

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Utilização de argamassa reforçada com têxtil de fibra de
vidro álcali resistente para reforço à flexão de vigas de
concreto armado**

Andressa Cristine Hamilko Giese

Porto Alegre
2019

ANDRESSA CRISTINE HAMILKO GIESE

**UTILIZAÇÃO DE ARGAMASSA REFORÇADA COM
TÊXTIL DE FIBRA DE VIDRO ÁLCALI RESISTENTE
PARA REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO
ARMADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do
Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2019

CIP - Catalogação na Publicação

Giese, Andressa Cristine Hamilko
Utilização de Argamassa Reforçada com Têxtil de
Fibra de Vidro Álcali Resistente para Reforço à Flexão
de Vigas de Concreto Armado / Andressa Cristine
Hamilko Giese. -- 2019.
188 f.
Orientador: Silva Filho Luiz Carlos Pinto da.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre,
BR-RS, 2019.

1. Argamassa reforçada com têxtil. 2. Reforço à
flexão. 3. Matriz cimentícia reforçada com fibras. 4.
Concreto têxtil, reforço. 5. Vigas de concreto armado.
I. Luiz Carlos Pinto da, Silva Filho, orient. II.
Título.

ANDRESSA CRISTINE HAMILKO GIESE

**UTILIZAÇÃO DE ARGAMASSA REFORÇADA COM
TÊXTIL DE FIBRA DE VIDRO ÁLCALI RESISTENTE
PARA REFORÇO À FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO
ARMADO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, ênfase em Construção, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 14 de outubro de 2019

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Dr. Universidade de Leeds, Inglaterra
Orientador

Prof. Nilo Cesar Consoli
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Dr. Hélio Adão Greven
Dr. pela Universidade de Hannover, Alemanha

Prof. Américo Campos Filho (UFRGS)
Dr. pela USP, Brasil

Profa. Vanessa Fátima Pasa Dutra (UFRGS)
Dra. pela UFRGS, Brasil

Dr. Amir Elias Abdalla Kurban
Dr. pela UFRJ, Brasil

Dedico esse trabalho ao meu esposo Davi, que me acompanhou em cada etapa e não mediu esforços para me ajudar a superar todas as dificuldades enfrentadas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sempre guiar meus passos pelos caminhos certos e nunca me deixar fraquejar.

Ao Exército Brasileiro por permitir que dedicasse parte de meu tempo ao desenvolvimento da pesquisa.

Ao professor Luiz Carlos, pela disponibilidade em me orientar e apoio com os recursos necessários para a pesquisa.

À professora Vanessa Pasa pela receptividade, orientação, discussão e apoio ao longo de toda pesquisa. Sua ajuda foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho, muito obrigada por tudo.

À empresa TEXIGLASS pela doação do têxtil e pela disponibilidade da equipe técnica em esclarecer dúvidas. Essa colaboração foi primordial para o desenvolvimento da pesquisa.

À empresa MC-Bauchmie, por doar parte da argamassa utilizada no programa e reduzir o custo do restante do material, facilitando assim o prosseguimento da pesquisa.

Aos técnicos Fontes e Edgar, pela compreensão e apoio durante a execução de toda parte experimental. A criatividade e disponibilidade de vocês foram fundamentais em todas as etapas. Obrigada pela paciência em ensinar e pelo carinho e dedicação em aperfeiçoar as etapas de instrumentação, execução e ensaios. Sempre serei grata pela inestimável e sincera ajuda de vocês.

Ao aluno de doutorado Lucas Reginato, por todo o apoio com uso dos equipamentos do laboratório, fundamentais para o desenvolvimento desse trabalho.

A bolsista Heloísa, pela ajuda excepcional na execução dos reforços das vigas.

À professora Mônica Garcez, pela disponibilidade e empenho para discutir a pesquisa, apoio de grande importância para análise dos resultados.

A mestrandia Carolina Dal Agnol, pela parceria e ajuda durante a execução do reforço das vigas. Obrigada por todo apoio e incentivo para me motivar na etapa final da pesquisa.

À minha família por sempre me apoiar e acreditar em mim.

Ao meu esposo Davi Nowicki Giese, por ser minha estrutura quando não tinha força e minha coragem quando me faltou esperança. Obrigada por viver comigo cada dia dessa caminhada e por nunca me desamparar.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”. (Marthin Luther King)

RESUMO

GIESE, A. C. H. **Utilização de argamassa reforçada com têxtil de fibra de vidro álcali resistente para reforço à flexão de vigas de concreto armado**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A necessidade de reforço ou ainda a recuperação de estruturas de concreto armado são problemas correntemente encontrados na construção civil. Os primeiros estudos de maior vulto sobre o concreto têxtil (CT) foram desenvolvidos na Alemanha na década de 90. O uso do CT como reforço, em geral denominado argamassa reforçada com têxtil (ART), traz algumas vantagens que o destacam das demais técnicas: resistente à corrosão, razoável proteção ao fogo, facilidade de instalação, compatibilidade com concreto e superfícies úmidas, permeabilidade ao vapor, entre outras. A ART é uma técnica inovadora e carece de mais pesquisas e desenvolvimentos, sobretudo com materiais produzidos no Brasil que possam facilitar sua introdução no contexto nacional. Portanto, a presente pesquisa destina-se a um estudo exploratório com o emprego de um têxtil de fibra de vidro AR, de produção nacional, para execução de ART em vigas de concreto armado submetidas ao ensaio de flexão a 4 pontos. O programa experimental avaliou o número de camadas de têxtil (2, 3 e 4 camadas), a idade do reforço no ensaio de flexão (3, 7 e 28 dias) e o nível de fissuração prévia à execução do reforço (sem fissuração, 50% e 100% da carga correspondente ao escoamento da viga). Com exceção das vigas executadas com 2 e 4 camadas, todas as demais tinham 3 camadas de têxtil. Todas as vigas reforçadas tiveram aumento da capacidade resistente e das cargas correspondentes ao Estado Limite de Serviço. A ruptura das vigas se deu por deslizamento do têxtil dentro da matriz cimentícia em todos os casos. As variáveis idade de ruptura e a fissuração prévia tiveram influência nos valores de carga de fissuração e escoamento das vigas, porém não apresentaram diferença significativa nos valores de carga máxima obtidos, trazendo em relação à viga testemunho um aumento médio da capacidade resistente de 49,06% e 52,80%, respectivamente. Já as vigas reforçadas com 2, 3 e 4 camadas apresentaram um ganho da capacidade resistente em relação à viga testemunho de 31,15%, 54,25% e 72,00%, respectivamente. Estes resultados indicam que a malha têxtil brasileira testada tem potencial para vir a ser utilizada em produção de CT para reforço.

Palavras-chave: argamassa reforçada com têxtil, reforço à flexão, matriz cimentícia reforçada com fibras, concreto têxtil, reforço, vigas de concreto armado.

ABSTRACT

GIESE, A. C. H. **Utilização de argamassa reforçada com têxtil de fibra de vidro álcali resistente para reforço à flexão de vigas de concreto armado.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

In civil construction, there is a common necessity to strengthen or repair reinforced concrete structures. The major initial research projects with textile reinforced concrete (TRC) were developed in Germany in the 1990s. TRC used as strengthening technique, generally named Textile Reinforced Mortar (TRM), presents some advantages when compared to other techniques: non corrosiveness, optimized fire protection, easiness to install, compatibility with concrete substrate and moist surfaces, vapour permeability, among others. TRM is an innovative technique and more research and developments are needed, primarily with Brazilian components that will enable its use in national context. Therefore, this research is an exploratory study using a Brazilian AR fiberglass textile to flexural strengthening reinforced concrete beams to be tested under four-point bending flexural test. The experimental program investigates the number of textile layers (2, 3 and 4 layers), the age of ART (3, 7 and 28 days) and the level of precracking (no precracking, 50% and 100% of the yielding load). Other than beams strengthening with 2 and 4 layers of textile, all beams were strengthened with 3 layers. All beams presented an increment of ultimate load and the load at serviceability conditions. In all cases, the failure of the beam occurred by mesh slippage between the mesh and the cementitious mortar. Different ages of TRM and levels of precracking affect in cracking and yielding loads, but there is no significant influence in ultimate load. The average flexural enhancement of ultimate load for beams of different TRM ages and precracking level is 49,06% and 52,8% of the reference beam, respectively. The flexural capacity of strengthened beams with 2, 3 and 4 layers increased by 31,15%, 54,25% and 72,00% over that of the reference beam, respectively. These results indicate that the tested Brazilian textile mesh has potential to be used in TRM.

Keywords: textile reinforced mortar, flexural strengthening, fabric reinforced cementitious mortar, textile reinforced concrete, Strengthening, reinforced concrete beams.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Seções típicas de concreto têxtil com: diversas camadas de reforços de têxteis bidimensionais (<i>a</i>) ou com uma camada de têxtil tridimensional (<i>b</i> e <i>c</i>)......	31
Figura 2. À esquerda: primeiros barcos de concreto têxtil, à direita: malha de fibras de vidro álcali-resistentes.....	32
Figura 3. Exemplos de têxteis fabricados por diferentes técnicas. Tradução livre para nomenclatura: a) transpassado tipo Lenon, b) biaxial sem pregas, c) espaçado sem pregas, d) espaçado sem pregas com distâncias variáveis, e) multiaxial sem pregas, f) tricotado e g) circular sem pregas.....	36
Figura 4. Tipos de fibras existentes.....	37
Figura 5. Filamentos com e sem aderência com a matriz cimentícia.....	39
Figura 6. Representação da aderência interna e externa dos filamentos de um fio de têxtil.....	40
Figura 7. Representação esquemática do deslizamento do têxtil dentro da matriz quando submetido à tração.....	40
Figura 8. Representação da ruptura telescópica em um fio formado por filamentos de fibra.....	41
Figura 9. Comportamento frágil (<i>a</i>) e dúctil (<i>b</i>) durante ensaio de arrancamento devido a uma maior e menor aderência, respectivamente, entre os filamentos internos do fio. A ruptura dos filamentos ativos está indicada no gráfico do carregamento (eixo vertical) pelo deslocamento (eixo horizontal) por quadrados de mesma cor da imagem da seção transversal do fio integrante da imagem.....	42
Figura 10. Alinhamento da estrutura molecular de um polímero durante o processo de fabricação da fibra. a) Contribuição do alinhamento geral e b) arranjo das cadeias da estrutura molecular antes e depois do alinhamento.....	45
Figura 11. Tensão-deformação teórica do concreto têxtil sob carregamento uniaxial... 49	49
Figura 12. Tensão-deformação de dois elementos de concreto têxtil com (a) têxtil de fibra de vidro AR e (b) têxtil de fibras de polipropileno com destaque para o tamanho da abertura das fissuras durante o carregamento.....	50

Figura 13. Diferença do comportamento de concreto têxtil submetido a tração quando há adição de fibras curtas na matriz de carbono (SCF) ou de vidro (SGF) em comparação à ausência de fibras curtas.	51
Figura 14. Detalhamento das vigas do programa experimental, medidas em <i>cm</i>	56
Figura 15. Têxtil da empresa TEXIGLASS adotado para estudo.	61
Figura 16. Detalhe da tecelagem do têxtil AR-360-RA-4R da TEXIGLASS.....	62
Figura 17. (a) Tratamento superficial com granalha de aço tipo g40; (b) g80 afastado com jato na diagonal; (c) g80 próximo com jato na diagonal (Jateamento adotado) e (d) g80 próximo com jato perpendicular.....	64
Figura 18. Fluxograma para determinação da capacidade resistente à flexão.....	69
Figura 19. Distribuição de tensões e deformações no momento último.....	74
Figura 20. Posicionamento dos LVDT: (a) leitor de baixo para cima nas vigas VT-3/7d-A, VT-3/7d-B, V3c-3d-A, V3c-3d-B, V3c-7d-A, V3c-7d-B, VT-28d-A e V3c-28d-A; (b) leitor de cima para baixo nas demais vigas.	77
Figura 21. Fixação do extensômetro: (a) posicionamento; (b) aplicação do adesivo; (c) extensômetro fixado.	77
Figura 22. Instalação do cabo de transmissão de dados: (a) isolamento da armadura; (b) isolamento entre os fios do extensômetro; (c) fixação do cabo no estribo; (d) proteção da solda com fita isolante.	78
Figura 23. Proteção do extensômetro: (a) primeira camada com fita veda rosca; (b) segunda camada com fita isolante auto fusão; (c) e (d) terceira camada com aplicação de massa plástica; (e) proteção dos terminais do cabo de transmissão; (f) cabos protegidos.	79
Figura 24. Preparo da superfície do concreto: (a) remoção da nata de cimento; (b) superfície apicoada; (c) aplicação da massa plástica; (d) lixamento da superfície e marcação da posição do extensômetro com riscador.....	80
Figura 25. Instalação do extensômetro no concreto: (a) superfície limpa com éter etílico; (b) aplicação do adesivo instantâneo; (c) proteção da instalação do extensômetro.	81
Figura 26. Instalação do extensômetro no têxtil: (a) Trama deslocada. (b) superfície lixada e limpa com éter etílico; (b) aplicação do adesivo instantâneo; (c) remoção da fita adesiva auxiliar.....	82
Figura 27. Instalação do extensômetro no têxtil: (a) execução da solda com estanho; (b) execução do reforço com têxtil instrumentado; (c) posicionamento dos cabos para solda após execução do reforço; (d) proteção da instalação.	83

Figura 28. Concretagem das vigas: (a) disposição das formas para concretagem única; (b) adensamento com vibrador de imersão; (c) dosador da central de concreto; (d) acabamento; (e) proteção com lona para cura inicial; (f) armazenamento das vigas.	85
Figura 29. Prensa utilizada para ensaio de flexão na etapa de fissuração prévia.	86
Figura 30. Deformação específica do aço e do concreto em função da carga durante a fissuração prévia das vigas do lote 4 e da viga testemunho.	87
Figura 31. (a) Vigas V3c-28d-F100-B e (b) V3c-28d-F50-B após execução do reforço com fissuras da fissuração prévia mapeadas.	87
Figura 32. Jateamento com granalha de aço. (a) Vigas posicionadas para o jateamento. (b) Equipamento de proteção. (c) Viga jateada. (d) Superfície do concreto após tratamento.	89
Figura 33. Têxtil da TEXIGLASS. (a) Fornecimento em forma de rolo. (b) Tiras de têxtil. (c) Largura da tira de têxtil.	90
Figura 34. Preparação das tiras do têxtil para reforço. (a) Dificuldade de acomodação da tira com curvatura residual na execução do teste piloto. (b) Sistema de condicionamento das tiras. (c) Tiras planas na execução do programa experimental.	91
Figura 35. Amassadeira utilizada no preparo da argamassa.	92
Figura 36. Viga posicionada para execução do reforço sobre cavaletes (a) e ajuste da altura das guias de madeira (b).	94
Figura 37. Execução da primeira camada de argamassa. (a) Espalhamento com pressão. (b) Remoção do excesso com movimentos de vai e vem. (c) Posicionamento da espátula.	95
Figura 38. Execução do reforço: colocação do têxtil com leve pressão para argamassa permear as aberturas (a); aplicação enérgica das porções de argamassa (b e c); e remoção do excesso após execução do espalhamento da argamassa (d).	95
Figura 39. Viga reforçada (a) e protegida por lona (b).	96
Figura 40. Apoios confeccionados para o ensaio de flexão e seus calços. a) Apoio de 2º gênero sobre calço e b) apoio de 1º gênero sobre calço.	97
Figura 41. a) esquema de carregamento das vigas; b) viga metálica posicionada; e c) viga posicionada para ensaio à flexão.	97
Figura 42. Concretagem e preparo das vigas para o teste piloto. a) concretagem das vigas; b) vigas concretadas; c) jateamento com granalha de aço g80; e d) vigas com face inferior jateada.	101

Figura 43. Execução do reforço o teste piloto. a) viga reforçada com 3 camadas sem ancoragem; b) viga reforçada com 3 camadas pronta para receber ancoragem; k) fixação do têxtil para ancoragem; e l) viga com ancoragem finalizada no dia do ensaio à flexão.	102
Figura 44. Corpos de prova cilíndricos rompidos da argamassa a) SikaMonotop 622 e b) Zentrifix CR.....	103
Figura 45. Registro das vigas logo após atingir a carga máxima do ensaio: testemunho (<i>a-1</i> e <i>a-2</i>); V3c-Sk (<i>b-1</i> a <i>b-3</i>); V3c-Zx (<i>c-1</i> a <i>c-3</i>); e V3c-Zx-Anc (<i>d-1</i> e <i>d-2</i>). Viga V3c-Zx-Anc levada até o colapso completo após ruptura do reforço (<i>e-1</i> e <i>e-2</i>).	104
Figura 46. Resultados do ensaio de flexão a 4 pontos do teste piloto.	106
Figura 47. Evolução da resistência à compressão do concreto com a idade.	108
Figura 48. Ensaio de módulo de elasticidade do concreto.	109
Figura 49. Evolução da resistência à compressão da argamassa utilizada no reforço..	110
Figura 50. Ruptura típica observada nos corpos de prova cilíndricos da caracterização da argamassa.....	111
Figura 51. Evolução da resistência à tração na flexão da argamassa utilizada no reforço.	111
Figura 52. Ruptura típica observada nos corpos de prova prismáticos da caracterização da argamassa.....	112
Figura 53. Viga VT-28d-B rompida.....	114
Figura 54. Gráficos da carga em função dos deslocamentos verticais no centro do vão para as vigas testemunho VT-3/7d-A e VT-3/7d-B (a) e VT-28d-A e VT-28d-B (b). 115	
Figura 55. Curva da carga em função o deslocamento do centro do vão (a) e as deformações específicas do aço e do concreto nas vigas testemunho instrumentadas (b).	117
Figura 56. Viga V3c-7d-B rompida.....	119
Figura 57. Gráficos dos deslocamentos verticais no centro do vão pela carga para as vigas do lote 2 a) V3c-3d-A e V3c-3d-B; b) V3c-7d-A e V3c-7d-B; c) V3c-28d-A e V3c-28d-B; e d) compilação das curvas referentes às diferentes idades ensaiadas.....	119
Figura 58. Momento da ruptura da viga V3c-7d-A que se deu de forma abrupta.....	121
Figura 59. Descolamento do reforço da viga V3c-28d-B observado na continuação do ensaio após ruptura inicial.	121
Figura 60. Gráficos da carga em função do deslocamento vertical (a) e das deformações específicas do aço e do concreto (b) das vigas do Lote 2.....	125

Figura 61. Momento da ruptura da viga V4c-28d-A com descolamento da camada de reforço (a) e detalhe do reforço após término do ensaio das vigas V4c-28d-A (b) e V4c-28d-B(c).....	126
Figura 62. Viga V2c-28d-B (a) e V4c-28d-B(b) rompidas.	127
Figura 63. Gráficos dos deslocamentos verticais no centro do vão pela carga para: as vigas do lote 3, V2c-28d-A e V2c-28d-B (a) e V4c-28d-A e V4c-28d-B (b); V3c-28d-A e V3c-28d-B (c); e compilação das vigas reforçadas com diferentes números de camadas...	127
Figura 64. Momento da ruptura da viga V4c-28d-B com descolamento da camada de reforço, com duração de 2 segundos.	130
Figura 65. Gráficos da carga em função do deslocamento vertical (a) e das deformações específicas do aço e do concreto (b) das vigas do Lote 3.....	132
Figura 66. Viga V PF 50 B e V PF 100 A após a pré-fissuração e após o ensaio de flexão.	133
Figura 67. Gráficos dos deslocamentos verticais no centro do vão pela carga para: as vigas do lote 4, V3c-28d-F50-A e V3c-28d-F50-B (a) e V3c-28d-F100-A e V3c-28d-F100-B (b); as vigas de 28 dias do lote 2 nomeadas como V3c-28d-A e V3c-28d-B (c); e compilação das curvas das vigas reforçadas após diferentes níveis de fissuração prévia.	134
Figura 68. Gráfico detalhando o início da curva de deslocamento vertical pela carga das vigas do Lote 4.	137
Figura 69. Gráficos completo (a e b) e detalhado (c e d) do deslocamento e das deformações específicas do aço e do concreto para os diferentes níveis de fissuração prévia das vigas reforçadas da série A do lote 4.....	137
Figura 70. Curva típica obtida do ensaio de flexão a 4 pontos para as vigas reforçadas.	139
Figura 71. Curvas carga x deslocamento do teste piloto e da viga V3c-28d-A e V3c-28d-B.	141
Figura 72. Fissura central, com medida máxima em torno de 5 mm, no centro do vão da viga V3c-28d-F100-A, logo após sua ruptura por deslizamento do têxtil dentro da matriz cimentícia. (a) vista lateral; (b) vista de baixo para cima.....	143
Figura 73. Fator ductilidade das vigas do programa experimental.....	145
Figura 74. relação da carga de escoamento pela carga máxima das vigas do programa experimental.	147

Figura 75. Curvas da carga pelo deslocamento e as deformações específicas do têxtil das vigas do lote 2 (a), lote 3 (b) e lote 4 (c).	148
Figura 76. Curvas da carga pelo deslocamento do lote 3.	152
Figura 77. Curvas da carga pelo deslocamento do lote 4.	153
Figura 78. Curvas da carga pelo deslocamento do lote 2.	154
Figura 79. Gráficos dos deslocamentos verticais no centro do vão pela carga para as vigas do lote 4.	157
Figura 80. Deformações específicas do aço e do concreto das vigas da série A na fissuração prévia e após terem sido reforçadas: V3c-28d-F50-A em (a) e (c) e V3c-28d-F100-A em (b) e (d).	158
Figura 81. Aumento da capacidade resistente em relação a viga testemunho.	160
Figura 82. Aumento da capacidade resistente em função do número de camadas.	161
Figura 83. Capacidade resistente da viga em função do número de camadas de reforço.	162
Figura 84. Resultados encontrados por Ebead <i>et al.</i> (2017).	163
Figura 85. Tendência linear do aumento da carga em função do número de camadas para diferentes pontos do ensaio à flexão.	165

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades de alguns tipos de fibras.....	37
Tabela 2. Efeito do agrupamento de filamentos na formação de fio quanto a aderência à matriz.....	44
Tabela 3. Dados da concretagem.....	56
Tabela 4. Dados dos têxteis fabricados pela TEXIGLASS.....	60
Tabela 5. Dados do têxtil AR-360-RA-4R da TEXIGLASS.....	61
Tabela 6. Nomenclatura das vigas do programa experimental.....	66
Tabela 7. Dados adotados para verificação do domínio de ruptura da viga testemunho.....	73
Tabela 8. Capacidade resistente estimadas para as vigas do programa experimental....	75
Tabela 9. Dados da concretagem.....	100
Tabela 10. Dados das argamassas utilizadas no reforço.....	103
Tabela 11. Dados teóricos e experimentais para o teste piloto.....	107
Tabela 12. Cargas máximas, em kN, obtidas nas rupturas das vigas testemunho nas diferentes idades ensaiadas e os desvios padrão e médias correspondentes.....	115
Tabela 13. ANOVA realizada para verificar se a diferença de idade do concreto impacta significativamente o valor de carga máxima obtido no ensaio de flexão à 4 pontos. ...	116
Tabela 14. Deformações específicas obtidas no centro da viga para o concreto e para o aço, com os respectivos valores de carga e deslocamento do centro da viga no mesmo instante de tempo.....	118
Tabela 15. Dados dos ensaios de flexão das vigas do lote 2.....	122
Tabela 16. ANOVA realizada para verificar se a diferença de idade de ruptura das vigas reforçadas impacta significativamente no valor de carga máxima obtido no ensaio de flexão à 4 pontos.....	122
Tabela 17. ANOVA realizada entre grupos do lote 2 para verificar se a diferença de idade de ruptura das vigas reforçadas impacta significativamente no valor de carga máxima obtido no ensaio de flexão a 4 pontos.....	123
Tabela 18. Dados dos ensaios de flexão das vigas do lote 3.....	129
Tabela 19. ANOVA realizada para verificar se a diferença do número de camadas das vigas reforçadas impacta significativamente no valor de carga máxima obtido no ensaio de flexão à 4 pontos.....	129

Tabela 20. ANOVA realizada para verificar a influência do número de camadas das vigas reforçadas no valor de carga máxima, desconsiderando a viga V4c-28d-B.....	131
Tabela 21. Dados dos ensaios de flexão das vigas do lote 4.	135
Tabela 22. ANOVA realizada para verificar se diferentes níveis de fissuração da viga antes da execução do reforço impactam significativamente no valor de carga máxima obtido no ensaio de flexão à 4 pontos.....	136
Tabela 23. Cargas de fissuração e os respectivos deslocamentos verticais medidos no centro do vão das vigas no ensaio de flexão.....	151
Tabela 24. Cargas máximas experimentais e estimadas para as diferentes configurações de reforço.....	160
Tabela 25. Incrementos de carga obtidos para cada viga reforçada para os deslocamentos limites a $l/250$ e $l/350$	164

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	ANÁLISE DE VARIÂNCIA
AR	ÁLCALI RESISTENTE
ART	ARGAMASSA REFORÇADA COM TÊXTIL
CPWD	CENTRAL PUBLIC WORKS DEPARTMENT
CRC	COLLABORATIVE RESEARCH CENTRES
CSI	CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE
DNIT	DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES
ELU	ESTADO LIMITE ÚLTIMO
FHD	FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION
FRCM	FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS MATRIX
ICTRC	CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE CONCRETO TÊXTIL
LEME	LABORATÓRIO DE ENSAIOS E MODELOS ESTRUTURAIIS
LVDT	<i>LINEAR VARIATION DISPLACEMENT TRANSDUCER</i>
MCRT	MATRIZ CIMENTÍCIA REFORÇADA COM TECIDO
NBR	NORMA BRASILEIRA
PBO	POLIPARAFENILEN BENZOBISOXAZOL
	RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATOIRES ET EXPERTS DES MATÉRIAUX
RILEM	INTERNATIONAL UNION OF LABORATORIES AND EXPERTS IN CONSTRUCTION MATERIALS, SYSTEMS AND STRUCTURES
TRM	TEXTILE REINFORCED MORTAR
UFRGS	UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

LISTA DE SÍMBOLOS

T	Tensão equivalente
E	Módulo de elasticidade (módulo de Young)
f_{cmj}	Resistência média do concreto à compressão, na idade de j dias
f_{ckj}	Resistência característica do concreto à compressão, na idade de j dias
s_d	Desvio-padrão
u_{af}	Umidade da areia fina
u_{am}	Umidade da areia média
X_i	Posição inicial da linha neutra
ε_s	Deformação específica do aço
ε_c	Deformação específica do concreto
d	Altura útil
ε_s'	Deformação do aço da armadura negativa
ε_t	Deformação específica do têxtil
σ	Tensão
x	Posição da linha neutra final
M_u	Momento último
f_c	Resistência à compressão do concreto
ε_{c2}	Deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico
σ_c	Tensão no concreto
σ_s	Tensão no aço
E_s	Módulo de elasticidade do aço
f_y	Tensão de escoamento do aço
σ_t	Tensão no têxtil
E_t	Módulo de elasticidade do têxtil
g	Gramatura do têxtil
b	Largura do têxtil
l	Comprimento da tira de têxtil
ρ	Densidade da fibra de vidro
A_t	Área da seção transversal do têxtil
E_c	Módulo de elasticidade do concreto
d	Altura útil da armadura longitudinal
d'	Altura útil da armadura longitudinal
ϕ	Diâmetro das armaduras de aço
d_{t-2c}	Altura útil da armadura têxtil do reforço com 2 camadas
d_{t-3c}	Altura útil da armadura têxtil do reforço com 3 camadas
d_{t-4c}	Altura útil da armadura têxtil do reforço com 4 camadas
d_t	Altura útil da armadura têxtil

b_w Largura da base da viga
 l_v Comprimento efetivo da viga
 h_v Altura da viga

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	23
1.1.	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	23
1.2.	DELINEAMENTO DA PROPOSTA DE PESQUISA	25
1.2.1.	Questão de pesquisa	27
1.3.	OBJETIVO	27
1.3.1.	Objetivo principal.....	27
1.3.2.	Objetivos específicos.....	27
1.4.	ESTRATÉGIA DE PESQUISA (DELIMITAÇÕES)	28
1.5.	LIMITAÇÕES	29
1.6.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	30
2.	CONCRETO TÊXTIL.....	31
2.1.1.	NOMENCLATURA.....	34
2.1.	TÊXTEIS	35
2.1.1.	Tipos de fibras	37
2.1.2.	Relação da impregnação com o comportamento dúctil do fio	38
2.1.3.	Características mecânicas	43
2.1.4.	Fios formados por fibras de vidro AR.....	45
2.2.	MATRIZ CIMENTÍCIA.....	46
2.3.	CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO TÊXTIL.....	48
2.3.1.	Propriedades mecânicas do compósito	48
2.3.2.	Principais vantagens	51
2.4.	APLICAÇÃO DO CONCRETO TÊXTIL PARA REFORÇO	52
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	53
3.1.	VARIÁVEIS DA PESQUISA.....	53
3.1.1.	Idade de ruptura	53
3.1.2.	Número de camadas.....	54

3.1.3.	Fissuração prévia	54
3.2.	DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS E DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS	54
3.2.1.	Características das vigas	54
3.2.2.	Concretagem das vigas	56
3.2.3.	Definição da argamassa	57
3.2.4.	Escolha do têxtil	58
3.2.5.	Espessura das camadas de argamassa.....	63
3.2.6.	Preparo do substrato	63
3.3.	ESTRUTURA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	64
3.4.	DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DA VIGA.....	67
3.4.1.	Análise de sensibilidade	71
3.4.2.	Estimativa da carga de ruptura	73
3.4.3.	Determinação da carga de fissuração prévia	75
3.5.	INSTRUMENTAÇÃO DAS VIGAS	76
3.5.1.	Fixação do LVDT na viga	76
3.5.2.	Fixação dos extensômetro no aço.....	77
3.5.3.	Fixação dos extensômetros no concreto	80
3.5.4.	Fixação dos extensômetros no têxtil.....	81
3.6.	CONCRETAGEM DAS VIGAS.....	83
3.7.	FISSURAÇÃO PRÉVIA DAS VIGAS	86
3.8.	EXECUÇÃO DO REFORÇO	88
3.8.1.	Preparação do substrato	88
3.8.2.	Preparação do têxtil	89
3.8.3.	Preparação da argamassa	92
3.8.4.	Procedimento para execução do reforço.....	94
3.9.	ENSAIOS.....	96
3.9.1.	Ensaio de flexão a quatro pontos.....	96

3.9.2.	Ensaio de caracterização do concreto	98
3.9.3.	Ensaio de caracterização do aço.....	98
3.9.4.	Ensaio de caracterização da argamassa.....	98
3.10.	TESTE PILOTO.....	99
3.10.1.	Caracterização das argamassas utilizadas.....	102
3.10.2.	Ensaio de flexão a 4 pontos	103
3.10.3.	Considerações finais do teste piloto.....	107
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	108
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	108
4.1.1.	Concreto	108
4.1.2.	Argamassa	109
4.1.3.	Aço	113
4.2.	ENSAIO DE FLEXÃO A 4 PONTOS	113
4.2.1.	Lote 1 – Testemunho	114
4.2.2.	Lote 2 – Idade de ruptura.....	119
4.2.3.	Lote 3 – Número de camadas	125
4.2.4.	Lote 4 – Fissuração prévia.....	132
4.3.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	138
4.3.1.	Comportamento da curva carga x deslocamento no ensaio de flexão....	138
4.3.2.	Padrão de ruptura.....	142
4.3.3.	Ductilidade na flexão.....	144
4.3.4.	Deformação específica do têxtil	147
4.3.5.	Análise das cargas de fissuração e escoamento.....	151
4.3.6.	Efeito da fissuração prévia	156
4.3.7.	Capacidade resistente	159
4.3.8.	Estado limite de serviço.....	163
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	166

5.1. CONCLUSÕES	166
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	169
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	171
APÊNDICE A – Caracterização dos materiais.....	180
APÊNDICE B - Dados do ensaio de flexão	185

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo tem a finalidade de apresentar o propósito do trabalho desenvolvido e a estrutura adotada. Primeiramente contextualiza-se o cenário em que a presente pesquisa está inserida, destacando a importância do tema e fundamentando a lacuna de conhecimento existente no âmbito científico. Na sequência, são elencados o objetivo principal e os específicos. Por último, são destacadas as limitações, a estratégia de pesquisa e a organização do trabalho.

