória transversal



Fonte: Adaptado de D'Ambrisi, Focacci (2011, tradução livre).

Neste estudo, a capacidade de carga aumentou conforme o aumento de número de camadas. As configurações com ancoragem obtiveram melhores resultados do que as possuíam reforço apenas na face inferior. A configuração C1 e C2, onde há envolvimento de toda a lateral da viga trouxe resultados semelhantes de carga máxima (média 196,3 kN) a configuração D1 e D2 (média 196,62 kN), ambos proporcionando um aumento de carga de aproximadamente 18% em relação a viga testemunho. As configuração N2_1, N2_2 e N2_3 obtiveram média de 253,24 kN, proporcionando aumento de 28%.

4.5 COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO REFORÇADAS COM CT – ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Neste item serão descritos os ensaios de reforço realizados disponíveis na literatura, caracterizando todos os materiais e configurações utilizados e apresentado seus resultados de aumento de capacidade de resistência. Essa seção tem o objetivo de esclarecer como são realizados os ensaios de vigas reforçadas com CT, sua execução, as configurações de materiais e os parâmetros utilizados, os quais constituem a base para os ensaios realizados neste trabalho.

Outro ensaio interessante além dos descritos é “Capacidade de carga à flexão de lajes de concreto armado reforçadas com CT”⁴, efetuado na Universidade de Dresden, na Alemanha, por Schladitz, Frenzel, Ehlig e Curbach, em 2012. As lajes não são necessariamente o objetivo de estudo do presente trabalho, porém a matriz, forma de ensaio e têxteis utilizados são importantes referências experimentais. Nele, a execução de 4 camadas de têxtil proporcionou um aumento de carga de 345% em relação a laje testemunho.

4.5.1 Experimento de Si Larbi, Agbossou e Hamelin

Este estudo foi realizado na França por Si Larbi, Agbossou e Hamelin, em 2012, com nome de Investigações experimentais e numéricas sobre CT e soluções híbridas para reparar e/ou reforçar vigas de concreto armado⁵. O interesse por este

⁴ Do inglês: Bending load capacity of reinforced concrete slabs strengthened with textile reinforced concrete

⁵ Do inglês: Experimental and numerical investigations about textile-reinforced concrete and hybrid solutions for repairing and/or strengthening reinforced concrete beams

estudo se dá pelo uso de Concreto Têxtil como reforço, e não o emprego de têxteis híbridas, no escopo deste trabalho. Cabe ressaltar que a terminologia empregada pelos autores para o material de reforço é TRC, apesar de a matriz ser uma argamassa, confirmando que a nomenclatura utilizada para os materiais ainda não é consenso entre os pesquisadores.

A argamassa utilizada Emaco R315 da BASF tem tamanho máximo de agregado de 0,8 mm e é uma argamassa de reparo tixotrópica. O têxtil utilizado possui abertura de 3x5mm, sendo a direção da carga feita de fibra de vidro álcali-resistente e a direção contrária de poliéster, tendo finura de 25000 tex e resistência de 1102 MPa. Um polímero de látex foi utilizado como revestimento para as fibras antes da aplicação da argamassa para que esta ficasse mais bem impregnada. Os materiais foram submetidos a ensaio de tração para o conhecimento de suas propriedades.

A viga utilizada para ensaio tem 25 centímetros de altura e 15 de largura na sua seção, com 2,3 metros de comprimento sendo vão livre entre apoios de 2 metros. Na armadura foram utilizados 28 estribos de diâmetro de 6 milímetros, 2 barras de aço de 8 mm na parte superior e 2 barras de 12 mm na inferior. O ensaio foi o de flexão a quatro pontos e as cargas foram aplicadas praticamente nos terços médios da viga figura 23, com velocidade de carregamento de 1 kN/minuto.

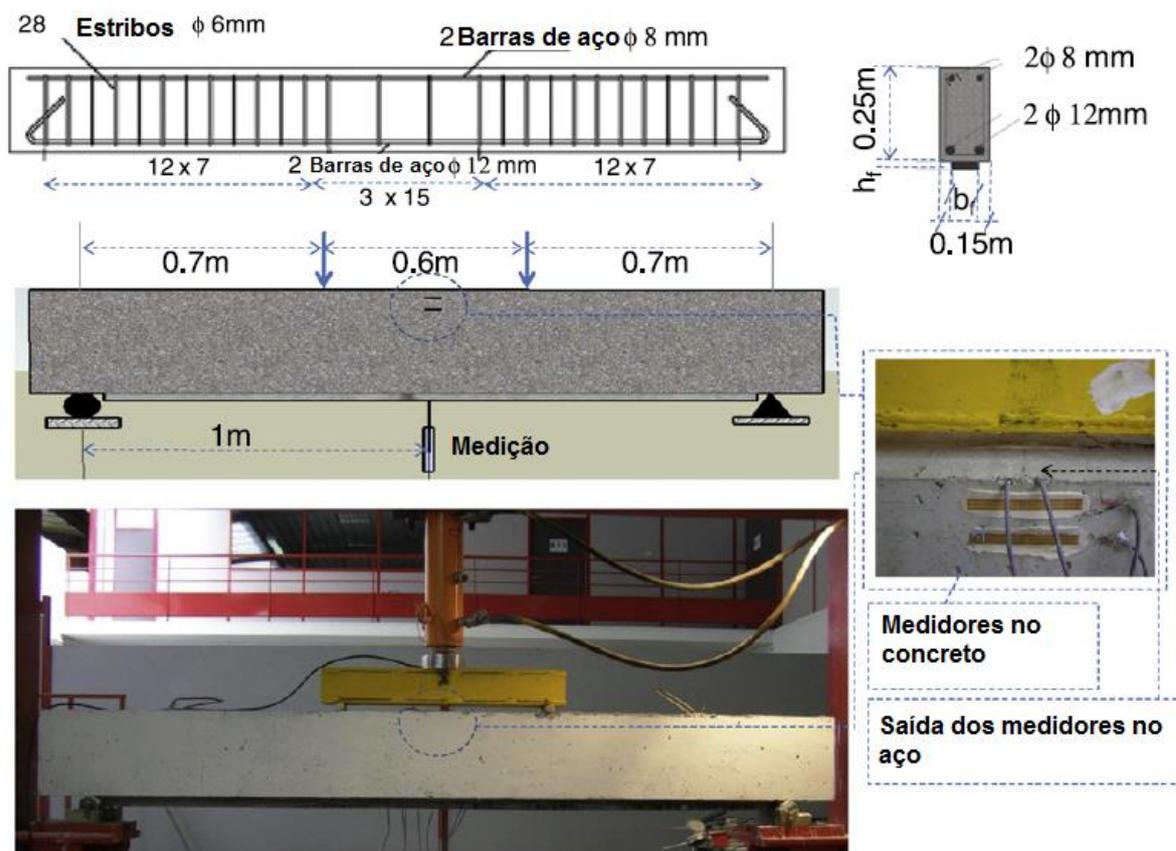
O reforço utilizado tem tamanho de 150 cm por 10 cm e foi colocado com três camadas de têxtil. Os resultados da tabela 4 mostram que houve um aumento de capacidade de carga com a colocação de reforço de CT.

Tabela 4: Resultados configuração 1

	Carga de serviço experimental (kN)	Carga de ruptura experimental (kN)	Carga de ruptura teórica (kN)	Aumento na carga de ruptura experimental (%)	Deflexão de ruptura experimental (mm)
Reference beam	60.03	77.03	76.5	-	46.14
TRC	69.08	98.58	91.5	28.1	24.57

Fonte: Adaptado de Si Larbi, Agbossou, Hamelin (2013, p. 156, tradução livre).

Figura 23: Viga e ensaio configuração 1



Fonte: Si Larbi, Agbossou, Hamelin (2013, p. 155, tradução livre).

4.5.2 Experimento de Elsanadedy, Almusallam, Alsayed e Al-Salloum

Este estudo foi realizado na Arábia Saudita, por Elsanadedy, Almusallam, Alsayed e Al-Salloum em 2013, com o nome de Reforço à flexão de vigas de concreto armado utilizando argamassa reforçada com têxtil – Estudo experimental e numérico⁶. Novamente apesar de se tratar de argamassa na nomenclatura, o tamanho máximo de agregado utilizado foi 5mm, sendo bem maior que outros experimentos cuja nomenclatura é concreto têxtil.

Foi utilizada uma matriz cimentícia de reparação, uma delas com cimento modificado por polímeros, atingindo 56,4 MPa, e outra comum, atingindo 23,9 MPa. A viga utilizada para ensaio tem 20 centímetros de altura e 15 de largura na sua seção, com 2,2 metros de comprimento sendo vão livre entre apoios de 2 metros. Na armadura foram utilizados estribos de diâmetro de 6 milímetros a cada 7,5

⁶ Do inglês: Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar – Experimental and numerical study

centímetros, 2 barras de aço de 10 mm na parte superior e inferior, conforme figura 24. O ensaio foi de flexão a quatro pontos e as cargas foram aplicadas a 80 centímetros dos apoios da viga. O concreto tem f_{ck} de 20MPa e as vigas testemunhos receberam menos armadura para que o uso do reforço ficasse em evidência.

O têxtil utilizado é de basalto, tem abertura de 25 milímetros e tensão de tração de 623 Mpa. Foram executadas camadas de 2 milímetros de argamassa, aplicadas com espátula de metal. O têxtil foi então pressionado ligeiramente na argamassa até que esta penetrasse nos vazios do tecido. A segunda camada de argamassa foi então aplicada para cobrir completamente o tecido e o procedimento foi repetido para cada camada de argamassa têxtil, antes que a anterior secasse.

Foi utilizado uma camada de tecido no formato de U (figura 24) que envolvia parte de seção da viga, para ancoragem do reforço logitudinal. A viga 1 foi a testemunho, a 2 e a 4 possuíram 10 camadas de reforço e a 3, 5 camadas. Nas vigas 3 e 4 foi empregada matriz modificada por polímero. O reforço tinha largura de 40 centímetros e comprimento de 1,85 metros. O ensaio também contava com uma viga reforçada com fibra carbono para comparação, que não será mencionada.

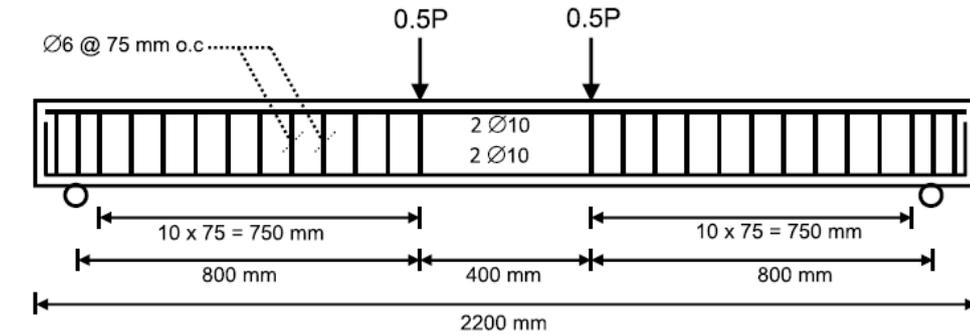
Tabela 5: Resultados da configuração 2

Identificação viga	Carga última (P_u) (kN)			Modo de falha	
	EXP	FEM	EXP/FEM	EXP	FEM
BF-1(1)	43.22	39.70	1.09	CC	CC
BF-1(2)	42.28	39.70	1.06	CC	CC
BF-2	77.63	77.97	1.00	DB	DB
BF-3	59.46	61.97	0.96	FR	FR
BF-4	81.75	84.59	0.97	FR	FR

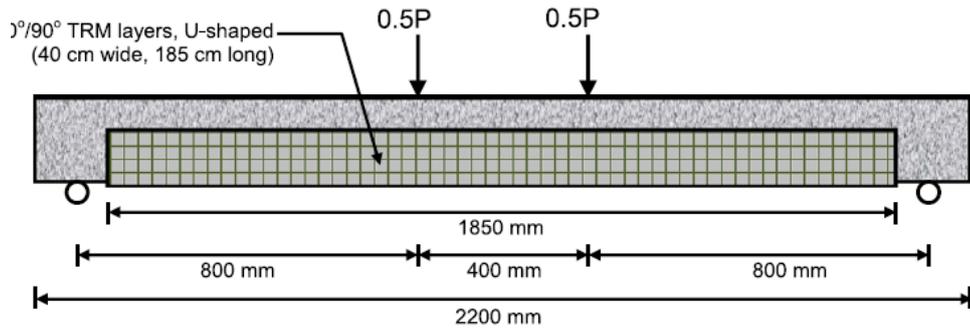
CC: Ruptura do concreto FR: Ruptura do têxtil DB: Descolamento do reforço

Fonte: Adaptado de Elsanadedy et al. (2012, p. 44, tradução livre).

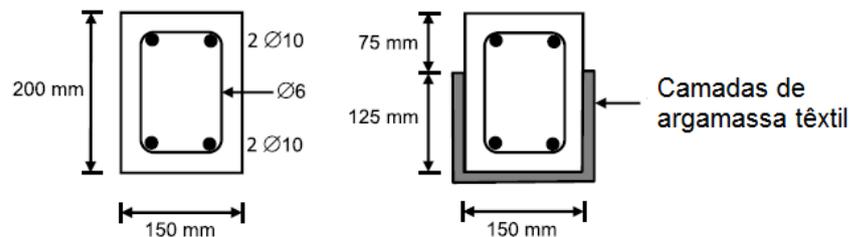
Figura 24: Viga da configuração 2



(a) Viga testemunho BF-1



(b) Reforço de argamassa têxtil vigas BF-2, BF-3 e BF-4

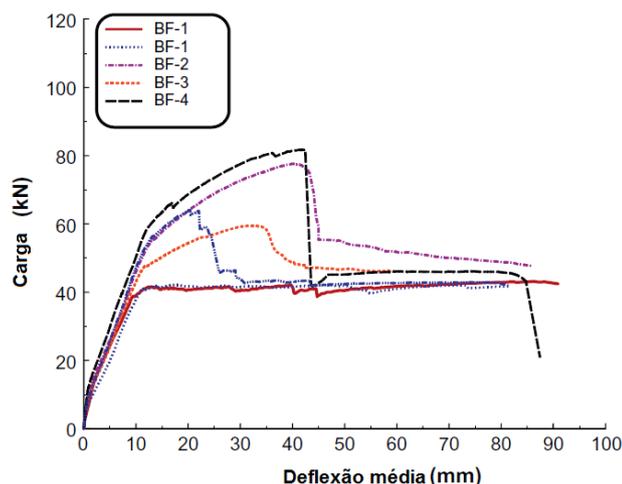


(d) Seção viga BF-1 (e) Seção vigas BF-2, BF-3 e BF-4

Fonte: Adaptado de Elsanadedy et al. (2012, p. 41, tradução livre).

A análise compara os resultados experimentais obtidos (EXP) com a análise através de elementos finitos, conforme tabela 5. As vigas 2 e 4 possuem maior número de camadas e obtiveram os melhores resultados. As curvas de carga por deflexão podem ser observadas gráfico 15.

Gráfico 15: Resultados de deslocamento configuração 2



Fonte: Adaptado de Elsanadedy et al. (2012, p. 45, tradução livre).

4.5.3 Experimento de Truong, Bui, Limam, Si Larbi, Le Nguyen e Michel

Este estudo foi realizado na França por Truong, Bui, Limam, Si Larbi, Le Nguyen e Michel, em 2017, com nome de Investigações experimentais de vigas de concreto armado reparadas/reforçadas com compósitos CT⁷. O estudo foi desenvolvido para reforço de tanques de água, mas utilizou vigas de 1 metro de comprimento com seção de 25 centímetros de largura por 10 centímetros de altura, sendo ensaiadas à flexão pelo ensaio de quatro pontos.

A matriz utilizada foi escolhida para se adaptar a situação de tanque, onde a possibilidade de situações e trechos molhados e secos, prevenindo a formação de mofo e possuindo menos chance de fissura à retração. Nesse sentido foi escolhido cimento aluminato de cálcio⁸ e tamanho máximo de agregado de 300 micrômetros.

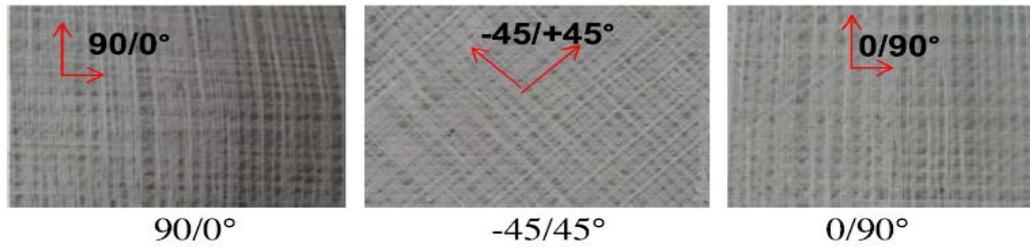
O tecido escolhido é a fibra de vidro⁹ bidirecional, possui resistência à tração entre 1100–1550 MPa, abertura de 3 milímetros por 3, finura de 300 tex. Foi disposto em três camadas, sendo uma posicionada a 90°, outro a 45° e outra novamente a 90°, para prevenir fissuras, conforme figura 25. O reforço ocupa toda área inferior da viga até os apoios.

⁷ Do inglês: Experimental investigations of reinforced concrete beams repaired/reinforced by TRC composites

⁸ Do inglês: calcium aluminate cement

⁹ Do inglês: E-glass

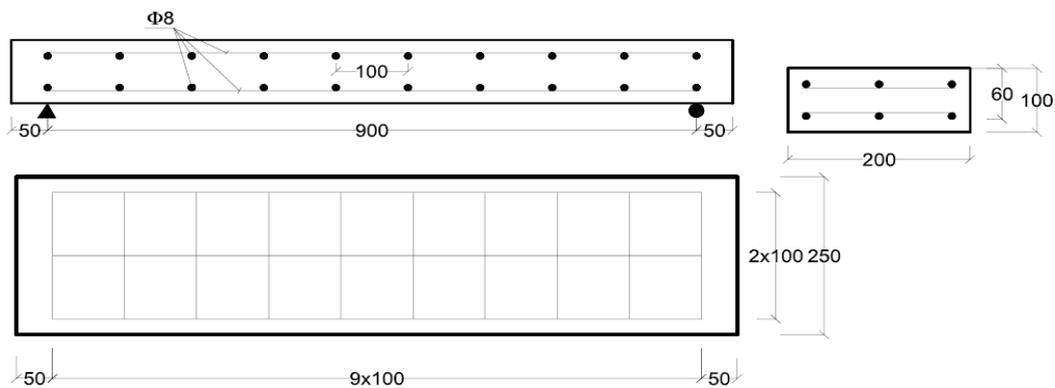
Figura 25: Tecido configuração 2



Fonte: Truong et al. (2017, p. 828).

Para as vigas, foi utilizado concreto de resistência à compressão média de 57,43 MPa. O aço utilizado consiste em uma malha de diâmetro de 8 milímetros e espaçamento de 10 centímetros nas duas direções, como mostra a figura 26.

Figura 26: Viga configuração 3



Fonte: Truong et al. (2017, p. 830).