1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A questão da vida útil de estruturas de concreto armado vem se destacando como um tópico cada vez mais relevante para a construção civil, principalmente após as últimas revisões das normas de desempenho NBR 15575 (2013) e de projeto de estruturas de concreto NBR 6118 (2014). A sua discussão não só aborda a importância dos requisitos de projeto que garantam a vida útil da estrutura, como também evidencia a necessidade da gestão dos vários fenômenos de deterioração que afetam as estruturas de concreto armado ao longo de sua vida.

O concreto armado é um dos materiais mais utilizados no mundo (CSI, 2009). Apesar de ser considerado um material durável e resistente quando comparado a outros materiais de construção, o concreto armado possui limitações. As deteriorações podem surgir de maneira pontual e isolada, porém a evolução do cenário e a sinergia dos efeitos deletérios podem categoricamente comprometer seu desempenho e a segurança da estrutura. Existe, portanto, uma grande demanda de manutenção, reparo e readequação de elementos em concreto armado.

Além disso, sabe-se que existe um grande número de construções de pequeno e grande porte que possuem suas manutenções negligenciadas e outras que precisam de intervenções recorrentes pela repetição do dano (DNIT, 2015; FHD, 2002). É o caso de estruturas em ambientes agressivos, em que mesmo que sejam feitos os reparos

necessários, os problemas persistem devido à ação da corrosão após um período de exposição.

As soluções existentes no mercado para realização de recuperação de estruturas de concreto armado deterioradas são diversas. De modo geral, as técnicas buscam corrigir as manifestações patológicas e, quando necessário, recompor a capacidade de suporte perdida. Nesses casos, as peças são reforçadas com elementos adicionais que vão complementar sua capacidade resistente, como por exemplo, o uso de chapas de aço e o aumento de seção com acréscimo de armadura (CPWD, 2002). Existem também os compósitos reforçados com fibras que possuem algumas vantagens, tais como a facilidade e agilidade da execução, a manutenção da seção dos elementos e ainda a ausência da corrosão do aço (VALIVONIS e SKUTURNA, 2007). O emprego da fibra de carbono despertou grande interesse do mercado da construção civil, entretanto algumas de suas características limitam seu emprego. Por exemplo, esses materiais têm baixa resistência a elevadas temperaturas, não aderem a substratos saturados e possuem alto custo (PELED, 2007; PINO *et al.*, 2017). Um material que tem sido investigado por atender várias das limitações dos compósitos reforçados com fibra é o compósito denominado concreto têxtil.

Esse material inovador tem se destacado por executar a mesma função do concreto armado, porém sem a presença do aço. Trata-se de um compósito de matriz cimentícia de granulometria fina que envolve uma ou mais camadas alternadas de argamassa e têxteis, tecidos vazados formados por filamentos de fibras que podem ser estruturados de diferentes maneiras (KÖCKRITZ *et al.*, 2006). As fibras mais utilizadas são as de carbono, vidro álcali-resistente, basalto e aramida (GRIES *et al.*, 2006). A nomenclatura “Concreto têxtil” é mais empregada em pesquisas que estudam essa técnica como uma alternativa para o próprio concreto armado, substituindo o emprego da armadura tradicional de aço pelo têxtil e eliminando assim a necessidade de cobrimento exigido pelo concreto armado, o que reduz consideravelmente a espessura dos elementos. Os trabalhos que estudam o uso do concreto têxtil aplicado para reforço e reparo em geral adotam uma nomenclatura diferente para a técnica, como “argamassa reforçada com têxtil (ART)” ou “matriz cimentícia reforçada com tecido (MCRT)”, ou no inglês, “Textile Reinforced Mortar” (TRM) e “Fiber Reinforced Cementitious Matrix” (FRCM).

Nessa abordagem, pode-se destacar a grande vantagem de realizar um reforço com camadas finas de material, alterando minimamente a seção transversal do elemento. A presença da matriz cimentícia facilita a aderência e torna a estrutura reparada mais homogênea. Como o têxtil fica imerso na matriz, o compósito também apresenta maior resistência a elevadas temperaturas, tornando-o uma opção mais segura em relação à fibra impregnada com resina. Além disso, como se trata de um material que não utiliza aço, a técnica se torna uma opção de solução muito conveniente, principalmente nos ambientes agressivos que iriam continuar favorecendo o fenômeno da corrosão em reforços que utilizam aço. As armaduras têxteis compostas por fibras não são suscetíveis à corrosão da mesma forma e condição que o aço, porém podem enfrentar outros tipos de degradação, sendo uma área de importante e necessário aprofundamento. De forma geral, tem-se que o reforço utilizando concreto têxtil apresenta um grande potencial de utilização em razão de suas diversas vantagens, porém é uma opção que precisa ser estudada mais a fundo, assim como as demais soluções já o foram, para possuir a confiabilidade, segurança e a viabilidade necessária para seu emprego.

No cenário brasileiro, a utilização do concreto têxtil ainda não é uma realidade. Em termos de pesquisa poucos trabalhos foram desenvolvidos (RAMBO, 2016; DENARDI, 2016; MORASSUTTI, 2016; NORA, 2018), sendo que não foram encontradas pesquisas que utilizaram têxteis fabricados no Brasil. Portanto, identifica-se também uma necessidade de avaliar os têxteis nacionais quanto ao seu desempenho para serem empregados como reforços estruturais nessa nova técnica. Esses materiais são usualmente comercializados apenas para reparos e execução de elementos de funções de acabamento. Essa é uma etapa essencial para introduzir a pesquisa do concreto têxtil no contexto nacional e assim desenvolver uma relação com a indústria em prol do aprimoramento da técnica e de seu efetivo emprego, trazendo os benefícios para a sociedade.

1.2.DELINEAMENTO DA PROPOSTA DE PESQUISA

No presente estudo será abordada a aplicação do concreto têxtil como forma de reforço de estruturas de concreto armado, buscando incluir algumas condições de execução que são encontradas na realização de reforço em campo. Busca-se com esta pesquisa contribuir para o desenvolvimento de uma técnica de reparo e de reforço que seja viável

técnica e economicamente e possa ser uma alternativa capaz de superar as limitações de outras soluções já existentes.

Apesar de existirem muitos estudos sobre técnicas de reforço, são poucas as pesquisas desenvolvidas relacionando reforço de estruturas de concreto armado com a técnica do concreto têxtil (AWANI, EL-MAADDAWY e ISMAIL, 2017). Portanto, neste trabalho será realizado um estudo exploratório com essa perspectiva, serão obtidos parâmetros para avaliação de seu desempenho e eficiência.

A primeira utilização de têxtil em uma pesquisa experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) foi realizada por Nora (2018) no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME). Porém, o presente trabalho é o primeiro estudo que considera uma maior quantidade de variáveis, voltado especificamente para a técnica de reforço utilizando ART.

Com o objetivo de ter uma avaliação inicial da técnica, definiu-se como primeira variável o número de camadas. Isso permitirá obter uma referência do potencial de reforço em relação a outras técnicas e do próprio têxtil empregado. Além disso, será possível compreender se o ganho da capacidade resistente da viga está relacionado de forma linear com o aumento de área de têxtil utilizado.

Outro fator determinante para escolha das variáveis estudadas foi o propósito de obter dados sobre a eficiência do reforço executado em condições semelhantes a encontradas nas situações reais. Isso foi feito analisando o efeito da deterioração da viga através de uma fissuração prévia, da escolha de uma argamassa tixotrópica ideal para aplicação na face inferior de vigas e lajes e pela verificação do desempenho do reforço a baixas idades, frente à necessidade de utilização de uma estrutura reforçada mesmo com pouco tempo de cura. Também foi considerada a possibilidade de avaliar outros parâmetros, como posição do reforço, posição da execução, diferentes dimensões de viga, execução sob carga e outros. Porém, devido ao tempo disponível limitou-se este estudo às variáveis de idade de ruptura e fissuração prévia.

Dessa forma, a pesquisa será dividida em lotes, onde cada um deles irá investigar as seguintes variáveis: idade de ruptura, número de camadas e fissuração prévia. Com os resultados desse experimento exploratório será possível obter conclusões da

aplicabilidade do reforço com têxtil, identificando os pontos que precisam ser estudados com maior profundidade. Assim, esperou-se que este trabalho fosse possível fornecer dados para futuras pesquisas investigarem as propriedades dos elementos de reforço de concreto têxtil isoladamente, bem como dos mecanismos das interações do reforço com substrato e com o meio em que serão expostos.

1.2.1. Questão de pesquisa

Almeja-se com este trabalho responder a seguinte questão:

Qual a influência dos parâmetros estudados – idade de ruptura, número de camadas e fissuração prévia - no aumento da capacidade resistente à flexão de uma viga de concreto armado reforçada com argamassa reforçada com têxtil (ART) de fibra de vidro álcali resistente (AR)?

1.3.OBJETIVO

1.3.1. Objetivo principal

O principal objetivo desta pesquisa é determinar se o reforço de ART aplicado em uma viga de concreto armado promove aumento de sua capacidade resistente e como os parâmetros de execução – idade de ruptura, número de camadas e fissuração prévia – influenciam, positiva ou negativamente, o desempenho do reforço em relação à carga máxima resistida, rigidez e ductilidade.

Além disso, pretende-se através desta pesquisa dar continuidade aos trabalhos experimentais da linha de pesquisa sobre concreto têxtil formada em 2014 pela UFRGS, a CONTEXT. Através da identificação das dificuldades iniciais, limitações, adaptações necessárias e outros fatores, será possível dar melhor embasamento para as futuras pesquisas desenvolvidas no LEME.

1.3.2. Objetivos específicos

O presente trabalho tem como objetivos específicos:

- a) verificar se a fissuração prévia da viga afeta a eficiência do reforço quando comparada a uma viga íntegra que recebeu o mesmo reforço;

- b) verificar se o reforço com 3 e 7 dias de cura contribui para o aumento da capacidade resistente da viga;
- c) verificar se há diferença no desempenho entre as vigas reforçadas com diferentes números de camadas;
- d) verificar se o resultado obtido no experimento apresenta valores compatíveis, com pouca variabilidade, ao desempenho estimado teoricamente;
- e) verificar se o têxtil nacional estudado apresenta resultados satisfatórios para emprego do têxtil como reforço estrutural;
- f) verificar se as vigas reforçadas apresentam um ganho de capacidade resistente quando analisado o Estado de Limite de Serviço de Deformação Excessiva da NBR 6118 (2014);
- g) verificar qual é o desempenho de um têxtil nacional quando comparado a materiais similares empregados em outras pesquisas encontradas na literatura.

1.4. ESTRATÉGIA DE PESQUISA (DELIMITAÇÕES)

O presente trabalho propõe-se a executar o reforço de vigas de concreto armado com diferentes configurações. O projeto foi dividido em três lotes destinados as variáveis de pesquisa e um lote de vigas testemunho destinado a estabelecer uma referência. Cada lote irá investigar uma variável de maneira isolada. Eventuais cruzamentos de informações entre os lotes serão realizados para expandir a análise dos resultados e obter mais conclusões. Além disso, foi executado primeiramente um teste piloto para explorar algumas possibilidades de insumos e características de execução, contribuindo para definir as condições ideais do programa experimental.

A altura das vigas foi definida com a intenção de explorar ao máximo o potencial do têxtil empregado. Isso foi feito através de um estudo de sensibilidade da altura em função do diâmetro das armaduras longitudinais.

Por se tratar de um estudo exploratório, optou-se por não incluir como variável a matriz cimentícia de fina granulometria utilizada para elaboração do compósito, tratando-se apenas de um elemento construtivo para análise do desempenho do têxtil adotado. Além

disso, buscou-se evitar que a ruptura do reforço se desse por falta de aderência entre a matriz e o substrato, de tal forma que o experimento permitisse analisar o desempenho do têxtil propriamente dito. Para isso, o tratamento superficial das vigas foi o jateamento, técnica mais utilizada e indicada em pesquisas da área, e foi adotada uma argamassa com alto desempenho em termos de aderência e resistência, não levando em consideração a composição ideal da matriz para maior compatibilidade com o têxtil visando sua durabilidade a longo prazo.

1.5.LIMITAÇÕES

As limitações da pesquisa são relacionadas principalmente a restrição do tempo de desenvolvimento do trabalho e da estrutura do laboratório, conforme apresentadas a seguir:

- Foram realizadas apenas 2 repetições para cada combinação do programa experimental;
- Os tamanhos das vigas foram definidos respeitando a viabilidade de seu manuseio no laboratório, ou seja, com um peso inferior a 100 kg e limitada pelas dimensões da prensa, correspondente a um comprimento máximo de 1,5 m e largura de 12 cm;
- Devido à limitada capacidade da argamassadeira e o tempo de vida da argamassa, foi necessário fazer uma mistura isolada para cada viga reforçada;
- Devido à disponibilidade limitada de extensômetros, apenas parte do programa foi instrumentado para obtenção das deformações específicas;
- O tipo de têxtil a ser estudado foi o de fibra de vidro álcali-resistente, uma vez que é o único tipo de têxtil não metálico comercializado no mercado nacional;
- O têxtil utilizado não foi caracterizado, pois os ensaios teriam de ser feitos em laboratórios parceiros ao LEME com a produção de elementos de fixação e de aquisição de dados adequados, o que não foi possível no tempo de desenvolvimento do presente trabalho. Quando necessário, utilizaram-se os dados fornecidos pelo fabricante.

1.6. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente pesquisa foi estruturada em cinco capítulos descritos a seguir:

O primeiro capítulo apresenta a introdução do tema, a relevância do estudo e os objetivos a serem atingidos. Incluiu-se ainda uma visão geral da proposta de pesquisa, sua estratégia e suas limitações.

O segundo capítulo contém uma revisão bibliográfica sobre a técnica do concreto têxtil e de sua aplicação como reforço estrutural. Relata-se de maneira sucinta a origem do concreto têxtil, sua definição, tópicos conceituais relevantes para pesquisa, os principais estudos desenvolvidos e as lacunas de conhecimento nessa área.

No terceiro capítulo é apresentado o programa experimental desenvolvido na pesquisa, bem como as informações do planejamento e execução, além de todas as premissas adotadas nas diversas etapas do trabalho.

No quarto capítulo consta a apresentação e discussão dos resultados obtidos durante o estudo.

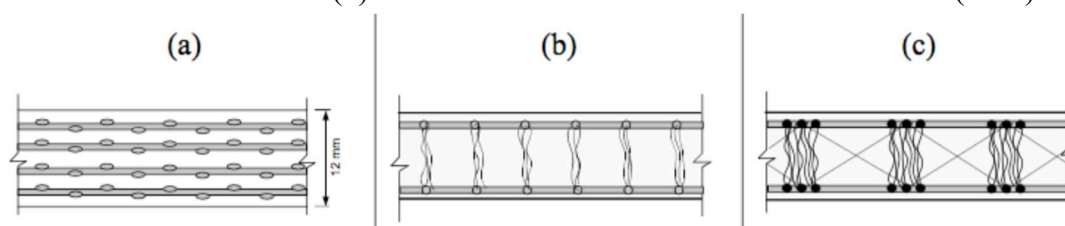
O quinto e último capítulo é composto pelas conclusões obtidas no trabalho e inclui sugestões para futuros estudos.

No Apêndice estão incluídos dados e resultados mais detalhados que complementam o conteúdo abordado nesse trabalho.

2. CONCRETO TÊXTIL

O concreto têxtil consiste em um novo tipo de compósito com aplicação estrutural na construção civil. Naaman (2010, p. 5), define concreto têxtil como um tipo de concreto armado formado pela combinação de uma matriz usualmente composta por cimento hidráulico e por camadas de têxteis de duas dimensões contínuos, ou ainda de três dimensões, que devem ter ao menos uma camada próxima a uma das faces da estrutura, conforme apresentado na Figura 1. O autor inclui ainda em sua definição que os têxteis são feitos de materiais como polímeros, sintéticos, metálicos, orgânicos ou outros adequados à matriz e, do mesmo modo, a matriz deve possuir composição compatível com a armadura de têxtil sendo capaz de envolvê-la.

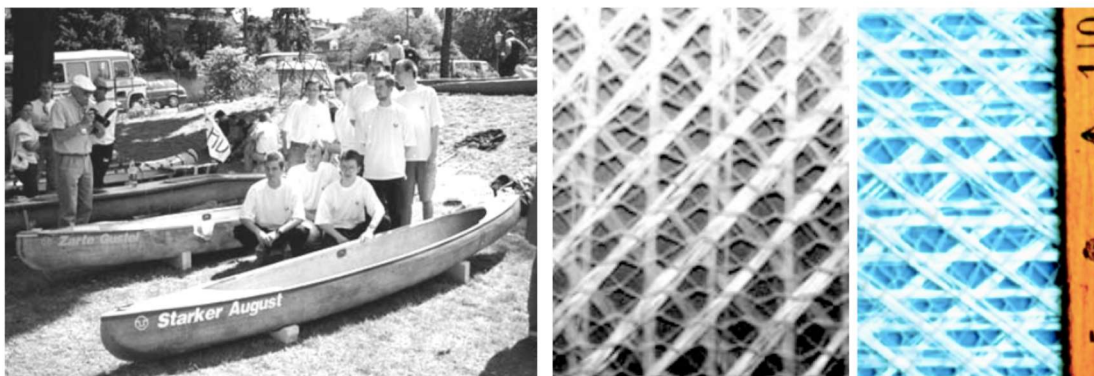
Figura 1. Seções típicas de concreto têxtil com: diversas camadas de reforços de têxteis bidimensionais (a) ou com uma camada de têxtil tridimensional (b e c).



(fonte: NAAMAN, 2010, p. 5)

A ideia de substituir o reforço convencional de aço por um reforço têxtil surgiu no início da década de 80. Em 1996 um barco de concreto utilizando têxteis como armadura foi construído para uma competição em Dresden na Alemanha, a “Concrete Canoe Regatta”, na qual teve êxito e foi premiado, conforme Figura 2. Esse evento chamou atenção para o uso desse material inovador, mostrando seu grande potencial (SCHEERER, SCHLADITZ e CURBACH, 2015).

Figura 2. À esquerda: primeiros barcos de concreto têxtil, à direita: malha de fibras de vidro álcali-resistentes.



(fonte: SCHEERER, SCHLADITZ e CURBACH, 2015, p. 19)

Pesquisas relacionadas ao Concreto Têxtil foram desenvolvidas em diferentes locais, como na Inglaterra, em Israel e no Japão. Entretanto, os maiores avanços da tecnologia do concreto têxtil foram obtidos entre 1999 e 2011, na Alemanha, com o início de dois grandes Centros Colaborativos de Pesquisa (CRC): o CRC- SFB 532 – Concreto têxtil – bases para o desenvolvimento de uma nova tecnologia, desenvolvido na Universidade de Aachen; e o CRC – SFB 528 – Reforços têxteis para reforço e reparo estrutural, desenvolvido na Universidade de Tecnologia de Dresden (BRAMESHUBER *et al.*, 2006).

Pode-se destacar como contribuições significativas à pesquisa do concreto têxtil as publicações do RILEM:

- REPORT 36 - Relatório Estado da Arte do Concreto Têxtil (BRAMESHUBER, 2006);
- PRO 50 - referente às publicações do 1ª Conferência Internacional de Concreto Têxtil (ICTRC) (HEGGER, BRAMESHUBER e WILL, 2006);
- PRO 75 - referente às publicações da Conferência Internacional em Ciências dos Materiais e da 2ª Conferência Internacional de Concreto Têxtil (ICTRC) (BRAMESHUBER, 2010);
- PRO 98 - referente as publicações do 11º Simpósio Internacional de Ferrocimento e a 3ª Conferência Internacional de Concreto Têxtil (ICTRC) (BRAMESHUBER, 2015);

- TC 232-TDT – referente à recomendação para Métodos de teste e projeto do Concreto têxtil (BRAMESHUBER, 2016).

O avanço nas pesquisas do cenário internacional cresce em ritmo acelerado assim como a popularização do concreto têxtil. Ao longo de anos de pesquisa é possível encontrar a utilização efetiva do concreto têxtil em diversas obras, como execução de fachadas, lajes de varandas, painéis de proteção contra ruídos, pontes, reforço em pontes, elementos estruturais e diversas outras aplicações (HEGGER *et al.*, 2006; SCHEERER, SCHLADITZ e CURBACH, 2015; PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 5;450). Mesmo que ainda não exista ampla regulamentação para essa técnica construtiva, já existe um posicionamento da indústria internacional quanto à produção de têxteis de fibra de carbono e de fibra de vidro AR (SCHEERER, SCHLADITZ e CURBACH, 2015, p. 28; DENARDI, 2016). De fato, é possível encontrar empresas como VETROTEX, SOLIDIAN, NIPPON e ADFORS que comercializam têxteis voltados para essa finalidade.

No âmbito brasileiro, ainda existem poucos trabalhos na área (RAMBO, 2016; DENARDI, 2016; MORASSUTTI, 2016; NORA, 2018), onde fica evidente a ausência de produtos nacionais desenvolvidos para emprego do concreto têxtil. A indústria da construção civil do Brasil ainda desconhece esse compósito como solução estrutural ou mesmo de reforço. O material comercializado que mais se aproxima de uma armadura têxtil são as telas de fibra de vidro AR fabricadas para finalidades não estruturais como fixação de costados de mármore, ancoragem de mosaicos, reforço estrutural de placas cimentícias, correção de trincas, reforço estrutural para pisos, execução de laminados com resina, revestimento de fachadas, prevenção e correção de fissuras. Mesmo considerando as telas com características técnicas não estruturais, foram encontradas poucas empresas que trabalham com esse material: TEXIGLASS, FIBERTEX, CENTROPLAC e TEGAPE. Dentre elas, destaca-se o têxtil adotado para a pesquisa, o AR-360-RA-04 da empresa TEXIGLASS, que tem dados técnicos que se aproximam dos têxteis utilizados nas pesquisas internacionais em termos de gramatura e resistência à tração.

2.1.1. NOMENCLATURA

A nomenclatura adotada para essa técnica inovadora ainda é muito variada na literatura. O termo concreto têxtil de forma generalizada faz referência a um concreto que possui como armadura um material têxtil, entretanto variações do emprego dessa técnica geraram diferentes denominações. Nas bibliografias internacionais os termos mais recorrentes são *Textile Reinforced Concrete (TRC)* e o *Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM)*.

Donnini, Corinaldesi e Nanni (2016), apresentam uma diferenciação na nomenclatura entre dois tipos de emprego das armaduras têxteis, um como reforço principal do elemento estrutural e outro como um instrumento de aumento da capacidade resistente de um elemento de concreto armado convencional. Eles definem *TRC* como um compósito formado de têxteis utilizado para produzir estruturas leves como cascas finas, painéis de revestimento, sistemas de fachada ventiladas e outros produtos manufaturados, ou seja, produtos novos. Sendo assim, definiu-se que para este trabalho será utilizado o termo Concreto Têxtil (CT), como equivalente ao nome *TRC*, para denominar o compósito formado por matriz de cimento de fina granulometria reforçada com camadas de têxteis não metálicos, onde estes exercem a função de armadura e dispensam o uso da tradicional armadura de aço do concreto armado.

A outra aplicação da mesma técnica que é voltada para reparo e reabilitação de estruturas de concreto e alvenaria é denominada como *FRCM*, podendo ser traduzida para o português como Matriz Cimentícia Reforçada com Fibras. Além do termo *FRCM*, diversos trabalhos utilizam a nomenclatura *Textile Reinforced Mortar (TRM)*. Com a intenção de associar o termo “têxtil” ao nome da técnica de reforço utilizada no presente estudo, optou-se pela nomenclatura Argamassa Reforçada com Têxtil, equivalente em português ao nome *TRM*, para denominar o compósito formado por matriz de cimento de fina granulometria reforçada com camadas de têxteis não metálicos aplicados externamente a um elemento estrutural, onde exercem a função de reforço estrutural ou reparo de estruturas deterioradas.

2.1.TÊXTEIS

O termo têxtil, traduzido livremente do inglês “*textile*”, faz referência a tecidos ou outro produto fabricado que sejam formados por filamentos, naturais ou sintéticos. Existe um vocabulário específico utilizado na literatura para descrever as diferentes formas de arranjo dessas fibras, que irão basicamente se constituir de filamentos que, dependendo da combinação, formam uma malha aberta flexível (ALDEA, GRIES e ROYE, 2006). Comumente podem-se utilizar termos como malha, tela ou tecido para fazer referência ao têxtil.

O relatório do estado da arte da RILEM apresenta algumas definições que facilitam a descrição dos têxteis e são reproduzidas na literatura de maneira usual (BRAMESHUBER, 2006). Destacam-se abaixo os mais utilizados para compreensão de dados utilizados e a respectiva tradução livre para o português:

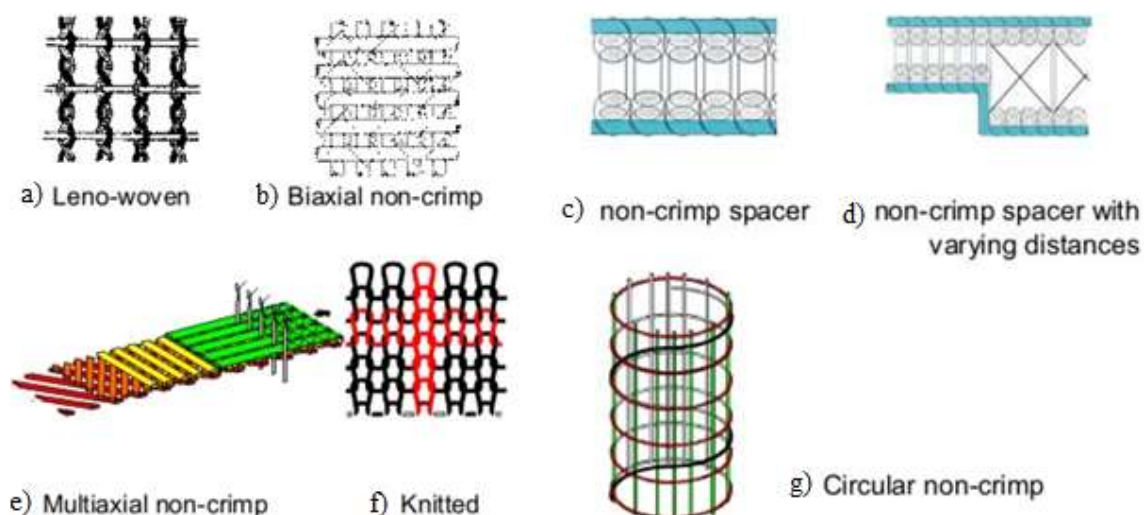
- *Fibre* – Fibra: unidade de matéria prima, podendo ser natural ou sintética. É caracterizada por ter seu comprimento maior ou igual a 100 vezes seu diâmetro ou espessura.
- *Filament* – filamento: uma fibra com grande comprimento que pode ser encontrada naturalmente ou extrudada;
- *Yarn* – fio: constitui no agrupamento de filamentos que são torcidos, alinhados ou a combinação dos dois formando um fio que poderá ser tecido através de variadas técnicas;
- *Rovings* – feixe: trata-se de um tipo de agrupamento de filamentos que pode ser caracterizado como uma tira condensada que foi torcida e dobrada, estando entre um fio e uma tira.
- *Strands* – cordão: atribuído para descrever uma fibra, filamento ou ainda formas de agrupamentos de filamentos, como tiras, feixes, fios, mechas, cordas e tranças.
- *Tex* – Tex: trata-se de uma unidade utilizada para expressar a densidade linear de um elemento de têxtil (fibra, fio, filamento, feixe), representando a massa em gramas de um quilômetro do elemento;
- *Warp* – urdume ou fio de urdidura: é constituído pelos fios do tecido que correm longitudinalmente e paralelos a borda, sendo entrelaçado pelos fios na outra

direção. Em geral, os fios de urdidura são posicionados na mesma direção do esforço solicitante;

- *Weft* - trama: é constituído por todos os fios que correm perpendicularmente ao urdume e vão de uma borda a outra do tecido.

Na Figura 3 são apresentados alguns tipos de têxteis tecidos por diferentes técnicas. Independente da técnica empregada é necessário que o arranjo crie uma estrutura aberta e com estabilidade quanto ao deslocamento dos filamentos. Isso permitirá uma permeabilidade e um envelopamento adequado pelo concreto (GRIES *et al.*, 2006, p. 11).

Figura 3. Exemplos de têxteis fabricados por diferentes técnicas. Tradução livre para nomenclatura: a) transpassado tipo Lenon, b) biaxial sem pregas, c) espaçado sem pregas, d) espaçado sem pregas com distâncias variáveis, e) multiaxial sem pregas, f) tricotado e g) circular sem pregas.



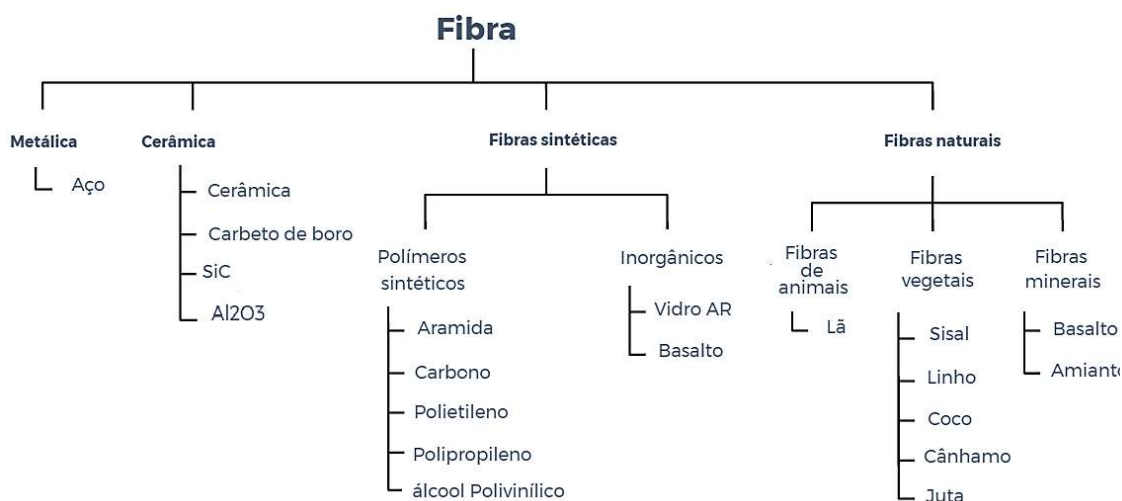
(fonte: adaptado de GRIES *et al.*, 2006, p. 17)

Não existe um padrão definido para a distância entre os fios do têxtil. É importante que a abertura seja maior do que a dimensão máxima do agregado utilizado na matriz cimentícia, garantindo assim uma penetrabilidade e, conseqüentemente, uma boa aderência do têxtil com a matriz. Em geral, as armaduras têxteis apresentam aberturas inferiores a 30 mm (KULAS, 2015).

2.1.1. Tipos de fibras

Existem diversos tipos de fibras, conforme exposto na Figura 4, porém nem todas são próprias para serem empregadas como armadura de um sistema estrutural ou de reforço. As propriedades das fibras podem variar significativamente, conforme pode ser observado na Tabela 1. De maneira geral, é importante que a fibra tenha elevada tenacidade, um módulo de elasticidade muito maior do que a matriz de concreto e permita a construção de um têxtil com elevada deformação última. Além disso, a fibra precisa resistir permanentemente e sem perda de propriedades a um ambiente alcalino (GRIES *et al.*, 2006, p. 16).

Figura 4. Tipos de fibras existentes.



(fonte: adaptado de PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 15)

Tabela 1. Propriedades de alguns tipos de fibras.

<i>Tipo de Fibra</i>	<i>Resistência à tração (MPa)</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	<i>Deformação última (%)</i>	<i>Densidade (g/cm³)</i>
Vidro AR	2.500	70	3,6	2,78
Carbono	3.500-6.000	230-600	1,5-2,0	1,60-1,95
Aramida	3.000	60-130	2,1-4,0	1,4
Polietileno	250	1,4-2,2	10-15	0,95
Polipropileno	140-690	3-5	25	0,9-0,95
Dyneema (HDPE)	2.000-3.500	50-125	3-6	0,97
PVA	880-1.900	25-41	6-10	1,3

Tabela 1. Propriedades de alguns tipos de fibras.

<i>Tipo de Fibra</i>	<i>Resistência à tração (MPa)</i>	<i>Módulo de Elasticidade (GPa)</i>	<i>Deformação última (%)</i>	<i>Densidade (g/cm³)</i>
Basalto	3.000-4.840	79,3-93,1	3,1	2,7
Amianto	620	160	-	2,55
Sisal	600-700	38	2-3	1,33
Metal	1.200	200	3-4	7,85
Cerâmica (boro/silicone)	800-3.600	360-480	0,79	2,4-2,6

(fonte: adaptado de PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 21)

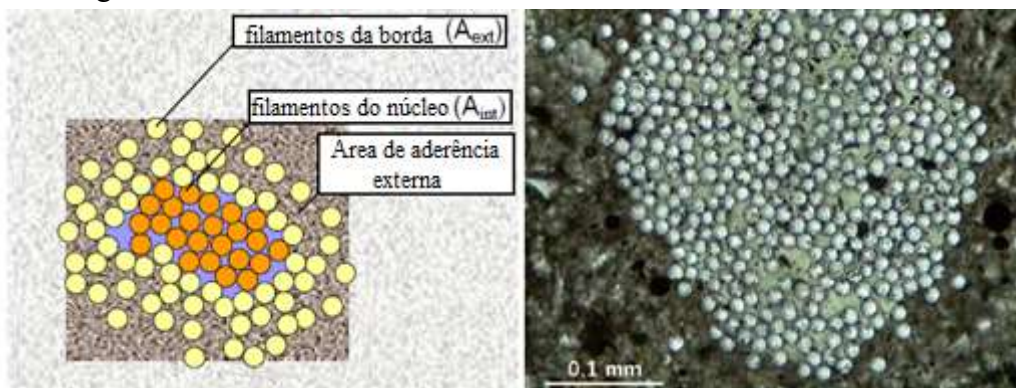
Fibras que se adequam para aplicação de reforço podem ser metálicas, minerais, naturais ou sintéticas. Como exemplo, o aço é classificado como fibra metálica e vidro e basalto como fibras minerais. As fibras naturais são materiais contendo celulose, como sisal, juta ou linho. Por último, as fibras sintéticas podem ser exemplificadas pelo polipropileno, carbono, aramida e poliparafenilenbenzobisoxazol (PBO) (ARBOLEDA, 2014, p. 10).

Os têxteis não metálicos mais utilizados para execução do concreto têxtil são os formados por fibras de carbono, aramida e vidro AR (DENARDI, 2016, p. 94). Porém existem outros tipos de fibras que podem ser utilizadas e também são estudadas para essa finalidade, como a fibra de basalto (RAMBO, 2016; LARRINAGA *et al.*, 2010), de PBO (D'AMBRISI e FOCACCI, 2011; JABR, EL-RAGABY e GHRIB, 2017; GIL, ESCRIG e BERNAT, 2014) e as metálicas (LARRINAGA *et al.*, 2010; GIL, ESCRIG e BERNAT, 2014).

2.1.2. Relação da impregnação com o comportamento dúctil do fio

Como os fios do têxtil são formados por milhares de filamentos agrupados, é inevitável que parte desses filamentos não tenha contato com a matriz cimentícia, conforme demonstrado na Figura 5. Dessa forma, a aderência entre o têxtil e a matriz é dada apenas pelos filamentos externos, de modo que os filamentos do núcleo do fio podem correr facilmente apenas com um pequeno atrito entre os filamentos (REINHARDT *et al.*, 2006).

Figura 5. Filamentos com e sem aderência com a matriz cimentícia.

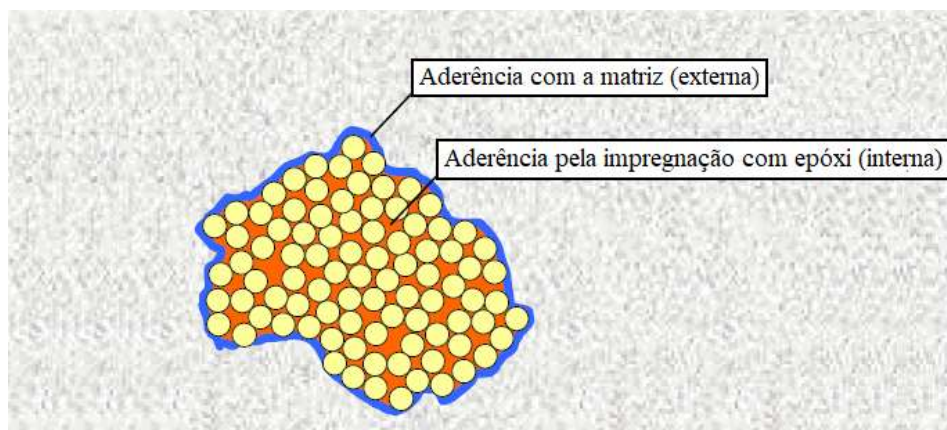


(fonte: adaptado de REINHARDT *et al.*, 2006, p. 84)

Devido a essa configuração, apenas os filamentos aderidos à matriz absorvem o carregamento, de modo que apenas cerca de 30 a 35% dos filamentos são ativados. Uma alternativa para garantir a aderência dos filamentos do núcleo é realizar uma impregnação, que consiste em aplicar um material que consiga penetrar mais profundamente no fio. Um dos materiais que apresenta bons resultados para essa finalidade é a resina epóxi e o butadieno-estireno (KULAS, 2015).

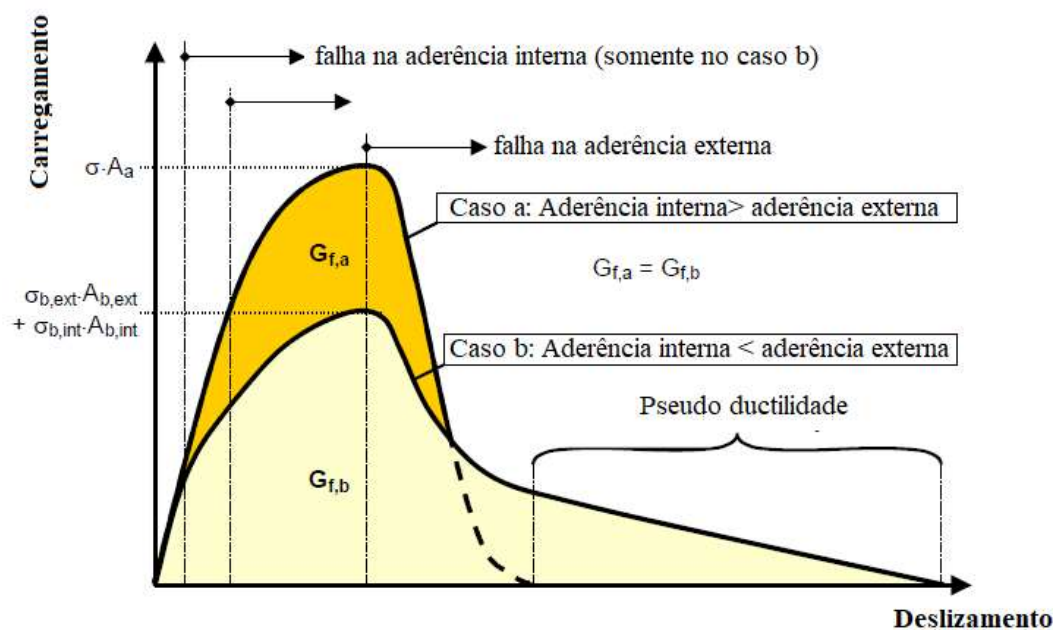
Um têxtil que possui o núcleo de seus filamentos mais aderidos internamente do que externamente, Figura 6, apresenta uma resistência à tração mais elevada do que um que com maior número de filamentos que deslizam livremente. Em contrapartida, a queda da resistência ocorre rapidamente e com uma deformação menor, deixando o têxtil com reduzido comportamento dúctil como é apresentado na Figura 7 (REINHARDT *et al.*, 2006).

Figura 6. Representação da aderência interna e externa dos filamentos de um fio de têxtil.



(fonte: adaptado de REINHARDT *et al.*, 2006, p. 85)

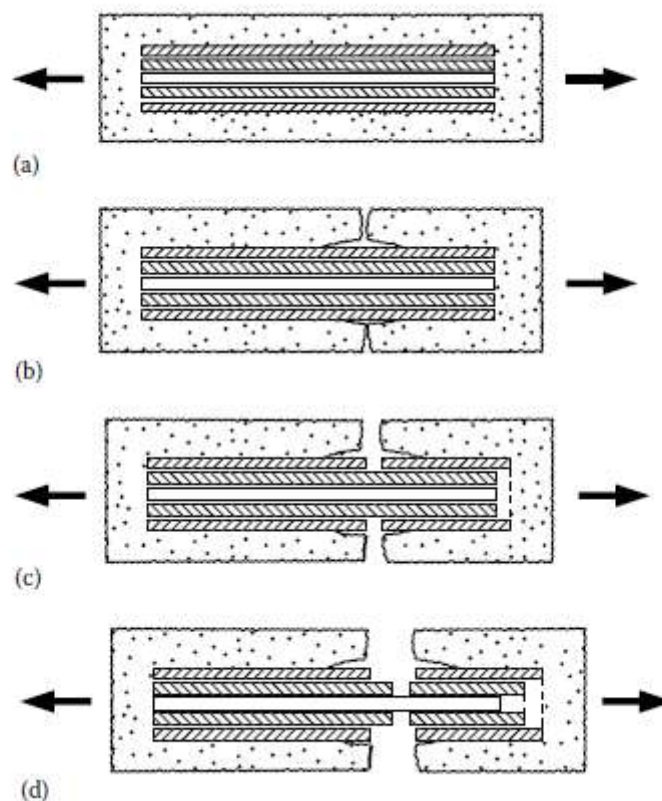
Figura 7. Representação esquemática do deslizamento do têxtil dentro da matriz quando submetido à tração.



(fonte: adaptado de REINHARDT *et al.*, 2006, p. 85)

As diferentes características de aderência nos filamentos internos e externos fazem com que o fio quando submetido a um carregamento de tração tenha seus filamentos rompidos de fora para dentro, um mecanismo de falha denominado ruptura telescópica, ilustrado na Figura 8 (DONNINI, CORINALDESI e NANNI, 2016, p. 221).

Figura 8. Representação da ruptura telescópica em um fio formado por filamentos de fibra.



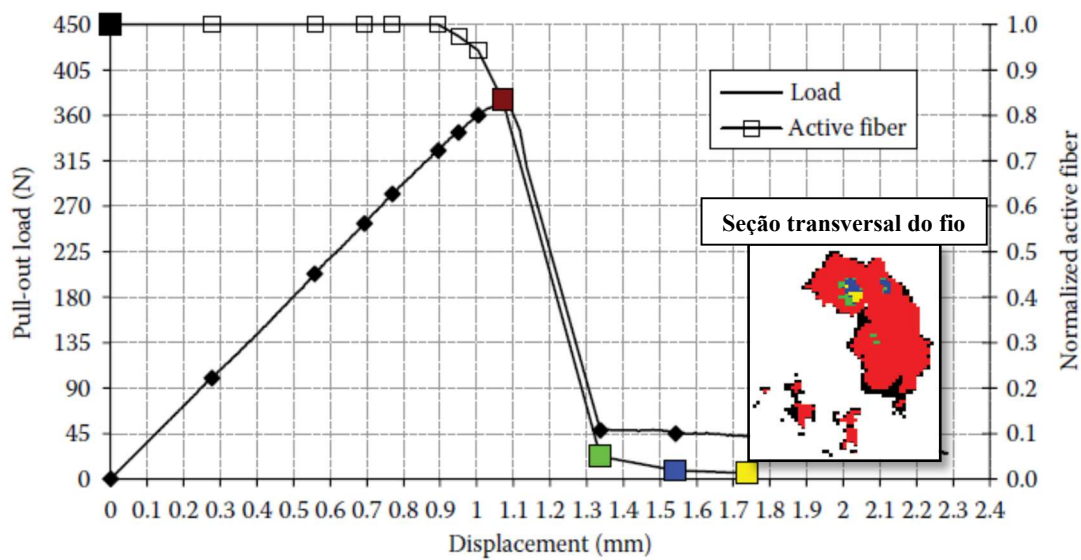
(fonte: BARTOS, 1987, *apud* PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 111)

No processo de ruptura telescópica ocorre que apenas parte dos filamentos do fio estão ativos, contribuindo para resistir à solicitação imposta. De acordo com o nível de aderência dos filamentos externos às camadas mais internas, tem-se um maior ou menor número de filamentos ativos simultaneamente. A proporção de filamentos ativos em diferentes níveis de carregamento influencia diretamente o modo de ruptura, que pode ser frágil ou apresentar uma pseudo-ductilidade devido ao processo de ruptura telescópica (PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 112).

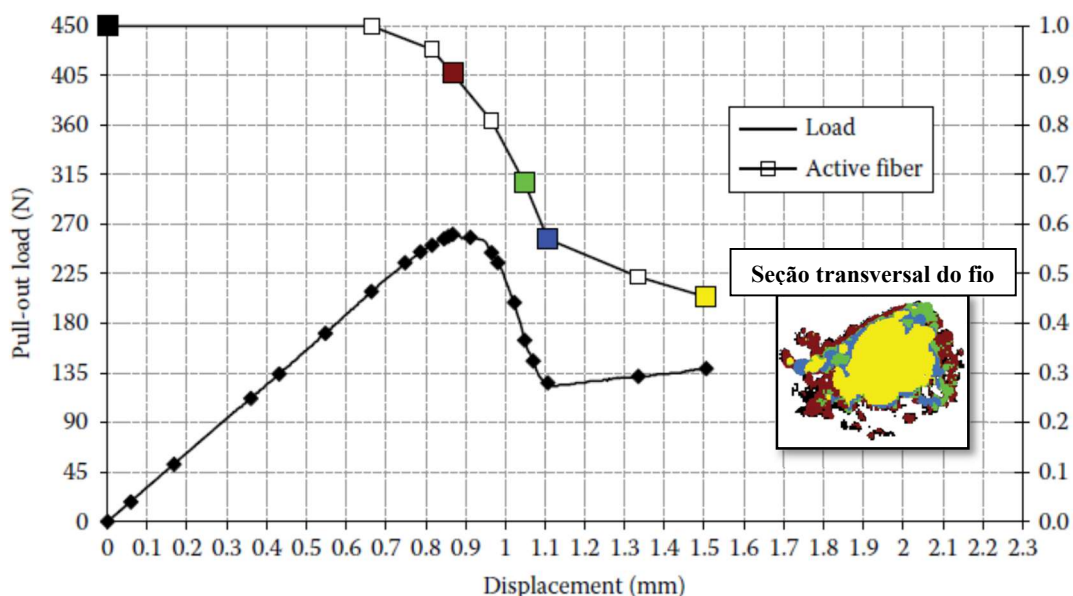
A Figura 9 mostra as duas situações de ruptura conforme o número de filamentos ativos. Quando existe um número maior de filamentos ativos o fio suporta carregamentos mais altos, porém ao ocorrer a ruptura desses filamentos há uma queda brusca no carregamento suportado, caracterizando o comportamento frágil (Figura 9-a). Por outro lado, quando existe um número menor de filamentos ativos, o fio apresenta a ruptura dos primeiros filamentos a um carregamento inferior, porém essa perda de capacidade de suporte ocorre

mais lentamente devido à ruptura telescópica, caracterizando um comportamento mais dúctil (Figura 9-b).

Figura 9. Comportamento frágil (a) e dúctil (b) durante ensaio de arrancamento devido a uma maior e menor aderência, respectivamente, entre os filamentos internos do fio. A ruptura dos filamentos ativos está indicada no gráfico do carregamento (eixo vertical) pelo deslocamento (eixo horizontal) por quadrados de mesma cor da imagem da seção transversal do fio integrante da imagem.



(a)



(b)

(fonte: adaptado de BENTUR, 2010, e YARDIMCI, 2011, *apud* PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 113-114)

2.1.3. Características mecânicas

As características mínimas necessárias para o têxtil exercer uma função estrutural são elevadas tenacidade da fibra, elevada deformação última e um módulo de elasticidade muito mais alto do que a matriz utilizada no concreto têxtil, de modo que quando ocorra a fissuração da matriz o elemento estrutural não tenha uma redução drástica de sua rigidez. Outras exigências para o bom desempenho do têxtil referem-se ao baixo relaxamento sob carregamentos, uma boa e permanente aderência à matriz e baixo custo de fabricação (GRIES *et al.*, 2006, p. 11).

O processo de fabricação de um têxtil pode se dar por diversas técnicas o que gera denominações diferentes para cada tipo, como por exemplo, os têxteis tricotados, transpassados, trançados, não costurados, colados, entre outros (DENARDI, 2016, p. 41). Cada técnica possui uma maneira específica de conectar os fios e feixes formando o tecido. A forma como é realizada a junção afeta a geometria do próprio fio e isso impacta o seu desempenho quando solicitado. Fios que não mantêm uma geometria retilínea apresentam uma eficácia reduzida, portanto para um melhor desempenho deve-se priorizar utilizar o maior número possível de fios retilíneos na direção do carregamento (PELED e BENTUR, 2000). A geometria do têxtil também afeta a penetrabilidade da matriz, interferindo significativamente na aderência desta com os filamentos. Quando se utiliza um feixe com múltiplos filamentos, os pontos de junção com os fios no sentido transversal promovem um aperto e fazem com que os filamentos permaneçam firmes e muito próximos, evitando que ocorra uma abertura entre eles e por sua vez impeçam que a matriz permeie os filamentos mais internos. Dependendo do tipo de junção, número de filamentos, espaçamento e outros fatores adotados na técnica, o têxtil poderá ter maior ou menor aderência com a matriz (PELED *et al.*, 2008, p. 174-175).

As propriedades relacionadas à aderência observadas em um filamento isolado imerso em uma matriz não são equiparadas com as de um agrupamento de filamentos. Isso ocorre devido à limitada penetração dos produtos de hidratação no núcleo de um fio que permitem que filamentos internos não estejam aderidos (PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 105). A Tabela 2 apresenta alguns resultados obtidos em pesquisas sobre a eficiência da aderência interna dos filamentos. É apresentada a comparação entre o desempenho de um conjunto de filamentos e o de um único filamento através de uma tensão equivalente (T), obtida pela relação da força de arrancamento

dividida pela área superficial de todos os filamentos em questão. É possível observar de acordo com os dados da Tabela 2 que existe uma redução considerável do desempenho devido ao agrupamento de filamentos. A fibra kevlar possui o pior aproveitamento de apenas 4,4% e a de polietileno apresenta o melhor resultado, porém ainda com um fator de aproveitamento abaixo de 50%.

Tabela 2. Efeito do agrupamento de filamentos na formação de fio quanto a aderência à matriz.

<i>Fibra</i>	<i>Diâmetro do filamento (μm)</i>	<i>Número de filamentos no fio</i>	<i>$T_{\text{filamento}}$ (MPa)</i>	<i>T_{fio} (MPa)</i>	<i>$T_{\text{fio}}/T_{\text{filamento}}$</i>	<i>Referência</i>
Nylon	27	220	0,16	0,051	0,321	Li and Wang (1990)
Kevlar	12	1000	4,50	0,198	0,044	
Polietileno	38	20	1,02	0,328	0,322	
		40	1,02	0,502	0,492	
		57	1,02	0,505	0,495	
		118	1,02	0,352	0,352	
Vidro	12,5	204	1,1	0,38	0,350	Oakley e Proctor (1975)

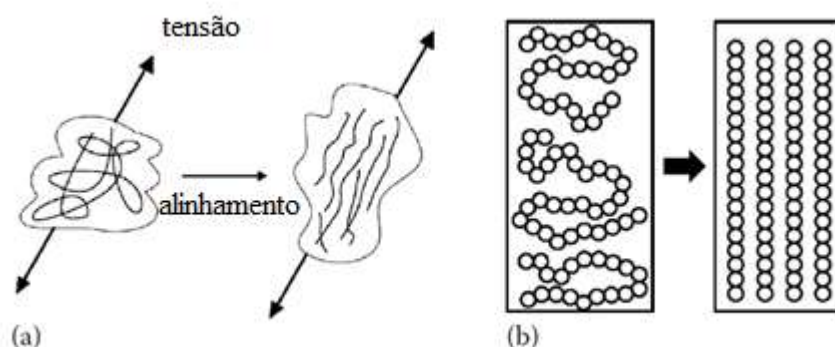
(fonte: Adaptado de BENTUR e MINDESS, 2007, *apud* PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 106)

Além da questão da reduzida aderência dos filamentos internos, ainda existe o efeito de redução de desempenho do fio propriamente dito. Banholzer, Brockmann e Brameshuber (2006) mostram que um fio composto por múltiplos filamentos de fibra de vidro AR possui uma resistência de cerca de 700 MPa, enquanto um filamento isolado resiste em torno de 1400 MPa. Essa redução do desempenho quando há o agrupamento de filamentos é atribuída em parte a danos pelo manuseio da amostra do fio e em parte aos desvios estatísticos referentes à escolha do filamento isolado para o ensaio. Além da queda no desempenho, também é observado no estudo que devido à variação da resistência individual dos filamentos que estão agrupados, o fio passa a apresentar um comportamento mais dúctil do que o um filamento isolado (PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 104).

2.1.4. Fios formados por fibras de vidro AR

A fabricação da fibra sintéticas de maneira geral se inicia com o material na sua forma fundida, ou em uma solução, que passa por pequenos orifícios e são construídos em forma de filamentos durante sua solidificação, que pode ser atingida por resfriamento, ar quente ou imersão em banho conforme o tipo de material. No caso de materiais polímeros, esse processo de fabricação proporciona um alinhamento da estrutura do material, Figura 10, o que torna os filamentos muito mais resistentes a tração do que a fibra na sua forma original. Quanto maior esse alinhamento molecular, maior são o módulo de Young (E) e a resistência da fibra e menor sua deformação última. Já as fibras de vidro se diferenciam por serem amorfas e isotrópicas, possuindo propriedades iguais em todas as direções. (PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 17-18)

Figura 10. Alinhamento da estrutura molecular de um polímero durante o processo de fabricação da fibra. a) Contribuição do alinhamento geral e b) arranjo das cadeias da estrutura molecular antes e depois do alinhamento.



(fonte: adaptado de PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 17-18)

As fibras de vidro possuem um comportamento frágil, o que torna sua resistência sensível a defeitos. A maioria dos defeitos das fibras de vidro provocados durante a fabricação ou manuseios são em sua superfície, pois ela é facilmente danificável (PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 18).

As fibras de vidro possuem uma alta resistência a tração considerando sua densidade e um alto módulo de elasticidade considerando seu custo. Essas características as tornam muito adequadas para utilização como fibras de reforço (PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 20).

Cada cordão de fibra de vidro é composto por cerca de 400 a 2000 filamentos que são combinados sem serem torcidos, formando um fio. A fibra de vidro mais econômica e de maior emprego é a fibra do vidro tipo E, denominada assim por sua alta resistividade elétrica. Mas existem também as fibras do tipo S, que possuem alta resistência à tração, e as do tipo C, que têm como característica principal serem resistentes quimicamente. Essas fibras, porém, são sensíveis a ambientes alcalinos, como de matrizes cimentícias que possuem pH entre 12,5 e 13,5 (PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 22).

Como solução desse problema, em 1975, surgiram as fibras de vidro álcali resistentes (AR), que recebem um tratamento de zircônio (ZrO_2) correspondente a uma quantidade de cerca de 15% em massa da fibra. Seus filamentos possuem um diâmetro em torno de 12 a 30 μm (BANHOLZER, BROCKMANN e BRAMESHUBER, 2006). As fibras de vidro AR tem adesão com matrizes cimentícias e possuem um custo relativamente baixo, por isso são muito empregadas como armaduras nos concretos têxteis (PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 22).

Devido as características favoráveis da fibra de vidro, as primeiras pesquisas relacionadas ao concreto têxtil foram realizadas com o emprego de têxtil desse material. Em Dresden, na Alemanha, as pesquisas iniciais foram com fibra de vidro AR, mas depois migraram para explorar o potencial das fibras de carbono. Já em Aachen, o CRC 532 sempre priorizou o uso da fibra de vidro AR, aprofundando os estudos para aplicação desse tipo de fibra (SCHEERER, SCHLADITZ e CURBACH, 2015, p. 24).

2.2.MATRIZ CIMENTÍCIA

A matriz cimentícia utilizada no concreto têxtil precisa ter agregados com diâmetro máximo bem reduzido, em geral menor do que 2 mm. Devido a isso, a matriz cimentícia é muitas vezes chamada de argamassa. Essa restrição do diâmetro máximo do agregado é necessária para que a matriz seja capaz de permear as aberturas do têxtil, envolvendo-o e assim garantir uma boa aderência. Entretanto, essas matrizes são de alto desempenho e possuem propriedades que são características de um concreto estrutural, adquirindo o nome “concreto de fina granulometria” ou “concreto fino” (BRAMESHUBER *et al.*, 2006, p. 29).

O principal fator que determina a composição da matriz do concreto têxtil é a sua reologia pois é fundamental que a matriz permeie o têxtil de maneira eficiente. Para garantir uma penetração adequada são necessários ajustes da fluidez através da adição de agregados finos, superplastificantes e aditivos minerais, principalmente pozolânicos como cinza volante, sílica ativa e metacaulim (PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 170). O uso de aditivos pozolânicos também reflete a preocupação em proporcionar maior estabilidade para o compósito e garantir uma maior durabilidade, principalmente para aqueles formados de fibra de vidro AR (BRAMESHUBER *et al.*, 2006, p. 31).

As matrizes cimentícias empregadas na execução do concreto têxtil podem ser classificadas como de base mineral, modificada por polímeros ou ainda de sistemas alternativos. As matrizes mais utilizadas são as de base mineral, que costumam sempre explorar a fina granulometria e uso de aditivos a fim de garantir a trabalhabilidade ideal e uma boa durabilidade. Já a escolha de um sistema modificado por polímeros consiste no emprego de dispersões poliméricas que são capazes de penetrar mais profundamente os filamentos devido ao tamanho reduzido de suas partículas, em torno de 100 a 200 nm. Além de uma maior penetração, os polímeros também influenciam a aderência direta com o têxtil e proporcionam uma alta resistência química à matriz (BRAMESHUBER *et al.*, 2006, p. 30-33). Cimentos a base de fosfatos e de aluminatos de cálcio são exemplos de sistemas alternativos. Esse tipo de matriz busca mitigar os danos a fibras sensíveis ao ataque de álcalis, como é o caso das fibras naturais e de vidro (PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 173; BRAMESHUBER *et al.*, 2006, p. 33-34).

Além da presença do têxtil no compósito, podem ser adicionadas fibras curtas na matriz cimentícia para aprimorar algumas características do compósito. Isso também melhora a capacidade de suporte do compósito e faz com que o início da fissuração ocorra com uma resistência mais alta. As fibras tornam o compósito mais dúctil e otimizam a abertura e o processo de fissuração, o que garante maior durabilidade e melhores condições de serviço (PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 177).

2.3. CARACTERÍSTICAS DO CONCRETO TÊXTIL

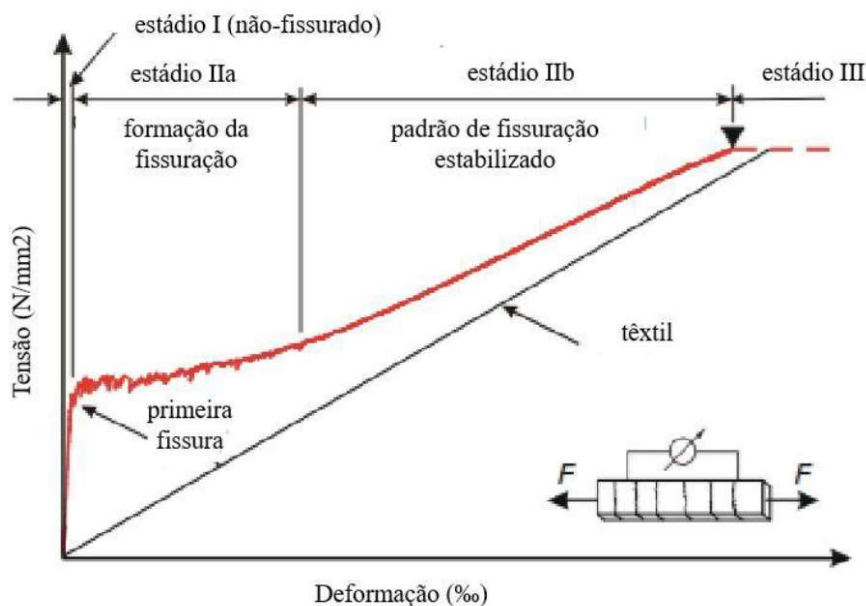
Ao utilizar têxteis formados por fibras não corrosivas, não é necessário construir uma barreira física para proteger o aço da corrosão. Assim a matriz cimentícia na qual o têxtil está imerso precisa apenas garantir uma aderência adequada entre eles. Um revestimento em torno de 10 e 15 mm já garante essa aderência, o que torna possível executar elementos com espessuras reduzidas de 20 e 30 mm, respectivamente (KULAS, 2015).

2.3.1. Propriedades mecânicas do composto

As propriedades mecânicas do concreto têxtil dependem não apenas das características dos seus elementos isolados, matriz e têxtil, mas também da aderência entre eles. Uma vez que os fios são formados por diversos filamentos, também deve ser levado em consideração como se dá a aderência entre a matriz e os filamentos mais internos e entre os próprios filamentos (HEGGER *et al.*, 2006, p. 134).

Com o aumento das tensões de tração impostas ao concreto têxtil, ocorre a fissuração da matriz cimentícia e o esforço passa a ser resistido apenas pelo têxtil. A distribuição de deformação para os filamentos é desigual, devido as diferenças na aderência da matriz com os filamentos internos e externos. A Figura 11 mostra o comportamento teórico típico de um elemento de concreto têxtil. Na fase inicial do carregamento não há fissuração (estádio I), mas assim que o esforço ultrapassa a resistência à tração da matriz cimentícia, forma-se uma primeira fissura e o carregamento nesse ponto passa a ser resistido pelo têxtil, que deve ser capaz de resistir à solicitação imposta. A aderência entre os filamentos e a matriz permite a transferência de solicitação novamente para a matriz, porém com valores superiores à sua resistência, resultando na formação de uma nova fissura e o processo vai se repetindo. Esse mecanismo de fissuração é denominado “múltipla fissuração” (estádio II-a) e nessa etapa verifica-se um ganho de resistência muito baixo. Porém, assim que as fissuras estabilizam, a matriz não influencia mais no desempenho do elemento estrutural, que passa a ser definido apenas pelo têxtil (estádio II-b) (PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 167-168; HEGGER *et al.*, 2006, p. 135). Os têxteis comumente utilizados, que são de vidro AR e de fibra de carbono, têm um comportamento frágil. Sendo assim, o concreto têxtil também apresentará uma ruptura frágil (HEGGER *et al.*, 2006, p. 135)).