Os resultados apresentam aumento de carga em relação à viga testemunho conforme apresentado na tabela 6, sendo a configuração “A” mantida em ar aberto e “W” mantida submersa. A capacidade de carga aumentou em torno de 20% nas duas situações.

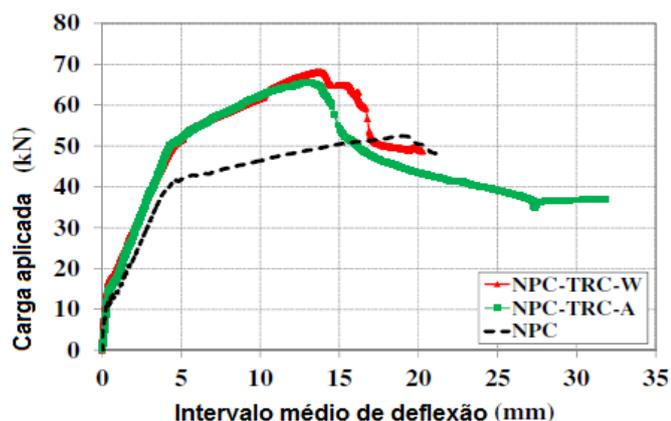
Tabela 6: Resultados configuração 3

Viga	Carga na 1ª fissura (kN)	Aumento de carga na 1ª fissura (%)	Carga de ruptura (kN)	Aumento da carga de ruptura (kN)
NPC	10.62	-	53.66	-
NPC-TRC-W	17.56	65.35	66.06	23.11
NPC-TRC-A	14.19	36.62	63.42	18.18

Fonte: Adaptado de Truong et al. (2017, p. 834, tradução livre).

A rigidez das vigas também aumenta como mostra o gráfico 16.

Gráfico 16: Resultados de deslocamento configuração 3



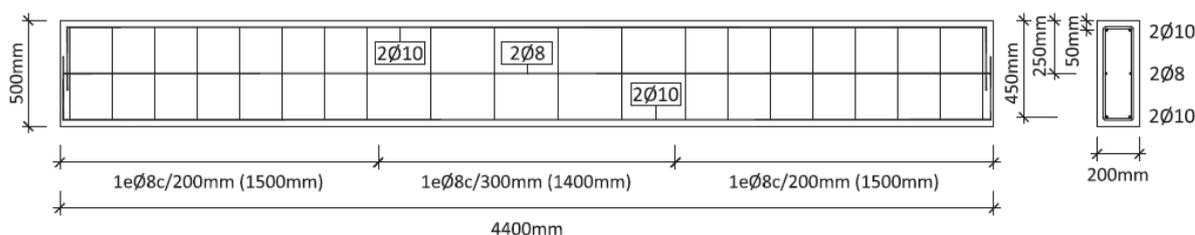
Fonte: Truong et al. (2017, p. 835, tradução livre).

4.5.4 Experimento de Escrig, Gil e Bernat-Maso

Experimento realizado na Espanha por Escrig, Gil e Bernat-Maso em 2017, chamado Comparação experimental de vigas de concreto armado reforçadas à flexão com diferentes tipos de materiais compósitos de matrizes cimentícias¹⁰. Percebe-se que foi usada nomenclatura diferente, de compósitos cimentícios, porém trata-se do mesmo material.

Foram realizadas 11 vigas, de comprimento 4,4m e seção 50cm por 20cm, executadas com menos armadura para simular um erro de projeto, conforme figura 27. As vigas foram curadas a temperatura ambiente por 30 dias. O f_{ck} do concreto foi em médio 48MPa.

Figura 27: Viga configuração 4



Fonte: Escrig, Gil, Bernat-Maso (2017, p. 318).

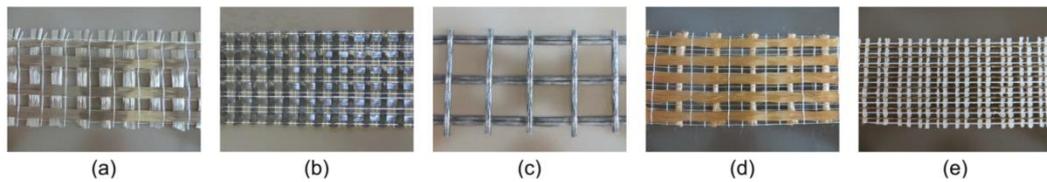
Para matriz, foram utilizadas quatro argamassas prontas: 1) PHDM, argamassa bicomponente com cimento de alta resistência, fibras de vidro,

¹⁰ Do inglês: Experimental comparison of reinforced concrete beams strengthened against bending with different types of cementitious-matrix composite materials

agregados selecionados e polímeros sintéticos em dispersão aquosa ($f_{c \text{ arg}} = 35,40$ MPa); 2) R3, argamassa hidráulica modificada com adições poliméricas destinadas à reparação estrutural ($f_{c \text{ arg}} = 24,65$ MPa); 3) XM25, argamassa pozolânica hidráulica contendo aditivos compatíveis com estruturas de alvenaria ($f_{c \text{ arg}} = 24,95$ MPa) e 4) XM750, argamassa hidráulica com fibras e aditivos especiais projetados especificamente para aplicação em concreto ($f_{c \text{ arg}} = 30,02$ MPa).

Foram utilizados 5 têxteis, apresentados na figura 28, a) basalto, b) carbono, c) vidro, d) PBO¹¹ e e) aço. Sua propriedades são apresentadas na tabela 7 e as configurações utilizadas entre matriz e têxtil na tabela 8.

Figura 28: Tecido configuração 4



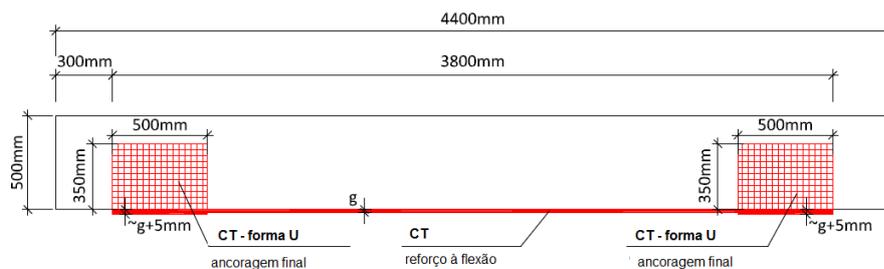
Fonte: Escrig, Gil, Bernat-Maso (2017, p. 319).

Tabela 7: Propriedades do têxtil configuração 4

Tipo de fibra			Basalto	Carbono	Vidro	PBO	Aço
Nomenclatura			B	C	G	P	S
Fibras	Orientação da fibra		Bi	Bi	Bi	Uni	Uni
	Tensão de tração última	f_{fib} [MPa]	3080	4320	2610	5800	3200
	Módulo de Young	E_{fib} [GPa]	95	240	90	270	206
	Deformação última	ϵ_{fib} [%]	3.15	1.80	2.90	2.15	1.55
Malha	Peso	w (g/m ²)	200	168	225	88	600
	Abertura	w_m (mm)	5.0	4.0	3.0	5.0	0.9
	Espessura equivalente	t_{ex} (mm)	0.0530	0.0470	0.0420	0.0455	0.0750

Fonte: Adaptado de Escrig, Gil, Bernat-Maso (2017, p. 319, tradução livre).

Figura 29: Reforço configuração 4



Fonte: Escrig, Gil, Bernat-Maso (2017, p. 320, tradução livre).

¹¹ Do inglês: polypara-phenylene benzobisoxazole

Tabela 8: Combinações de matriz e têxtil configuração 4

Viga	Têxtil	Matriz
<i>M-CONTROL</i>	–	–
<i>M-BR3-01</i>	Basalt	R3
<i>M-BR3-02</i>	Basalt	R3
<i>M-CXM25-01</i>	Carbon	XM25
<i>M-CXM25-02</i>	Carbon	XM25
<i>M-GPHDM-01</i>	Glass	PHDM
<i>M-GPHDM-02</i>	Glass	PHDM
<i>M-PXM750-01</i>	PBO	XM750
<i>M-PXM750-02</i>	PBO	XM750
<i>M-SR3-01</i>	Steel	R3
<i>M-SR3-02</i>	Steel	R3

Fonte: Adaptado de Escrig, Gil, Bernat-Maso (2017, p. 320, tradução livre).

Todas as vigas foram executadas com ancoragem conforme figura 29. Foi realizado apenas uma camada de reforço após preparada a superfície. O ensaio realizado foi flexão a quatro pontos, com velocidade de deformação controlada a 1 mm/min até abertura de fissuras e após 5 mm/min até o rompimento.

Os aspectos analisados foram: Capacidade de flexão promovida pelo CT, ductilidade, rigidez à flexão e processo de fissuração. Na tabela 9 vemos os resultados de momento último, momento de serviço, momento do aparecimento da primeira fissura, deformação no momento último e deformação de serviço.

Tabela 9: Resultados configuração 4

Specimen	$M_{u,exp}$ (kNm)	$M_{y,exp}$ (kNm)	$M_{\sigma,exp}$ (kNm)	$\delta_{u,exp}$ (mm)	$\delta_{y,exp}$ (mm)	g (mm)
<i>M-CONTROL</i>	67.89	48.66	30.02	135.08	10.05	–
<i>M-BR3-01</i>	77.72	59.32	43.28	122.99	14.43	8.40
<i>M-BR3-02</i> (*)	72.37	57.92	–	118.56	15.76	6.10
<i>M-CXM25-01</i> (*)	70.28	59.26	–	117.78	16.36	7.50
<i>M-CXM25-02</i>	72.96	60.98	33.13	123.10	16.23	6.00
<i>M-GPHDM-01</i>	74.55	57.79	46.64	145.63	13.27	6.50
<i>M-GPHDM-02</i>	70.16	58.29	41.50	110.72	15.81	9.30
<i>M-PXM750-01</i>	64.54	64.24	35.86	69.74	21.92	9.10
<i>M-PXM750-02</i> (*)	67.98	62.87	–	50.95	18.85	6.90
<i>M-SR3-01</i>	80.43	70.56	42.33	46.52	24.58	5.30
<i>M-SR3-02</i> (*)	83.77	68.73	–	46.43	21.07	7.20

Fonte: Adaptado de Escrig, Gil, Bernat-Maso (2017, p. 322, tradução livre).

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente trabalho visa analisar o comportamento de vigas reforçadas com CT em relação a formas de falha, aumento de capacidade de carga e deformações, em diferentes configurações. Visa também analisar, comparativamente, o aumento da capacidade de carga do reforço de concreto têxtil em relação a outros reforços já utilizados no mercado, para verificar se o mesmo constitui uma alternativa viável. Como as instalações do LEME da UFRGS serão utilizadas para experimentação, decidiu-se seguir a metodologia já utilizada para os outros reforços para que as análises sejam mais consistentes e as comparações tenham maior embasamento.

Além de trabalhos de mestrado e doutorado e pesquisas do próprio laboratório apresentadas em seminários relacionados a esse tema, a disciplina de Patologia e Instrumentação das Construções vem sendo ministrada há vários anos na graduação. Em todos os semestres, são executadas vigas com materiais e geometrias semelhantes, os quais são reforçados e ensaiados à flexão conforme descrito no terceiro capítulo. Desta forma, por ser um método já bem definido e amplamente testado, será também utilizado para esta pesquisa conforme descrito nos próximos itens. Além disso, são levados em conta parâmetros importantes baseados em pesquisas realizadas em outros países.

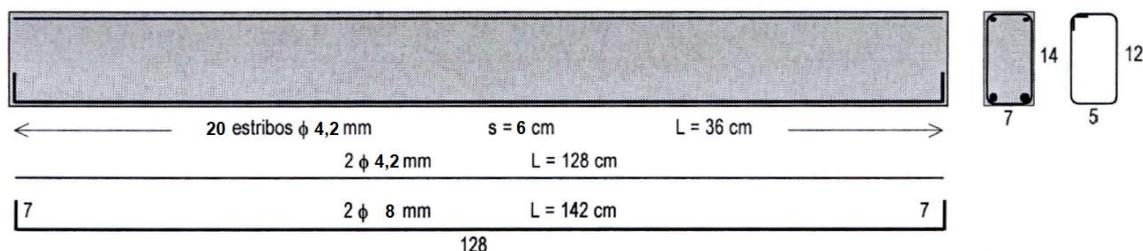
5.1 MATERIAIS

Neste capítulo serão feitas considerações sobre cada passo do ensaio, explicando porque certas decisões na escolha de materiais e dimensões de corpos de prova foram adotadas.

5.1.1 Dimensões da viga e armadura

As vigas executadas seguirão o detalhamento apresentado na seção 3.4, e terão 130 cm de comprimento, com seção de 7 cm de base e altura de 14 cm.

Figura 30: Detalhe da viga testemunho e vigas a serem reforçadas



Fonte: Adaptado de Campagnolo, Dal Molin e Silva Filho (2003).

É importante ressaltar que a dimensão de viga escolhida será utilizada a título de comparação com os experimentos já realizados ao longo dos anos no LEME. Ela foi escolhida para que fosse metade de uma viga comum utilizada em obra, de dimensões 15x30cm, e dessa forma não tivesse peso elevado para transporte durante as aulas da disciplina. Porém este tamanho pequeno não representa tão bem a realidade, e pode trazer divergências quanto à representatividade do reforço, por exemplo.

Para armadura de aço foram utilizados 20 estribos de 12 cm de altura por 5 cm de base, com espaçamento de 6 cm ao longo do comprimento da viga. O aço utilizado foi CA60, diâmetro de 4,2 mm.

Para armadura longitudinal tracionada foram utilizadas duas barras de aço CA50, diâmetro de 8 mm, dispostas em cada canto inferior da viga. Foi utilizada armadura de montagem nos cantos superiores da viga, do mesmo material utilizado nos estribos com diâmetro 4,2 mm. Foi utilizado arame recozido w18 para amarração dos estribos nas barras longitudinais, através de alicate de corte, conforme figura 31.

Figura 31: Montagem das armaduras



Fonte: Elaborado pela autora

5.1.2 Concreto e traço

O traço do concreto escolhido para concretagem das vigas foi de 1:3:4, considerando a tabela 1 do item 3.4. Houve muita variação de traço durante os anos de aplicação do ensaio, por isso um deles teve de ser escolhido para aplicação neste trabalho. Deve ser levado em consideração que o dado mais importante diz respeito à carga máxima de rompimento da viga testemunho, que não teve grandes variações conforme tabela 3.

Os agregados utilizados foram areia média e brita 1, ambos secos a temperatura ambiente. A concretagem foi feita utilizando betoneira de 400 litros. As armaduras já montadas foram apoiadas com espaçadores em fôrmas de madeira de compensado resinado, previamente preparadas com desmoldante, conforme figura 32.

Figura 32: Preparação das fôrmas



Fonte: Elaborado pela autora

A relação água/cimento poderia variar entre 0,5 e 0,65 conforme ensaios anteriores, e durante a concretagem, através da avaliação da trabalhabilidade, optou-se pela relação a/c igual a 0,6. O slump obtido nesta configuração foi de 7 cm na primeira concretagem e 6,5 cm na segunda. Estes valores concordam com ensaios anteriores, onde o slump foi adotado como 8+-2cm. A figura 33 mostra o ensaio sendo realizado. O ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone foi feito segundo determinações da NBR NM 67 de 1998.

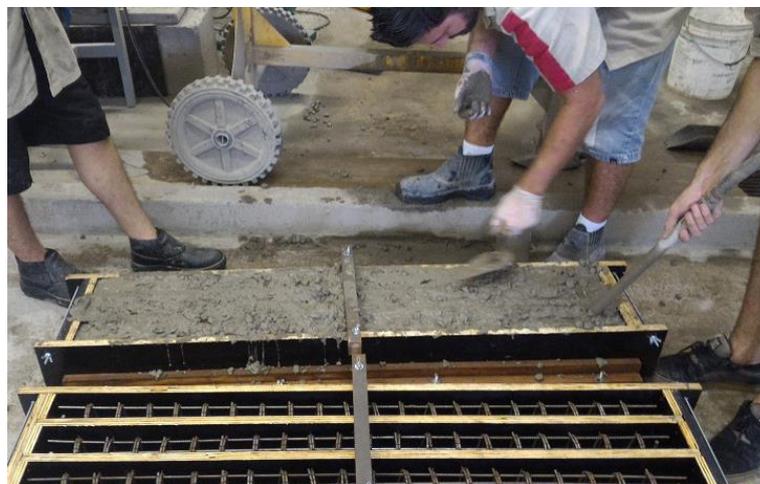
Figura 33: Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone



Fonte: Elaborado pela autora

As concretagens foram realizadas em duas etapas (dias 2 de abril de 2018 e 9 de abril de 2018), sendo moldadas seis vigas em cada uma delas (Figura 34). Foi utilizado vibrador para assentar o concreto na fôrma e diminuir possíveis vazios.

Figura 34: Concretagem



Fonte: Elaborado pela autora

Foram produzidos doze corpos de prova (CP) cilíndricos de 10 cm por 20 cm no total, rompidos a compressão conforme NBR 5739 de 2007 através de prensa

conforme figura 35. Para cada uma das concretagens são 2 CPs aos 7 dias, 2 CPs aos 28 dias e 2 CPs no dia do rompimento das vigas, que foi em 56 dias.

Figura 35: Rompimento do CP de concreto



Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados das médias dos valores de f_{cj} encontrados estão na tabela 10.

Tabela 10: Resultados do f_{cj} do concreto (MPa)

Concretagem	7 dias	28 dias	60 dias
1	32,03	38,07	37,09
2	28,29	32,55	35,42

Fonte: Elaborado pela autora

5.1.3 Matriz do reforço

A matriz utilizada para o reforço tem agregado máximo de 1,2 mm, pois esta é a peneira disponível no laboratório que possui tamanho de agregado mais semelhante aos experimentos disponíveis na literatura.

O traço utilizado foi adaptado daquele já amplamente conhecido e empregado no LEME para reforço do tipo armadura incorporada com argamassa. Ele possui adição de sílica ativa, que tem influência na durabilidade do reforço (SCHULER, 1998). O traço original é 1:3 com 10% de adição de sílica ativa, com relação água/agregado de 0,5, utilizando areia média. A resistência esperada aos 7 dias é de 35MPa em média.

Foram efetuados alguns testes iniciais com a matriz especialmente focados na trabalhabilidade. Para isso foram produzidas pequenas vigas para aplicação das argamassas testadas e verificadas as trabalhabilidades com o auxílio da mesa de abatimento. Os testes apontaram índices de consistência entre 24,7 cm e 27,9 cm. A trabalhabilidade e aparência final da argamassa com índices de consistência mais próximos de 27 cm foi melhor em comparação aos outros.

Considerando os resultados obtidos, o traço com comportamento mais próximo ao esperado, com boa consistência para que a argamassa tenha aderência na viga porém ao mesmo tempo suficientemente líquida para que as camadas de espessuras finas possam ter bom acabamento, foi de 1:2 com 10% de adição de sílica ativa e relação água/aglomerante de 0,5. A adição de sílica à matriz, além de manter um traço já comumente empregado no LEME, traz benefícios, como durabilidade, conforme mencionado no item 3.2. Em conjunto com o têxtil de fibra de vidro utilizado, a argamassa com sílica proporciona bons resultados conforme identificado na seção 4.1.

Durante o processo de produção da argamassa foi necessária à adição de uma menor quantidade de água em relação à prevista para obtenção da trabalhabilidade desejada, portanto a relação a/a final do experimento foi de 0,47.

Buscando evitar a pega da matriz durante a execução do reforço, a quantidade total de argamassa foi produzida em duas etapas sendo, mantido o traço. As médias dos índices de consistência realizados na mesa de abatimento foram de 26,9 cm para a primeira argamassa produzida e 26,5 cm para a segunda. A figura 36 demonstra o método do abatimento do corpo de prova troncônico para verificação do índice de consistência conforme NBR 7215 de 1996.

Figura 36: Ensaio de abatimento para verificação do índice de consistência



Fonte: Elaborado pela autora

Foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos de dimensões 5 cm x 10 cm para verificação da resistência à compressão da argamassa, com rompimento aos 7 e 28 dias. Os resultados obtidos encontram-se na tabela 11.

Tabela 11: Resultados do fcj da argamassa (MPa)

Argamassa	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
1	36,32	57,13
2	38,33	61,92

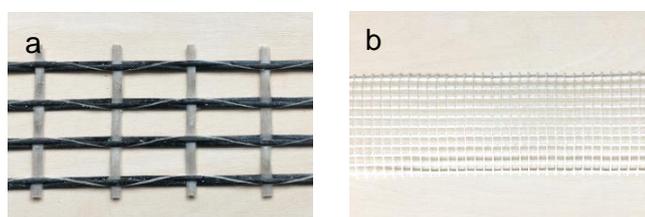
Fonte: Elaborado pela autora

5.1.4 Têxtil do reforço

Os tecidos empregados no presente estudo, de fibras vidro (Figura 37a) e híbrido de fibras de carbono e de vidro (Figura 37b), são comercializados, respectivamente, pelas empresas FiberTEX e S & P. O primeiro tipo de tecido é produzido no país e foi doado ao laboratório pela empresa, enquanto o segundo é importado da Suíça e foi adquirido pelo laboratório. Os dados técnicos dos tecidos empregados estão descritos na tabela 12 e foram obtidos das fichas técnicas fornecidas pelas empresas ou encontrados na literatura. Por uma limitação de tempo, o presente trabalho não contemplou a verificação independente das características das malhas empregadas.

Decidiu-se realizar o reforço com dimensões semelhantes à de fibra carbono realizado na disciplina de Patologia das Construções, tendo 1,00 m de comprimento por 7 cm de largura da viga, e suas ancoragens 20 cm por 9 cm de altura em cada lado, para que houvesse um padrão já conhecido. Os têxteis foram preparados nestes tamanhos no dia anterior a execução dos reforços, pois devem ser manuseados com cuidado e por isso demandam tempo, sendo realizado corte com tesoura.

Figura 37: Têxteis utilizados



Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 12: Dados técnicos têxtil

	ARMO-mesh L500	AF - 0200 BR
Material	Fibra carbono longitudinal – Fibra de vidro transversal	Fibra de vidro
Abertura da malha [mm x mm]	30x15	5x5
Modulo de Elasticidade (teórico) [kN/mm ²]	240	70 (lit.)
Fator de redução do modulo de elasticidade devido a aplicação	1,5	–
Modulo elástico (reduzido) de cálculo [kN/mm ²]	160	–
Resistência à tração última fibra [N/mm ²]	4300	1000 (lit.)
Gramatura da fibra na direção principal [g/m ²]	200	170/2 = 85
Densidade da fibra [g/cm ³]	1,7	2,6 (lit.)
Alongamento de ruptura teórico [%]	1,75	2 a 4,3% (lit.)
Espessura teórica de cálculo [mm]	0,117	0,5

Fonte: Elaborado pela autora

5.2 EXECUÇÃO DO REFORÇO

A superfície do concreto foi preparada por apicoamento da face inferior da viga e das laterais onde será executada ancoragem. Esta é a opção disponível no laboratório que é mais semelhante ao jato de areia, opção que é a mais utilizada nos ensaios internacionais segundo literatura disponível (seção 4.5). Porém por uma questão de logística, já que as vigas teriam de ser transportadas a outro laboratório, essa solução não será utilizada. De qualquer forma, levando em conta as considerações do item 4.4.2, este método é adequado para preparo de superfície.

Foi utilizado marteleto para apicoar as maiores partes da viga, conforme figura 38, e martelo com prego para os cantos, visando realizar os detalhes com maior cuidado. Nem sempre foi possível evitar o rompimento de pedaços maiores, porém considerando que o reforço executado terá argamassa, estes vazios foram preenchidos posteriormente.

Figura 38: Apicoamento da superfície de reforço



Fonte: Elaborado pela autora

Foi retirada toda a nata de cimento até que as britas estivessem aparentes, deixando uma rugosidade de 3 mm em média, conforme pode ser verificado na figura 39. O apicoamento foi realizado 21 dias após a concretagem. As medidas de preparação da superfície são exatamente as do reforço a ser aplicado.

Figura 39: Detalhe da rugosidade da superfície da viga



Fonte: Elaborado pela autora

Previamente à execução do reforço também foi realizada a preparação da ancoragem. Foi utilizada solução semelhante ao descrito no item 4.4.5, onde são inseridos parafusos na viga, e o têxtil fica preso entre uma chapa fina de aço e a superfície da peça. É importante ressaltar que este foi uma primeira solução de

ancoragem testada que apresentava, teoricamente, maior facilidade para execução. A figura 40 demonstra este modelo de ancoragem.

Figura 40 : Aplicação do reforço - superfície da viga



Fonte: Elaborado pela autora

Na semana seguinte ao apicoamento (3ª semana após a concretagem), utilizando a argamassa da matriz e têxteis mencionados nos itens 5.1.3 e 5.1.4 foram realizados os reforços. No total são 10 vigas reforçadas, nas configurações descritas na tabela 13.

Tabela 13: Configurações de reforço

Configuração	Concretagem	Quantidade camadas	Ancoragem	Tipo de têxtil	Argamassa
3-AM-C-1	1	3	Sim	ARMO-MESH (AM)	2
3-AM-C-2	2	3	Sim	ARMO-MESH (AM)	1/2
3-FT-C-1	1	3	Sim	Fibertex (FT)	1
3-FT-C-2	2	3	Sim	Fibertex (FT)	1
6-FT-C-1	1	6	Sim	Fibertex (FT)	2
6-FT-C-2	2	6	Sim	Fibertex (FT)	1/2
3-FT-S-1	1	3	Não	Fibertex (FT)	1
3-FT-S-2	2	3	Não	Fibertex (FT)	1
6-FT-S-1	1	6	Não	Fibertex (FT)	1
6-FT-S-2	2	6	Não	Fibertex (FT)	1

Fonte: Elaborado pela autora

Como houveram duas concretagens e duas vigas para cada configuração de reforço, tomou-se o cuidado de realizar uma configuração para cada concretagem

para diminuir os desvios causados pelo fch do concreto e dissipar algum erro que possa ter ocorrido em relação ao concreto e moldagem. A superfície das vigas foi molhada antes a aplicação da argamassa, tomando cuidado para não deixar água parada, e sim apenas umidade. Isto é feito para que os poros do concreto não retirem a água da argamassa, podendo causar retração e fissuras.

A argamassa foi sendo utilizada antes do momento de pega, porém na configuração 3-FT-C-2 isto quase ocorreu, pois já havia sido iniciado o reforço e o tempo de execução demorou mais do que o esperado. Pelo mesmo motivo as vigas 3-AM-C-2 e 6-FT-C-2 acabaram tendo sua parte longitudinal realizada com a argamassa 1 e a as ancoragens com a argamassa 2. Tomou-se cuidado de criar uma ponte de aderência entre as argamassas.

A aplicação da argamassa na superfície da viga foi feita utilizando espátula. Na primeira camada foi utilizada energia na aplicação, da mesma forma que normalmente executa-se reboco, para que houvesse uma maior aderência no substrato. A figura 40 mostra este processo. Após, colocou-se uma camada de têxtil na face longitudinal pressionando para que imergisse na camada. Uma nova camada fina de argamassa foi aplicada acima da têxtil, de forma mais leve, em forma de lâminas, como pode ser visto na figura 42, onde está sendo aplicado o têxtil ARMO-MESH, e a figura 43, onde está sendo aplicado o têxtil da FiberText.

Figura 41: Aplicação do reforço - superfície da viga



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 42: Aplicação do reforço – imersão do têxtil ARMO MESH



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 43: Aplicação do reforço – imersão do têxtil FiberTEX



Fonte: Elaborado pela autora

De forma geral, as camadas longitudinais foram fáceis e rápidas de executar, pois a argamassa é um material já conhecido e o têxtil, por ser um material maleável, mas também razoavelmente rígido se adaptava bastante bem ao local de aplicação. Porém foi extremamente difícil manter a espessura das camadas, e se considerarmos uma situação de execução fora do ambiente de laboratório e com a estrutura na sua posição, é provável que fosse ainda mais complexa a execução deste tipo de reforço. Também é importante considerar que o reforço foi executado por 4 pessoas com inexperiência neste tipo de atividade e uso deste tipo de material. O têxtil ARMO-MESH, por ser mais espesso, também precisou de camadas um

pouco maiores de argamassa. Os cantos reforçados ficaram com espessuras um pouco diferentes em relação ao centro da viga.

Após a aplicação de todas as camadas do têxtil de reforço, 3 ou 6 dependendo da configuração, foi aplicada uma camada de têxtil em cada uma das ancoragens, envelopando as camadas longitudinais. Inicialmente, retiraram-se as chapas da viga, que estavam presas por roscas no parafuso. Após, aplicou-se uma camada de argamassa com energia na superfície do concreto. Então o têxtil foi encaixado, preso entre a superfície de argamassa e a chapa, que foi fixada com a ajuda das roscas. Na sequência, uma nova camada de argamassa foi aplicada para o acabamento. O processo pode ser visto nas figuras 44 e 45.

Figura 44: Execução da ancoragem



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 45: Execução da ancoragem



Fonte: Elaborado pela autora

Para todos os reforços a cura das vigas foi feita a temperatura ambiente, apenas cobrindo-as com lona. Considerando todos os passos de, a parte da ancoragem foi a mais complexa e levou mais tempo de execução do que o previsto, influenciando no tempo de pega da argamassa. Também, o controle da espessura da camada foi muito mais difícil do que em relação a parte longitudinal. De forma geral, a utilização das chapas foi importante para fixar melhor o têxtil, porém seu encaixe nos parafusos foi um pouco difícil.

5.3 MÉTODO DE ENSAIO

O método de ensaio utilizado consiste em submeter a viga testemunho e vigas reforçadas a cargas de flexão através da aplicação lenta e gradual de cargas concentradas nos terços médios das vigas, utilizando macaco hidráulico.

A viga fica disposta sobre dois apoios, um de primeira ordem e outro de segunda, para que seja caracterizada a situação de viga bi apoiada isostática. As cargas são transmitidas através de dois pontos a uma distância $1/3$ dos apoios, e sendo 'l' o vão teórico da viga, obtém-se um esforço cortante nulo no terço médio, e uma flexão pura na zona central.

O ensaio de ruptura das vigas foi realizado 28 dias após a execução do reforço. As cargas foram aplicadas constantemente através de macaco hidráulico, realizando paradas nas cargas de 10kN, 15kN e 20kN para marcação de microfissuras. As deformações foram medidas por LVDT. Todas as vigas romperam pelo esmagamento do concreto, porém o ensaio foi mantido para que se observasse a deformação da peça até a ruptura do reforço.

5.4 MÉTODO DE CÁLCULO TEÓRICO

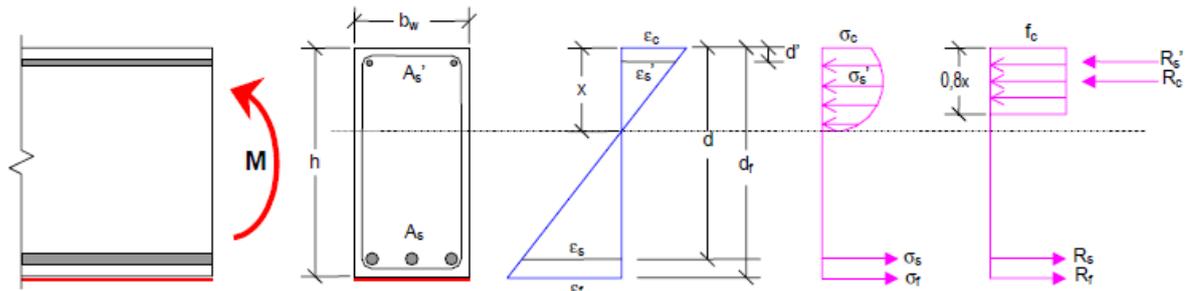
Os modelos de cálculo existentes são baseados nos diversos modelos de cálculo já estudados para outros reforços, como chapa colada, que considera o deslizamento do adesivo, e também junção de concreto antigo e novo. O fato de termos camadas muito finas no CT nos leva a comparação com as formas adesivas, como por exemplo, a utilização de resina com fibra carbono. Porém a semelhança é apenas geométrica, pois enquanto a fibra possui comportamento linear, o CT tem comportamento não linear, e isso deve ser considerado. (ORTLEPP, 2007).

Um modelo de cálculo simplificado é apresentado por Schladitz (2012, p. 320-322) para o cálculo teórico do reforço, assim como por Jabr, El-Ragaby e Ghrib (2017, p. 19-22) com considerações semelhantes, definido pelo Instituto Americano de Concreto¹².

O modelo de cálculo utilizado será o de Beber (2003, p. 57-61) por ser bastante semelhante aos modelos utilizados internacionalmente e de mais fácil entendimento, uma vez que exemplifica em detalhe a teoria e formas utilizadas, diferentemente dos ensaios internacionais. A figura 46 demonstra esquematicamente a seção e nomenclatura que será utilizada, sendo feitas as seguintes considerações (p. 57, 2003):

- (i) Até a ruptura, as seções transversais permanecem planas (hipótese de Bernoulli);
- (ii) O encurtamento de ruptura do concreto é 3,5‰;
- (iii) O alongamento máximo permitido para armadura de tração é 10‰;
- (iv) É desprezada a resistência à tração do concreto;
- (v) Existe aderência perfeita entre o aço e o concreto; e
- (vi) Existe aderência perfeita entre o reforço e a superfície do concreto;

Figura 46: Esquema de aplicação de forças na seção da viga



Fonte: Beber (2003, p.57).

Para que se encontre a carga máxima que a viga irá resistir após o reforço, utiliza-se:

$$P = M * 6/l \quad (1)$$

Onde: l = comprimento entre apoios, no caso 1,1 m.

M = momento último da seção transversal, dado por:

$$M = \sigma_s A_s d + \sigma_f A_f d_f - 0,32 b_w \sigma_c (x)^2 - \sigma_{s'} A_{s'} d' \quad (2)$$

¹² Do inglês: American Concrete Institute - ACI

Onde: b_w = dimensão da base da seção, no caso 7 cm

A distância entre a fibra mais comprimida e o centroide da armadura tracionada pode ser calculada com:

$$d = h - \phi_{ests} - c_{ob} - \frac{\phi_s}{2} \quad (3)$$

A distância entre a fibra mais comprimida e o centroide da armadura comprimida pode ser calculada com:

$$d' = \phi_{ests} + c_{ob} + \frac{\phi_{s'}}{2} \quad (4)$$

A área de aço é dada por:

$$A_{s/s'} = 2\pi\left(\frac{\phi_{s/s'}}{2}\right)^2 \quad (5)$$

Onde: h = altura da seção da viga, no caso 14 cm;

ϕ_{ests} = diâmetro da barra de estribos, no caso 4,2 mm;

c_{ob} = cobrimento da viga, no caso 1 cm;

ϕ_s = diâmetro da barra de aço longitudinal tracionada, no caso 8 mm;

$\phi_{s'}$ = diâmetro da barra de aço longitudinal comprimida, no caso 4,2 mm.

Para determinação da altura da linha neutra, utiliza-se o equilíbrio de forças da seção, que é dado por:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow R_s + R_f = R_c + R_{s'} \quad (6)$$

Onde: $R_s = \sigma_s A_s$;

$R_c = 0,8b_w \sigma_c x$;

$R_{s'} = \sigma_{s'} A_{s'}$.

$R_f = A_f \sigma_f$

Fazendo a substituição e isolando os fatores, temos a fórmula para linha neutra:

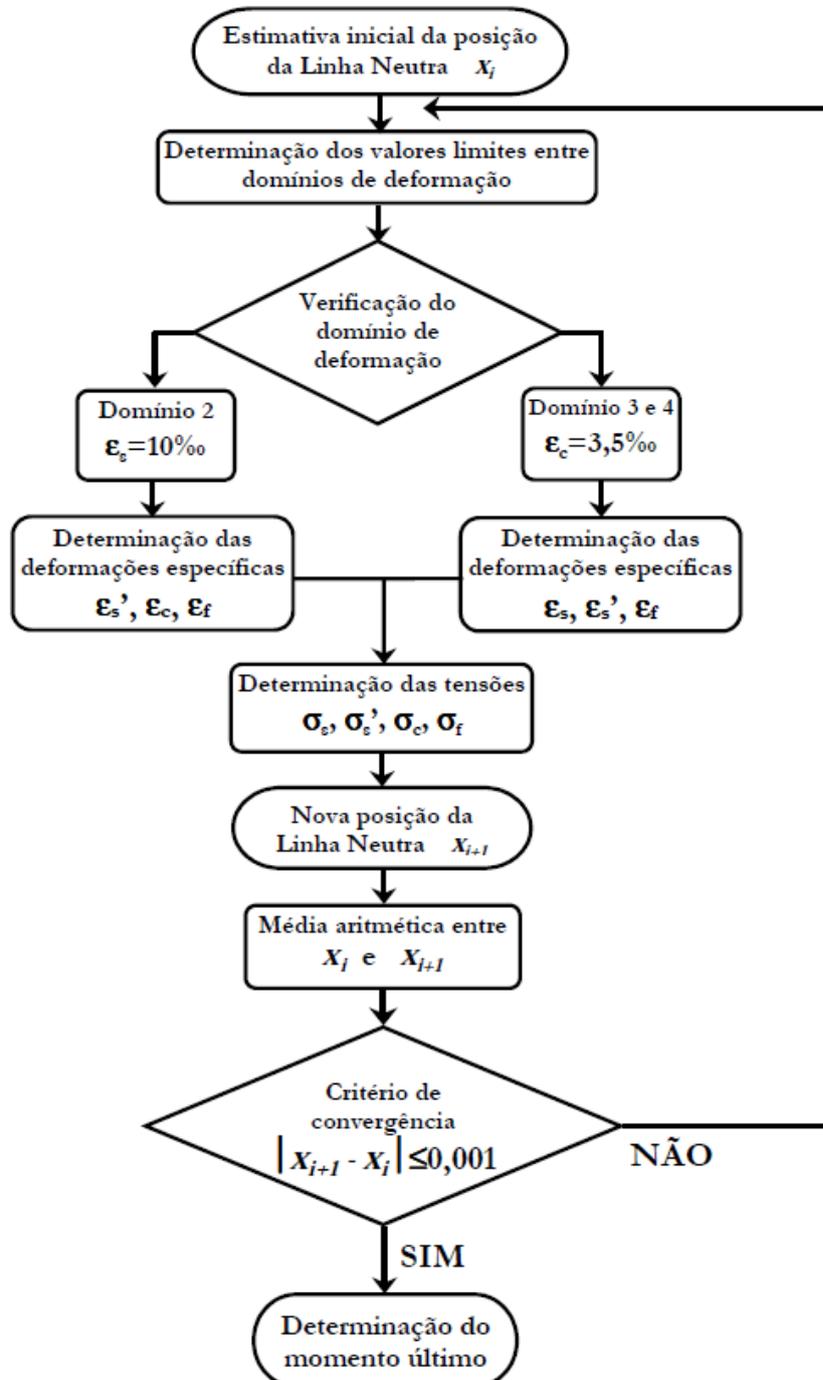
$$x = \frac{\sigma_s A_s + A_f \sigma_f - \sigma_{s'} A_{s'}}{0,8b_w \sigma_c} \quad (7)$$

Para cálculo de σ_s , $\sigma_{s'}$, σ_c e σ_f é necessário processo de iteração, segundo processo demonstrado na figura 47. Para a obtenção do x inicial assume que as tensões dos materiais são as máximas suportadas por eles, ou seja, $\sigma_s = 500MPa$, $\sigma_{s'} = 600MPa$, $\sigma_c = fck$ e $\sigma_f = 430MPa$ para o ArmoMesh e $\sigma_f = 100MPa$ para a FiberTex. De posse do valor, compara-se x a x_{23} e x_{lim} , se $x < x_{23}$ a viga está no

domínio 2 e segue o lado esquerdo do processo de iteração. Caso seja maior que x_{23} , segue o lado direito do processo de iteração.

$$x_{23} = \frac{0,0035}{0,0035+0,01}; x_{lim} = \frac{0,0035}{0,0035+\varepsilon_y} \quad (8)$$

Figura 47: Processo de iteração teórico



Fonte: Beber (2003, p.59).