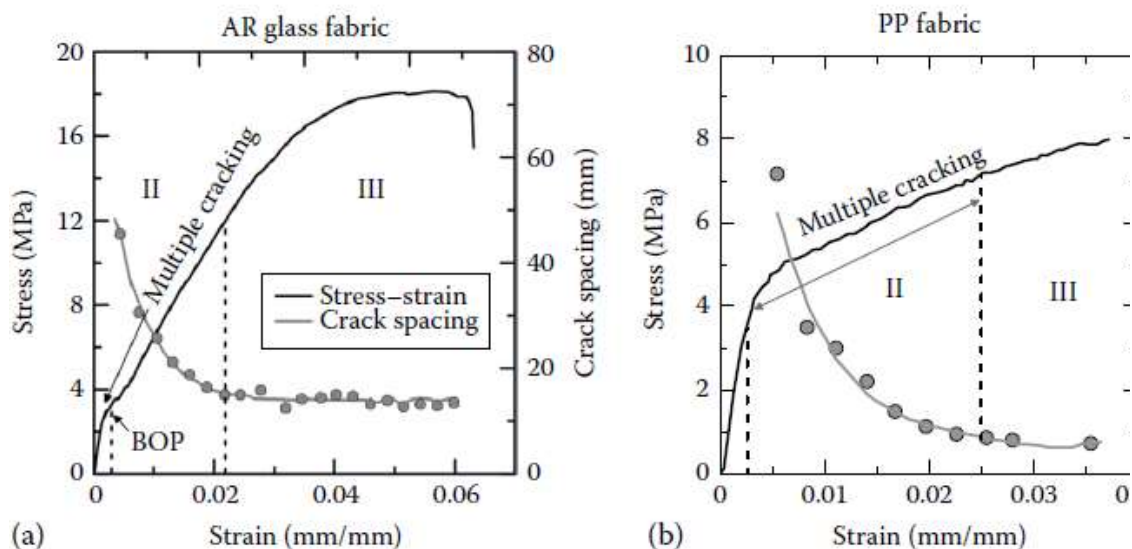
Figura 11. Tensão-deformação teórica do concreto têxtil sob carregamento uniaxial.



(fonte: adaptado de HEGGER *et al.*, 2006, p. 135)

O comportamento da curva de tensão por deformação de um elemento de concreto têxtil irá apresentar algumas variações do modelo teórico apresentado na Figura 11, decorrente das características resultantes da escolha dos materiais utilizados, como tipo da matriz, geometria e material do têxtil e a utilização ou não de impregnação nos fios do têxtil. Uma informação qualitativa que é possível obter da análise da curva de tensão por deformação é como se dá a aderência entre o têxtil e a matriz. Com uma maior aderência, existe uma melhor transferência de carga e isso faz com que a abertura das fissuras seja menor e o compósito tenha um padrão de múltipla fissuração mais denso. Na Figura 12 é possível observar dois comportamentos distintos devido a escolha do têxtil que refletem diretamente em como se dá a fissuração e a ruptura do têxtil, o que influencia o comportamento do elemento em termos de resistência, ductilidade e rigidez (PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 168-169).

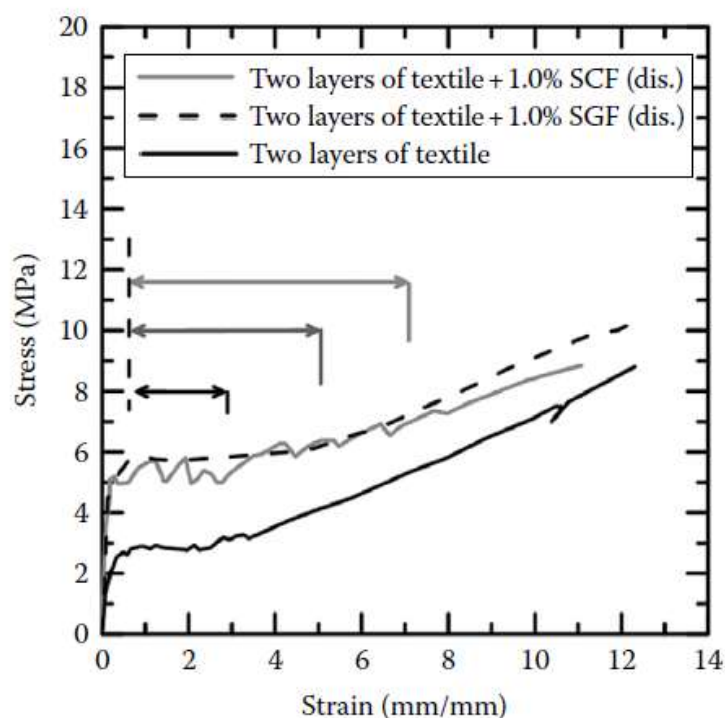
Figura 12. Tensão-deformação de dois elementos de concreto têxtil com (a) têxtil de fibra de vidro AR e (b) têxtil de fibras de polipropileno com destaque para o tamanho da abertura das fissuras durante o carregamento.



(fonte: adaptado de PELED, MOBASHER, 2007, *apud* PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 169)

Assim como o têxtil influencia no comportamento do compósito, modificações na matriz também podem melhorar o desempenho do concreto têxtil. Conforme citado no item 2.2, a adição de fibras curtas na matriz aumenta a tenacidade do compósito e garante um melhor desempenho da curva de tensão-deformação, como exemplificado na Figura 13. Além de aumentar a resistência correspondente a formação da primeira fissura, a adição de fibras garante um aumento da capacidade de deformação durante a fase de múltipla fissuração. (PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 178).

Figura 13. Diferença do comportamento de concreto têxtil submetido a tração quando há adição de fibras curtas na matriz de carbono (SCF) ou de vidro (SGF) em comparação à ausência de fibras curtas.



(fonte: adaptado de BARHUM, 2012, *apud* PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 179)

Peled, Bentur e Mobasher (2017, p. 182) afirmam que a melhora devido a adição de fibras curtas pode ser explicada por vários mecanismos. Primeiramente, a adição de fibras evita defeitos internos uma vez que atuam no controle da retração. Elas também atuam como pontes das microfissuras, o que contribui para conter a fissuração. Acredita-se que as fibras curtas possam influenciar a aderência dos filamentos à matriz, formando ligações adesivas especiais. Por último, tem-se que a própria presença dessas fibras aumenta o grau de reforço.

2.3.2. Principais vantagens

A utilização de uma armadura têxtil garante várias vantagens para o concreto. A possibilidade de empregar o reforço em estruturas curvas próximas a face dos elementos e ainda em diferentes direções de carregamento torna o concreto têxtil muito versátil (GRIES *et al.*, 2006, p. 16). Como os têxteis, com exceção dos metálicos, não são corrosivos, não há necessidade de um envelopamento da armadura para proteção à

corrosão como ocorre com as armaduras de aço, o que reduz significativamente as camadas de cobrimento (KULAS, 2015).

2.4.APLICAÇÃO DO CONCRETO TÊXTIL PARA REFORÇO

O concreto têxtil aplicado como reforço pode ser facilmente comparado com o emprego de tecidos contínuos de fibra de carbono, aramida ou vidro aderidos ao substrato através da aplicação de uma resina. Muitas das desvantagens observadas neste reforço tradicional com uso de resina são resolvidos ao alterar a técnica de construção do tecido formando os têxteis e utilizando uma matriz cimentícia ao invés da resina. Pode-se destacar algumas vantagens como maior proteção ao fogo, facilidade de instalação, baixo custo da matriz, compatibilidade com superfícies úmidas, permeabilidade ao vapor e ausência de liberação de compostos perigosos (LARRINAGA *et al.*, 2010, p. 236)

Larrinaga *et al.* (2010, p. 236), destacam propriedades do concreto têxtil que o fazem ser recomendável para emprego como reforço em estruturas mais antigas, onde a resistência do concreto é usualmente mais baixa. Uma característica da matriz cimentícia é ter baixa resistência à tração, o oposto do têxtil que possui uma tensão última de tração elevada. Devido a essa diferença de tensão, o compósito apresenta fissuras muito antes de começar a solicitar a contribuição das fibras. Com a matriz fissurada, os têxteis atuam como pontes e transmitem o esforço de maneira mais homogênea. Juntamente com esse comportamento, a matriz cimentícia apresenta uma aderência mais baixa quando comparada com outros ligantes orgânicos. Essa configuração torna-se adequada a concretos antigos pois uma vez que os pontos de concentração de tensão são reduzidos, diminui a chance de descolamento de uma capa do substrato que recebeu o reforço (LARRINAGA *et al.*, 2010, p. 236).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Conforme apresentado no capítulo 1, a estratégia experimental do presente trabalho consiste em avaliar vigas de concreto armado reforçadas com ART. Neste capítulo serão apresentadas as variáveis de pesquisa escolhidas, os critérios adotados para escolha dos materiais e procedimentos, a estrutura do programa experimental propriamente dito e a execução de suas etapas.

Parte das definições foram obtidas após a execução de um teste piloto que foi desenvolvido e permitiu uma melhor compreensão de diversos fatores envolvidos no programa experimental. Os detalhes da condução do teste piloto e os resultados encontrados serão apresentados no item 3.10 deste capítulo.

3.1. VARIÁVEIS DA PESQUISA

O programa foi estabelecido com variáveis de 3 níveis, conforme apresentado abaixo.

- Idade de ruptura: 3, 7 e 28 dias após a execução do reforço;
- Número de camadas: execução de 2, 3 e 4 camadas de têxtil;
- Fissuração-prévia: não realizada (0%), por aplicação de carga intermediária (50%) e por aplicação de carga elevada (100%).

3.1.1. Idade de ruptura

A utilização de uma matriz cimentícia é associada usualmente ao período de cura mínimo de 28 dias para garantir o seu desempenho adequado. Porém, quando se trata da execução de um reforço estrutural, existe em geral o interesse de utilização da estrutura reforçada com maior brevidade possível. Considerando que existem argamassas com propriedades que garantem uma elevada resistência inicial, buscou-se investigar se a função exercida pela matriz cimentícia no concreto têxtil já é adequada para garantir a eficiência do reforço mesmo a baixas idades.

Dessa forma, foram estipuladas as idades de 3 e 7 dias para serem comparadas ao tempo de cura de 28 dias do reforço. As resistências à compressão e à tração na flexão da

argamassa empregada foram obtidas nessas mesmas idades para auxiliar a análise de resultados.

3.1.2. Número de camadas

A escolha do número de camadas foi baseada na literatura e nas verificações teóricas de desempenho. Identificou-se que os artigos publicados em geral utilizam entre 1 e 6 camadas de têxteis. Como o presente trabalho tem o viés exploratório e não se possui muitos dados técnicos do têxtil a ser empregado, optou-se por utilizar valores intermediários de 2 a 4 camadas de têxtil.

Para o estudo das demais variáveis foi adotado o número de 3 camadas, permitindo relacionar os dados obtidos entre os lotes e assim reduzir o número de vigas do programa.

3.1.3. Fissuração prévia

A variável fissuração prévia tem a intenção de aproximar o estudo de reforço a uma aplicação de reparo de estruturas deterioradas, no caso, vigas que já apresentam formação de fissuras e que precisam ter um aumento, ou a recuperação, da sua capacidade resistente.

Para estudo dessa variável foram considerados dois níveis de fissuração, um nível extremo, correspondendo a carga em que se caracteriza o escoamento do aço na curva do ensaio de flexão (plastificação no estágio III), e um intermediário, correspondendo a 50% dessa carga. Também nesse lote foi incluída a análise da viga reforçada nas mesmas condições, porém sem ser submetida à fissuração prévia.

3.2. DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS E DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS

3.2.1. Características das vigas

Com o intuito de aproximar a situação estudada a uma situação usual em obras urbanas, definiu-se trabalhar com um concreto com resistência característica à compressão (f_{ck}) de 25 MPa, o mínimo tolerado pela norma NBR 6118 (2014) para a classe II de agressividade. Entretanto, o traço executado durante a concretagem superou esse valor e o valor médio da resistência média à compressão para 28 dias foi de 36,7 MPa, conforme apresentado no item 4.1.1. Adotando a Equação 1 da norma NBR 12655 (2015) para o

cálculo da resistência à compressão característica, obtém-se que o f_{ck} das vigas do programa experimental foi equivalente a 30,1 MPa.

$$f_{cmj} = f_{ckj} + 1,65 \cdot s_d \quad \text{Equação 1}$$

Onde,

f_{cmj} – é a resistência média do concreto à compressão, na idade de j dias, expressa em megapascal (MPa);

f_{ckj} – é a resistência característica do concreto à compressão, na idade de j dias, expressa em megapascal (MPa); e

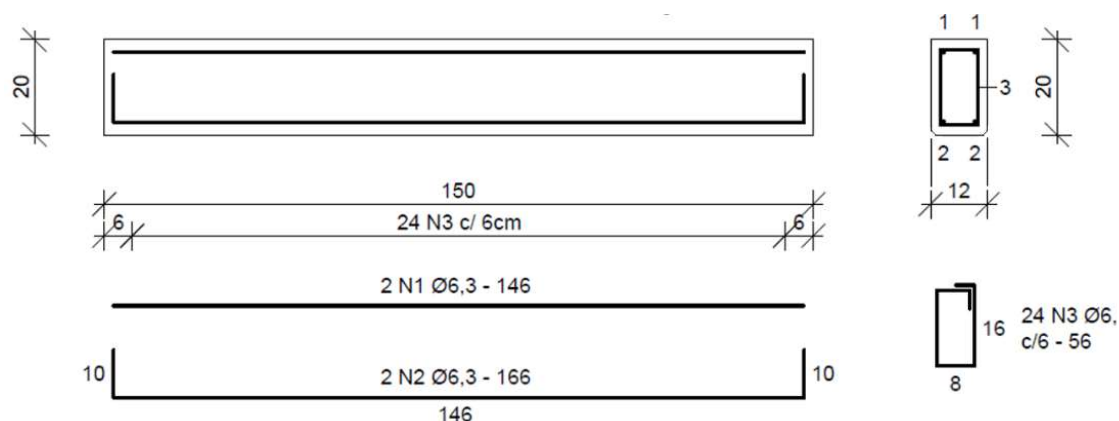
s_d – é o desvio-padrão da dosagem, expresso em megapascal (MPa). Como o desvio padrão da dosagem era desconhecido, adotou-se o valor de 4,0 MPa conforme recomendação da NBR 12655 (2015) para concretos preparados por medidas em massa.

A escolha do tamanho das vigas deu-se principalmente pela limitação de execução do laboratório, que restringiu as vigas a um comprimento de 1,5 m e uma base de 12 cm. A altura da seção e as armaduras adotadas foram obtidas após uma análise de sensibilidade dessas variáveis, conforme detalhado no item 3.4.1. Buscou-se a situação que proporcionasse a maior solicitação do têxtil e assim permitisse uma melhor compreensão do potencial de contribuição do reforço.

Após as verificações das diferentes possibilidades, definiu-se a viga com seção transversal de 120 x 200 mm e comprimento de 1500 mm. Todas as armaduras utilizadas foram de 6,3 mm de diâmetro, sendo 2 armaduras longitudinais positivas, correspondendo a uma taxa de $\rho=0,26\%$, 2 armaduras longitudinais negativas e estribos espaçados a cada 60 mm.

Devido às características das formas da empresa responsável pela concretagem, as vigas tiveram chanfros executados em sua base, reduzindo a largura da seção transversal na face inferior de 12 cm para 10 cm. Devido a essa redução, as tiras recortadas para aplicação do têxtil tiveram a largura limitada a 10 cm, equivalendo a presença de 8 urdiduras. A Figura 14 mostra o detalhamento das vigas.

Figura 14. Detalhamento das vigas do programa experimental, medidas em *cm*.



3.2.2. Concretagem das vigas

Apesar de ser definido que as variáveis estudadas teriam apenas 2 repetições para cada nível, o programa apresentou um elevado número de vigas a ser executado. A execução em laboratório demandaria muitas concretagens e diversos operadores, o que poderia causar muitos ruídos no experimento. Prezando pela homogeneidade das vigas para aumentar a confiabilidade das medições de contribuição do reforço, optou-se pela aquisição de vigas pré-fabricadas de empresa com equipamentos de escala industrial.

3.2.2.1. Propriedades do concreto

A concretagem das vigas foi executada por uma fábrica de pré-moldados localizada em Porto Alegre, RS. Foi utilizada uma central de concreto computadorizada que dosa os materiais em peso. Todas as vigas foram moldadas com concreto de uma única dosagem. Os dados da concretagem estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Dados da concretagem.

Traço teórico:

**fck teórico* $\geq 25\text{MPa}$

Cimento CPV- ARI	Brita 1	Brita 0	Areia fina	Areia média	Água	Aditivo
271 kg	692 kg	231 kg	280 kg	654 kg	185 kg	800 mL

Tabela 3. Dados da concretagem.

Temperatura: 21,9 °C						
Tempo de concretagem: 60 min						
Aditivo: ADVA 527						
Slump: 155 mm						
Umidade da areia fina (u_{af}): 8,80%						
Umidade da areia média (u_{am}): 6,20%						
Corpos de prova moldados manualmente em duas camadas.						
Traço executado:						
Cimento CPV- ARI	Brita 1	Brita 0	Areia fina $u_{af}=8,8\%$	Areia média $u_{am}=6,2\%$	Água	Aditivo
271 kg	692 kg	231 kg	304,64 kg	694,55 kg	119,81 kg	600 mL

As caracterizações dos materiais utilizados para dosagem do concreto foram fornecidas pela empresa responsável pela concretagem e estão apresentadas no APÊNDICE A.

3.2.3. Definição da argamassa

Em relação à definição da matriz cimentícia, ressalta-se que o foco do programa experimental está na análise de desempenho do têxtil adotado e na compreensão inicial do sistema de reforço. É importante ressaltar que o estudo detalhado da matriz não está no escopo do presente estudo. Sendo assim, a premissa básica para escolha da matriz cimentícia foi adotar uma argamassa que possua o melhor desempenho possível, de modo que não seja o fator limitante do desempenho do concreto têxtil. Foi observado na literatura que um problema usual nos reforços de concreto têxtil é a aderência da argamassa ao substrato. Dessa forma, uma das características necessárias era uma boa resistência adesiva à tração.

Outro fator considerado na escolha da argamassa foi a sua trabalhabilidade. Apesar de existir a facilidade de aplicar os reforços nas vigas na posição invertida no programa experimental, em uma situação real de reforço isso não ocorre e a reologia da argamassa passa a ser um fator limitante. Assim, buscaram-se argamassas próprias para execução de reforço estrutural que fossem tixotrópicas, garantindo a executabilidade em uma situação de campo.

Foram selecionadas duas argamassas que apresentaram características adequadas para execução do concreto têxtil:

- Sika Monotop 622 – uma argamassa polimérica para reparo em estruturas de concreto, classificada como R3 da norma europeia EN 1504 (“*Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity Part 3: Structural and non-structural repair*”). Conforme indicação do fabricante, o diâmetro máximo do agregado é de 1,4 mm e possui aos 28 dias: resistência adesiva à tração maior do que 1 MPa, resistência à compressão maior do que 43 MPa e resistência à tração na flexão 7 MPa.
- Zentrifix CR – uma argamassa polimérica para reparos estruturais com agente adesivo integrado, classificada como R4 da norma europeia EN 1504. Conforme indicação do fabricante, o diâmetro máximo do agregado é de 2,0 mm e possui aos 28 dias: resistência adesiva à tração maior do que 2,0 MPa, resistência à compressão maior do que 70 MPa e resistência a tração na flexão maior do que 9 MPa.

As duas argamassas foram utilizadas no teste piloto e apresentaram comportamento satisfatório e muito similar. A diferença notada foi que argamassa Zentrifix CR proporcionou um aumento menor da carga de fissuração da viga reforçada em relação a argamassa SikaMonotop 622.

Devido à similaridade no desempenho, a escolha da argamassa a ser empregada foi determinada pelo prazo de validade. A argamassa Zentrifix CR possui validade de 12 meses, enquanto a SikaMonotop 622 apenas de 6 meses. Tendo em vista a duração do programa experimental e a possibilidade de sua expansão, a argamassa selecionada para estudo foi a Zentrifix CR da marca MC-Bauchemie. Os dados fornecidos pelo fabricante estão apresentados no APÊNDICE A.

3.2.4. Escolha do têxtil

Foi realizada uma vasta pesquisa por tecidos, telas, malhas ou têxteis que possuíssem as características correspondentes a um têxtil próprio para execução da ART. Foram levadas em consideração as seguintes características:

- Existência da proteção álcali resistente;
- Abertura da malha maior do que 0,5 cm;
- Fabricação nacional;
- Peso por unidade de área;
- Resistência à tração.

Foram encontradas apenas quatro empresas que forneciam tecidos com malha aberta e formados por fibra de vidro álcali resistente, a TEGAPE (Curitiba/PR), CENTROPLAC (Blumenau/SC), FIBERTEX (Louveira/SP) E TEXIGLASS (Vinhedo/SP). Inicialmente considerou-se também o material SikaGlass-300 da SIKA, porém ao conseguir uma amostra do material foi verificado que não se tratava de uma malha aberta e sim de um tecido contínuo de fibra de vidro AR para ser aplicado com resina. Além desses fornecedores, identificou-se que existem duas fábricas que produzem filamentos de fibra de vidro álcali resistente, a OWENS CORNING e a CPIC, ambas no estado de São Paulo, e que, pelas informações fornecidas por telefone, aparentemente fornecem matéria prima para TEXIGLASS e FIBERTEX, respectivamente. Cabe ressaltar que todos os produtos encontrados são indicados para fins não estruturais, como reparo de fissuras, prevenção de formação de trincas, reforço para piso elevado, ancoragem para mosaicos, entre outras aplicações.

Em contato com as empresas constatou-se que os têxteis da TEGAPE e da CENTROPLAC não são de fabricação nacional, tratando-se de têxteis importados para revenda. Esse item já os torna desfavoráveis a serem utilizados na pesquisa devido ao alto risco de descontinuidade da comercialização do material. Além disso, esses têxteis possuíam uma malha com abertura pequena, menor do que 1 cm, e uma gramatura baixa, menor do que 150g/m².

As duas outras empresas de fato são fabricantes nacionais dos têxteis e possuem uma variedade maior de produtos. A FIBERTEX possui diversos modelos apresentados em seu site, que variam em termos de abertura da malha, peso por m², espessura e resistência à tração. A TEXIGLASS possui apenas um modelo comercial disponível em seu site, porém em contato direto foi identificado outro modelo que corresponde a um têxtil de maior peso por m², apresentados na Tabela 4. As duas empresas informaram ser possível

fabricar um têxtil com propriedades específicas, porém existe a necessidade de ser em grande escala, o que não seria possível para esta pesquisa.

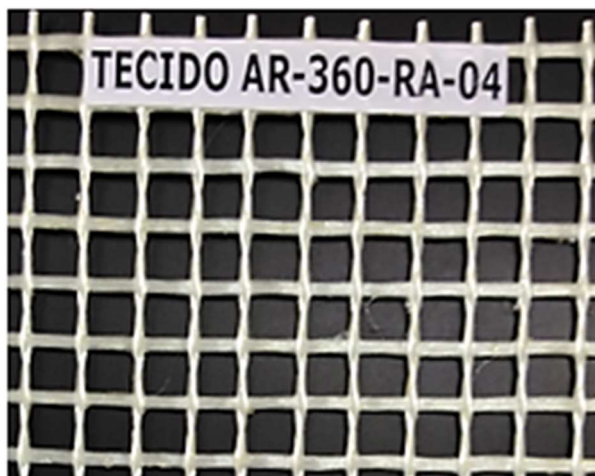
Tabela 4. Dados dos têxteis fabricados pela TEXIGLASS.

<i>Modelo</i>	<i>Peso (g/m²)</i>	<i>Resistência à tração</i>		<i>Resistência à tração normalizados</i>		<i>Abertura da malha (mmxmm)</i>	<i>Espessura (mm)</i>
		<i>Urdume</i>	<i>Trama</i>	<i>Urdume</i>	<i>Trama</i>		
		<i>(kgf/cm)</i>	<i>(kgf/cm)</i>	<i>(N/5cm)</i>	<i>(N/5cm)</i>		
AR-122-RA-04	122	20	22	1000	1100	10 x 10	0,45
AR-360-RA-04	360	54	54	2700	2700	14 X 14	1,15

(fonte: fichas técnicas fornecidas pela TEXIGLASS)

Analisando os dados fornecidos dos dois fabricantes, tanto por ficha técnica quanto por contato direto com setor de vendas, identificou-se que as telas da FIBERTEX são produzidas com fibra de vidro do tipo E com posterior proteção álcali resistente, enquanto que os têxteis da TEXIGLASS são fabricados diretamente com fibra de vidro AR. Apesar de o estudo da durabilidade não ser um objetivo deste trabalho, levou-se em consideração essa diferença do material para escolha do têxtil visando a continuidade das pesquisas com o têxtil selecionado. O fator decisivo para escolha do têxtil foi a combinação da abertura da malha com um peso elevado por m², confirmado pela resistência a tração adequada em comparação aos têxteis empregados em pesquisas da área. De todos os têxteis identificados o de modelo AR-360-RA-04 da TEXIGLASS apresentou melhores características para ser utilizado como armadura do reforço, sendo adotado para desenvolvimento da pesquisa (Figura 15).

Figura 15. Têxtil da empresa TEXIGLASS adotado para estudo.



3.2.4.1. Propriedades do têxtil

O programa experimental não contemplou a caracterização complementar do têxtil empregado devido às restrições existentes apresentadas no item 1.5, sendo utilizados apenas os dados fornecidos pelo fabricante, apresentados na Tabela 5.

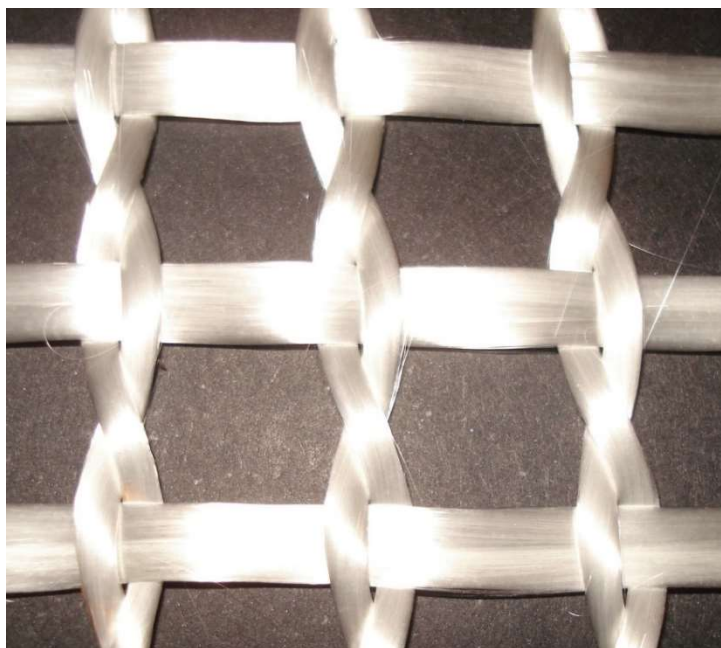
Tabela 5. Dados do têxtil AR-360-RA-4R da TEXIGLASS.

<i>Parâmetros</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Nominal</i>	<i>Máximo</i>
Peso (g/m ²)	324	360	396
Número de fio de urdume (fios/cm)	0,71	0,75	0,79
Número de fio de trama (fios/cm)	0,68	0,75	0,83
Título de fio de Urdume (Tex)	2160	2400	2640
Título de fio de Trama (Tex)	2160	2400	2640
Espessura sem resina (mm)	0,45	0,55	0,65
Espessura resinado (mm)	0,95	1,15	1,35
Carga de ruptura teórica do urdume (Kgf/cm)	43	54	59
Carga de ruptura teórica da trama (Kgf/cm)	43	54	59
Porcentagem de resina em peso (%)	17	20	23

(fonte: ficha técnica fornecida pela TEXIGLASS)

O têxtil da TEXIGLASS utiliza a técnica de tecelagem denominada giro inglês (“*leno weaving*”). Observa-se que apesar de a ficha técnica apresentar praticamente as mesmas características para os fios de trama e de urdume, eles apresentam diferença entre si no aspecto geométrico (Figura 16).

Figura 16. Detalhe da tecelagem do têxtil AR-360-RA-4R da TEXIGLASS



(Fonte: fornecido por TEXIGLASS).

Os fios adotados como urdume para o reforço das vigas, posicionados na direção do carregamento, foram os fios mais chatos e contínuos, sem torção. Os fios torcidos e cilíndricos foram posicionados como trama. Esse posicionamento está coerente com o entendimento encontrado na revisão bibliográfica, onde se atribui melhor desempenho a um fio mais retilíneo. Além disso, o fabricante foi consultado e a recomendação obtida ratificou a escolha de posicionamento.

Também foi informado pelo fabricante que o têxtil é coberto por uma resina que não tem função estrutural, apenas é responsável por evitar que a tecelagem se desfaça com o manuseio. Apesar de não ser considerada estrutural, não é possível afirmar que essa resina não exerce influência na aderência entre os filamentos alterando o comportamento do têxtil.

Foi realizada a pesagem de algumas amostras, cujos valores estão apresentados no APÊNDICE A, e foi obtido o peso médio de 497 g/m², superior ao valor de 360g/m² informado pela ficha técnica. Como não foi realizada caracterização do têxtil, considerou-se para o valor teórico de carga de ruptura um valor corrigido adotando a mesma proporção entre o peso por m² medido e o informado pelo fabricante, correspondendo a 74 N/mm.

3.2.5. Espessura das camadas de argamassa

A escolha da espessura das camadas de argamassa foi baseada na literatura. Foram encontradas citações de camadas desde 2 mm até 2 cm, dependendo do objetivo e contexto da pesquisa desenvolvida (AWANI, EL-MAADDAWY e ISMAIL, 2017; D'AMBRISI e FOCACCI, 2011, p. 710; HEGGER e VOSS, 2008, p. 2055; TRUONG *et al.*, 2017, p. 829). Estipulou-se utilizar a espessura mínima para garantir a cobertura do têxtil.

No teste piloto iniciou-se o controle das camadas com 3 mm, onde se observou ser inviável a execução devido a uma leve curvatura existente no têxtil e que dificultava sua cobertura com essa espessura. Desta forma, alterou-se para 5 mm a espessura da camada e foi possível realizar um controle mais eficiente. Sendo assim, a espessura das camadas de reforço das vigas do programa experimental foram de 5 mm.

Apesar da execução do reforço incluir o controle da espessura, ressalta-se que não foi possível garantir controle extremamente preciso da altura das camadas por se tratar de uma argamassa com pouca fluidez e ainda ocorrer uma modificação da altura durante a colocação do têxtil.