Decidindo o caminho do processo de iteração, usam-se as fórmulas de deformações conforme descrito por Beber (2003, p.60). Os módulos de elasticidade utilizados foram: 240 GPa para o têxtil ArmoMesh, fornecido pela fabricante, 70 GPa para FiberTex, 210 GPa para o aço e $E_c = 5600^2 \sqrt{fck}$ para o concreto.

A_f é igual a área estimada do têxtil, dada por:

$$A_f = \frac{p}{\gamma} \quad (9)$$

Onde: p = gramatura na direção principal do têxtil, sendo 200 g/m² para ArmoMesh e 85 g/m² par FiberTex;

γ = densidade da fibra, sendo 1,7 g/cm³ para ArmoMesh, conforme ficha técnica e 2,6 g/cm³ para FiberTex, conforme dado encontrado na literatura.

Esta estimativa foi adotada uma vez que o escopo deste trabalho não contemplou a medição da seção transversal do reforço têxtil através de alguma metodologia específica, como a microscopia eletrônica de varredura, por exemplo.

A distância entre a fibra mais comprimida e o centro do reforço pode ser calculado com:

$$d_{f3} = h + 2e_a + \frac{3}{2}e_t \quad (10)$$

Para as configurações de 3 camadas e:

$$d_{f6} = h + \frac{7}{2}e_a + 3e_t \quad (11)$$

Para as configurações de 6 camadas, onde:

e_a = é a espessura da argamassa, considerada como 2 mm para FiberTex e 3 mm para ArmoMesh;

e_t = é a espessura da têxtil, sendo 0,5mm para FiberTex e 0,117 mm para ArmoMesh;

Substituindo as variáveis mencionadas na equação (7), calculamos o x , que é a altura da linha neutra, até que haja convergência do processo de iteração. Assim teremos todos os parâmetros necessários para substituição nas equações (2) e (1), que indicam os valores teóricos de carga de ruptura.

Para que o modelo fosse mais preciso, seria necessário que houvesse dados de espessura do têxtil, gramatura, densidade, módulo de elasticidade e área, específicos para as malhas empregadas neste estudo. O LEME está atuando em pesquisas neste sentido para que as respostas dos cálculos possam ser mais confiáveis.

O número de camadas foi escolhido após o dimensionamento das vigas através do processo de cálculo. Considerou-se que o aumento seria muito pequeno utilizando apenas uma ou duas camadas, por isso optou-se pela utilização de três e seis camadas de têxtil.

As vigas testemunho para seção de concreto escolhida encontram-se no domínio 2, assim como as vigas reforçadas com Fibertex. As vigas ArmoMesh encontram-se no domínio 3.

6 RESULTADOS

Os resultados obtidos com os ensaios realizados encontram-se na tabela 14, sendo o valor de carga de ruptura o momento onde houve ruptura da viga de concreto em sua parte comprimida. Era esperado que todas as vigas rompessem dessa forma, já que as peças estavam dimensionadas para o domínio 2 em sua ruptura, e com a utilização das camadas de reforço, considerando a dimensão pequena da seção da viga, houve diminuição da altura da linha neutra, como poderá ser observado nas fotos.

Neste sentido, foi continuado o ensaio para observação das deformações e verificação da forma de ruptura do reforço. Não houve aumento de carga após o esmagamento do concreto na região comprimida da viga, apenas aumento de deformações.

A carga indicada como “carga fissuras” diz respeito ao ponto onde iniciou-se a identificação visual da abertura de microfissuras na viga. Ela é aproximada uma vez que esta observação foi feita a olho nu a cada aumento de carga a partir de 10 kN até 20 kN. O primeiro conjunto de fissuras (10kN ou 15kN) foi marcado em caneta vermelha, o segundo (15kN ou 20kN) em caneta azul e o terceiro (20kN), verde.

Tabela 14: Resultados dos ensaios

	Carga fissuras (kN)	Carga ruptura (kN)	Média (kN)	Aumento (%)
VT 1	15	36,27	35,29	-
VT 2	15	34,31		
3-FT-S-1	10	38,33	37,81	7,13%
3-FT-S-2	10	37,28		
6-FT-S-1	10	39,49	39,66	12,37%
6-FT-S-2	15	39,82		
3-FT-C-1	10	37,42	37,60	6,53%
3-FT-C-2	15	37,77		
6-FT-C-1	10	38,89	38,87	10,14%
6-FT-C-2	10	38,85		
3-AM-C-1	10	46,41	48,12	36,36%
3-AM-C-2	15	49,83		

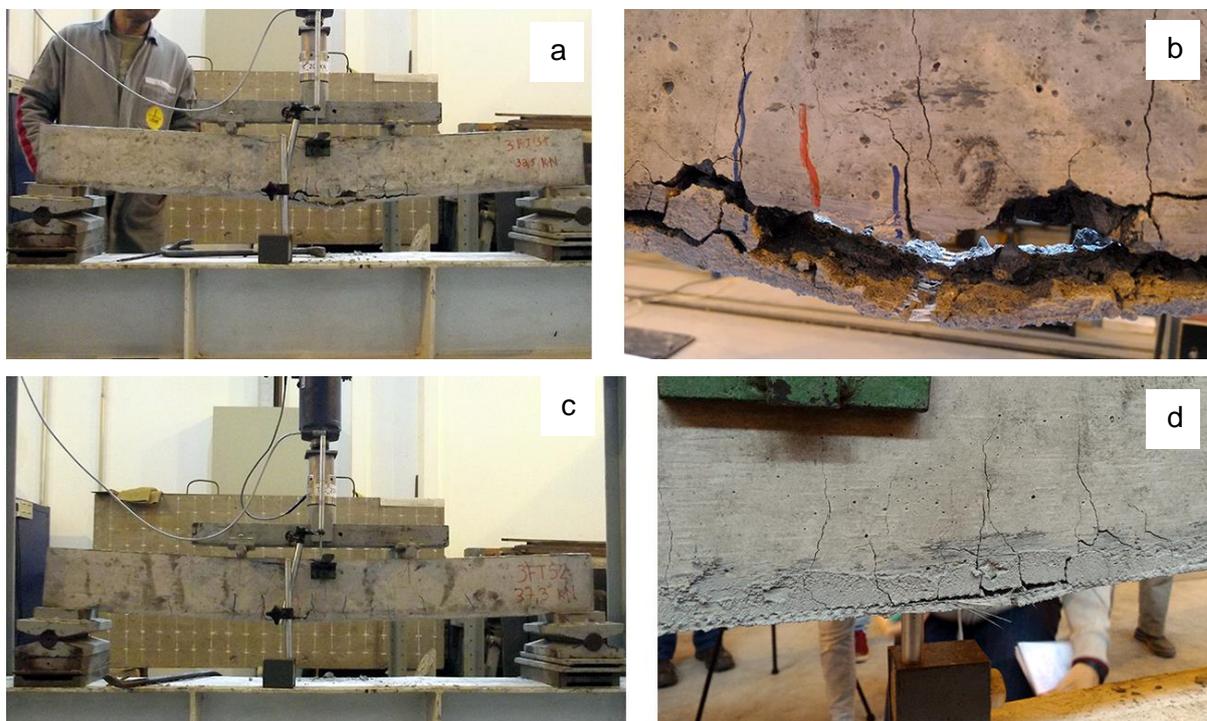
Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados obtidos mostram que não houve muita diferença entre concretagens, exceto na viga testemunho e solução de reforço AM. Houve um

aumento de capacidade de carga pelo têxtil brasileiro em relação à viga testemunho, porém este foi menor do que o esperado. Os aumentos estão em torno de 7% para vigas com 3 camadas e 11% para vigas com 6 camadas, demonstrando que houve aumento da capacidade de carga conforme aumento de camadas, não seguindo a proporção do aumento do reforço.

É importante destacar que por ter havido ruptura do concreto antes da solicitação do reforço não é possível avaliar corretamente o seu aumento de capacidade. Seria necessária maior altura de seção para que houvesse maior área comprimida de concreto e este pudesse suportar mais carga para real observação do comportamento do têxtil.

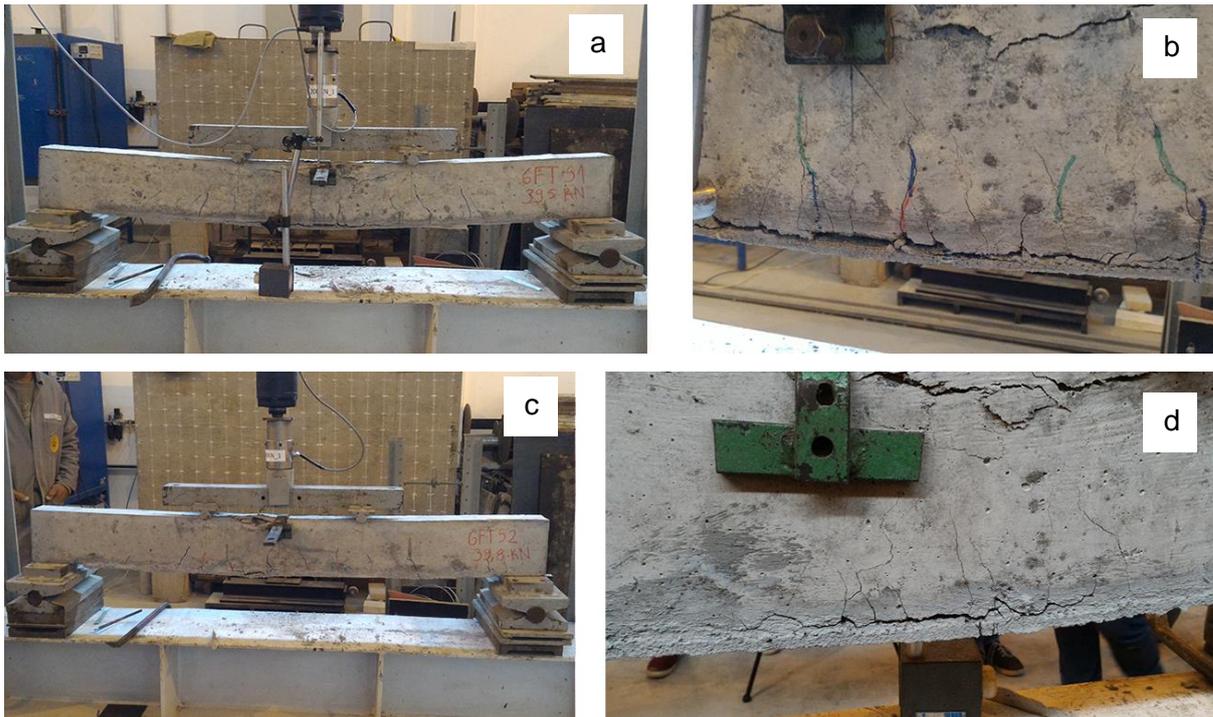
Figura 48: Ruptura 3-FT-S-1 e 3-FT-S-2



Fonte: Elaborado pela autora

Nas configurações de 3 camadas sem ancoragem 3-FT-S-1 (Figura 48a e 48b) e 3-FT-S-2 (Figura 48c e 48d), ocorreu deslocamento do reforço em seu centro, com rompimento de algumas fibras nos cantos mais externos da viga. O mesmo aconteceu para as configurações 6-FT-S-1 (Figura 49a e 49b) e 6-FT-S-2 (Figura 49c e 49d), porém sem rompimento de nenhuma fibra, provavelmente por serem configurações mais rígidas em função do aumento de camadas.

Figura 49: Ruptura 6-FT-S-1 e 6-FT-S-2

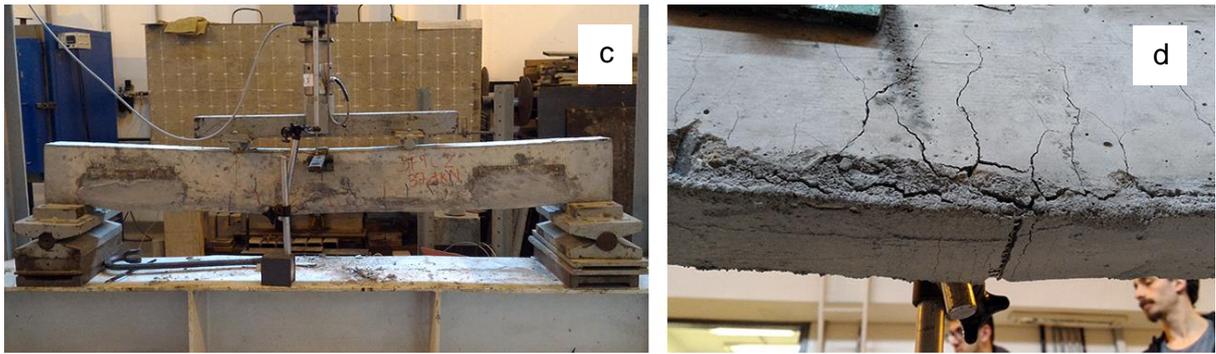


Fonte: Elaborado pela autora

A eficiência da ancoragem neste ensaio não pôde ser propriamente observada já que devido ao tamanho das vigas e seu dimensionamento não houve solicitação da fibra têxtil, e por isso as ancoragens não chegaram a ser solicitadas. As vigas 3-FT-C-1 (Figura 50a e 50b), 3-FT-C-2 (Figura 50c e 50d), 6-FT-C-1 (Figura 51a e 51b) e 6-FT-C-2 (Figura 51c e 51d) romperam de forma semelhante as vigas sem ancoragem, com perda de aderência, sem o rompimento da fibra. Assim, não ocorreu nenhum aumento de carga devido à utilização da ancoragem, que era um resultado esperado, inclusive sendo observados resultados levemente menores do que as vigas sem ancoragem.

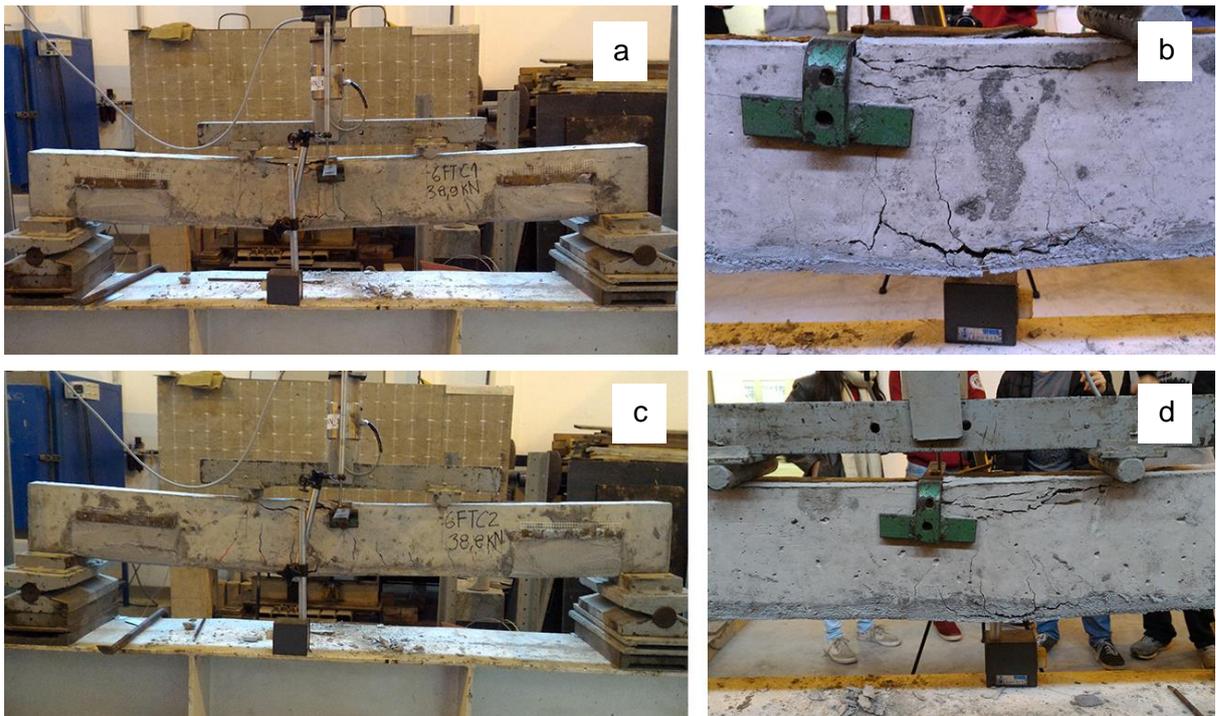
Figura 50: Ruptura 3-FT-C-1 e 3-FT-C-2





Fonte: Elaborado pela autora

Figura 51: Ruptura 6-FT-C-1 e 6-FT-C-2



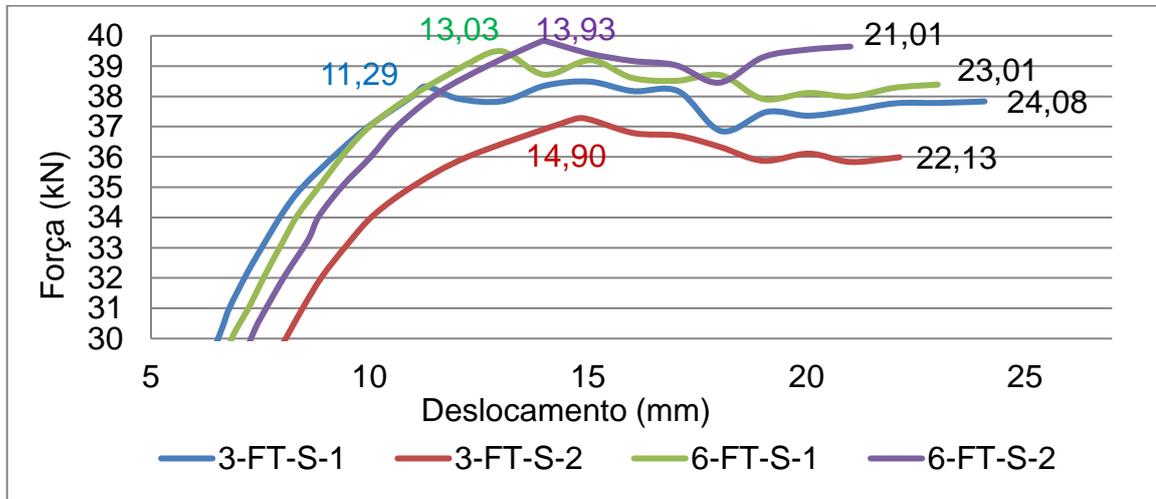
Fonte: Elaborado pela autora

Os valores demonstrados nos gráficos 17, 18 e 19 representam primeiramente o deslocamento no momento da ruptura da viga de concreto, e após continuação do ensaio, o deslocamento no momento da ruptura do reforço. Os gráficos completos para análise dos pontos de deslocamento a cada carga, considerando o início no ponto zero, para todas as vigas e configurações de reforços executados encontram-se Apêndice B.

O gráfico 17 demonstra os resultados de deslocamento da FT sem ancoragem, com o gráfico iniciando ao 30kN para que as variações possam ser melhor observadas. Os gráficos de mesmos fcj de concreto obtiveram

comportamentos semelhantes. Os deslocamentos estão demonstrados no pico da ruptura do concreto e no fim, na ruptura do reforço.

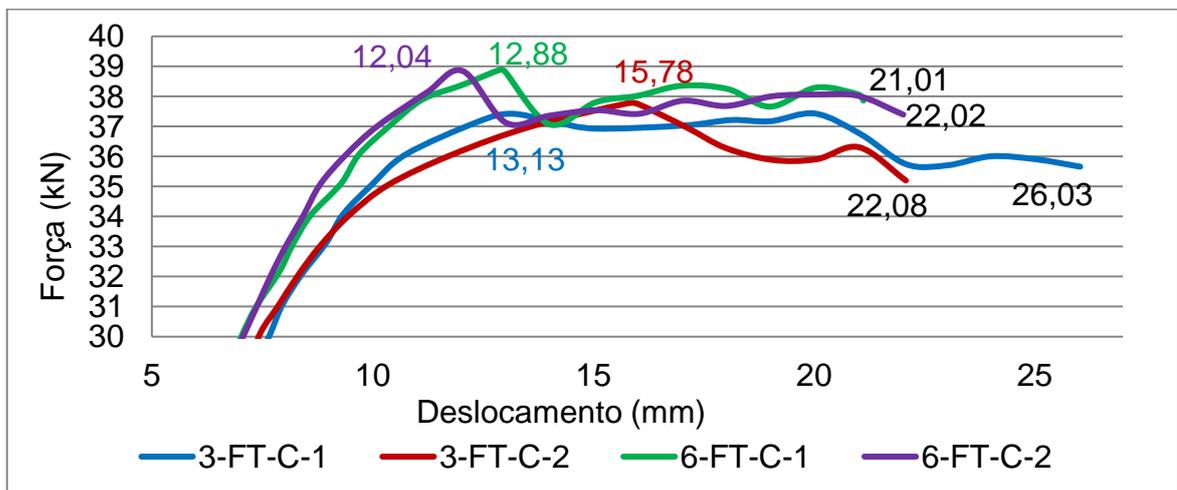
Gráfico 17: Resultados de deslocamento sem ancoragem FiberTEX



Fonte: Elaborado pela autora

O gráfico 18 demonstra os resultados de deslocamento da FT com ancoragem. Neste caso as linhas de mesmo número de camadas tiveram comportamentos semelhantes. Os deslocamentos estão demonstrados no pico da ruptura do concreto e no fim, na ruptura do reforço. A utilização de ancoragem não demonstrou mudanças significativas nos deslocamentos justamente pelo reforço longitudinal não ter solicitado a ancoragem.

Gráfico 18: Resultados de deslocamento com ancoragem FiberTEX

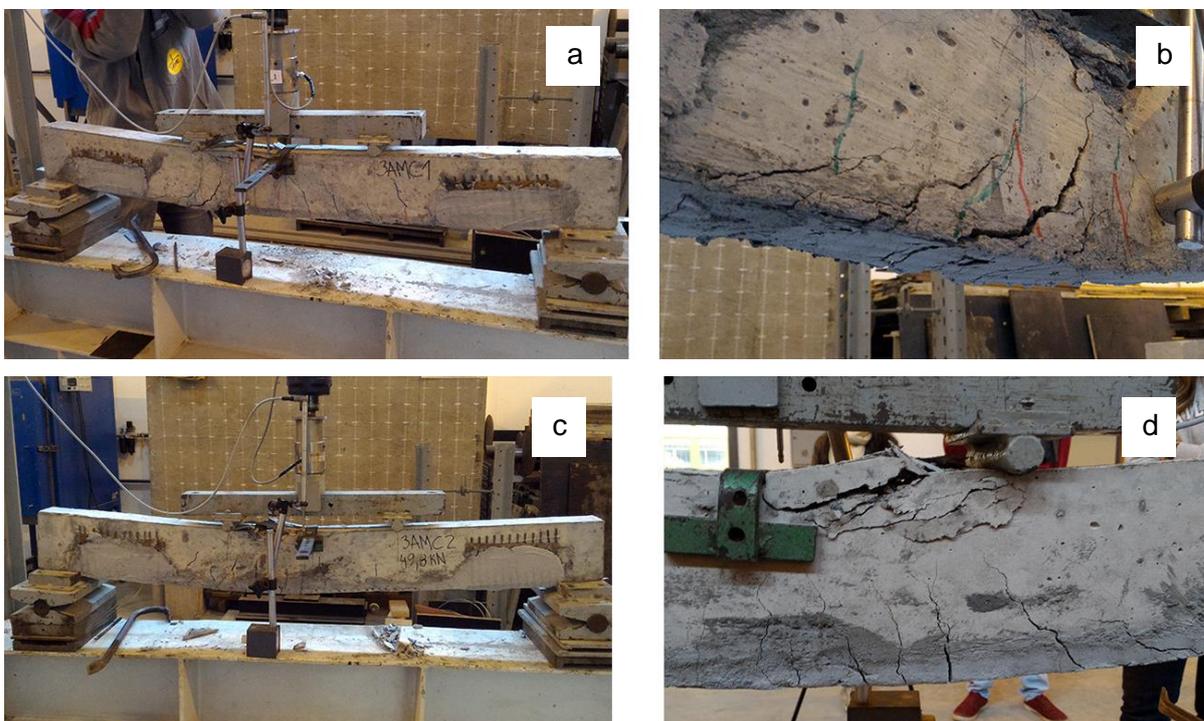


Fonte: Elaborado pela autora

A fibra ArmoMesh (Figura 52a e 52c) apresentou melhores resultados de aumento de capacidade de carga em relação a fibra da FiberTEX. Seu rompimento se deu por flexão, de forma conjunta ao concreto, com fissuras integradas entre reforço e substrato (Figura 52b e 52d).

A explicação para o melhor desempenho do reforço se dá pois o ArmoMesh é um material com maior módulo de elasticidade, composto de fibra carbono, que possui maior rigidez em relação a fibra de vidro, mas também, acredita-se, por possuir maior abertura de malha. Isso permite que haja maior aderência entre as camadas já que a matriz é a parte do reforço responsável por esta propriedade, conforme detalhado na seção 4.4.3.

Figura 52: Ruptura 3-AM-C-1 e 3-AM-C-2

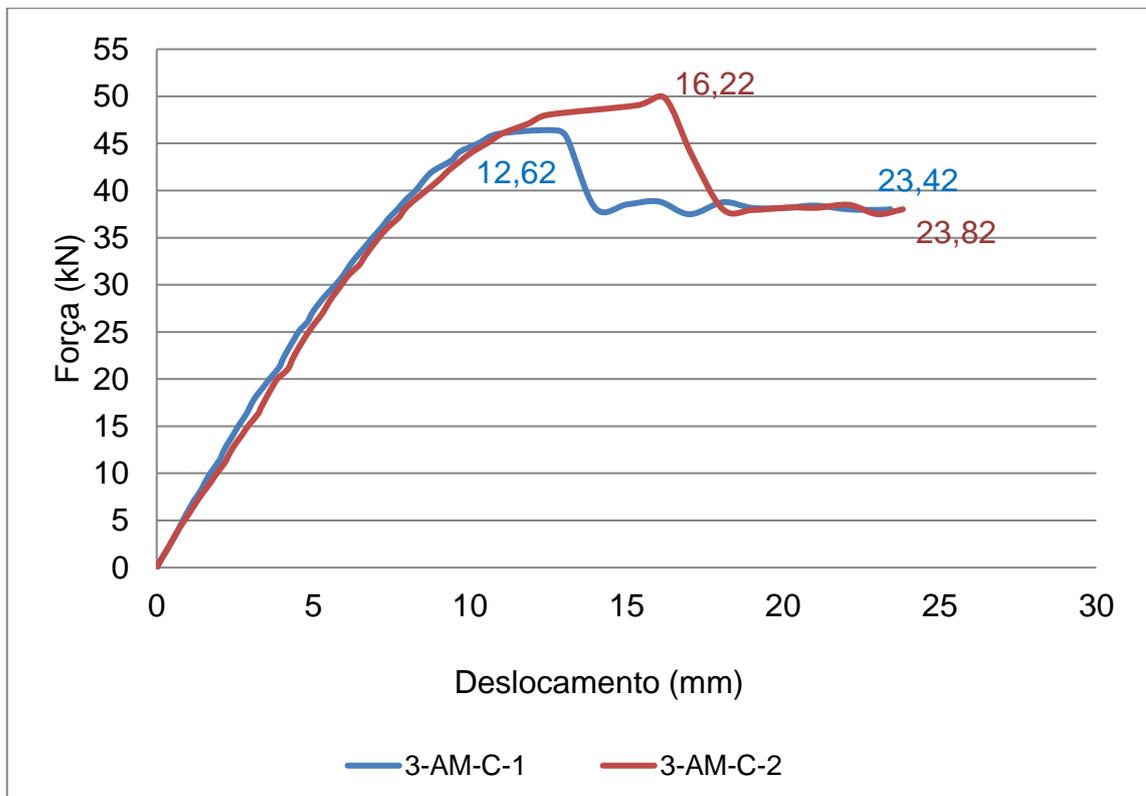


Fonte: Elaborado pela autora

O comportamento de reforço de AM foi semelhante para as vigas das concretagens, havendo menor deslocamento na hora do pico da primeira concretagem já que o concreto rompeu mais cedo. Os reforços romperam com deslocamentos de mais de 2,3 cm (gráfico 19), porém não foi possível estabelecer este valor pois o LVDT já havia perdido seu alcance. Por observação pode-se dizer que o máximo deslocamento foi atingido por volta de 3,5 cm.

Também pode-se perceber, que diferente dos reforços de FT, que apresentaram pequenas variações, o reforço de AM descarregou aproximadamente 9 kN logo após o pico da ruptura da viga. O gráfico 20 apresenta os resultados de deslocamento de todas as configurações feitas no trabalho, podendo ser observada a rigidez de cada reforço.

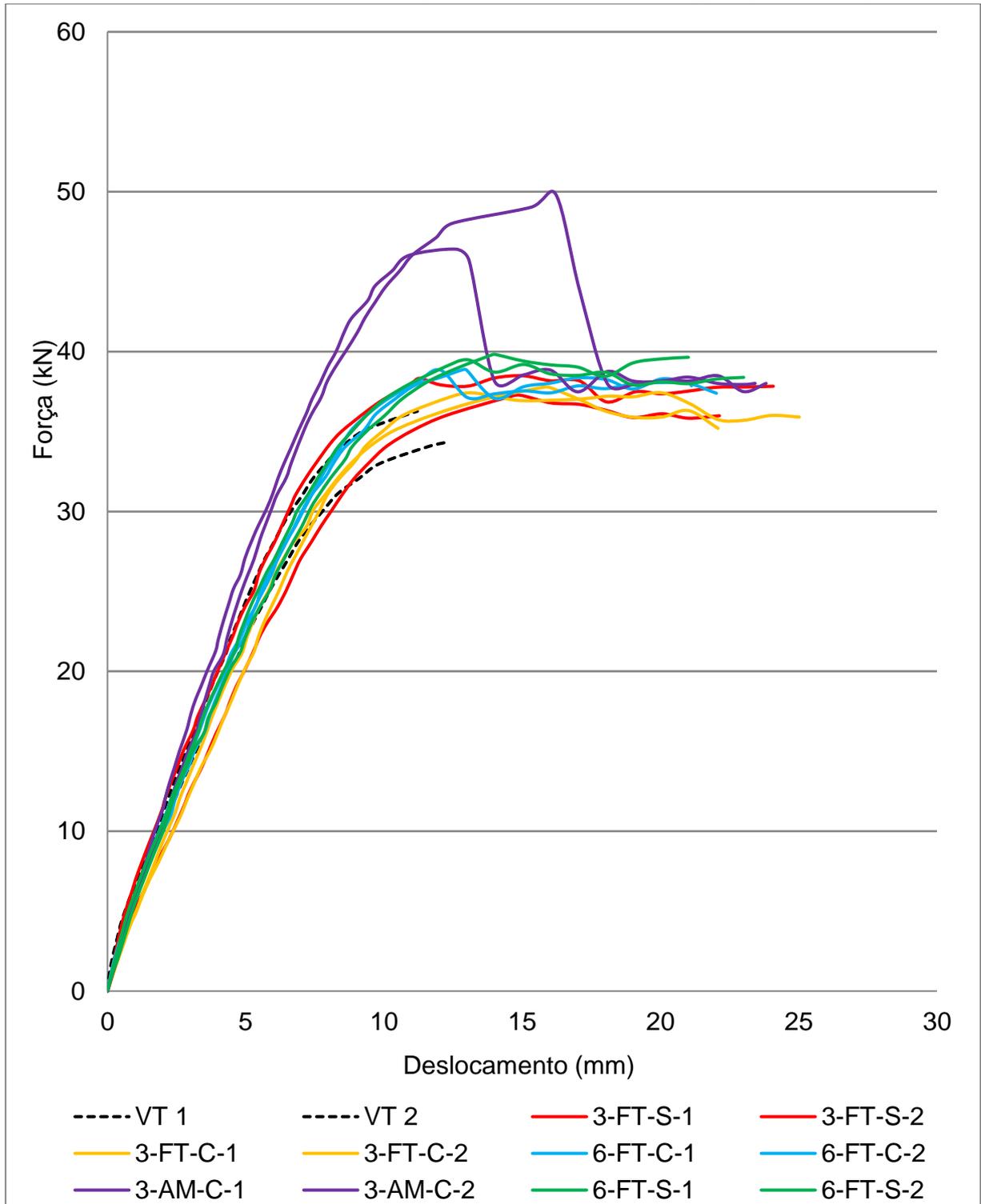
Gráfico 19: Resultados de deslocamento ArmoMesh



Fonte: Elaborado pela autora

A tabela 15 traz uma comparação entre dados experimentais e teóricos, calculados conforme item 5.4 utilizando os dados dos materiais da seção 5.1. O modelo teórico pode ser considerado relativamente adequado, já que as diferenças em relação ao experimento não foram tão altas, exceto na concretagem do reforço AM. Estas diferenças podem ser explicadas por falhas de execução, uma vez que estes tipos de reforços foram executados pela primeira vez no laboratório LEME e por isso há pouco familiaridade com o processo.

Gráfico 20: Resultados de força x deslocamento configurações reforços



O reforço de AM, especialmente o da primeira concretagem, foi o último reforço a ser executado, após todos os outros, podendo ter falha de execução por cansaço do operador. Além disso, é possível que existam detalhes, especialmente

relacionados à consideração da área de reforço, que podem não terem sido adequadamente consideradas no modelo teórico. Além disso, o modelo também considera que há perfeita aderência entre o reforço e o concreto, o que não ocorreu nos reforços de FT, já que houve perda de aderência.

Tabela 15: Comparação teórico x experimental

	Experimental (kN)	Teórico (kN)	Diferença (%)
VT-1	36,27	31,56	12,99%
VT-2	34,31	31,54	8,07%
3-AM-C-1	46,41	74,65	-60,85%
3-AM-C-2	49,83	72,55	-45,60%
3-FT-S-1	38,33	35,86	6,44%
3-FT-S-2	37,28	35,84	3,86%
6-FT-S-1	39,49	40,66	-2,96%
6-FT-S-2	39,82	40,63	-2,03%

Fonte: Elaborado pela autora

Também é importante pontuar que as vigas testemunho executadas encontram-se dentro do intervalo de confiança dos dados experimentais, estabelecido na tabela 2 da seção 3.4.

6.1 ANÁLISE QUALITATIVA

Para que fosse feita uma análise real de competitividade do têxtil no mercado, diversos itens deveriam ser mensurados através de ensaios de laboratório e testes reais em obra para que os custos gerados durante toda vida útil do reforço pudessem ser devidamente comparados.

A manutenção, por exemplo, é item essencial muitas vezes não quantificado em obra, assim como o tempo de vida útil dos materiais e do reforço aplicado. O concreto têxtil, por ser um material bastante recente, não possui tanto campo de pesquisa nessa área, e se levarmos em conta o têxtil brasileiro neste tipo de aplicação, até o momento não existe nenhuma pesquisa.

Neste item será feita uma breve avaliação (tabela 16), baseada na própria experiência de execução de reforço descrita no item 5.2, comparada a forma de execução dos outros reforços levando-se em conta a experiência da disciplina de Patologia das Construções.

A mão-de-obra contratada para execução deve possuir treinamento na execução de cada tipo de reforço, levando em consideração que são utilizados materiais não tão comuns ao dia-a-dia da obra, como chapa e fibras, que devem ser manuseadas com cuidado e aplicadas em direções específicas. Além disso, a resina possui forma de aplicação específica e tempos de pega diferentes dos materiais comumente utilizados.

Neste sentido, o reforço de armadura incorporada com argamassa acaba não precisando de mão-de-obra especializada, já que é comum que as lajes e vigas da obra sejam executadas com processo semelhante ao reforço. O concreto têxtil, por ter matriz de argamassa, acaba sendo um material conhecido de fácil manuseio, porém sua aplicação é diferente das aplicações comuns de obra, como reboco ou assentamento de tijolos. No concreto têxtil a espessura deve ser bem controlada, tornando-se necessário o treinamento de mão-de-obra especializada.