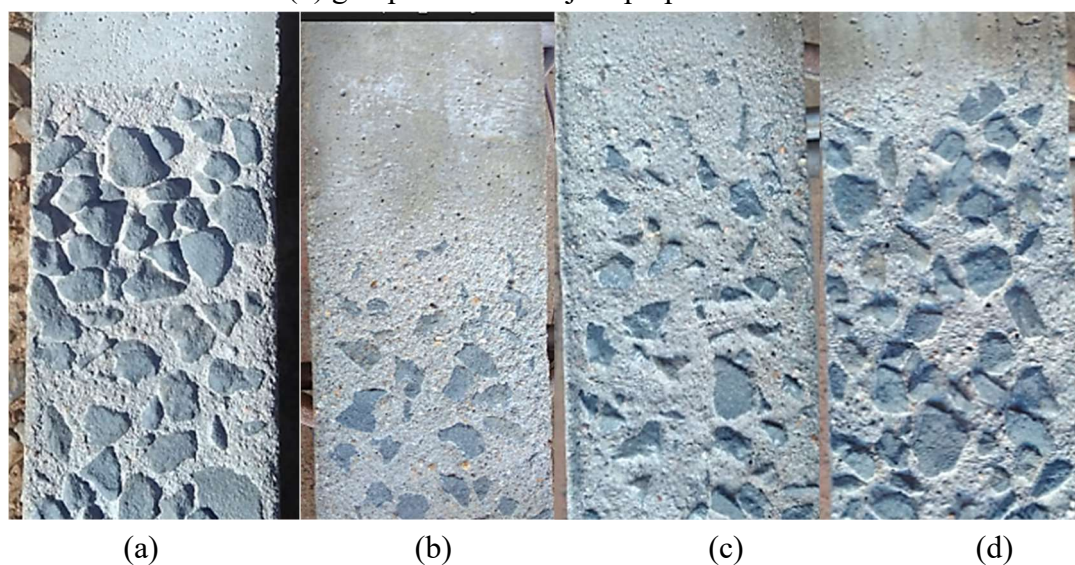
3.2.6. Preparo do substrato

A preparação da superfície do concreto para recebimento do reforço foi identificada na literatura como um fator de forte influência na aderência da argamassa ao substrato e assim no desempenho do reforço. As argamassas escolhidas para estudo no teste piloto indicam que a superfície do substrato deve estar rugosa, isenta de qualquer partícula solta ou produto químico e sem nata de cimento. Uma delas indica inclusive o uso de hidrojateamento de alta pressão ou lixamento.

Esses cuidados poderiam ser suficientes, porém essas argamassas não foram fabricadas especificamente para execução de reforço com armadura têxtil. Com a intenção de garantir a melhor aderência possível, foi adotado o mesmo tratamento superficial empregado na maioria das pesquisas da área, o jateamento de areia.

Cabe o esclarecimento que apesar de o nome do tratamento ser jateamento de areia, a técnica é realizada com granalhas de aço por exigência de lei municipal que proíbe o uso de areia devido ao risco à saúde do operador. Foi realizado um teste com dois tipos de granalha, uma mais fina (g80) e uma mais grossa (g40). Além disso, foi solicitado que o operador variasse a distância e a posição do jato, pois isso influencia no resultado do tratamento. Após os testes, foi definido pela utilização da granalha g80, que possui diâmetro médio de 0,3 mm, com aplicação próxima e jato na diagonal, cujo aspecto está detalhado na Figura 17-c. O tratamento foi realizado tanto no teste piloto como no programa experimental e se mostrou eficiente em termos de garantir uma boa aderência entre a argamassa e o substrato.

Figura 17. (a) Tratamento superficial com granalha de aço tipo g40; (b) g80 afastado com jato na diagonal; (c) g80 próximo com jato na diagonal (Jateamento adotado) e (d) g80 próximo com jato perpendicular.



3.3. ESTRUTURA DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental é composto por 9 configurações de vigas com 2 repetições cada, totalizando 18 vigas. Todas as vigas tiveram sua deflexão medida com uso de LVDT

durante o ensaio de flexão a 4 pontos. As repetições são denominadas pelas letras “A” e “B” no final do nome. Apenas uma das repetições, série “A”, foi instrumentada com extensômetros no aço, no têxtil e no concreto, sendo o último posicionado na face superior da viga.

O programa foi subdividido em lotes, conforme descrito a seguir:

- lote 1 - destina-se à ruptura de vigas testemunho para serem utilizadas como referência na análise de dados das variáveis estudadas. Foram definidos 2 grupos de vigas testemunho. O primeiro grupo corresponde à ruptura no mesmo dia das vigas com reforço de 3 e 7 dias (VT 3/7d) e o segundo grupo corresponde à ruptura da viga testemunho no mesmo dia das vigas com reforço de 28 dias (VT 28d).
- lote 2 - destinado ao estudo da variável idade de ruptura, sendo composto por duas vigas reforçadas para cada idade, 3, 7 e 28 dias. As vigas correspondentes às idades de 7 e 28 dias foram reforçadas no mesmo dia e aquelas referentes à idade de 3 dias foram executadas de forma a coincidir a data de ruptura com as vigas de 7 dias.
- lote 3 - destina-se ao estudo do número de camadas, composto por 4 vigas. Sendo duas vigas reforçadas com 2 camadas e duas com 4 camadas. Todas as vigas foram reforçadas no mesmo dia e programadas para que a ruptura fosse realizada com idade de 28 dias, possibilitando utilizar os dados da viga de 28 dias do lote 2 como nível intermediário de 3 camadas.
- lote 4 - corresponde às vigas submetidas à fissuração prévia, sendo duas vigas para cada nível de fissuração, denominados por 50% e 100%. Todas as vigas foram reforçadas no mesmo dia e programadas para que a ruptura fosse realizada com idade próxima a 28 dias. Isso permitiu que fossem utilizados os dados da viga de 28 dias do lote 2 como nível sem fissuração prévia, denominado por 0%.

Na Tabela 6 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** está apresentada a nomenclatura adotada para as vigas do programa experimental do presente trabalho que é composta por 4 partes. A primeira parte faz referência ao tipo de viga, onde “VT” corresponde à viga testemunho e “V2c”, “V3c” e “V4c” às vigas reforçadas com 2, 3 e 4 camadas, respectivamente. A segunda parte indica a idade do reforço no dia do ensaio de flexão, sendo “3d” para 3 dias, “7d” para 7 dias e “28d” para as vigas rompidas com idades de

27, 28 e 32 dias. No caso das vigas testemunho a indicação corresponde à idade das vigas reforçadas ensaiadas no mesmo dia, podendo ser “3/7d” para viga testemunho ensaiada no mesmo dia das vigas com reforço de 3 e 7 dias e “28d” para viga testemunho ensaiada no mesmo dia da viga com reforço de 28 dias. A terceira parte só consta nas vigas que passaram pela fissuração prévia, sendo “F50” para o nível 50% e “F100” para o nível 100%. Por último, a letra “A” e “B” indica a série de repetição, onde a série “A” corresponde às vigas que foram instrumentadas com extensômetros.

Tabela 6. Nomenclatura das vigas do programa experimental.

Lote 1 Testemunho	<i>Testemunho (3 e 7 dias)</i>	VT-3/7d-A	VT-3/7d-B
	• Concreto: 33 dias		
	<i>Testemunho (28 dias)</i>	VT-28d-A	VT-28d-B
	• Concreto: 54 dias		
Lote 2 Idade de ruptura	<i>3 dias</i>		
	• Concreto: 33 dias	V3c-3d-A	V3c-3d-B
	• Reforço: 3 dias		
	<i>7 dias</i>		
	• Concreto: 33 dias	V3c-7d-A	V3c-7d-B
	• Reforço: 7 dias		
<i>28 dias</i>			
• Concreto: 54 dias	V3c-28d-A	V3c-28d-B	
• Reforço: 28 dias			
Lote 3 Nº de camadas	<i>2 camadas</i>		
	• Concreto: 54 dias	V2c-28d-A	V2c-28d-B
	• Reforço: 27 dias		
	<i>3 camadas</i> (mesma viga do lote 2)		
	• Concreto: 54 dias	V3c-28d-A	V3c-28d-B
	• Reforço: 28 dias		
<i>4 camadas</i>			
• Concreto: 54 dias	V4c-28d-A	V4c-28d-B	
• Reforço: 27 dias			

Tabela 6. Nomenclatura das vigas do programa experimental.

	<i>Sem fissuração - 0%</i> (mesma viga do lote 2)		
	<ul style="list-style-type: none"> • Concreto: 54 dias • Reforço: 28 dias 	V3c-28d-A	V3c-28d-B
Lote 4	<i>Fissuração prévia - 50%</i>		
Fissuração prévia	<ul style="list-style-type: none"> • Concreto: 61 dias • Reforço: 32 dias 	V3c-28d-F50-A	V3c-28d-F50-B
	<i>Fissuração prévia - 100%</i>		
	<ul style="list-style-type: none"> • Concreto: 61 dias • Reforço: 32 dias 	V3c-28d-F100-A	V3c-28d-F100-B

3.4. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA DA VIGA

Como forma de auxiliar a definição da geometria da viga e de obter uma referência para os dados experimentais obtidos, foi realizado um protocolo para uma verificação teórica simplificada do estado limite último (ELU) das diferentes configurações de reforço.

Inicialmente, utilizaram-se no protocolo dados teóricos para definição da geometria da viga e direcionamento do arranjo experimental. Após a execução do programa experimental, os cálculos foram refeitos substituindo aqueles valores que foram obtidos durante o programa experimental, possibilitando obter a estimativa da capacidade resistente das vigas, ainda que de maneira simplificada, mais próxima da realidade.

Foi adotado o protocolo apresentado por Beber (2003, p. 56) para o cálculo teórico do reforço com o compósito de resina com fibra de carbono, adaptando-o à utilização de têxtil, conforme apresentado na Figura 18. Ressalta-se também que as tensões de tração do concreto foram desprezadas e que se considerou uma solidariedade perfeita entre os materiais.

Primeiramente, foi necessário estimar a posição inicial da linha neutra (X_i) da seção e definir as deformações máximas admitidas para cálculo da capacidade resistente. Foram definidos os limites para a deformação do aço (ϵ_s) em 10‰ e para a deformação do concreto (ϵ_c) em 3,5‰. Através da relação da linha neutra com a altura útil (d), identifica-

se qual domínio de deformação da seção e se a deformação limitante será a do aço ou do concreto. Na sequência, são obtidas as deformações específicas dos demais elementos considerando a Hipótese de Bernoulli das seções planas. Como o objetivo é explorar o máximo potencial do têxtil, buscou-se sempre trabalhar no domínio 2. Dessa forma, calculam-se as deformações específicas para o concreto (ϵ_c), para a armadura negativa (ϵ_s') e para o têxtil (ϵ_t). A etapa seguinte consiste em obter as tensões atuantes (σ) na seção para cada um dos elementos e as forças atuantes na seção, sendo a força resultante do concreto e no aço função da posição da linha neutra. A última etapa baseia-se em atender o equilíbrio de forças da seção. Igualando as forças de compressão com as de tração, obtém-se a posição da linha neutra. A partir dessa nova posição da linha neutra, repete-se o processo iterativo até obter a convergência. O protocolo foi executado com apoio da ferramenta Excel para o cálculo iterativo até obter a convergência correspondente ao valor nulo da força resultante da seção. Por fim, com a posição da linha neutra final (x) obtém-se o Momento último (M_u) por meio da Equação 2.

$$M_u = \sigma_s \cdot A_s \cdot d + \sigma_t \cdot A_t \cdot d_t - 0,32 \cdot b_w \cdot f_c \cdot x^2 - \sigma'_s \cdot A'_s \cdot d' \quad \text{Equação 2}$$

Onde,

$\sigma_s, \sigma_t, \sigma'_s$ - tensão na armadura longitudinal positiva, no têxtil e na armadura longitudinal negativa, respectivamente;

f_c - resistência à compressão do concreto;

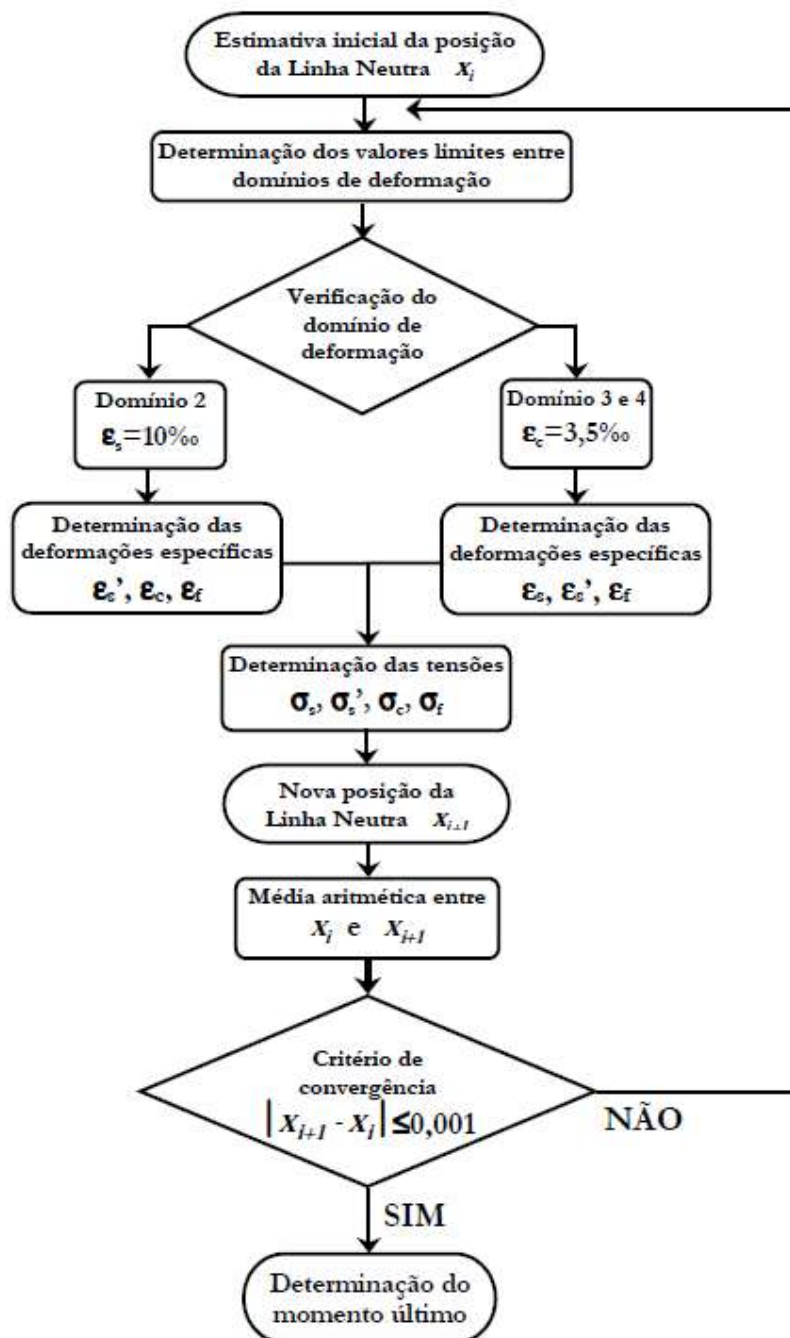
A_s, A_t, A'_s – área da seção transversal da armadura longitudinal positiva, do têxtil e da armadura longitudinal negativa, respectivamente;

d, d_t, d' - distância entre a fibra mais comprimida e o centroide da armadura longitudinal positiva, do têxtil e da armadura longitudinal negativa, respectivamente.

b_w - largura da base da viga;

x - posição da linha neutra.

Figura 18. Fluxograma para determinação da capacidade resistente à flexão.



(Fonte: (BEBER, 2003, p. 56))

Para o cálculo da tensão de compressão do concreto na análise do estado limite último da viga foi considerado o diagrama tensão-deformação idealizado proposto na NBR 6118 (2014), porém foi desconsiderado o fator de redução correspondente ao efeito Rüsç e foi utilizada a resistência à compressão obtida na caracterização do concreto, conforme a Equação 3. Para o cálculo das forças atuantes na seção e do momento último foi adotada a simplificação do diagrama parábola retângulo.

$$\sigma_c = f_c \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^2 \right] \quad \text{Equação 3}$$

Onde,

σ_c - tensão no concreto;

f_c - resistência à compressão do concreto;

ε_c - deformação específica no concreto;

ε_{c2} - deformação específica de encurtamento do concreto no início do patamar plástico.

Para as tensões atuantes nas armaduras de aço, admitiu-se um comportamento elasto-plástico perfeito, conforme apresentado na Equação 4, antes de atingir o escoamento, e na Equação 5, após atingir o escoamento.

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s \quad \text{Equação 4}$$

$$\sigma_s = f_y \quad \text{Equação 5}$$

Onde,

σ_s - tensão no aço;

E_s - módulo de elasticidade do aço;

ε_s - deformação específica no aço;

f_y - tensão de escoamento do aço.

O comportamento do têxtil foi admitido como linear-elástico até sua ruptura, conforme indicado pela Equação 6.

$$\sigma_t = E_t \cdot \varepsilon_t \quad \text{Equação 6}$$

Onde,

σ_t - tensão no têxtil;

E_t - módulo de elasticidade do têxtil;

ε_t - deformação específica no têxtil;

Para a área aplicada no reforço foi realizada uma aproximação em função dos dados fornecidos pelo fabricante do têxtil da TEXIGLASS, da literatura e da caracterização realizada no programa experimental. Conforme indicação na ficha técnica, 20% do peso do têxtil corresponde à resina aplicada. O peso do têxtil, conforme o item 3.2.4.1, é de 497g/m² Dessa forma, tem-se que a gramatura média do têxtil, sem aplicação da resina, é de 397,6 g/m². Fez-se a consideração que apenas as urdiduras têm contribuição para

resistir aos esforços, portanto admite-se que o têxtil possui 198,8 g/m² de fibra de vidro contribuintes para o reforço.

A densidade da fibra de vidro AR foi admitida como 2,78 g/cm³ e seu módulo de elasticidade como 70 GPa (PELED, BENTUR e MOBASHER, 2017, p. 21). A massa correspondente à tela para uma camada de têxtil será sua gramatura (g) multiplicada pela largura (b) e pelo comprimento da tira de têxtil (l) (Equação 7).

$$m = g \cdot b \cdot l \quad \text{Equação 7}$$

Outra forma de obter a massa de uma tira de têxtil é através da densidade (ρ) multiplicada pelo seu volume, que pode ser obtido pela multiplicação entre o comprimento da tira (l) e a área da seção transversal do têxtil (A_t) (Equação 8).

$$m = \rho \cdot A_t \cdot l \quad \text{Equação 8}$$

Igualando as equações 7 e 8, obtém-se a área de armadura têxtil para uma camada em função da densidade (ρ), da gramatura (g) e da largura da tira (b) (Equação 9).

$$A_t = \frac{g}{\rho} \cdot b \quad \text{Equação 9}$$

Substituindo na equação 9 os valores adotados, tem-se que cada camada de têxtil para uma tira de 10 cm de largura contribui com uma armadura têxtil de área correspondente a 0,072 cm².

Para o acréscimo da altura útil da seção foi admitido que a espessura de cada camada de argamassa é de 5 mm e a contribuição do têxtil foi desprezada, por estar imersa na argamassa. O esforço máximo resistido por uma camada de têxtil, com 10 cm de largura, seria de 7,4 kN, utilizando o valor corrigido conforme explicação do item 3.2.4.1. Com esse dado pode-se estimar a tensão última para o têxtil através da relação entre a força de tração máxima sobre a área do têxtil correspondente. Para os dados adotados, tem-se que a tensão última do têxtil estimada é de 1028 MPa.

3.4.1. Análise de sensibilidade

As verificações teóricas foram realizadas buscando a configuração que proporcionasse a maior sollicitação do têxtil, permitindo que a contribuição do têxtil na viga reforçada fosse

mais perceptível. Sendo assim, a primeira etapa consistiu em verificar que a viga testemunho teria sua ruptura por flexão no domínio 2, condição que foi satisfeita.

Com o intuito de otimizar a sollicitação do têxtil e obter maiores informações de seu desempenho, verificou-se a influência da altura da seção da viga e das armaduras positiva e negativa quanto ao impacto na sollicitação transferida ao têxtil, no momento último e no percentual de acréscimo da capacidade resistente da viga promovido pelo reforço.

Foram analisadas todas as combinações considerando as seguintes possibilidades:

- Altura da seção transversal de 20 cm, 21 cm e 24cm;
- Armadura positiva de 6,3 mm e 8,0 mm;
- Armadura negativa de 6,3 mm e 8,0 mm;
- Número de camadas de têxtil igual a 2, 3 e 4.

Dos variados casos simulados, percebeu-se que a alteração da altura e do diâmetro da armadura de montagem não exerceram influências significativas nos parâmetros analisados. O aumento da altura da seção da viga provocou uma leve redução do percentual de aumento da capacidade resistente, assim como da transferência do esforço de tração para o têxtil. A diferença dos valores obtidos para os parâmetros analisados entre a viga de menor e maior altura aumenta ligeiramente com o aumento de número de camadas de têxtil, porém as diferenças foram inferiores a 5%. Dessa forma, identificou-se que a variação da altura da seção não exerce influência significativa para otimizar o programa experimental. A escolha da seção foi feita baseada na economicidade e na facilidade de manuseio das vigas para o experimento, definindo-se a altura de 20 cm.

Devido ao posicionamento elevado da linha neutra da seção para situação do momento último, já era esperado que não houvesse grande influência da armadura negativa no estudo de sensibilidade por sua reduzida contribuição. De fato, os casos analisados indicaram que a substituição da armadura de diâmetro de 6,3 mm por uma de 8,00 mm teve uma influência menor do que a variação da altura da seção da viga, podendo ser descartada. Optou-se pela armadura de 6,3 mm atendendo ao critério da economicidade do programa experimental.

Diferentemente das outras análises, a variação do diâmetro da armadura positiva resultou em uma diferença no esforço de tração transmitido ao têxtil e no percentual de aumento da capacidade resistente em relação à viga testemunho. As vigas com armadura positiva de 6,3 mm e 8,0 mm transferem praticamente o mesmo esforço de tração para o têxtil, sendo ligeiramente superior para as de diâmetro maior. Em contrapartida, o percentual de aumento da capacidade resistente para armaduras positivas de diâmetro 6,3 mm é maior. Ou seja, as barras longitudinais inferiores com diâmetro menor permitem explorar um potencial maior do reforço em termos percentuais.

Esse comportamento é favorável para uma pesquisa exploratória em que é incerta a obtenção de resultados quantitativos, mas se espera obter dados qualitativos que demonstrem a efetividade do reforço executado. Um maior distanciamento da capacidade resistente entre a viga testemunho e as vigas reforçadas permite observar melhor o potencial do reforço e diminuir o impacto de ruídos do experimento. Portanto, foram adotadas para a armadura positiva as barras de diâmetro 6,3 mm, correspondendo a uma taxa de armadura positiva de $\rho=0,26\%$.

3.4.2. Estimativa da carga de ruptura

Os parâmetros utilizados para as estimativas das cargas estão apresentados na Tabela 7. Foram verificadas as configurações para viga sem reforço e para a viga reforçada com 2, 3 e 4 camadas. Os efeitos da fissuração prévia e da idade da matriz cimentícia não foram avaliados nessa estimativa. A Figura 19 representa a distribuição de tensões e deformações na seção transversal da viga.

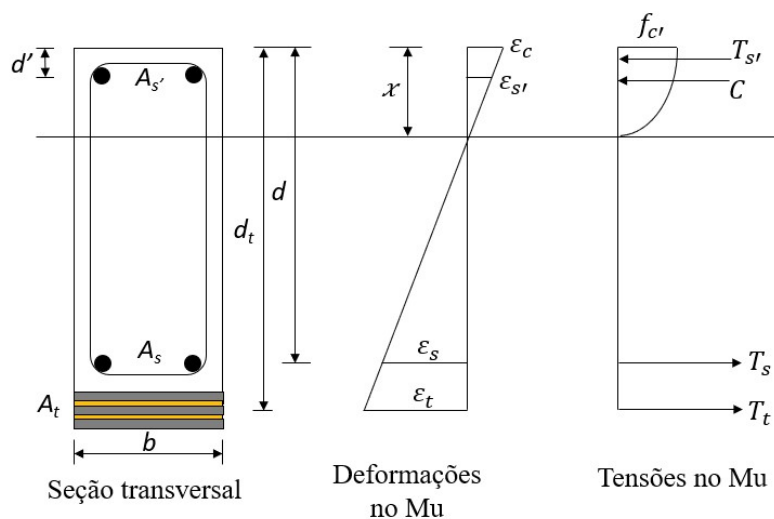
Tabela 7. Dados adotados para verificação do domínio de ruptura da viga testemunho.

Dados de entrada	
<i>Altura da viga (h)</i>	200 mm
<i>Largura da viga (b_w)</i>	120 mm
<i>Comprimento efetivo da viga (apoios de 10 cm) (l_v)</i>	1400 mm
<i>Resistência à compressão do concreto (f_c)- item 4.1.1.1</i>	36,7 MPa
<i>Módulo de elasticidade do concreto (E_c)- item 4.1.1.2</i>	36,874 GPa
<i>Altura útil da armadura positiva (d)</i>	170,55 mm

Tabela 7. Dados adotados para verificação do domínio de ruptura da viga testemunho.

Dados de entrada	
<i>Altura da armadura negativa (d')</i>	29,45 mm
<i>Diâmetro das armaduras positiva e negativa (ϕ)</i>	6,3 mm
<i>Tensão de escoamento do aço (f_y)</i>	670 MPa
<i>Módulo de elasticidade do aço (E_s)</i>	210 GPa
<i>Deformação específica de escoamento do aço (ε_y)</i>	3,19 ‰
<i>Cobrimento</i>	20,0 mm
<i>Altura útil da armadura têxtil (d_{t-2c})</i>	207,5 mm
<i>Altura útil da armadura têxtil (d_{t-3c})</i>	210,0 mm
<i>Altura útil da armadura têxtil (d_{t-4c})</i>	212,5 mm
<i>Módulo de elasticidade do têxtil (E_t)</i>	70 GPa
<i>Área da seção transversal do têxtil por camada (A_t) – item 3.4</i>	0,072 cm ²

Figura 19. Distribuição de tensões e deformações no momento último



Foi realizado o protocolo apresentado na Figura 18 para obtenção dos momentos de ruptura e, conseqüentemente, das cargas de ruptura. Os quatro pontos de aplicação da carga para o ensaio de flexão foram espaçados igualmente, dividindo o comprimento

efetivo da viga em três partes, conforme esquema apresentado na Figura 41. Os valores estimados para as cargas de ruptura das vigas estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Capacidade resistente estimadas para as vigas do programa experimental.

<i>Viga</i>	M_u (kN.m)	P_u (kN)	<i>Aumento estimado da capacidade resistente</i>
<i>Viga testemunho</i>	7,05	30,21	-
<i>Viga com 2 camadas de têxtil</i>	9,47	40,59	34%
<i>Viga com 3 camadas de têxtil</i>	10,76	46,11	53%
<i>Viga com 4 camadas de têxtil</i>	12,13	51,97	72%

3.4.3. Determinação da carga de fissuração prévia

Não foram rompidas vigas testemunho antes da fissuração prévia para conhecimento da carga que corresponderia ao patamar de escoamento, portanto a carga aplicada para o nível de fissuração 100% foi definida ao longo do próprio ensaio através da observação do gráfico do resultado. Definiu-se também como limite do ensaio a deformação específica do aço em 5‰, evitando que ocorresse a ruptura do extensômetro, o que impossibilitaria o monitoramento do aço durante o ensaio da viga após receber o reforço.

Para facilitar o controle durante a fissuração prévia, fez-se o cálculo da carga correspondente à deformação teórica de escoamento do aço. A estimativa foi feita conforme o protocolo apresentado para uma deformação teórica da armadura positiva fixada em 3,2‰, calculando-se as deformações para o concreto e armadura negativa correspondentes e obtendo o equilíbrio da seção. A carga obtida para essa situação foi de 28,81 kN. Antes de atingir a carga definida, observou-se que a curva já indicava o início do escoamento. Portanto o carregamento foi suspenso ao ser identificado o início do patamar de escoamento que ocorreu para a carga de 28,1kN e deformação específica experimental de 4,9‰.

3.5. INSTRUMENTAÇÃO DAS VIGAS

Todas as vigas ensaiadas foram instrumentadas com dois LVDT (*Linear variation displacement transducer*) para monitoramento do deslocamento vertical durante o ensaio de flexão. Os LVDT são da marca HBM do modelo WA 50 mm.

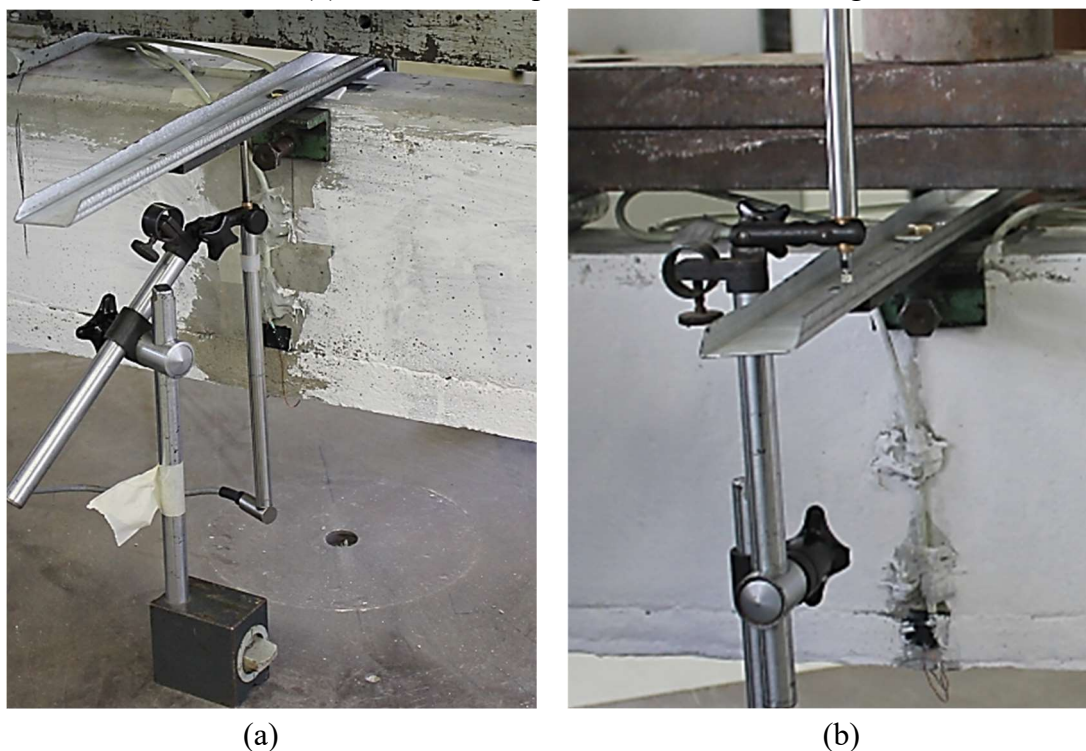
Além da deflexão, também foram instalados extensômetros no aço, no concreto e no têxtil das vigas da série A. Para o aço, foram fixados um extensômetro em cada armadura longitudinal, no centro da barra. Os extensômetros utilizados são da marca Kyowa do tipo KFG-10-120-C1-11, com comprimento de 10 mm e largura de 3 mm. Para o concreto, os extensômetros foram aplicados na face superior e no centro da viga, sendo da marca Kyowa do tipo KFG-20-120-C1-11, com comprimento de 20 mm e largura de 5 mm. Para o têxtil, foram utilizados os extensômetros da marca Kyowa do tipo KFRP-5-120-C1-3, com comprimento de 5 mm e largura de 1,4 mm, específicos para compósitos de CFRP ou GFRP (Polímeros reforçados com fibra de carbono ou vidro), fixados em um urdume no centro da última camada de têxtil.