Tabela 16: Comparação qualitativa dos reforços

Análise	Chapas coladas com resina	Armadura incorporada	Fibra carbono	Concreto têxtil
Mão-de-obra	Especializada	Comum	Especializada	Especializada
Execução	Média	Difícil	Fácil	Média
Tempo de execução	Médio	Lento	Rápido	Médio

Fonte: Elaborado pela autora

A execução dos reforços de chapa colada e armadura incorporada envolvem furação da viga para inserção do parabolts ou estribos, e isso faz com que deva ser tomado muito cuidado para que não sejam furados pontos errados da viga ou quebradas partes do concreto antigo. Porém, desconsiderando esta preparação, a execução é fácil, especialmente na chapa colada, pois envolve apenas aplicação de resina e da chapa. A armadura incorporada envolve execução do reboco, que é comum para o dia-a-dia da obra. O reforço de fibra é bastante fácil, já que envolve apenas aplicação de camadas de resina e fibra alternadas. A execução da ancoragem é um pouco mais trabalhosa, porém considerando um tamanho maior de viga onde não haja dificuldade na dobra da fibra, não há maiores problemas.

O concreto têxtil em sua aplicação longitudinal foi bastante fácil, pois envolve apenas as camadas alternadas de argamassa e têxtil. Porém a ancoragem foi

bastante problemática, mesmo utilizando as chapas para fixação prévia do têxtil, foi bastante complicado dobrá-lo e mantê-lo na posição para regularização da argamassa e isto provavelmente prejudicou a aderência do material. Além disso, considerando que as espessuras de argamassa são muito pequenas, em uma situação de obra onde a viga encontra-se em sua posição natural, de forma invertida a aplicada no laboratório, seria especialmente difícil a execução de forma perfeita.

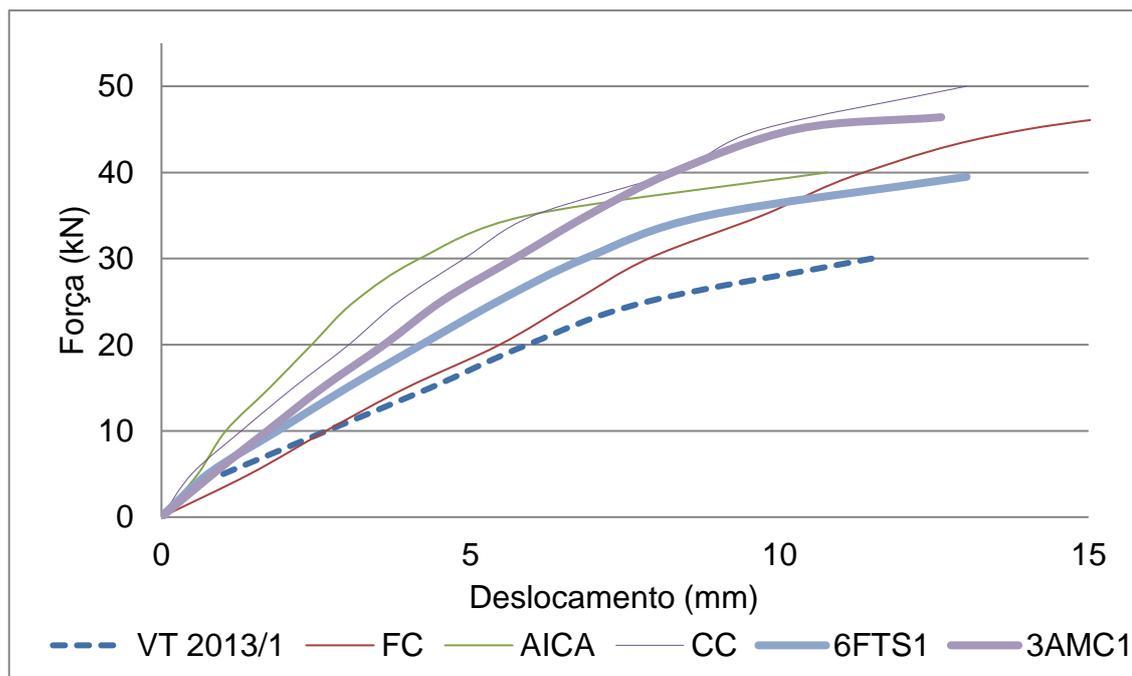
O tempo de execução para os reforços que necessitam que a viga seja furada acaba se tornando lento, por isso se o reforço de concreto têxtil for executado da forma escolhida neste trabalho, deve ser levado em conta o tempo de execução de furação para ancoragem. Tanto o concreto têxtil como a armadura incorporada também possuem o tempo de preparação de argamassa, que acaba se tornando maior do que os reforços de resina, onde só é necessária a mistura rápida de dois componentes. O tempo de execução do têxtil foi considerado médio pois as camadas em forma de lâmina são de rápida execução, estando a maior parte da execução na preparação da superfície e furação da viga e preparação da argamassa. A ancoragem, se executada, também acaba se tornando um processo bastante demorado quando não há prática de execução e existe a tentativa de ser dado um bom acabamento na peça.

6.2 ANÁLISE COMPARATIVA EXPERIMENTAL E TEÓRICA

As análises de capacidade de carga e deformações entre reforços foram feitas considerando-se o semestre de 2013/1, que dentro todos os semestres avaliados na seção 3.4, possui maior número de dados dentro dos intervalos de confiança calculados, além de todos os reforços terem rompido por compressão do concreto, diferente de outros semestres.

Em relação ao comportamento de deformação, o reforço de concreto têxtil, como esperado, está localizado entre o reforço de argamassa e o reforço de fibra carbono (gráfico 20), já que é, em sua essência, uma mistura dos dois materiais. Tanto o AM quanto o FT tem sua rigidez entre os dois reforços, sendo o AM mais rígido do que o FT pela fibra carbono ser um material mais rígido do que a fibra de vidro e também ter tido maior aderência entre camadas e em relação ao substrato.

Gráfico 20: Resultados 2013/1 em relação a FT e AM



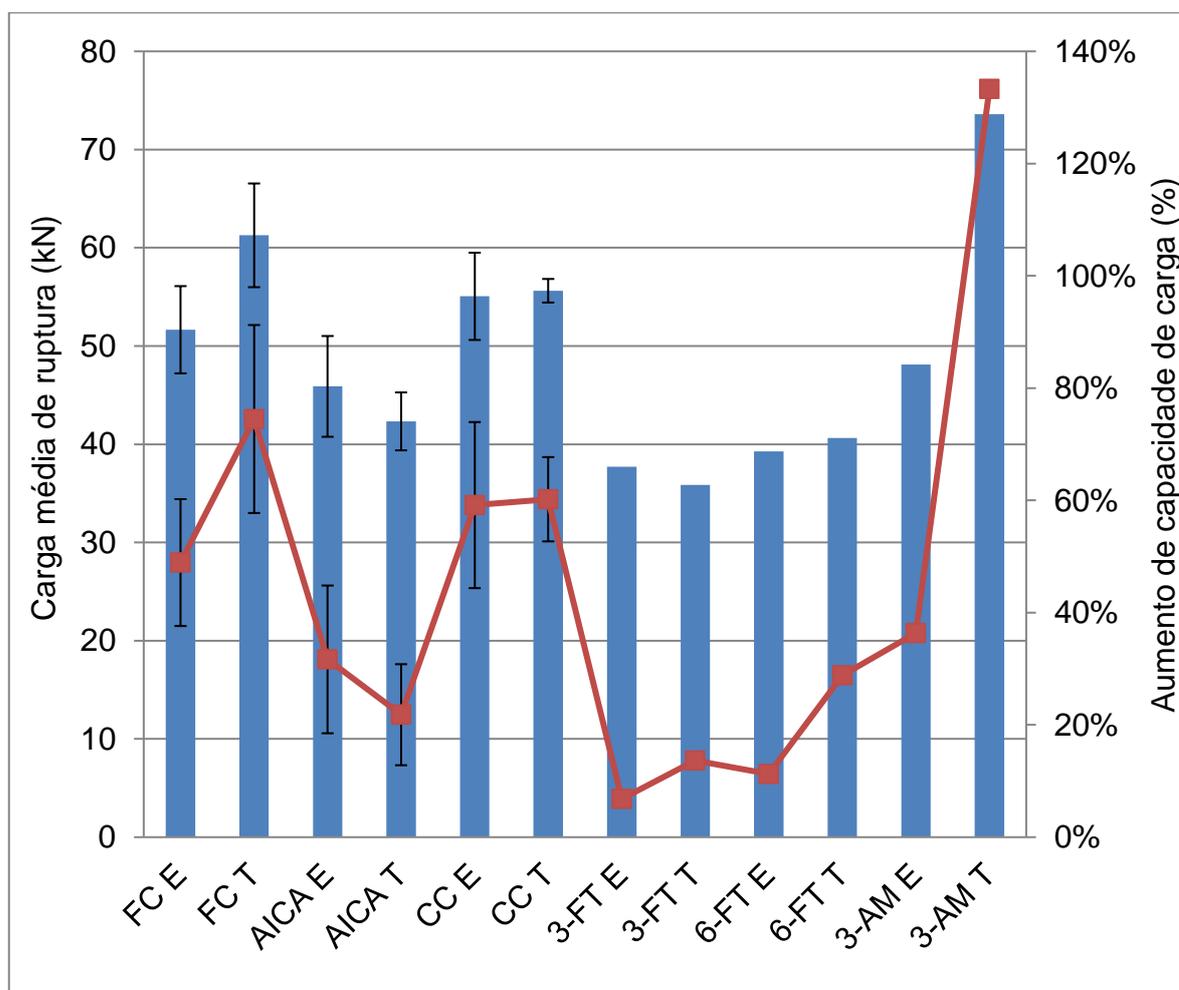
Fonte: Elaborado pela autora

Utilizando os dados das tabelas 2 e 3 da seção 3.4, onde são apresentados os valores teóricos e experimentais dos reforços em cada ano e seus aumentos de capacidade de carga, pode ser feita a comparação, considerando os intervalos de confiança dos resultados como as barras de erro representadas no gráfico 21. Não foram calculados intervalos de confiança para os resultados do têxtil por ainda haverem poucos dados

Mesmo que a comparação direta não seja adequada, pois os reforços foram calculados para capacidades diferentes, percebe-se que o têxtil brasileiro não estaria tão competitivo em relação aos outros, considerando que seu aumento de capacidade de carga foi muito menor do que todos os outros reforços. Porém no cálculo teórico seu aumento atinge valores semelhantes aos do reforço de argamassa, tornando-se interessante caso seja possível tornar a execução próxima à teoria.

O reforço de ArmoMesh por sua vez apresenta resultados mais competitivos, uma vez que experimentalmente já atinge carga de ruptura e aumentos de capacidade de carga próximos aos intervalos de confiança experimentais dos outros reforços.

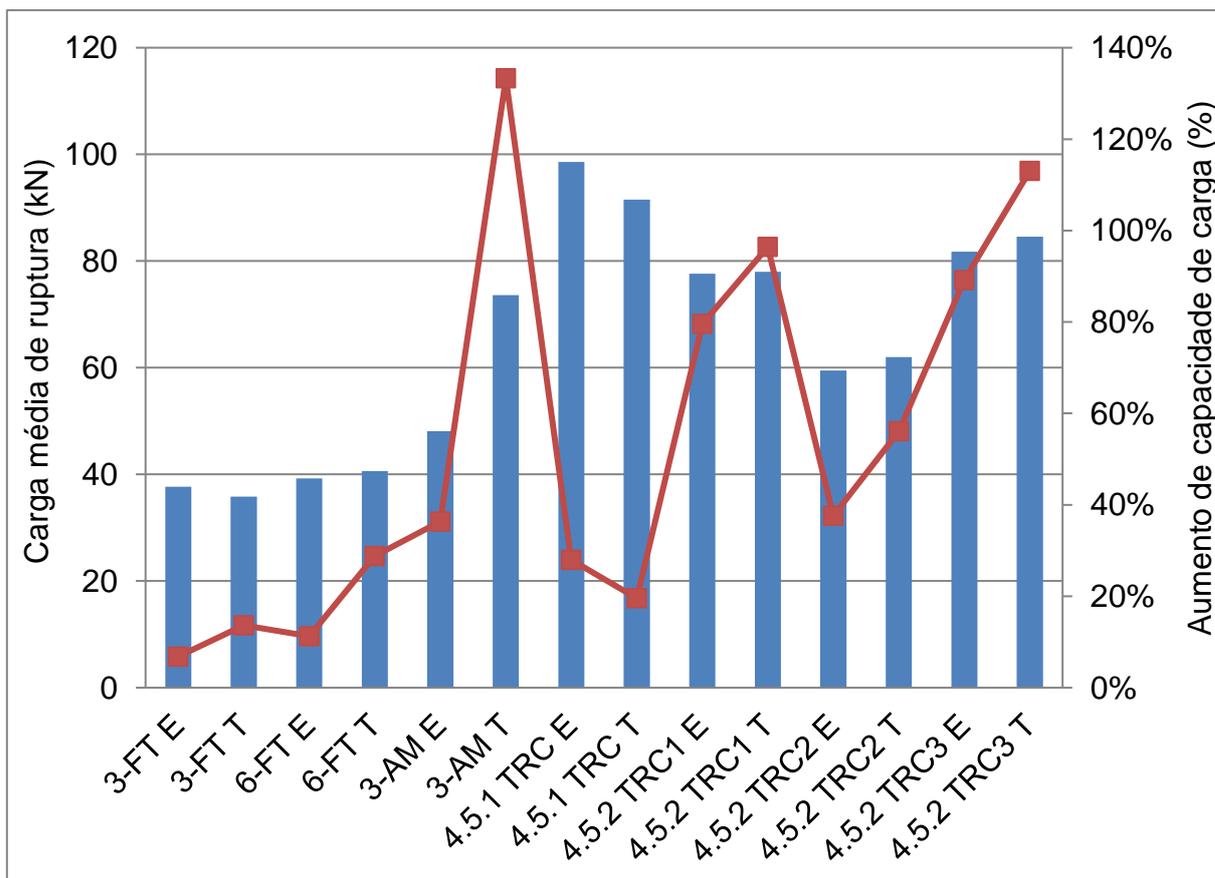
Gráfico 21: Comparação de cargas e aumentos de capacidade de carga teórico e experimental



Fonte: Elaborado pela autora

Comparativamente aos ensaios internacionais apresentados na seção 4.5 (gráfico 22), pode-se observar que tanto o têxtil brasileiro como o ArmoMesh foram competitivos, especialmente se levarmos em conta que as malhas internacionais são mais robustas e feitas de materiais mais resistentes. Apesar dos ensaios possuírem configurações completamente diferentes, percebe-se que os modelos teóricos internacionais também não estão fielmente adaptados ao modelo experimental e que são necessários maiores estudos nesta área.

Gráfico 22: Comparação de cargas e aumentos de capacidade de carga teórico e experimental com ensaios internacionais



Fonte: Elaborado pela autora

6.3 ANÁLISE DE PREÇOS DE MERCADO

Para a estimativa do valor gasto por metro quadrado para execução dos reforços (tabela 17) foi considerada a compra apenas das quantidades necessárias para execução do reforço, o que não seria possível no mercado já que os produtos geralmente são vendidos em quantidade pré-determinadas.

Os valores de venda dos produtos foram adquiridos pelos sites do fabricante ou entrando em contato por e-mail. As quantidades e valores foram calculados para cada viga considerando as configurações estabelecidas nos ensaios. Para a fibra carbono foi considerado um rendimento de resina de 600g/m² conforme fabricante e para chapa colada, 1,7k6/m² dado 1 mm de espessura de uso do material. Para cálculo de valor de reforço por metro linear foi feita a divisão pelo valor da base da seção do reforço, que é de 0,07 m.

Tabela 17: Comparação de custo entre reforços

Material	Unidade	Preço unitário (R\$)	Quantidades viga	Total
Fibra de carbono				
Resina Epóxi Barracuda	kg	R\$ 65,00	0,259	R\$ 16,81
Fibra de carbono RC200P	m ²	R\$ 140,00	0,254	R\$ 35,56
			Total viga	R\$ 52,37
			Total R\$/m	R\$ 748,13
Chapa colada com resina				
Resina Sikadur 32	kg	R\$ 86,00	0,131	R\$ 11,26
Chapa 2,8mm	m ²	R\$ 120,18	0,077	R\$ 9,25
Parabolt 1/4" - 2 1/4"	50 pç.	R\$ 49,90	10	R\$ 9,98
			Total viga	R\$ 30,49
			Total R\$/m	R\$ 435,59
Armadura incorporada com argamassa				
Barra 8mm	m	R\$ 2,33	2	R\$ 4,65
Cimento	kg	R\$ 0,56	1,1	R\$ 0,61
Sílica ativa	kg	R\$ 6,47	0,11	R\$ 0,71
Areia média	kg	R\$ 0,15	3,29	R\$ 0,49
Estribos 4,2mm (7,cmx14cm)	unid	R\$ 0,42	10	R\$ 4,20
			Total viga	R\$ 10,67
			Total R\$/m	R\$ 138,53
ARMO MESH				
Fibra têxtil	m ²	R\$ 200	0,31	R\$ 62,00
Cimento	kg	R\$ 0,56	0,76	R\$ 0,42
Sílica ativa	kg	R\$ 6,47	0,08	R\$ 0,52
Areia fina	kg	R\$ 0,20	2,27	R\$ 0,44
			Total viga	R\$ 63,38
			Total R\$/m	R\$ 905,52
FIBERTEXT – 6 camadas				
Fibra têxtil	m ²	R\$ 8,70	0,52	R\$ 4,52
Cimento	kg	R\$ 0,56	0,76	R\$ 0,42
Sílica ativa	kg	R\$ 6,47	0,08	R\$ 0,52
Areia fina	kg	R\$ 0,20	2,27	R\$ 0,44
			Total viga	R\$ 5,91
			Total R\$/m	R\$ 84,43

Fonte: Elaborado pela autora

O têxtil brasileiro, considerando apenas o valor dos materiais envolvidos, é o reforço com menor preço, dessa forma podendo ser considerado economicamente competitivo frente aos outros tipos de reforço.

Em uma situação real seria necessário também levar em conta o valor da mão-de-obra envolvida, logística de compra dos materiais, tempo de execução, perdas envolvidas, entre diversos outros fatores relevantes. Para que fosse avaliada a viabilidade econômica de forma correta, seria necessário considerar também todo o período de vida útil do reforço, e não apenas o momento de sua aplicação, pois a durabilidade é um fator de grande influência para questão de mercado.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O têxtil brasileiro, apesar de não ter apresentado grande aumento de capacidade de carga, possui grande potencial para uso como reforço. Os materiais utilizados, inclusive a fibra têxtil, possuem baixo custo, e isto torna este tipo de solução interessante economicamente. A argamassa é um material já bastante conhecido e utilizado e, portanto, a execução deste tipo de reforço acaba sendo bastante facilitada. A maior dificuldade está relacionada à ancoragem e controle da espessura das camadas, que pode ser otimizada com a criação de novos métodos de execução.

De forma geral o modelo teórico utilizado se aproxima dos resultados experimentais, podendo ser um ponto de partida para o dimensionamento do reforço de concreto têxtil, especialmente para o têxtil brasileiro cujos resultados estiveram mais próximos da realidade. Porém é necessário que as variáveis envolvidas sejam melhor conhecidas, especialmente em relação à área e espessura da malha têxtil, além de sua resistência à tração.

Entende-se serem necessárias mais experimentações, com utilização de vigas de maior seção e comprimento que representem melhor uma situação real e permitam a avaliação da capacidade da fibra têxtil em si. Por ter uma base muito pequena, a viga utilizada neste trabalho impediu que houvesse uma largura adequada para avaliação do reforço, pois considerando a abertura da malha acabou não existindo tanto material têxtil longitudinalmente.

Também é necessário que todos materiais utilizados sejam avaliados individualmente, de forma experimental, sendo definidas as propriedades técnicas do têxtil e da argamassa de forma a entender melhor o seu comportamento. Neste trabalho a maioria das variáveis utilizadas foi encontrada na literatura, causando um distanciamento da realidade. Acima de tudo são necessários testes com as combinações dos dois materiais, para que seja definida qual a melhor argamassa e seus aditivos e agregados em relação aos materiais constituintes do têxtil. A argamassa utilizada no trabalho foi pensada pois já havia uma grande utilização e conhecimento da sua qualidade no LEME, além de possuir boa trabalhabilidade para a execução das camadas, porém não necessariamente este traço e o melhor a ser utilizado para este tipo de reforço.

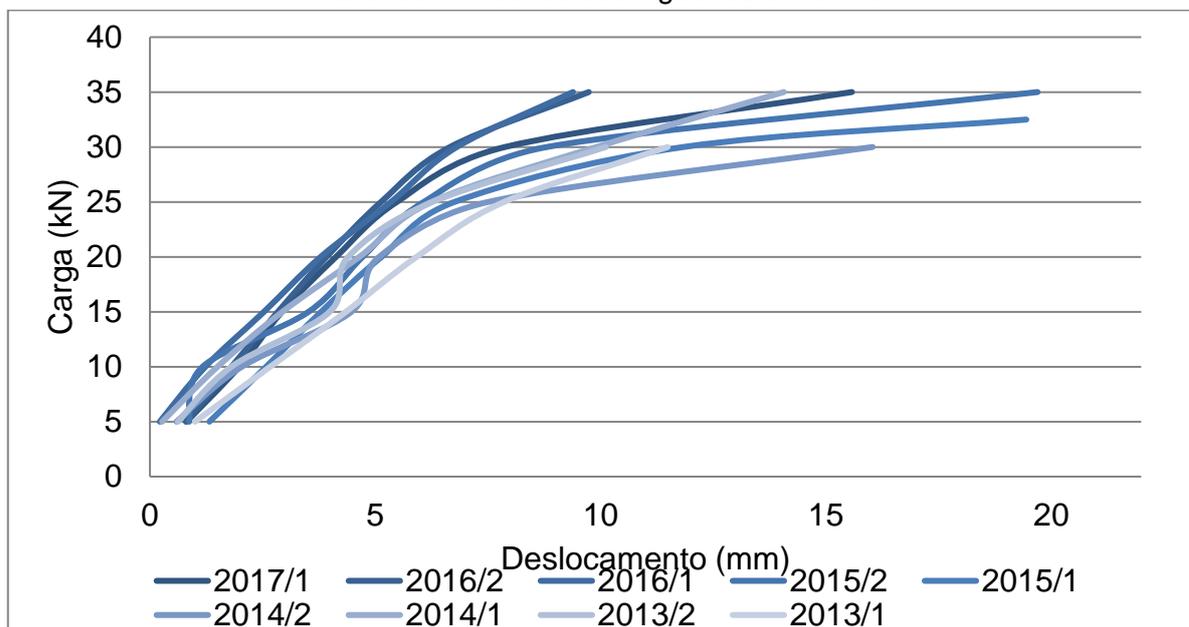
Entende-se que esta pesquisa inicia a avaliação de reforço de concreto têxtil no Brasil e pode servir de base e referência para próximos experimentos. O referencial teórico aqui citado também será importante para próximas pesquisas uma vez que resume a temática de reforço de vigas com concreto têxtil tratando de assuntos importantes como aderência entre materiais, aspectos a serem considerados para execução do reforço e modelos teóricos, identificando o que há de mais atual neste campo até o presente momento.

No espectro brasileiro, é interessante que sejam testados outros fabricantes que produzam têxteis com outros materiais, afim de que a solução de reforço com concreto têxtil se torne viável no mercado.

APÊNDICE A – RESULTADOS EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS DO LEME

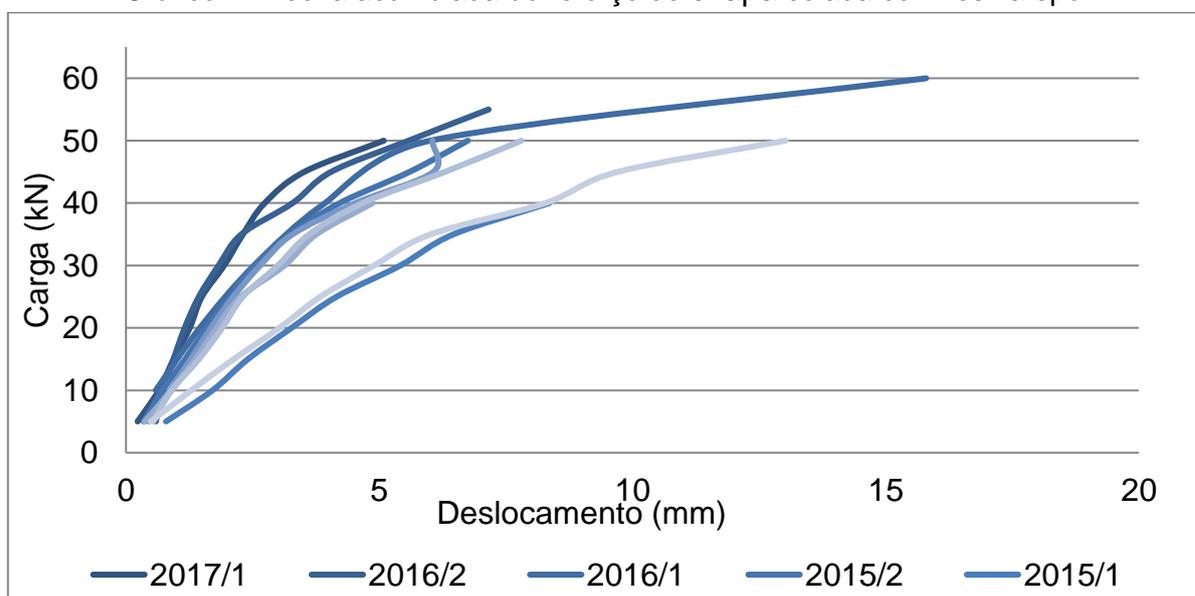
Este documento apresenta os resultados completos através de gráficos de carga por deslocamento dos resultados experimentais das vigas realizadas durante 5 anos de experimentos no LEME.

Gráfico 1: Flechas das vigas testemunho



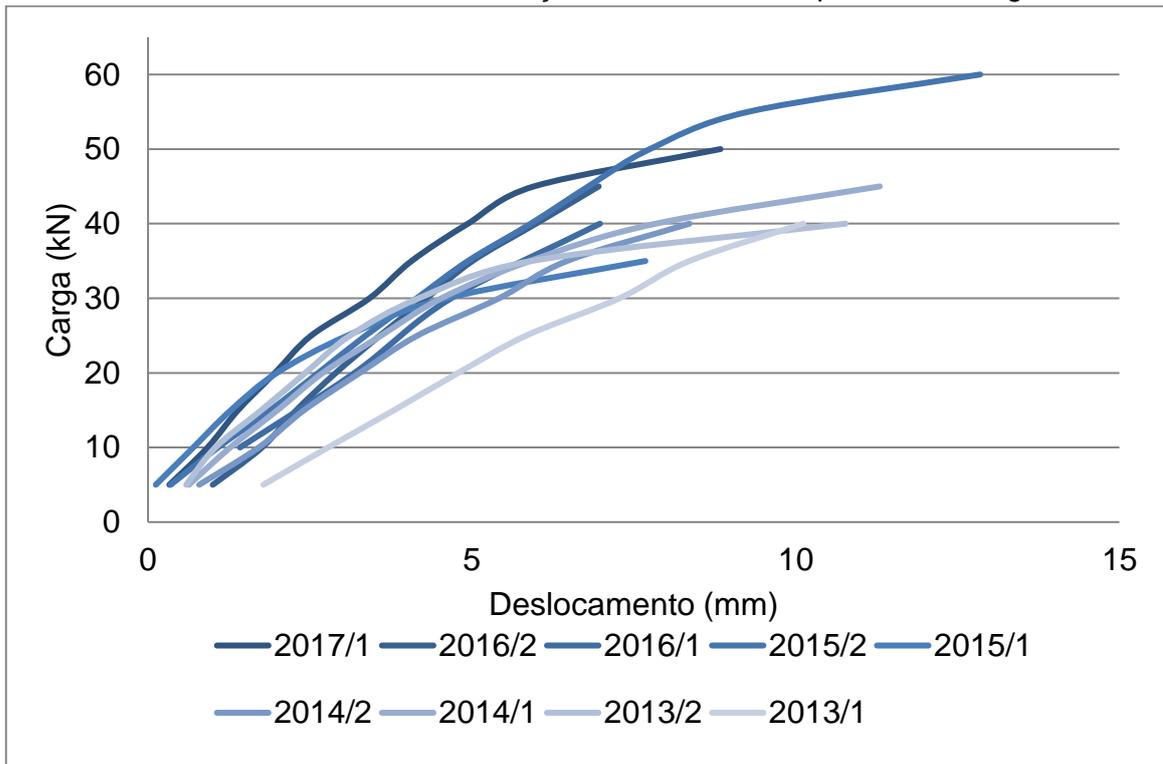
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 2: Flecha acumulada do reforço de chapa colada com resina epóxi



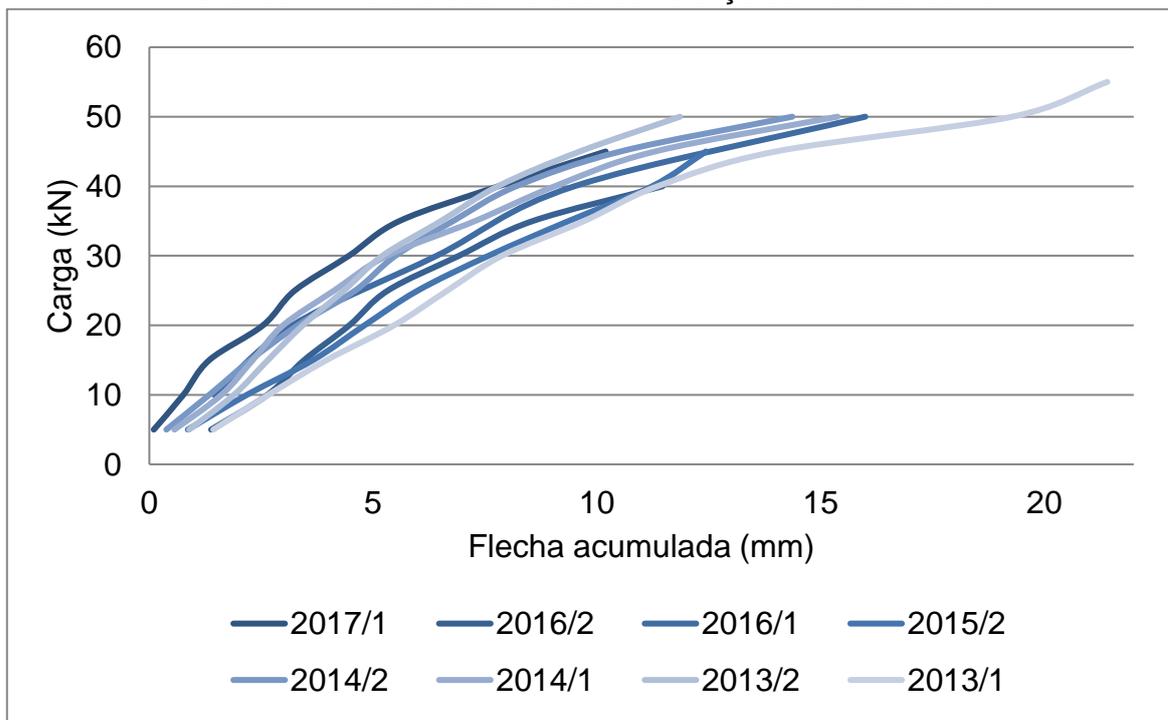
Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 3: Flecha acumulada do reforço de armadura incorporada com argamassa



Fonte: Elaborado pela autora.

Gráfico 4: Flecha acumulada do reforço de fibra carbono

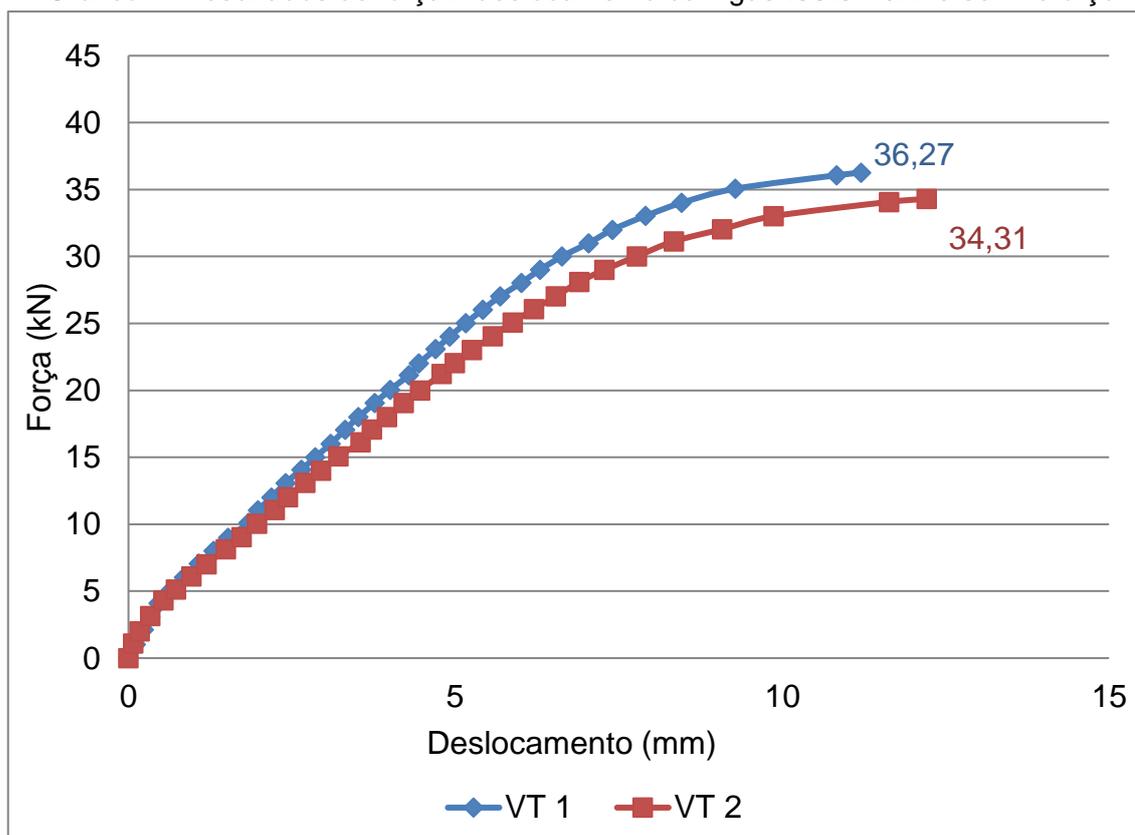


Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE B – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este documento apresenta os resultados completos através de gráficos de carga por deslocamento dos resultados experimentais das vigas deste trabalho. Os valores pontuados em cada gráfico representam o momento de ruptura da viga de concreto armado em sua parte comprimida, sendo após continuado o ensaio para observação dos deslocamentos e modo de ruptura do reforço.

Gráfico 1: Resultados de força x deslocamento da vigas testemunho sem reforço



Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 2: Resultados de força x deslocamento reforço 3 camadas sem ancoragem
FiberTEX