Durante o ensaio de flexão, foi utilizada a versão 4.5 do software CATMAN, da empresa HBM, para gravação de todas as leituras, incluindo a de aplicação de carga da prensa.

3.5.1. Fixação do LVDT na viga

A medição da deflexão foi realizada apenas no centro da viga, com um leitor para cada lado da viga. Foi utilizada uma haste rígida auxiliar para possibilitar a medição e sua fixação na viga foi feita por parafusos que foram apertados contra a superfície da viga até garantir a imobilidade da haste. A instalação foi feita com auxílio de nível garantindo a verticalidade correta dos leitores. Inicialmente os LVDT foram posicionados de baixo para cima, fornecendo uma medição positiva referente ao deslocamento registrado. Porém, nesta posição era necessário remover os leitores quando se atingia uma deformação grande da viga, para evitar que fossem danificados pela haste caso houvesse um deslocamento abrupto desta. Dessa forma, optou-se por alterar a posição posicionando os LVDT de cima para baixo, permitindo a leitura completa até esgotamento do seu curso de 50 mm (Figura 20). A alteração não interferiu na obtenção de dados, que foram tratados para sua posterior análise.

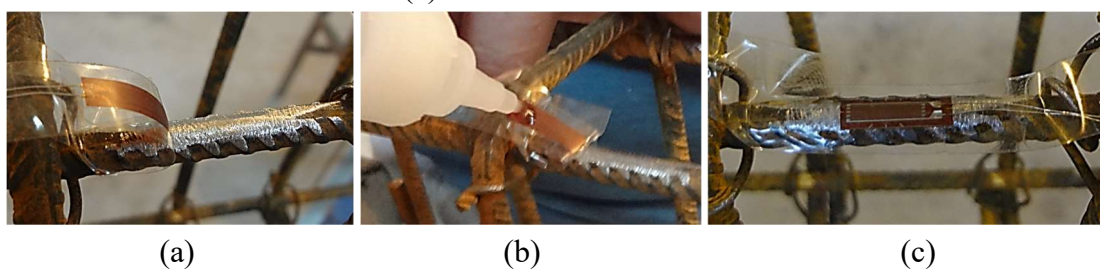
Figura 20. Posicionamento dos LVDT: (a) leitor de baixo para cima nas vigas VT-3/7d-A, VT-3/7d-B, V3c-3d-A, V3c-3d-B, V3c-7d-A, V3c-7d-B, VT-28d-A e V3c-28d-A; (b) leitor de cima para baixo nas demais vigas.



3.5.2. Fixação dos extensômetros no aço

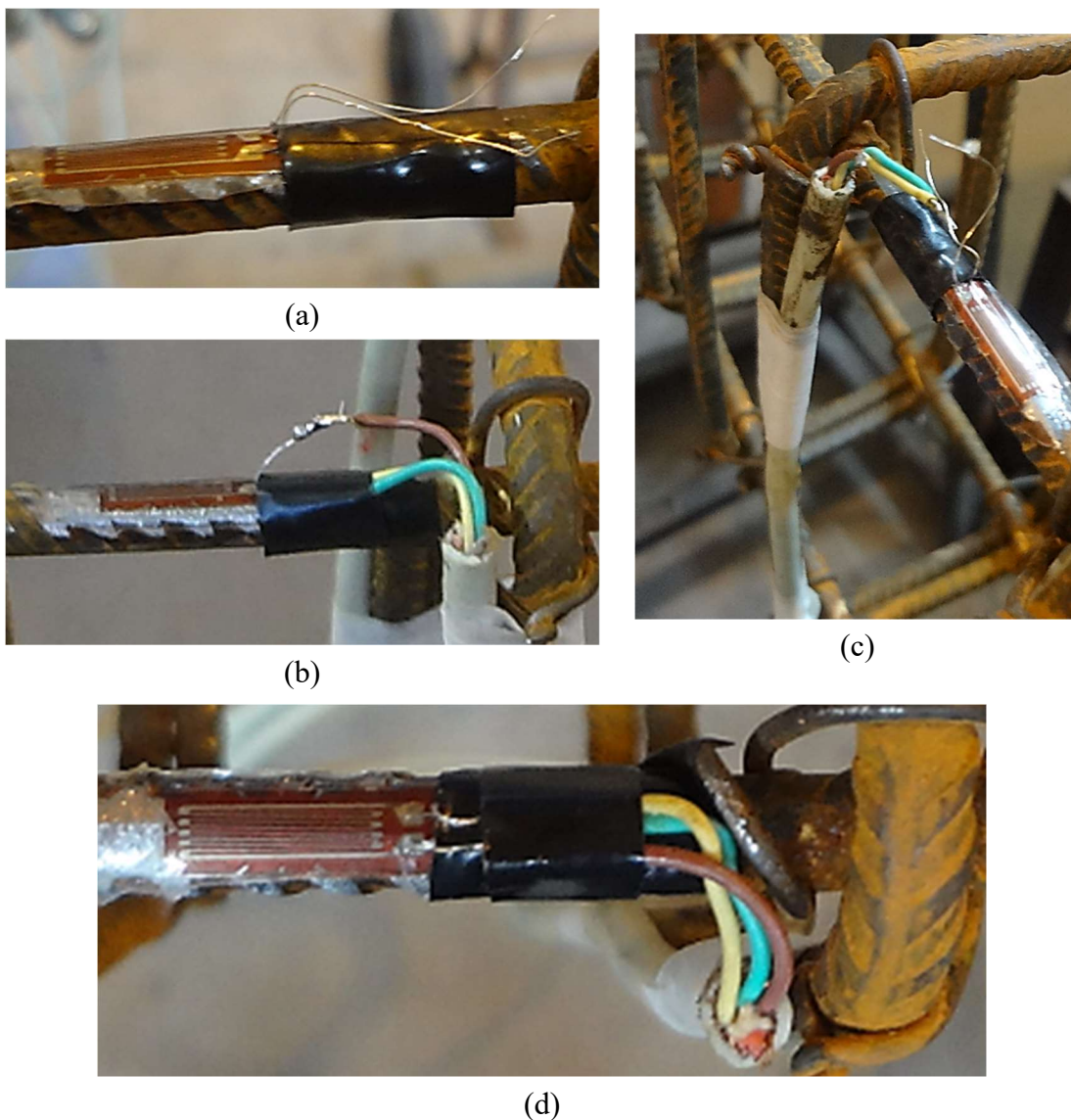
Os extensômetros foram posicionados no centro das duas armaduras positivas da viga, desviando apenas o necessário para fixá-los entre dois estribos. O preparo da superfície do aço foi feito com uso de uma lixa para ferro LFV-0046 grão 36, removendo as impurezas e as ranhuras da barra de aço, garantindo uma superfície plana. Após o lixamento, a superfície foi limpa com éter etílico com teor mínimo de 98%. O extensômetro foi posicionado com auxílio de uma fita adesiva e foi utilizado um adesivo instantâneo para superfícies rígidas (Loctite 496) (Figura 21).

Figura 21. Fixação do extensômetro: (a) posicionamento; (b) aplicação do adesivo; (c) extensômetro fixado.



Após a fixação do extensômetro, a fita adesiva é removida com auxílio de uma pinça de maneira cuidadosa para expor os fios de contato. Utilizou-se uma fita isolante para impedir o contato dos fios do extensômetro com a barra de aço e entre os dois fios do extensômetro para não gerar curto circuito. O cabo de transmissão de dados foi fixado nos estribos com fita crepe para garantir sua imobilidade e soldado com estanho junto aos fios do extensômetro (Figura 22).

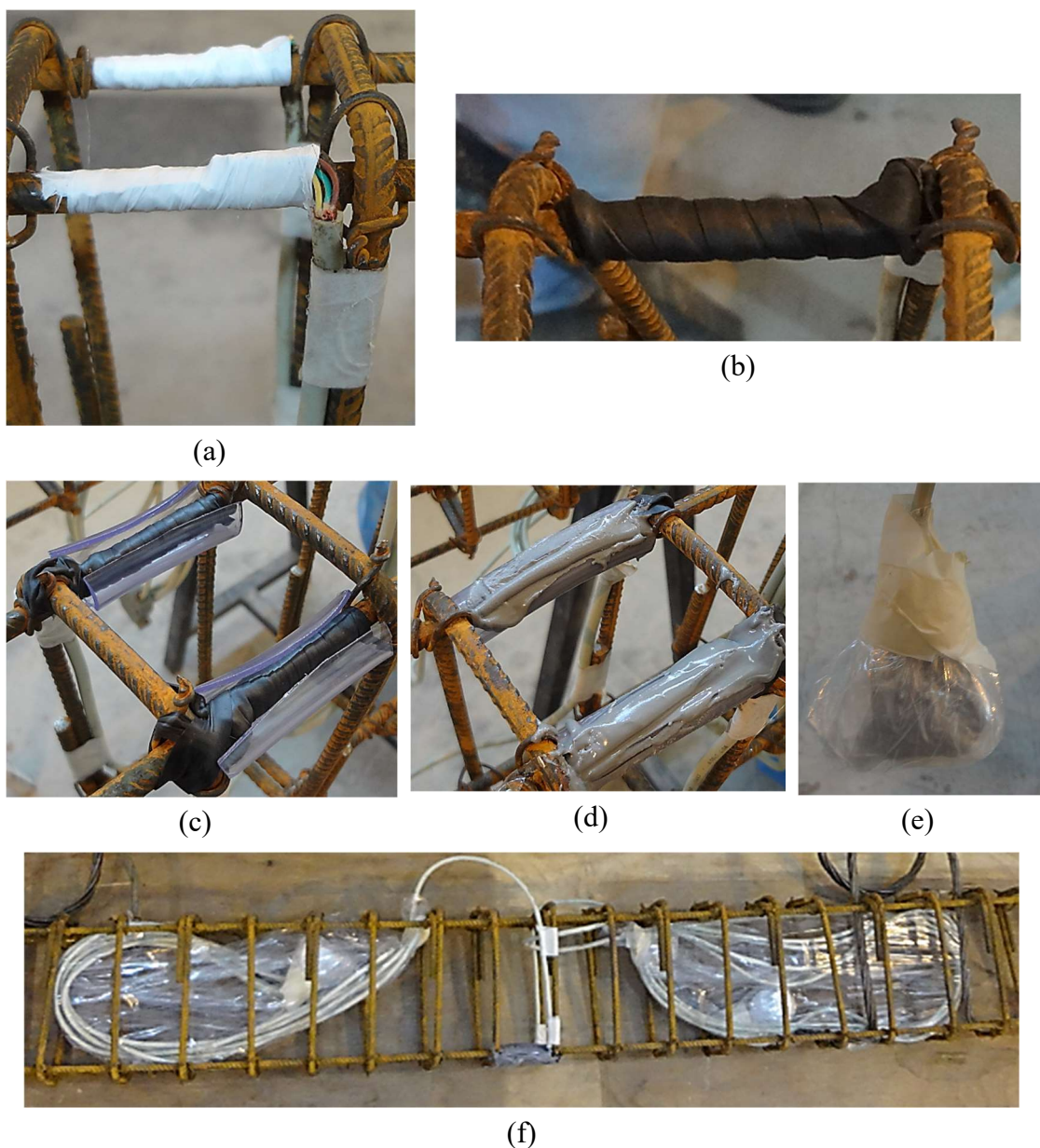
Figura 22. Instalação do cabo de transmissão de dados: (a) isolamento da armadura; (b) isolamento entre os fios do extensômetro; (c) fixação do cabo no estribo; (d) proteção da solda com fita isolante.



Para proteção do extensômetro fixado, foi utilizada primeiramente uma camada de fita veda rosca envolvendo toda a região. Por cima desta camada, foi utilizada uma fita

isolante auto fusão, que devido a sua propriedade elástica permitiu envolver firmemente toda instalação. Além disso, a auto fusão garante uma melhor fixação, impedindo que a proteção se desloque. A última camada de proteção foi realizada com massa plástica. Os terminais dos cabos também foram envolvidos em sacos plásticos e enrolados para garantir sua proteção durante o transporte e a concretagem (Figura 23b).

Figura 23. Proteção do extensômetro: (a) primeira camada com fita veda rosca; (b) segunda camada com fita isolante auto fusão; (c) e (d) terceira camada com aplicação de massa plástica; (e) proteção dos terminais do cabo de transmissão; (f) cabos protegidos.



3.5.3. Fixação dos extensômetros no concreto

Os extensômetros para medição da deformação do concreto foram fixados no centro da viga e na face superior, deslocando apenas o necessário devido a presença dos cabos da instrumentação das armaduras de aço. A primeira etapa foi apicoar a superfície para remover a nata de concreto e atingir o concreto propriamente dito. Para garantir uma superfície lisa e perfeitamente aderida ao concreto, foi utilizada massa plástica sobre a área apicoada. A aplicação foi realizada com auxílio de uma espátula aplicando com uma leve pressão para evitar a formação de bolhas. Após a secagem da massa, o excesso foi lixado garantindo uma superfície plana e rente à superfície da viga. Por fim, a posição de fixação do extensômetro foi marcada com lápis e com um riscador (Figura 24).

Figura 24. Preparo da superfície do concreto: (a) remoção da nata de cimento; (b) superfície apicoada; (c) aplicação da massa plástica; (d) lixamento da superfície e marcação da posição do extensômetro com riscador.



(a)



(b)



(c)

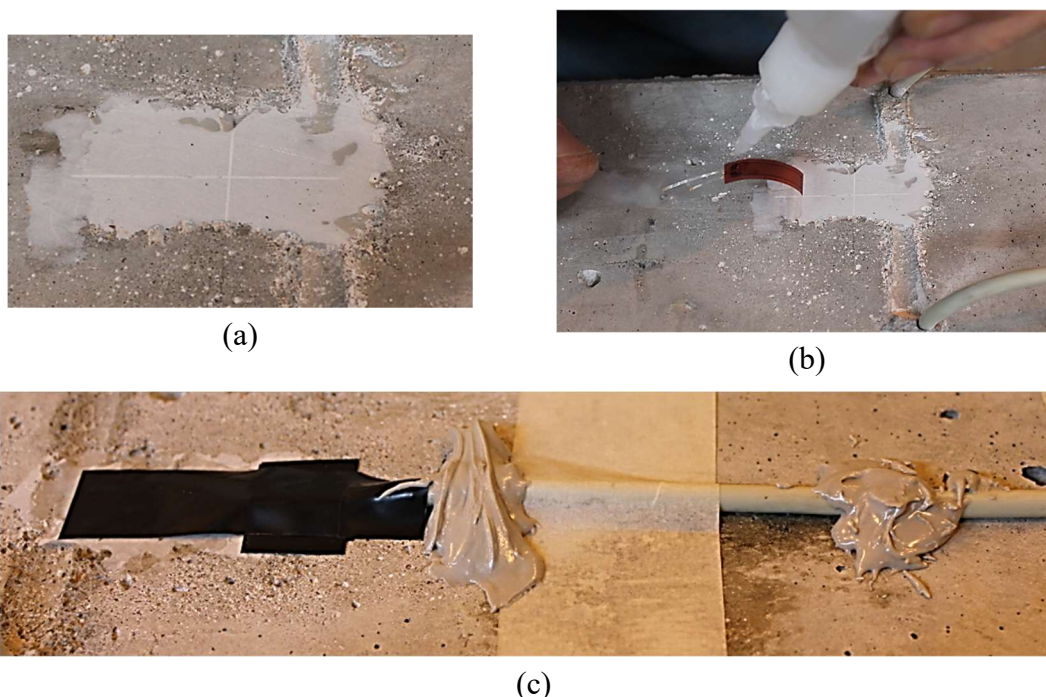


(d)

A instalação do extensômetro ocorreu de forma similar à instalação no aço (Figura 25). A superfície foi limpa com éter etílico e o extensômetro foi posicionado com auxílio de

uma fita adesiva. Foi utilizado o mesmo adesivo instantâneo para superfície rígida empregado no aço e os cabos de transmissão de dados foram posicionados e fixados com fita crepe. A solda foi executada com estanho e protegida com fita isolante. Para preservar a instalação realizada e evitar o rompimento da solda, os cabos foram fixados à viga com massa plástica.

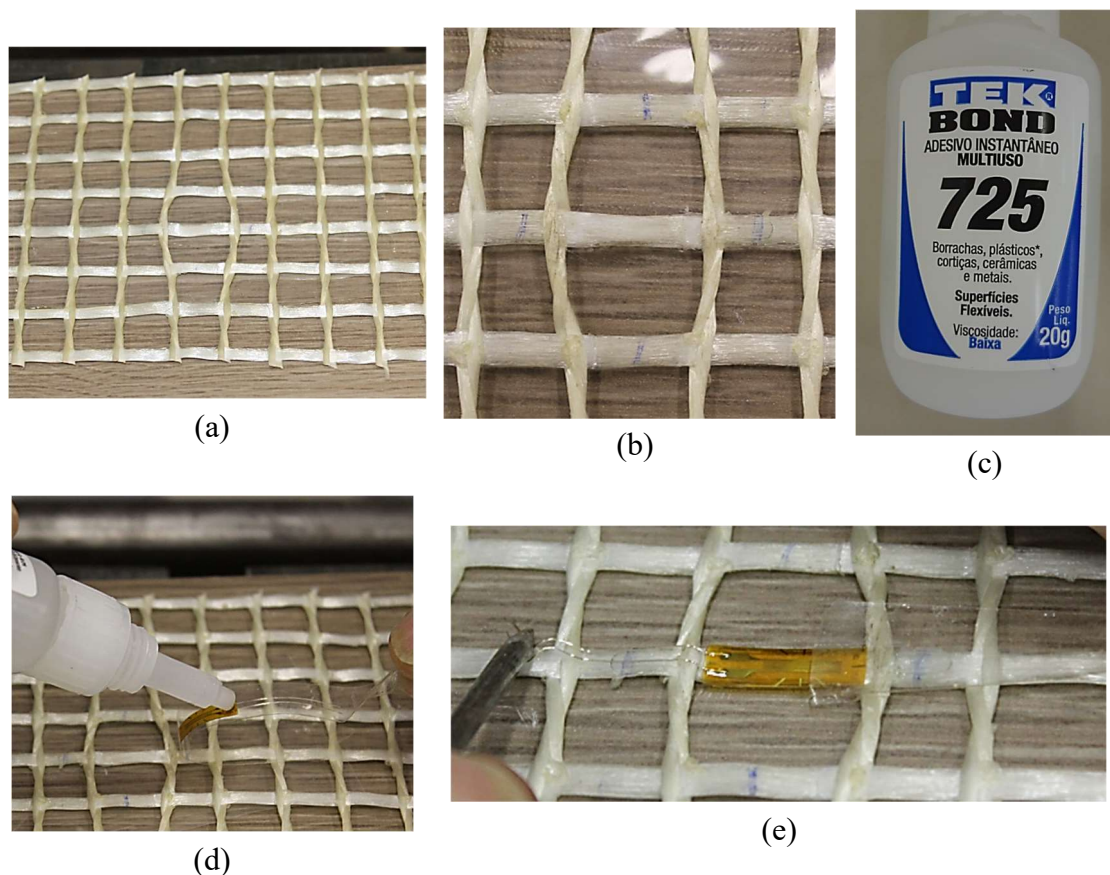
Figura 25. Instalação do extensômetro no concreto: (a) superfície limpa com éter etílico; (b) aplicação do adesivo instantâneo; (c) proteção da instalação do extensômetro.



3.5.4. Fixação dos extensômetros no têxtil

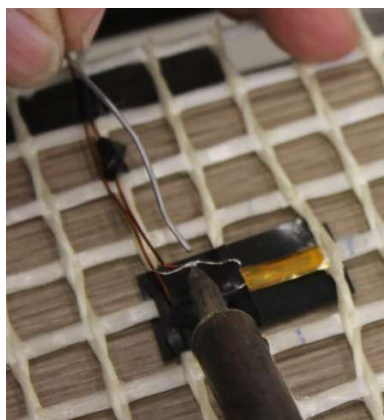
Para a instalação do extensômetro no têxtil (Figura 26) foi necessário deslocar os feixes da trama para garantir comprimento livre suficiente para sua instalação em um dos urdumes centrais. Como a tela possui uma amarração simples e os urdumes não são fixados à trama, esse procedimento foi feito manualmente, sendo necessário apenas romper uma leve resistência da resina existente na superfície da tela. A superfície foi lixada levemente apenas para remoção da resina e limpa com éter etílico. Com auxílio de uma fita adesiva, o extensômetro foi posicionado na área preparada. Para a fixação do extensômetro utilizou-se um adesivo instantâneo para superfícies flexíveis (Tek Bond 725).

Figura 26. Instalação do extensômetro no têxtil: (a) Trama deslocada. (b) superfície lixada e limpa com éter etílico; (b) aplicação do adesivo instantâneo; (c) remoção da fita adesiva auxiliar.

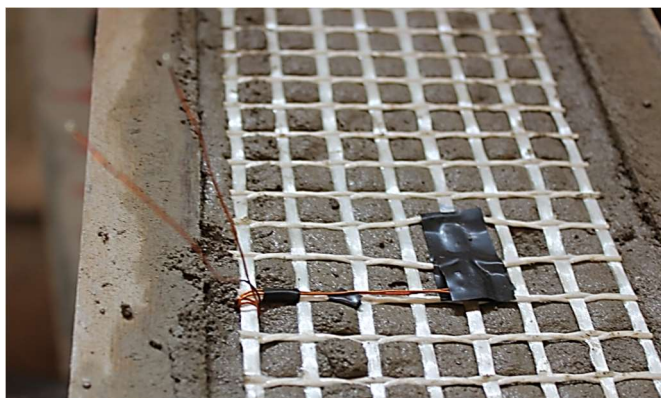


Para garantir a menor interferência no desempenho do reforço devido à instalação do extensômetro, utilizaram-se fios de cobre flexíveis esmaltados como ponte para instalação dos cabos de transmissão de dados. As extremidades dos cabos foram lixadas para remover a pintura isolante e estanhadas, deixando o fio em condições de ser soldado ao extensômetro. Os fios foram posicionados na tela com fita isolante e soldados com estanho. A solda foi protegida com fita isolante e a extremidade livre dos cabos ficaram expostas para serem conectados ao cabo de transmissão de dados após a execução do reforço. Os cabos soldados ao têxtil também foram fixados com massa plástica para evitar a ruptura da solda (Figura 27).

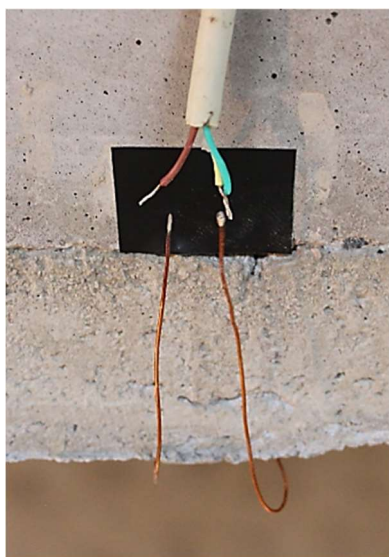
Figura 27. Instalação do extensômetro no têxtil: (a) execução da solda com estanho; (b) execução do reforço com têxtil instrumentado; (c) posicionamento dos cabos para solda após execução do reforço; (d) proteção da instalação.



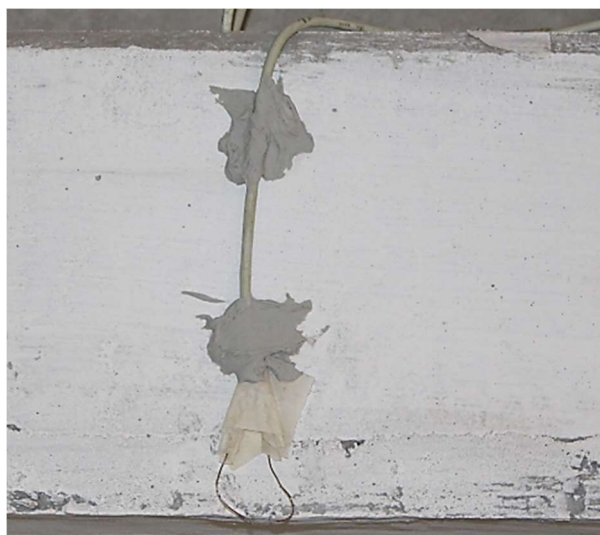
(a)



(b)



(e)



(f)

3.6. CONCRETAGEM DAS VIGAS

Antes da concretagem foram fixados os extensômetros nas armaduras das vigas selecionadas. A empresa que realizou a concretagem entregou as armaduras montadas no LEME, onde foi executada toda a fase de instrumentação. Após essa etapa, as armaduras foram coletadas e levadas para a fábrica da empresa, local em que se executou a concretagem.

A concretagem foi realizada por empresa especializada em execução de estrutura pré-moldadas e se deu em uma única etapa (Figura 28). Foi utilizada uma central de concreto

com capacidade de 3 m³ com materiais dosados em massa. Todo o processo de concretagem, da usinagem até o acabamento da última viga, durou 60 minutos e foi acompanhado para garantir o atendimento às normas NBR 12655 (2015) e NBR 7212 (2012).

Para a concretagem das vigas foi utilizado um vibrador de imersão de diâmetro de 40 mm (Figura 28-b). Os materiais e a água do concreto foram dosados em massa na central de concreto da empresa. Foi realizado o abatimento de uma amostra do concreto antes da concretagem conforme a NBR NM 67 (1998). Os dados do concreto executado estão apresentados no item 3.2.2.1.

Foram moldados corpos de prova conforme NBR 5738 (2016) para obtenção da curva de resistência à compressão em relação ao tempo nas idades de 7, 14, 28, 63 e 91 dias, do módulo do concreto aos 28 dias e para controle das rupturas nos dias dos ensaios à flexão das vigas. O método de adensamento dos corpos de prova adotado foi o manual e dividido em duas camadas. A cura dos corpos de prova foi realizada sempre junto às vigas e nas mesmas condições até o momento de suas rupturas.

A cura inicial foi realizada no próprio local da concretagem, onde as vigas foram cobertas com lona plástica (Figura 28-e). Com a idade de 12 dias as vigas foram transportadas até o LEME onde ficaram estocadas em pallets sem necessidade de empilhamento. Durante todo o período de armazenamento as vigas ficaram protegidas de intempéries, porém sem controle de temperatura e de umidade. O período entre a concretagem e a ruptura das vigas ficou compreendido entre os meses de outubro e dezembro de 2018, os quais tiveram temperaturas entre 20 e 28° C e umidade entre 60 e 90%, predominantemente, segundo dados registrados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Figura 28. Concretagem das vigas: (a) disposição das formas para concretagem única; (b) adensamento com vibrador de imersão; (c) dosador da central de concreto; (d) acabamento; (e) proteção com lona para cura inicial; (f) armazenamento das vigas.



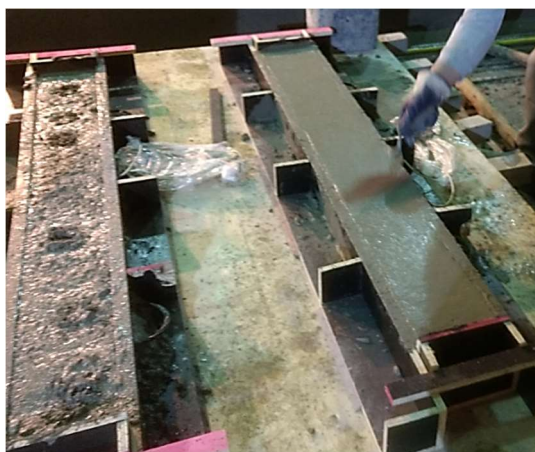
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

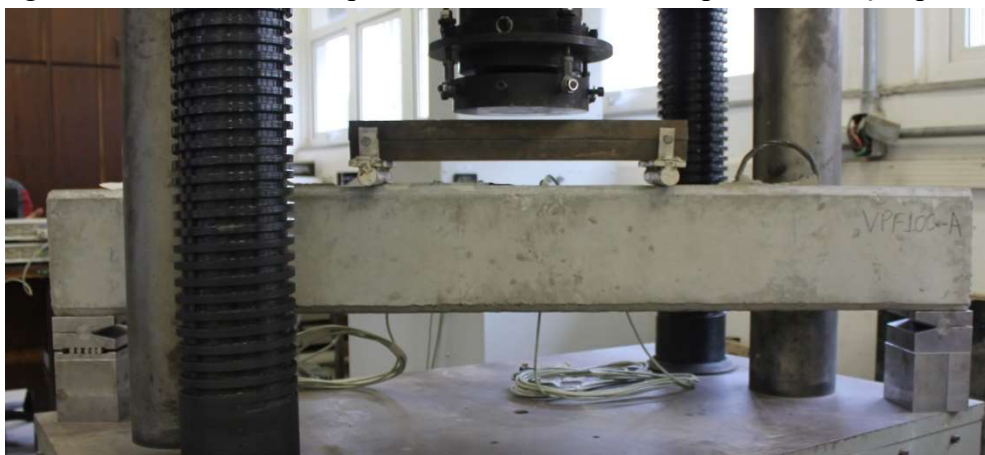


(f)

3.7.FISSURAÇÃO PRÉVIA DAS VIGAS

A carga aplicada na fissuração prévia foi definida conforme descrito no item 3.4.3. O carregamento das vigas foi realizado na prensa SHIMADZU instalada no LEME, com capacidade de 2.000 kN (Figura 29). As vigas foram submetidas ao carregamento quando completaram 28 dias de idade, a aplicação das cargas se deu na mesma configuração definida para o ensaio de flexão a 4 pontos. Primeiramente foram carregadas as vigas para o nível 100% e depois as de 50%.

Figura 29. Prensa utilizada para ensaio de flexão na etapa de fissuração prévia.



A velocidade adotada para o ensaio foi de 2 mm/min. Durante o ensaio foram monitorados os sinais do extensômetro das vigas instrumentadas, apresentados na Figura 30. As vigas V3c-28d-F100-A e V3c-28d-F100-B foram carregadas até a carga de 28,1 kN e as vigas V3c-28d-F50-A e V3c-28d-F50-B até 15,5 kN.

Figura 31. (a) Vigas V3c-28d-F100-B e (b) V3c-28d-F50-B após execução do reforço com fissuras da fissuração prévia mapeadas.