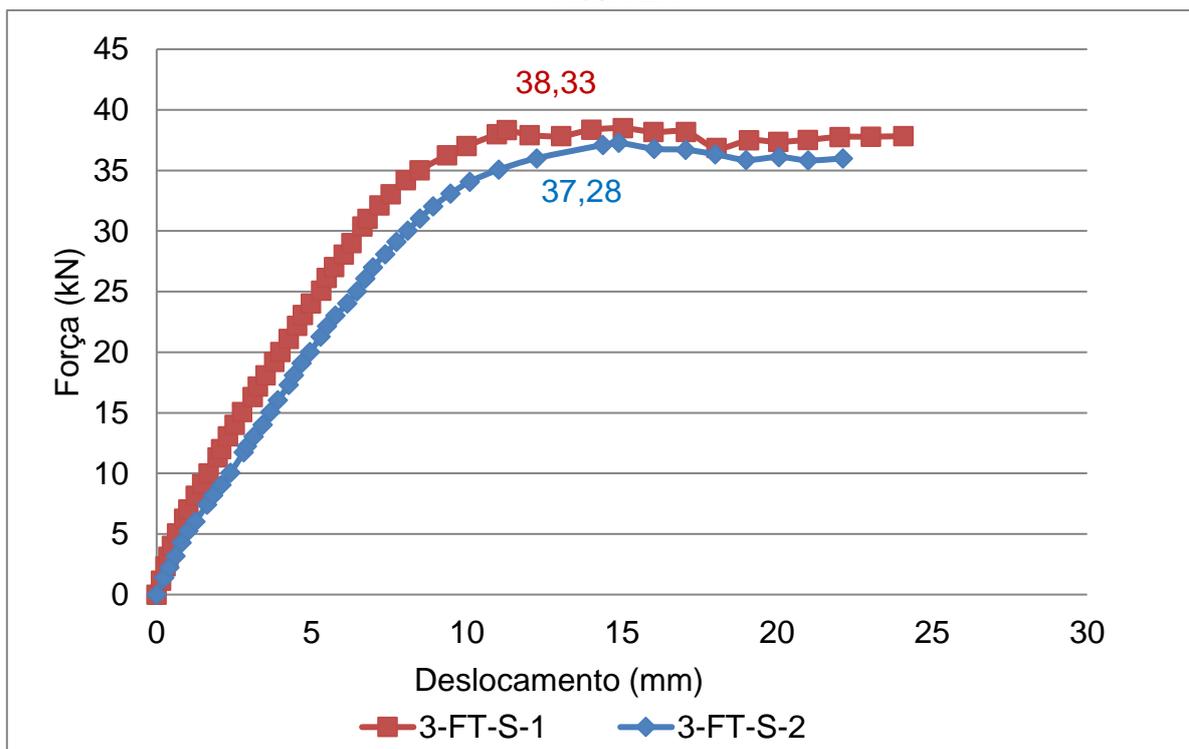
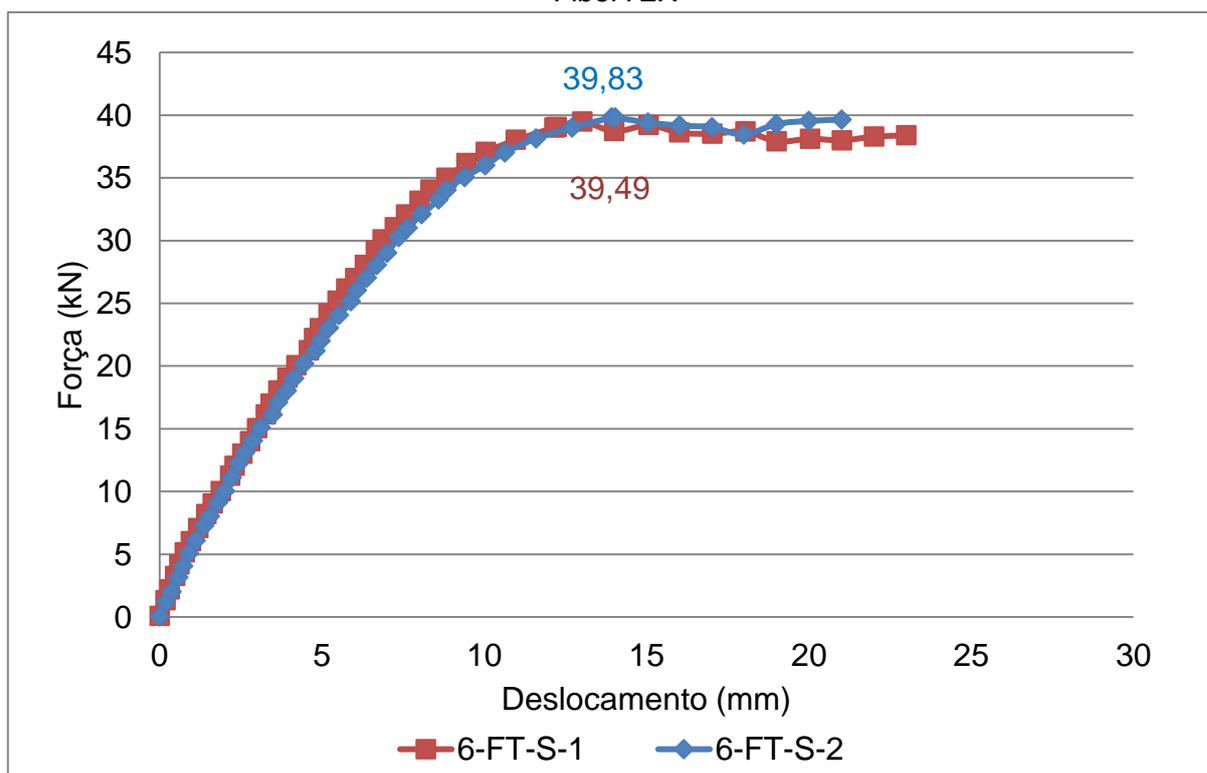
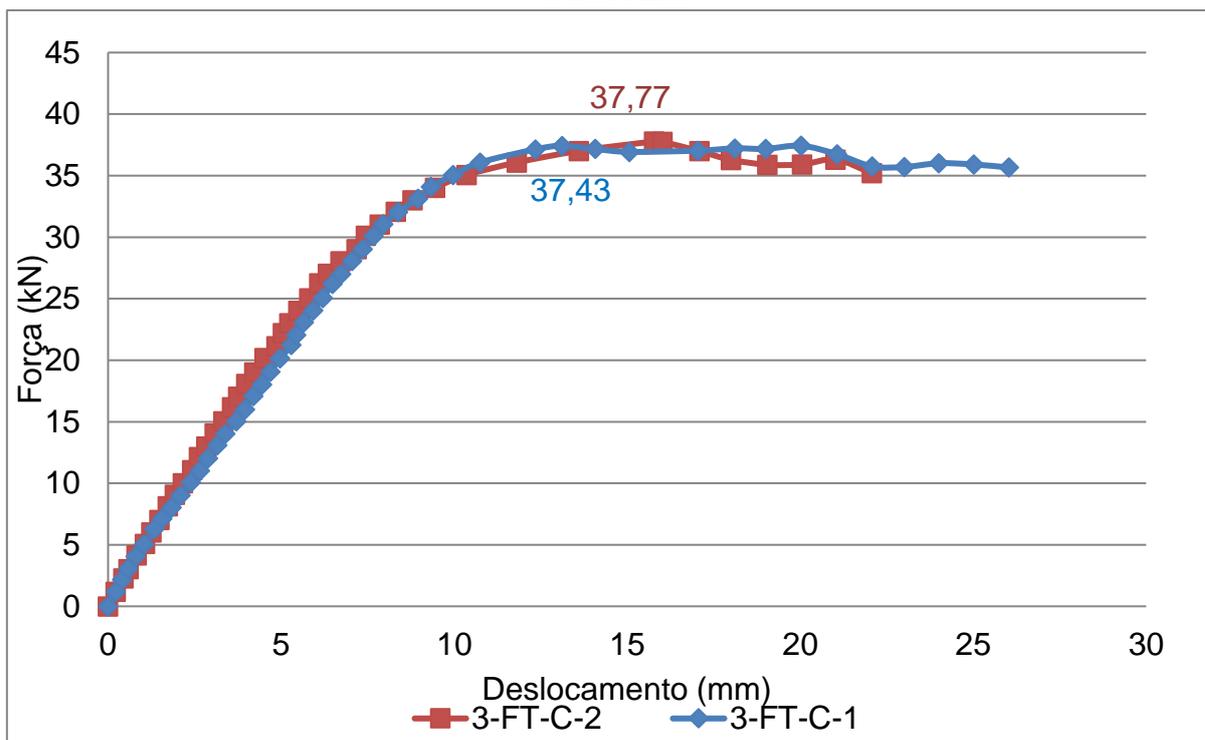


Gráfico 3: Resultados de força x deslocamento reforço 6 camadas sem ancoragem
FiberTEX



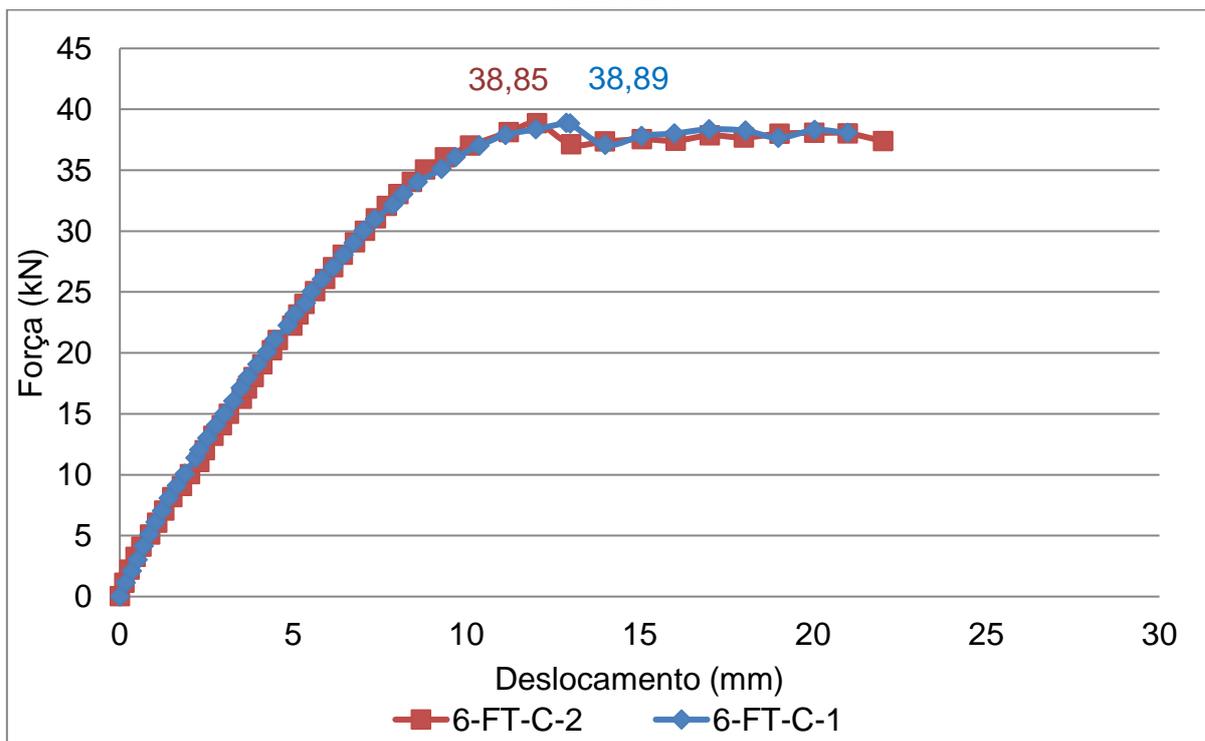
Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 4: Resultados de força x deslocamento reforço 3 camadas com ancoragem FiberTEX



Fonte: Elaborado pela autora

Gráfico 5: Resultados de força x deslocamento reforço 6 camadas com ancoragem FiberTEX



Fonte: Elaborado pela autora

REFERÊNCIAS

ARBOLEDA, Diana. **Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composites for Infrastructure Strengthening and Rehabilitation**: characterization methods. 2014. Dissertação de Mestrado (Doutorado em Filosofia). Universidade de Miami, Coral Gables, Flórida, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1996.

BEBER, Andriei José. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. 2003. 317 f. Tese (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

BEBER, A. J.; CAMPOS FILHO, A. Rigidez à flexão de vigas de concreto reforçadas com compósitos de CFRP. In: **Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural**, 32., 2006, Campinas. Anais... Campinas, 2006.

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2. ed, Boca Raton: Taylor & Frances Group, 2007.

BRAMESHUBER, W. et al. Concrete/Matrix. In: BRAMESHUBER, W. **Textile Reinforced Concrete - State of the Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC**. França: RILEM Publications, 2006

BRAMESHUBER, W. BROCKMANN, T. Introduction. In: BRAMESHUBER, W. **Textile Reinforced Concrete - State of the Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC**. França: RILEM Publications, 2006

BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M. Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear. **Material and Structures**. v. 39, n. 8, p 741-748. set. 2006. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-005-9027-2>> Acesso em: 13 nov. 2017.

CAMPAGNOLO, J. L.; SILVA FILHO, L. C. P. Avaliação do desempenho de formulações epóxi visando sua utilização como reforço de estruturas. In: Simpósio sobre patologia das edificações e recuperações, 1989, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 1989.

CAMPAGNOLO, João Luiz; DAL MOLIN, Denise C. C.; SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto da. Estudo comparativo de técnicas para aumento da capacidade de estruturas degradadas. In.: **Seminário Tiradentes: Conservação e preservação do Patrimônio Histórico**, 2003, Tiradentes, MG.

CURBACH, Manfred; ORTLEPP, Regine; TRIANTAFILLOU, T. C. TRC for rehabilitation. In: BRAMESHUBER, W. **Textile Reinforced Concrete - State of the Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC**. França: RILEM Publications, 2006

D'AMBRISI, Angelo; FOCACCI, Francesco. Flexural Strengthening of RC Beams with Cement-Based Composites. **Journal of Composites for Construction**. v. 15, n. 5, out. 2011.

DENARDI, Aline. **Concreto têxtil: uma revisão bibliográfica sobre desenvolvimentos, aplicações e perspectivas de estudos e empregos no Brasil**. 2016, 108 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ELSANADEDY, Hussein M. et al. Flexural strengthening of RC beams using textile reinforced mortar: experimental and numerical study. **Composite Structures**. n. 97, 2013, p. 40-55.

ESCRIG, Christian; GIL, Lluís; BERNAT-MASO, Ernest. Experimental comparison of reinforced concrete beams strengthened against bending with different types of cementitious-matrix composite. **Construction and Building Materials**. n. 137, 2017, p. 317-329.

FERRARI, Vladimir José; PADARATZ, Ivo José; LORIGGIO, Daniel Domingues. Reforço à flexão em vigas de concreto armado. **Acta Scientiarum**. Maringá, v. 24, n. 6, p. 1783-1791, 2002.

FIBERTEX. **Informações do produto**: tecido de fibra de vidro. Disponível em: <<http://www.fibertex.com.br/wp-content/uploads/2014/05/AF-0200-BR.pdf>> Acesso em: 05 maio 2018.

GRELLE, Stephen V.; SNEDD, Lesley H. Review of Anchorage Systems for Externally Bonded FRP Laminates. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 7, n.1, p.17–33, mar. 2013.

GRIES, T. et al. Textiles. In: BRAMESHUBER, W. **Textile Reinforced Concrete - State of the Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC**. França: RILEM Publications, 2006

HEGGER, J. et al. Applications of textile reinforced concrete. In: BRAMESHUBER, W. **Textile Reinforced Concrete - State of the Art Report of RILEM Technical Committee 201-TRC**. França: RILEM Publications, 2006

HELENE, Paulo. **Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1992.

JABR, Abdulla;EL-RAGABY, Amr; GHRIB, Faouzi. Effect of the Fiber Type and Axial Stiffness of FRCC on the Flexural Strengthening of RC Beams. **Fibers**. v. 5, n. 2, jan. 2017.

KULAS, C. **Actual applications and potential of textile-reinforced concrete**. GRCA, 17, 2015. Disponível em: <<https://www.grca.org.uk/pdf/congress-2015/02%20Actual%20applications%20and%20potential%20of%20textile-reinforced%20concrete.pdf>> Acesso em 14 out. 2017.

MANAGEMENT, maintenance and strengthening of concrete structures. International Federation for Structural Concrete (fib). Bulletin 17. abr. 2002.

MARQUES, Guilherme Granata. **Análise experimental de sistemas de reforço estrutural à flexão com laminados de PRFC aplicados a vigas de concreto armado**. 2017. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MATISSE Reforço e Recuperação de Estruturas. **Reforço em Laje de Concreto com utilização de Estruturas Metálicas e Fibras de Carbono**. Disponível em: <<http://reforcodeestruturas.com.br/fibradecarbono/reforco-em-laje-de-concreto-com-utilizacao-de-estruturas-metalicas-e-fibras-de-carbono/>> Acesso em: 05 maio 2018.

MECHTCHERINE, V. Novel cement-based composites for strengthening and repair of concrete structures. In: ALEXANDER, M. G. **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2013.

NAAMAN, A. E. Textile Reinforced Cement Composites: competitive status and research directions. In: BRAMESHUBER, W. **International RILEM Conference on Material Science** . 2, ICTRC, Textile Reinforced Concrete, Theme 1. Disponível em: < <http://demo.webdefy.com/rilem-new/wp-content/uploads/2016/10/pro075-001.pdf>> Acesso em: 05 maio 2018.

ORTLEPP, Regine; HAMPEL, Uwe; CURBACH, Manfred. A new approach for evaluating capacity of TRC strengthening. **Cement and Concrete Composites**. Vancouver, v. 28, n. 7, p. 589-597, ago. 2006.

ORTLEPP, Regine; CURBACH, Manfred. Bonding Behaviour Of Textile Reinforced Concrete Strengthening. In: **RILEM International Workshop**. High Performance Fiber Reinforced Cement Composites. 2003, p, 517-527.

ORTLEPP, Regine. **Untersuchungen Zue Verbundverankerung Textilbewehrter Feinbetonverstärkungs-schichten für Betonbauteile**. 2007. 326 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Fakultät Bauingenieurwesen. Technischen Universität Dresden. Dresden Alemanha, 2007.

ORTLEPP, Regine; ORTLEPP, Sebastian; CURBACH, Manfred. Stress transfer in the bond joint of subsequently applied textile reinforced concrete strengthening. In: **RILEM Syposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC)**, 6, 2004, Varenna, Italy. Disponível em: <<http://demo.webdefy.com/rilem-new/wp-content/uploads/2016/10/pro039-137.pdf>> Acesso em 23 set. 2017.

PALIGA, Charlei Marcelo. **Análise probabilística de vigas de concreto armado recuperadas à flexão, através do método de Monte Carlo utilizando um modelo de elementos finitos**. 2008. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

PELED, Alva; MOBASHER, Barzin; BENTUR, Arnon. **Textile Reinforced Concrete**. Boca Raton: Taylor & Frances Group, 2017.

PELLEGRINO, Carlo; SENA-CRUZ, José. Design Procedures for the Use of Composites in Strengthening of Reinforced Concrete Structures. **State of the Art Report of RILEM Technical Committee 234 DUC**. França: RILEM Publications, 2016

PORTAL, Natalie Williams; THRANE, Lars Nyholm; LUNDGREN, Karin. Flexural behaviour of textile reinforced concrete composites: experimental and numerical evaluation. **Materials and Structures**. v. 50, ago. 2016.

RAOOF, Saad M.; KOUTAS, Lampros N.; BOURNAS, Dionysios A. Bond between textile-reinforced mortar (TRM) and concrete substrates: experimental investigation. **Composites Part B**, n. 98, 2016, p. 350-361.

RAUPACH, M. et al. Epoxy-impregnated textiles in concrete-load bearing capacity and durability. In: **International RILEM Conference Textile Reinforced Concrete**, 1, 2006, Germany. Disponível em: <<http://demo.webdefy.com/rilem-new/wp-content/uploads/2016/10/pro050-008.pdf>> Acesso em: 05 maio 2018.

SANTOS, Euler Wagner Freitas. **Reforço de vigas de concreto armado à flexão por encamisamento parcial**. 2006, 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Programa de Pós Graduação em Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

SCHLADITZ, Frank. et al. Bending load capacity of reinforced concrete slabs strengthened with textile reinforced concrete. **Engineering Structures**, USA, v. 40. p. 317-326, 2012.

SCHULER, Andrea. **Caracterização de argamassas com adições de sílica ativa como material para reparos e reforço de estruturas de concreto armado**. 1998. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

S&P Clever Reinforcement Brasil. **ARMO-MESH**. Disponível em: <<http://www.sp-reinforcement.com.br/armo-mesh/>> Acesso em: 05 maio 2018.

S&P Clever Reinforcement Brasil. **Ficha Técnica: S&P ARMO-mesh**. Disponível em: <http://www.sp-reinforcement.com.br/pdf/armomesh_FTGE.pdf> Acesso em 05 maio 2018.

SI LARBI, Amir; AGBOSSOUM Amen; HAMELIN, Patrice. Experimental and numerical investigations about textile-reinforced concrete and hybrid solutions for repairing and/or strengthening reinforced concrete beams. **Composite Structures**, v. 99, p. 152-162, 2013.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

TRUONG, B. T. et al. Experimental investigations of reinforced concrete beams repaired/reinforced by TRC composites. **Composite Structures**, v. 168. p. 826-839, 2017.

TSESARSKY, Michael et al. Textile reinforced concrete (TRC) shells for strengthening and retrofitting of concrete elements: influence of admixtures. **Materials and Structures**, v. 48, n. 1-2, jan. 2015, p. 471-484.

VARIÂNCIA Desconhecida. **Portal Action**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/inferencia/412-varianca-desconhecida>> Acesso em: 18 nov. 2017.