(b)

3.8.EXECUÇÃO DO REFORÇO

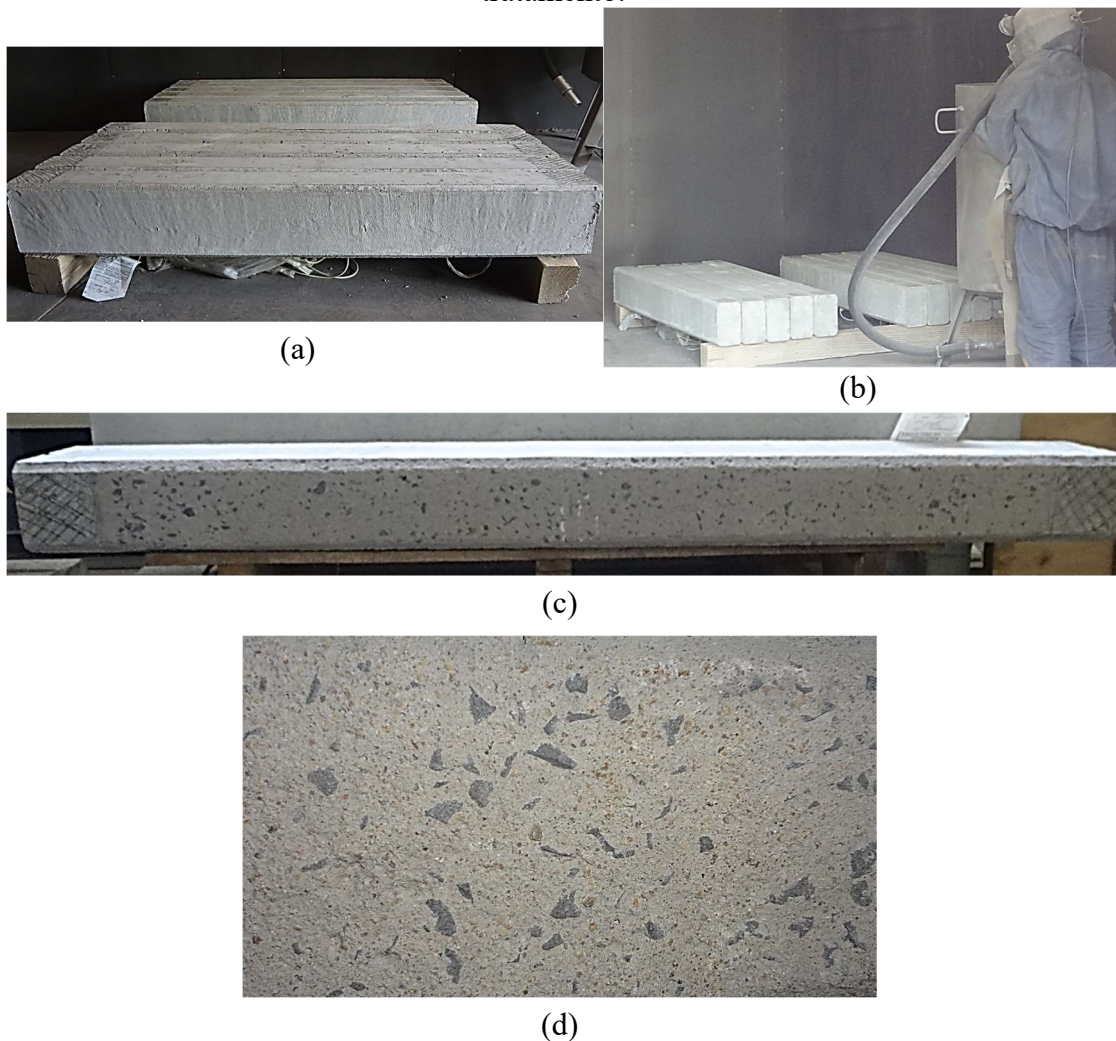
3.8.1. Preparação do substrato

A preparação do substrato foi feita com jateamento de granalha de aço realizado por empresa especializada. Devido a segurança do procedimento que exige um ambiente confinado e uso de equipamento específico de proteção individual, as vigas foram deslocadas até a empresa responsável pela execução do jateamento e posteriormente foram entregues no LEME.

As vigas foram previamente marcadas para identificar a área a ser jateada, deixando 11 cm de suas extremidades isentos do tratamento de modo a possibilitar o controle de espessura das camadas e a acomodação nos apoios do ensaio de flexão, cujos comprimentos são de 10 cm.

O jateamento das vigas foi executado por um mesmo operador em uma única leva e as vigas estavam com a idade de 14 dias. Após o jateamento, as vigas foram transportadas novamente ao laboratório e armazenadas em pallets até o dia em que receberam o reforço. Apesar de pequenas variações do jateamento por se tratar de um serviço manual, todas as vigas tiveram a nata de cimento removida, agregados expostos e uma superfície final rugosa, tornando a superfície do substrato adequada a aplicação da argamassa (Figura 32).

Figura 32. Jateamento com granalha de aço. (a) Vigas posicionadas para o jateamento. (b) Equipamento de proteção. (c) Viga jateada. (d) Superfície do concreto após tratamento.



3.8.2. Preparação do têxtil

O têxtil adotado na pesquisa é fornecido pelo fabricante em rolos com largura de 1,30 m. O tecido possui urdiduras com largura de aproximadamente 4 mm e espaçamento entre urdiduras em torno de 1,0 cm, porém existem pequenas variações da trama que possuem distâncias maiores ou menores entre as urdiduras. Foram preparadas tiras com medidas aproximadas de 128 cm de comprimento e 10 cm de largura, todas contendo 8 urdiduras (Figura 33).

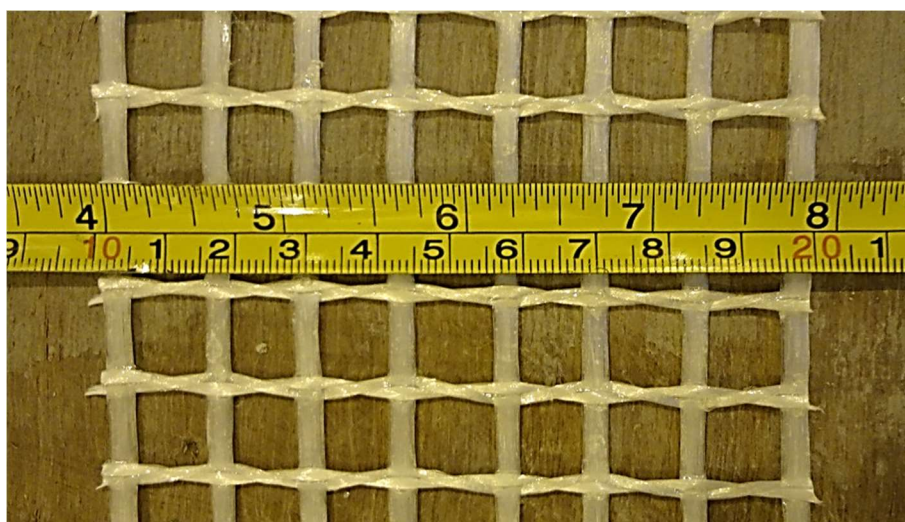
Figura 33. Têxtil da TEXIGLASS. (a) Fornecimento em forma de rolo. (b) Tiras de têxtil. (c) Largura da tira de têxtil.



(a)



(b)



(c)

Para o preparo do têxtil foram utilizadas tesouras comuns afiadas e luvas de couro, uma vez que fragmentos de vidro se soltam facilmente com manuseio. O excesso de resina entre os feixes foi removido para permitir a passagem da argamassa no momento da execução do reforço. O desalinhamento dos feixes de algumas tiras foi corrigido

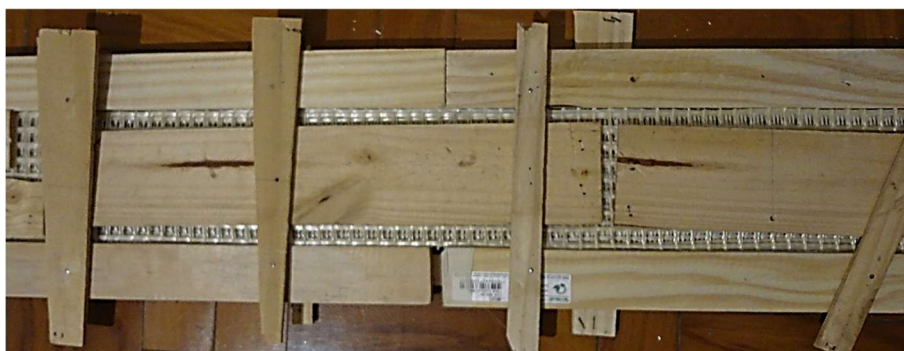
manualmente reposicionando os feixes da trama e da urdidura, porém sem promover a quebra dos feixes. As tiras com um desalinhamento excessivo foram descartadas.

No teste piloto identificou-se uma dificuldade de executar o reforço devido à curvatura residual no têxtil por este ser fornecido em rolo. A aplicação enérgica da argamassa ajudou na fixação do têxtil, porém algumas tiras tiveram de ser substituídas durante a execução por não se acomodarem retilmente à viga. Para o restante do programa, esse problema foi resolvido através do condicionamento prévio das tiras para ficarem completamente planas. Foram utilizadas como limitadores ripas de madeira nas mesmas dimensões da viga e as tiras foram confinadas transversalmente ao longo do seu comprimento, corrigindo a curvatura e o desalinhamento dos feixes (Figura 34).

Figura 34. Preparação das tiras do têxtil para reforço. (a) Dificuldade de acomodação da tira com curvatura residual na execução do teste piloto. (b) Sistema de condicionamento das tiras. (c) Tiras planas na execução do programa experimental.



(a)



(b)

Figura 34. Preparação das tiras do têxtil para reforço. (a) Dificuldade de acomodação da tira com curvatura residual na execução do teste piloto. (b) Sistema de condicionamento das tiras. (c) Tiras planas na execução do programa experimental.



(c)

3.8.3. Preparação da argamassa

A argamassa utilizada para o reforço foi preparada conforme recomendações do fabricante. Foi utilizada a amassadeira espiral da marca METVISA com capacidade de 12 L. (Figura 35).

Figura 35. Amassadeira utilizada no preparo da argamassa.



Primeiramente a amassadeira foi umedecida com auxílio de um pano limpo e então a água foi adicionada. Adotou-se trabalhar com o limite superior da quantidade de água indicada pelo fabricante para garantir uma melhor trabalhabilidade, uma vez que já se trata de uma argamassa tixotrópica. A proporção foi de 3,5 L para cada saco de 25 Kg, correspondendo

a uma relação água/aglomerante de 0,14. Na sequência, acrescentou-se a mistura previamente pesada. Para todos os preparos foi respeitado o tempo recomendado de 5 minutos de mistura, contados após a colocação completa da massa.

Ao término do preparo foram retiradas amostras para moldagem de 6 corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura para controle. A moldagem foi realizada conforme a NBR 7215 (1997) e foi utilizada mesa vibratória para adensamento. Dos seis corpos de prova, três foram curados nas mesmas condições do reforço, junto às vigas, e três foram acondicionados em câmara úmida para comparação com a caracterização da argamassa. Além disso, também foi determinado o índice de consistência da amassada, executado conforme a norma NBR 13276 (2016). Esse ensaio tinha por objetivo registrar eventuais diferenças entre as argamassadas que poderiam influenciar nos resultados, assim como a influência do clima nos diferentes dias de execução do reforço.

Após a retirada do material para moldagem dos corpos de prova e determinação do índice de consistência, a cuba da amassadeira foi desmontada e posicionada próxima a viga a ser reforçada. Utilizou-se colher de pedreiro para homogeneizar e amassar vigorosamente a massa antes das coletas das porções para aplicação sobre a viga.

Foi executada uma amassada, nas condições descritas acima, para cada viga reforçada. Todos os reforços foram executados ao longo de 5 dias corridos e não houve variação significativa do clima dentro desse período, favorecendo a homogeneidade da matriz cimentícia empregada no reforço das diferentes vigas.

Dentro desse mesmo período de execução de reforço foi realizada uma amassada específica para caracterização da argamassa, na qual foram moldados corpos de prova cilíndricos e prismáticos para serem rompidos com as idades de 3, 7, 14, 28 e 63 dias. Para as moldagens dos corpos de prova foram seguidas as recomendações das normas NBR 13279 (2005) e NBR 7215 (1997). O objetivo das moldagens desses corpos de prova foi obter um parâmetro de referência da argamassa efetivamente empregada nas vigas e, assim, identificar possíveis variações da execução dos reforços que poderiam impactar os resultados obtidos.

3.8.4. Procedimento para execução do reforço

Todas as vigas foram reforçadas pelos mesmos operadores e conforme os procedimentos descritos a seguir.

A viga foi posicionada com a face jateada para cima sobre cavaletes e o pó foi removido com auxílio de uma broxa, garantindo uma superfície limpa e isenta de impurezas para execução do reforço. O sistema de controle de altura foi fixado por três sargentos e o posicionamento das guias de madeira foi ajustado através do aperto dos parafusos. Foi utilizado um paquímetro para verificar a altura da guia em relação a face da extremidade da viga, área em que a superfície não foi jateada, possibilitando o controle da espessura das camadas de argamassa (Figura 36-b).

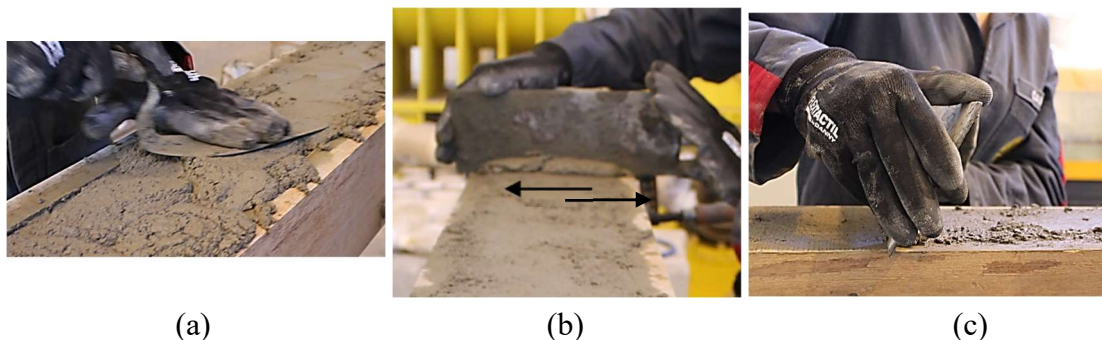
Figura 36. Viga posicionada para execução do reforço sobre cavaletes (a) e ajuste da altura das guias de madeira (b).



Após a instalação da viga, sua superfície foi umedecida até o ponto de saturação com superfície seca, conforme orientações do fabricante da argamassa. A primeira camada de argamassa é responsável por garantir a aderência entre o substrato e o reforço, sendo essencial que seja aplicada energeticamente. Para isso, a argamassa ainda na cuba foi sovada manualmente com a colher de pedreiro e, em pequenas porções, foi lançada energeticamente a uma distância aproximada de 50 cm. As porções foram lançadas até que se cobrisse todo o comprimento da viga e com a própria colher de pedreiro e uma espátula espalhou-se a argamassa com movimentos suaves, porém com aplicação de pressão. Porções adicionais foram lançadas quando necessário para garantir que a camada ultrapassasse os limitadores de espessura. O excesso foi removido por meio de movimentos curtos de vai e vem da espátula apoiada nas guias de madeira e levemente inclinada. Ao acumular argamassa na face da espátula, retirava-se esse excedente com a

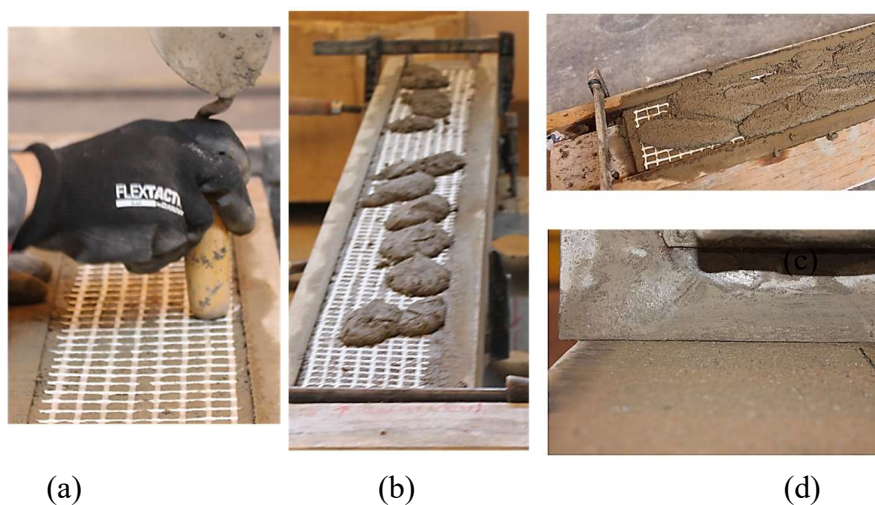
colher de pedreiro para evitar que a camada aderida ao têxtil fosse removida junto com o movimento da espátula. (Figura 37).

Figura 37. Execução da primeira camada de argamassa. (a) Espalhamento com pressão. (b) Remoção do excesso com movimentos de vai e vem. (c) Posicionamento da espátula.



Após a aplicação da primeira camada de argamassa, as guias de madeira foram reposicionadas com auxílio do paquímetro com um incremento de 5 mm na altura. O têxtil foi posicionado sobre a argamassa e levemente pressionado, de forma que a argamassa ocupasse todas as aberturas da malha. Repetiu-se então a aplicação da argamassa conforme executado na primeira camada: sovar a argamassa, aplicação enérgica de pequenas porções ao longo de toda viga, espalhamento com pressão, remoção do excesso com a espátula. O processo foi repetido até serem executadas todas as camadas para a viga em questão (Figura 38).

Figura 38. Execução do reforço: colocação do têxtil com leve pressão para argamassa permear as aberturas (a); aplicação enérgica das porções de argamassa (b e c); e remoção do excesso após execução do espalhamento da argamassa (d).



Na última camada foi realizado o acabamento com a espátula por meio de movimentos circulares com pouca pressão para garantir uma superfície lisa. Após a retirada dos delimitadores de espessura, foi removido o excesso de argamassa que tenha escorrido para os lados, para facilitar a visualização do início da camada de reforço. Todas as vigas reforçadas foram identificadas e cobertas com lona até o dia de sua ruptura (Figura 39). Por fim, a viga teve suas faces pintadas com cal para facilitar a visualização das fissuras no ensaio de flexão.

Figura 39. Viga reforçada (a) e protegida por lona (b).



(a)



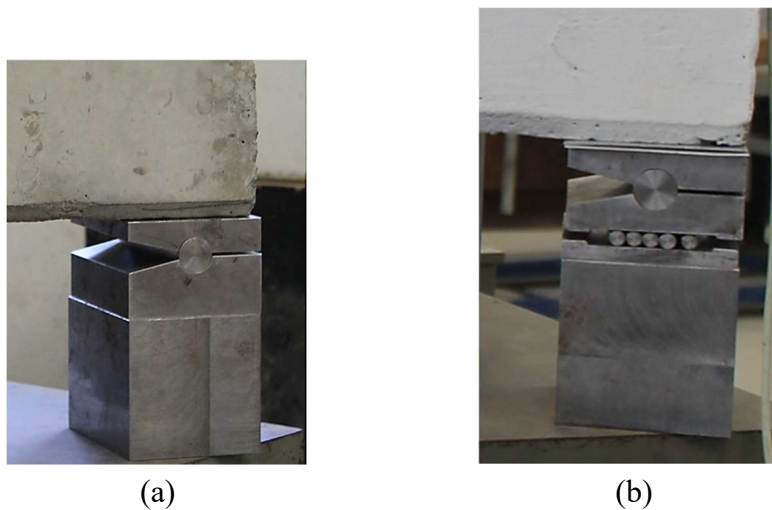
(b)

3.9. ENSAIOS

3.9.1. Ensaio de flexão a quatro pontos

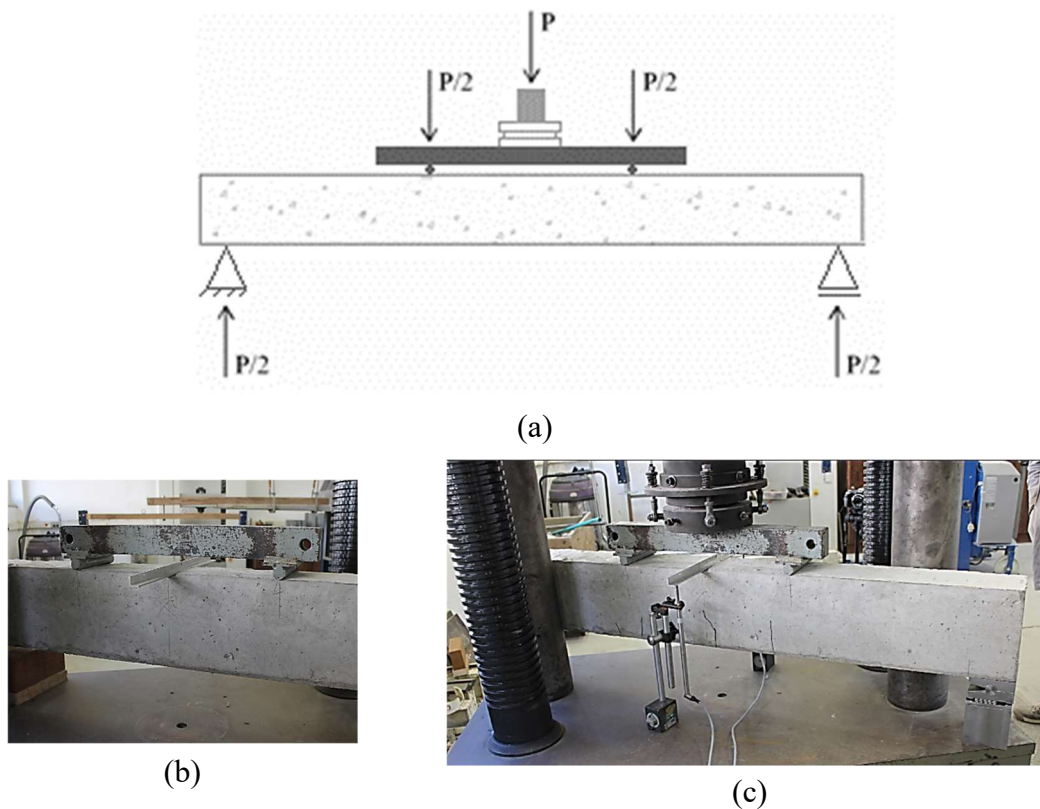
As capacidades resistentes das vigas do programa experimental foram obtidas através da carga máxima aplicada à viga no ensaio de flexão a quatro pontos. As vigas foram apoiadas pelas extremidades sobre apoios de largura de 100 mm, confeccionados para permitir a livre rotação e, em um deles, também a translação horizontal da viga durante a execução do ensaio (Figura 40). O comprimento útil adotado para os cálculos teóricos foi de 1400 mm, distância entre o centro dos apoios.

Figura 40. Apoios confeccionados para o ensaio de flexão e seus calços. a) Apoio de 2º gênero sobre calço e b) apoio de 1º gênero sobre calço.



A aplicação da carga foi transmitida por uma viga metálica e os pontos de aplicação dividem o comprimento útil da viga em três partes iguais, ou seja, a viga de 1,5 m possui um comprimento útil de 1,4 m e a aplicação de carga ocorre a 46,67 cm do centro dos apoios e com igual distância entre si (Figura 41).

Figura 41. a) esquema de carregamento das vigas; b) viga metálica posicionada; e c) viga posicionada para ensaio à flexão.



A taxa de aplicação de carga em função do deslocamento vertical foi definida a partir de referências encontradas na literatura, sendo as taxas de 1 mm/min e 2 mm/min as mais empregadas. No teste piloto foi utilizada a taxa de 1 mm/min, apresentando um bom comportamento durante a ruptura que permitiu observar a abertura de fissuras, porém tornou o ensaio razoavelmente longo. Na etapa de fissuração prévia adotou-se a velocidade de 2 mm/min, velocidade a qual seria executada a ruptura das vigas reforçadas. Entretanto, observou-se que o aumento da velocidade dificultava consideravelmente o mapeamento de fissuras e a observação do ensaio. Dessa forma, a taxa de 1 mm/min foi mantida para o programa experimental. Também foi estabelecido que após a primeira queda abrupta da capacidade resistente da viga, devido a ruptura do reforço, a velocidade seria aumentada para 3mm/min, reduzindo o tempo do ensaio. porém permitindo a observação do comportamento da viga após sua ruptura.

3.9.2. Ensaio de caracterização do concreto

O controle tecnológico do concreto foi feito através da moldagem de corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Após a cura inicial, os corpos de prova foram retificados por meio de retífica equipada com lixa rotativa e água. O ensaio de resistência à compressão foi realizado conforme a NBR 5739 (2018).

Também foi realizado o ensaio de módulo de elasticidade para a idade de 28 dias, conforme o prescrito na norma NBR 8522 (2017) para determinação dos módulos estáticos de elasticidade.

3.9.3. Ensaio de caracterização do aço

Para o programa experimental foram adotadas apenas armaduras de 6,3 mm do aço CA-50, as quais foram ensaiadas quanto sua resistência à tração. O ensaio foi realizado conforme o prescrito na NBR 6892 (2015) referente ao método de ensaio de tração para materiais metálicos.

3.9.4. Ensaio de caracterização da argamassa

Devido à limitação do tempo de pega e das condições de execução dos reforços, cada viga reforçada teve a preparação da argamassa feita por uma mistura diferente e em dias diferentes ao longo de semanas, podendo ocorrer uma variabilidade na propriedade da argamassa das vigas.

Devido à inviabilidade de obter os dados completos para cada mistura, optou-se por realizar um estudo isolado do desempenho da argamassa, com dados de resistência à compressão e à tração da flexão para as idades de 3, 7, 14, 28 e 63 dias e módulo de elasticidade a 28 dias, onde os corpos de prova foram moldados todos em uma única betonada. Os procedimentos adotados para moldagem e ruptura foram os preconizados pelas normas NBR 7215 (1997), para determinação da resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos, e NBR 13279 (2005), para determinação da resistência à tração na flexão e à compressão para os corpos de prova prismáticos.

Além disso, foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos para cada preparo de argamassa realizado. O intuito desses corpos de prova era permitir um monitoramento da argamassa efetivamente empregada em cada viga reforçada e identificar possíveis variações que possam ocorrer durante a execução e que venham influenciar no desempenho do reforço como um todo. Dos corpos de prova, 3 foram curados junto às vigas e 3 na câmara úmida. Ressalta-se que a escolha do corpo de prova cilíndrico se deve pelo tempo reduzido de ensaio quando comparado à ruptura dos corpos de prova prismáticos. Devido ao grande número de rupturas que foram executadas em um mesmo dia na mesma prensa, optou-se por restringir as medições em relação a argamassa para tornar as verificações das propriedades do concreto e da argamassa viáveis, restringindo-se então a conferência das resistências à compressão dos corpos de prova.

3.10. TESTE PILOTO

Conforme apresentado no início deste capítulo, foi executado um teste piloto para obter uma melhor compreensão dos materiais a serem utilizados no programa experimental e testar os procedimentos definidos para execução do reforço e ensaio das vigas. O teste piloto foi composto por 4 vigas configuradas da seguinte maneira:

- **VT** - Viga testemunho;
- **V3c-Sk** - Viga reforçada com 3 camadas de têxtil da TEXIGLASS utilizando argamassa Sika Monotop 622;
- **V3c-Zx** - Viga reforçada com 3 camadas de têxtil da TEXIGLASS utilizando argamassa Zentrifix CR;

- **V3c-Zx-Anc** - Viga reforçada com 3 camadas de têxtil da TEXIGLASS utilizando argamassa Zentrifix CR e com sistema de ancoragem nas extremidades.

Diferentemente do programa experimental, a concretagem das vigas do teste piloto foi feita no próprio LEME. As vigas possuíam as mesmas dimensões de 1,5 m de comprimento e seção transversal de 12 cm de base por 20 cm de altura, porém o concreto, o aço e as dimensões do têxtil adotados foram diferentes.

As tiras de têxtil para execução do reforço não foram previamente planejadas como no programa experimental e tinham aproximadamente comprimento de 128 cm e largura de 11 cm, contendo sempre 9 urdiduras independentemente de pequenas variações nas aberturas da trama. As armaduras longitudinais negativas e positivas tinham diâmetro de 6,3 mm e 8,0 mm, respectivamente. Os estribos tinham diâmetro de 6,3 mm e foram espaçados de 10 cm.

A concretagem das vigas foi realizada com uso de betoneira de 400 L. O concreto de todas as vigas foi executado de um único preparo na betoneira e foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, conforme NBR 5738 (2016). O ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova foi realizado conforme previsto na NBR 5739 (2018) na idade de 28 dias e no dia do ensaio de flexão a 4 pontos das vigas. Os dados da concretagem estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Dados da concretagem.

Traço adotado (25 MPa):	CP V-ARI	Areia	Brita	Relação a/c
	1	2,9	3,6	0,66
Abatimento:	190 mm			
Resistência à compressão a 28 dias:	27,15 MPa (0,40 MPa)*			
Resistência à compressão a 84 dias: (dia do ensaio de flexão das vigas)	31,79 MPa (0,43 MPa)*			
<i>*Valores de desvio padrão entre parênteses</i>				

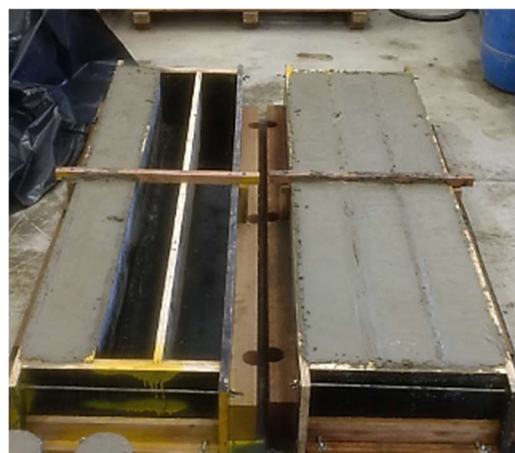
Na Figura 42 são apresentadas imagens da concretagem e do preparo da superfície das vigas. As vigas foram jateadas com granalha de aço nas mesmas condições que as vigas

do programa experimental. O procedimento do reforço também foi o mesmo adotado no programa experimental, conforme detalhado no item 3.8. A principal diferença foi quanto à execução de ancoragem nas extremidades de uma das vigas do teste piloto após a última camada de reforço, conforme observado na Figura 43.

Figura 42. Concretagem e preparo das vigas para o teste piloto. a) concretagem das vigas; b) vigas concretadas; c) jateamento com granalha de aço g80; e d) vigas com face inferior jateada.



(a)



(b)

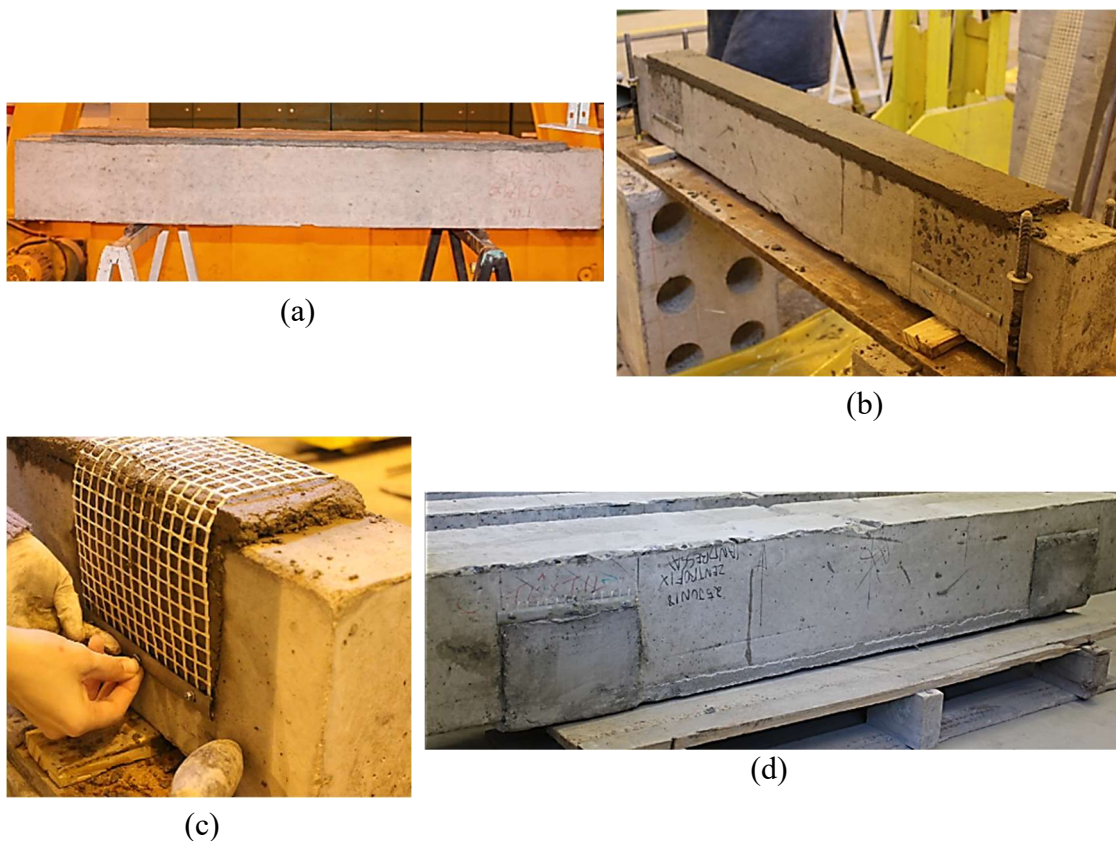


(c)



(d)

Figura 43. Execução do reforço o teste piloto. a) viga reforçada com 3 camadas sem ancoragem; b) viga reforçada com 3 camadas pronta para receber ancoragem; k) fixação do têxtil para ancoragem; e l) viga com ancoragem finalizada no dia do ensaio à flexão.



3.10.1. Caracterização das argamassas utilizadas

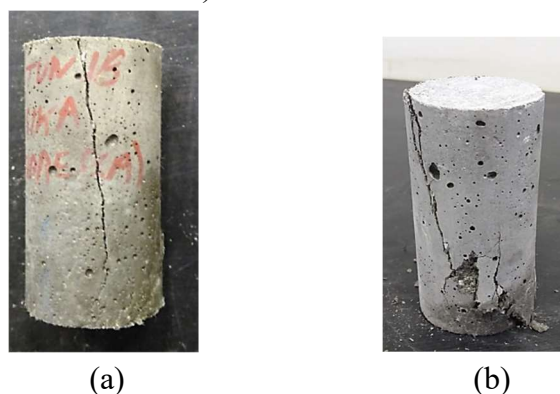
A argamassa empregada no reforço de cada viga foi preparada em uma única mistura. Foram moldados, para cada preparo aplicado nas vigas reforçadas, seis corpos de prova cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura e três prismáticos de 16 cm de comprimento e seção quadrada de 4 cm. Os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida até o momento de seu ensaio, sendo os cilíndricos retificados previamente à ruptura. Os corpos de prova prismáticos e 2 dos cilíndricos foram rompidos no mesmo dia do ensaio de flexão da viga correspondente. Os demais corpos de prova cilíndricos foram rompidos nas idades e 7 e 28 dias. As resistências à compressão e à tração na flexão obtidas segundo as normas NBR 7215 (1997) e NBR 13279 (2005), respectivamente, estão apresentadas na Tabela 10. Devido ao reduzido número de corpos de prova, o maior valor obtido para cada ensaio foi adotado como valor de referência para resistência à compressão e à tração na flexão das argamassas.

Tabela 10. Dados das argamassas utilizadas no reforço.

Argamassa	Resistência (MPa)			
	à compressão		Idade do ensaio de flexão da viga	
	7 dias	28 dias	à compressão	à tração na flexão
Sika Monotop 622	33,98	49,15	47,20	6,82
Zentrifix CR (sem ancoragem)	47,27	66,36	73,27	6,46
Zentrifix CR (com ancoragem)	47,78	66,07	69,90	6,82

Os corpos de prova ficaram com muito poros, conforme pode-se observar na Figura 44. Além disso, a quantidade de material disponível para execução do reforço era limitada e parte da moldagem foi feita com a sobra do material após a execução do reforço que durou em torno de 30 minutos, resultando em uma perda de qualidade significativa para moldagem dos corpos de prova. Apesar de toda variabilidade observada, todos os corpos de prova apresentaram valores de resistência à compressão maior do que a do concreto.

Figura 44. Corpos de prova cilíndricos rompidos da argamassa a) SikaMonotop 622 e b) Zentrifix CR.



3.10.2. Ensaio de flexão a 4 pontos

As vigas foram instrumentadas com dois LVDT e submetidas a uma taxa de carregamento constante de 1mm/min. Durante o ensaio da viga testemunho ocorreu um problema técnico e a viga foi ensaiada apenas até o deslocamento vertical em torno de 10 mm. Apesar disso, a viga atingiu o patamar de escoamento do aço e não rompeu por compressão de concreto. Houve a formação de uma fissura central e seu alargamento

contínuo devido a deformação excessiva do aço, confirmando o comportamento esperado da viga dimensionada para domínio 2.

Todas as vigas reforçadas apresentaram a mesma forma de ruptura, abertura abrupta de uma fissura central devido ao escorregamento do têxtil dentro da matriz cimentícia. Pode-se observar que os feixes do têxtil ainda se encontravam íntegros e não foram rompidos, apenas deslizaram dentro da matriz. A carga aplicada nas vigas reforçadas teve uma queda brusca após a ruptura do reforço, evidenciando que o reforço não promoveu nenhuma contribuição para a viga em termos de capacidade resistente após sua ruptura. Na viga com ancoragem, a carga aplicada retornou ao patamar correspondente ao da viga testemunho e o ensaio foi continuado até a viga encontrar-se excessivamente fissurada e deformada. Na Figura 45 consta o registro fotográfico das vigas após atingir a carga máxima do ensaio.

Figura 45. Registro das vigas logo após atingir a carga máxima do ensaio: testemunho (a-1 e a-2); V3c-Sk (b-1 a b-3); V3c-Zx (c-1 a c-3); e V3c-Zx-Anc (d-1 e d-2). Viga V3c-Zx-Anc levada até o colapso completo após ruptura do reforço (e-1 e e-2).

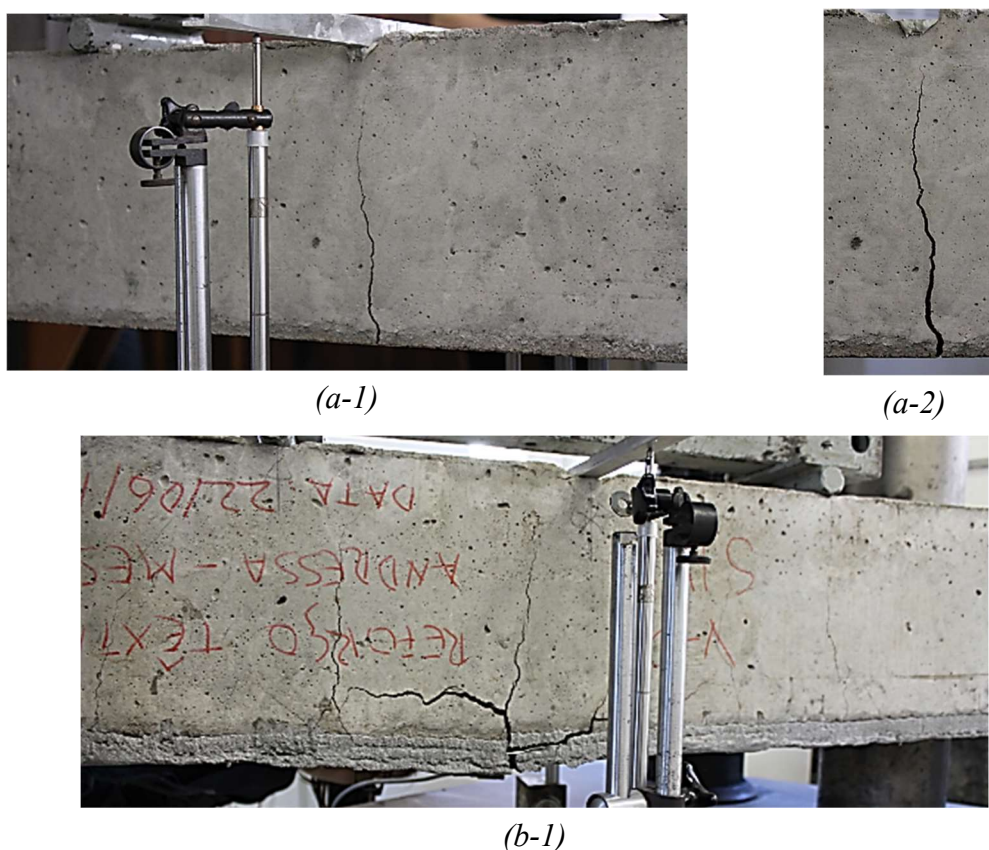


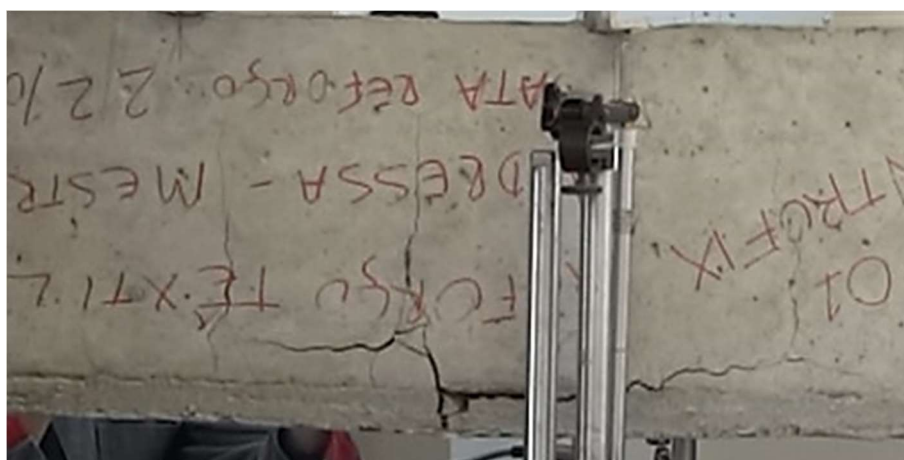
Figura 45. Registro das vigas logo após atingir a carga máxima do ensaio: testemunho (a-1 e a-2); V3c-Sk (b-1 a b-3); V3c-Zx (c-1 a c-3); e V3c-Zx-Anc (d-1 e d-2). Viga V3c-Zx-Anc levada até o colapso completo após ruptura do reforço (e-1 e e-2).



(b-2)



(b-3)



(c-1)



(c-2)



(c-3)



(d-1)



(d-2)

Figura 45. Registro das vigas logo após atingir a carga máxima do ensaio: testemunho (a-1 e a-2); V3c-Sk (b-1 a b-3); V3c-Zx (c-1 a c-3); e V3c-Zx-Anc (d-1 e d-2). Viga V3c-Zx-Anc levada até o colapso completo após ruptura do reforço (e-1 e e-2).



Na Figura 46 está apresentado o gráfico da carga aplicada pelo deslocamento médio dos resultados obtidos das vigas do teste piloto. As cargas máximas alcançadas para cada viga estão apresentadas na Tabela 11.

Figura 46. Resultados do ensaio de flexão a 4 pontos do teste piloto.

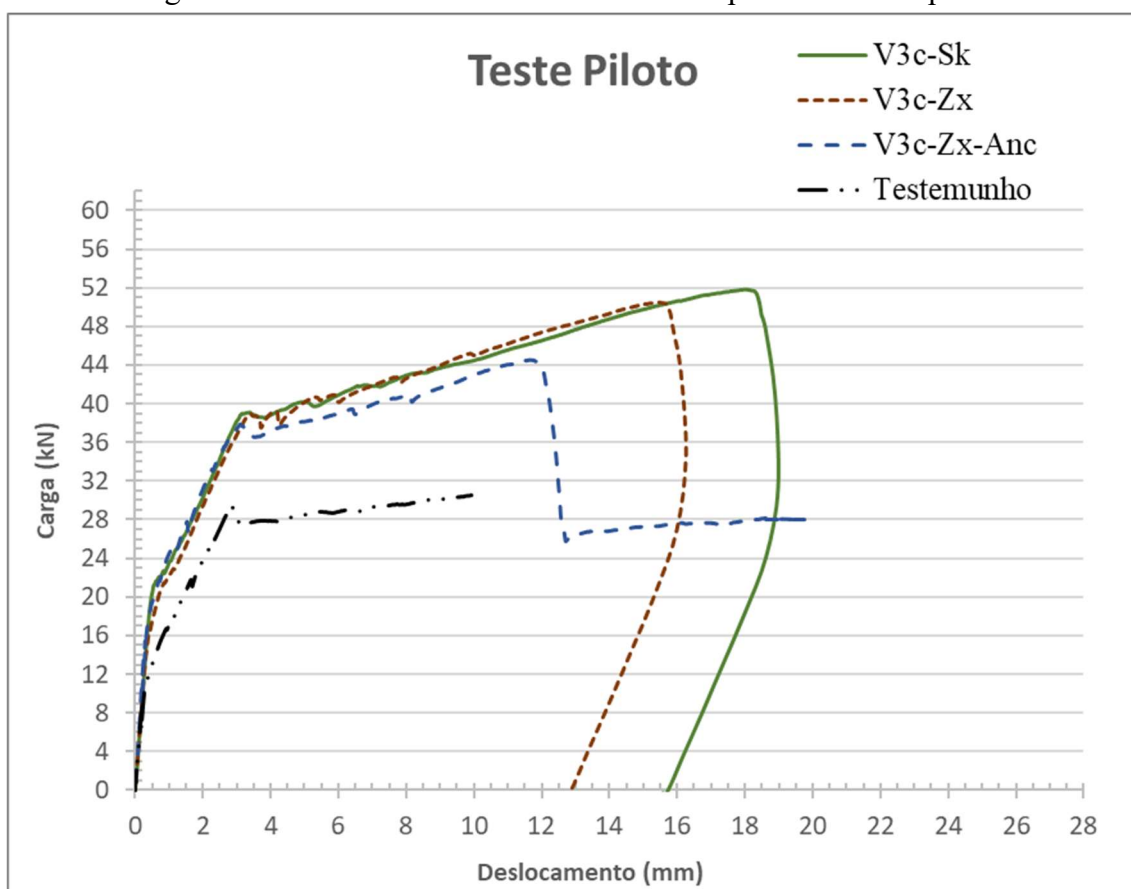


Tabela 11. Dados teóricos e experimentais para o teste piloto.

<i>Viga</i>	<i>Carga máxima (kN)</i>	<i>Deslocamento (mm)</i>	<i>Aumento da carga em relação a viga testemunho</i>
Testemunho	30,53	9,62	-
V3c-Sk	51,82	18,02	70%
V3c-Zx	50,50	15,42	65%
V3c-Zx-Anc	44,52	11,66	46%

Observa-se que o aumento da capacidade resistente foi significativo, sendo de 70% para a viga com argamassa SikaMonotop, 65% para argamassa Zentrifix e de 46% para viga com ancoragem.

As curvas das vigas sem ancoragem tiveram comportamento muito similar e um aumento considerável da capacidade resistente. Já a viga com sistema de ancoragem apresentou uma carga máxima inferior e após a ruptura do reforço não ocorreu o descarregamento completo da viga, retornando ao patamar da viga testemunho. Especula-se que a ancoragem interferiu na distribuição de esforços ao longo da vida e afetou o equilíbrio da seção transversal, de tal forma o deslizamento do têxtil ocorreu para cargas e deslocamentos inferiores aos das vigas sem sistema de ancoragem.

3.10.3. Considerações finais do teste piloto

O principal objetivo do teste piloto foi identificar dificuldades em lidar com os materiais e confirmar os procedimentos escolhidos para a realização do reforço, resultando na configuração mais adequada para o programa experimental.

A análise dos resultados e as observações feitas durante a execução do teste piloto indicou não haver necessidade de ancoragem e assim se definiu não estudar a influência deste parâmetro no programa. O efeito provocado pela ancoragem cabe maior investigação, entretanto não será incluído nesse estudo exploratório.

Os resultados obtidos para o teste piloto foram satisfatórios e utilizados para complementar as discussões e decisões do programa experimental.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

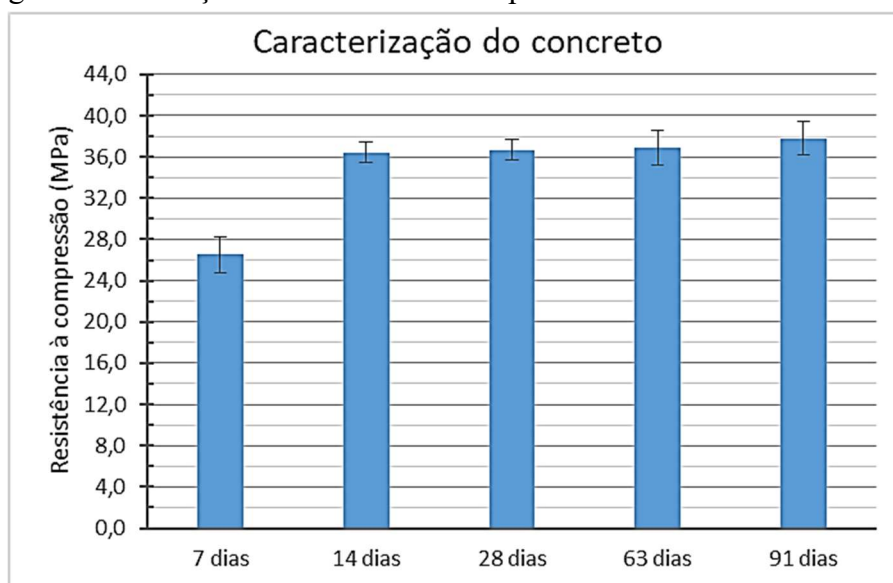
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1. Concreto

4.1.1.1. Resistência à compressão

Os resultados das rupturas dos corpos de prova para caracterização do concreto e de outras rupturas de controle ao longo do programa experimental estão apresentados no APÊNDICE A. Na Figura 47 constam os valores médios obtidos para resistência à compressão do concreto nas diferentes idades ensaiadas, acompanhados da indicação gráfica do desvio padrão correspondente.

Figura 47. Evolução da resistência à compressão do concreto com a idade.



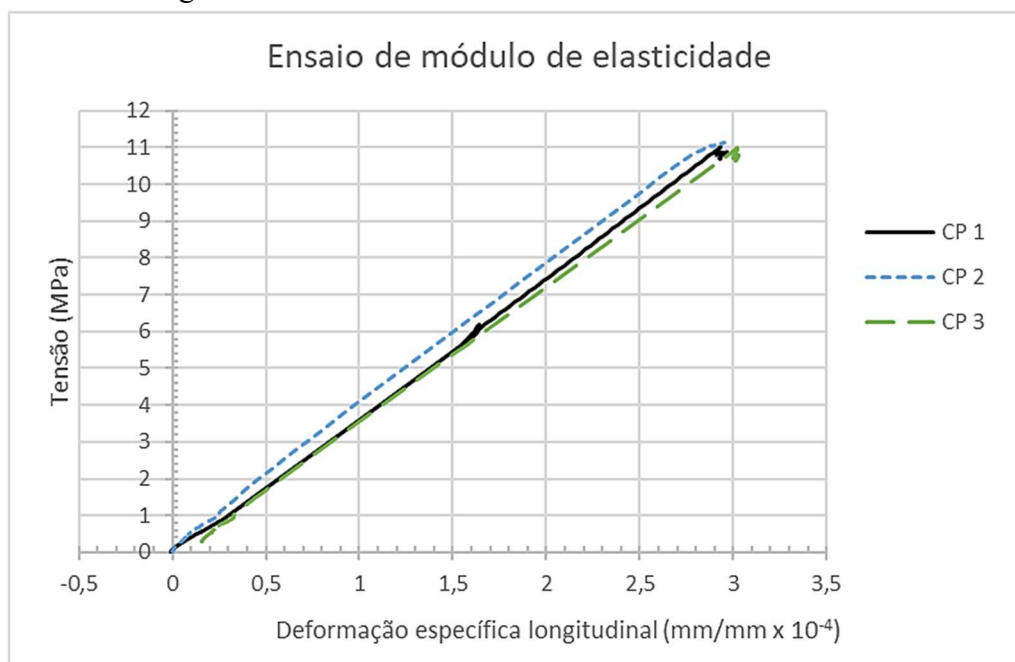
Nota-se que o valor da resistência à compressão variou pouco após a idade de 14 dias. Para fins de cálculos e análises, adotou-se como resistência à compressão do concreto das vigas a média das resistências obtidas para os corpos de prova ensaiados na idade de 28 dias, obtendo-se o valor de 36,7 MPa.

4.1.1.2. Módulo

O ensaio do módulo de elasticidade foi realizado conforme previsto na NBR 8522 (2017). Foi adotada a metodologia de tensão fixa, onde o módulo é dado pelo coeficiente angular

da reta do gráfico (Figura 48) que passa a 0,5 MPa e a tensão superior correspondente a 30% da resistência à compressão aos 28 dias. O valor médio do módulo dos 3 corpos de prova ensaiados foi de 36,874 GPa, com um desvio padrão de 0,62 GPa.

Figura 48. Ensaio de módulo de elasticidade do concreto.

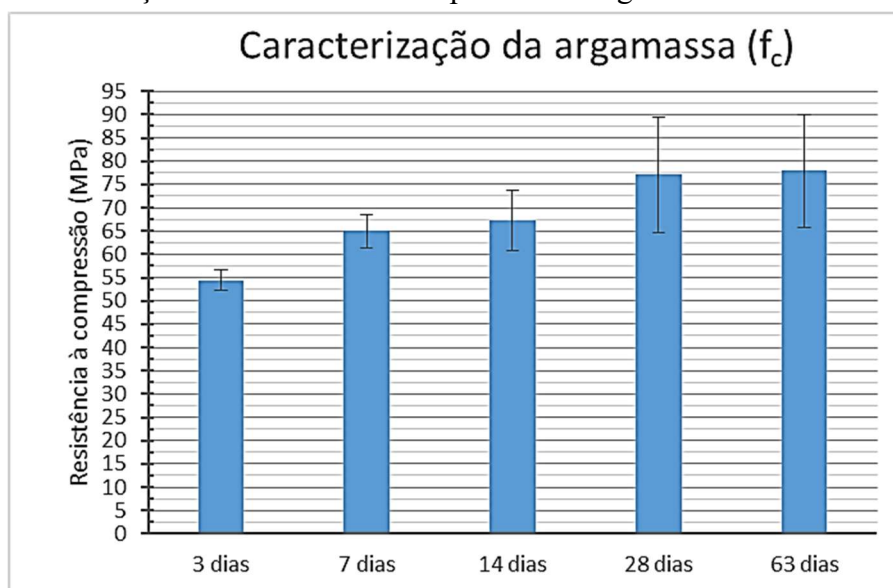


4.1.2. Argamassa

4.1.2.1. CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA

A caracterização da argamassa foi realizada para as idades de 3, 7, 14, 28 e 63 dias, conforme detalhado no item 3.9.4. Foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos e 3 prismáticos para cada idade, todos a partir de uma única mistura. O índice de consistência da argamassa preparada foi obtido conforme preconizado na NBR 7215 (1997), encontrando-se o valor de 229,3 mm. No APÊNDICE A estão apresentados os resultados de todos os corpos de prova ensaiados. Na Figura 49 e na Figura 51 estão apresentados os valores obtidos nas diferentes idades para resistência à compressão e à tração na flexão, respectivamente.

Figura 49. Evolução da resistência à compressão da argamassa utilizada no reforço.



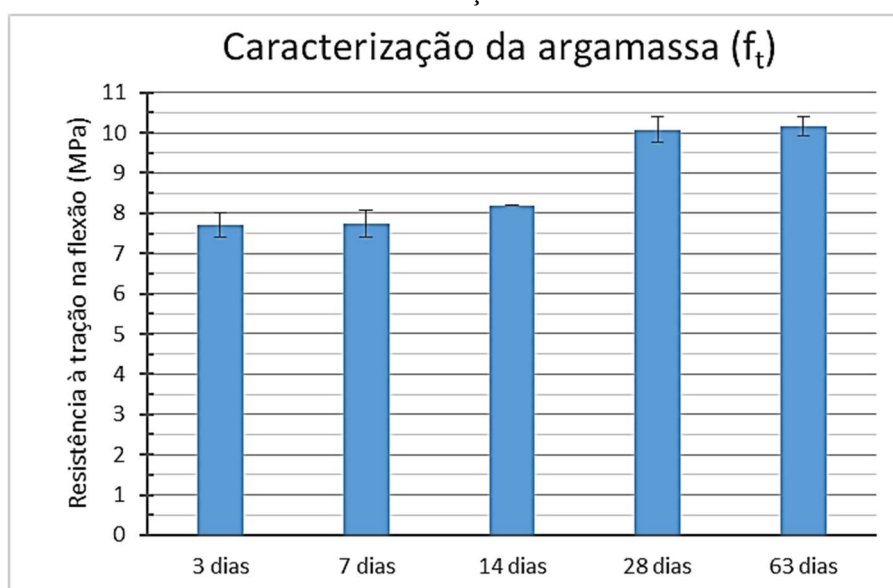
Observou-se uma variação razoável entre os valores obtidos para os corpos de prova cilíndricos da mesma idade, conforme evidenciado pelo desvio padrão da amostra de cada idade indicado no gráfico da Figura 49. Atribuiu-se essa variação à dificuldade de adensamento da argamassa, fato observado também na presença de vários poros nos corpos de prova. Por essa razão, optou-se por adotar como resistência à compressão da argamassa o maior valor obtido dos corpos de prova ensaiados, indicados no gráfico de barras. As rupturas de todos os corpos de prova foram abruptas e com um padrão cônico, conforme registrado na Figura 50. Ressalta-se que com a idade de 3 dias a argamassa já atingiu resistência de 54,4 MPa, superior a do concreto das vigas. Adotando como a resistência à compressão da argamassa o valor de 77,9 MPa, correspondente à idade de 63 dias, tem-se que com as idades de 3, 7 e 28 dias a argamassa apresentou 70%, 83% e 99% da resistência final, respectivamente.

Figura 50. Ruptura típica observada nos corpos de prova cilíndricos da caracterização da argamassa.



Os ensaios dos corpos de prova prismáticos tiveram menor variação entre as repetições e, portanto, utilizou-se o critério recomendado pela NBR 13279 (2005) para calcular o valor da resistência à tração na flexão. A resistência à tração na flexão foi obtida pela média dos resultados dos corpos de prova ensaiados, descartando aqueles que ocasionavam um desvio absoluto maior do que 0,3 MPa. Os dados apresentados no gráfico de barras da Figura 51 correspondem aos valores médios obtidos por no mínimo dois corpos de prova e os respectivos desvios padrão da amostra considerada para obter a média.

Figura 51. Evolução da resistência à tração na flexão da argamassa utilizada no reforço.



Percebe-se pelos dados obtidos que o ganho de resistência à tração na flexão se dá entre as idades de 7 e 28 dias, não apresentando grande diferença entre as demais idades. As rupturas de todos os corpos de prova ocorreram através de fissura no seu centro, conforme registrado na Figura 52. A resistência à tração na flexão para 63 dias foi de 10,17 MPa. Para as idades de 3 e 7 dias atingiu-se 76% da resistência final e para a idade de 28 dias 99%.

Figura 52. Ruptura típica observada nos corpos de prova prismáticos da caracterização da argamassa.



4.1.2.2. Controle da execução do reforço

O controle do reforço executado foi feito conforme apresentado no item 3.9.4 e os resultados estão apresentados no APÊNDICE A. Apesar de ser executado o mesmo traço e mesmo procedimento para todos os preparos de argamassa, constatou-se uma variação nos parâmetros medidos. O índice de consistência obtido pela média dos diferentes preparos foi de 239 mm, com um desvio padrão de 7,4 mm.

Assim como na caracterização da argamassa, os corpos de prova apresentaram um desvio padrão elevado para o valor de resistência à compressão aos 28 dias. Adotou-se então o maior valor obtido da amostra de cada viga ao invés do valor médio, tanto para os corpos de prova curados junto à viga, quanto para os curados em câmara úmida. Para todas as vigas, a argamassa empregada no reforço apresentou resistência à compressão superior à do concreto da viga. Os valores médios entre as diferentes argamassas preparadas foram de 67,2 MPa (desvio padrão de 8,6 MPa) e 70,6 MPa (desvio padrão de 4,5 MPa) para corpos de prova curados junto às vigas e na câmara úmida, respectivamente.

4.1.3. Aço

O aço CA-50, de diâmetro 6,3 mm, apresentou uma tensão de escoamento média de 670 MPa e uma tensão de ruptura de 774 MPa.

4.2. ENSAIO DE FLEXÃO A 4 PONTOS

O ensaio de flexão a 4 pontos foi realizado conforme descrito no item 3.9.1. O mapeamento das fissuras foi feito em apenas uma face das vigas ao longo do ensaio.

Para todas as vigas, a medida do deslocamento refere-se ao centro do vão e foi obtida pela média das medidas feitas pelos dois LVDTs, posicionados um em cada lado da viga. Para as curvas de deformação do aço das vigas instrumentadas, denominadas pela letra A, também foi considerada a média das leituras dos dois extensômetros fixados nas barras até a ruptura de um deles, quando se passou a considerar apenas a leitura do extensômetro não rompido. Com exceção do extensômetro instalado para leitura da deformação do concreto da viga V4c-28d-A, que houve a ruptura na solda logo no início do ensaio, todos os dados referentes aos extensômetros do aço, do concreto e do têxtil foram obtidos com êxito até o momento de sua ruptura ou descolamento por deformação excessiva.

Nas vigas V3c-28d-A, V3c-28d-B, V4c-28d-A e V4c-28d-B a queda abrupta da carga após a ruptura do reforço ativou o mecanismo de segurança da prensa que executa o descarregamento completo da carga aplicada. Portanto, foi necessário realizar novamente a aplicação da carga de forma manual até sua estabilização para dar continuidade ao ensaio, evento possível de ser observado nos gráficos dos ensaios das vigas em questão. Os ensaios foram monitorados até a queda significativa da carga, tendendo ao descarregamento completo, ou até a interrupção forçada por questões de segurança devido ao excesso de fissuração e deslocamento, evitando assim o colapso completo da viga sobre a mesa da prensa.

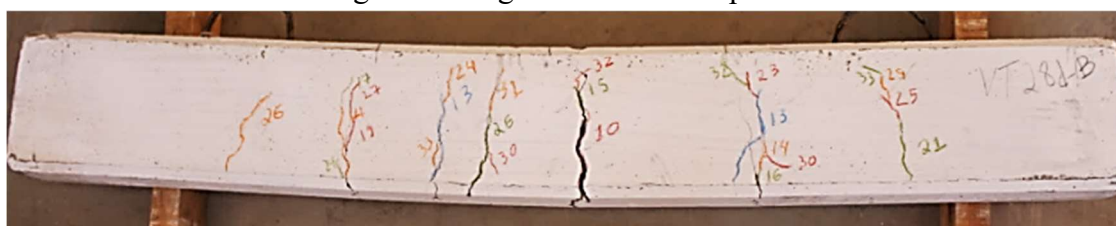
A análise de variância (ANOVA) com emprego da distribuição F de Fisher-Snedecor foi realizada para verificar se houve diferença significativa entre as cargas máximas obtidas em cada lote. Para tanto, empregou-se o software Microsoft Excel ®.

Os resultados obtidos serão apresentados sucintamente por lotes nos itens subsequentes e as discussões mais detalhadas serão apresentadas no item 4.3.

4.2.1. Lote 1 – Testemunho

Todas as vigas testemunho tiveram comportamentos compatíveis entre si e as cargas de ruptura atingidas foram coerentes com as cargas estimadas. As rupturas se deram por deformação excessiva do aço e a fissura de maior abertura se deu no centro da viga, com exceção da viga VT-3/7d-B que ficou um pouco deslocada do centro. O padrão de fissuração de todas as vigas foi similar, exemplificado pela viga VT-28d-B na Figura 53.

Figura 53. Viga VT-28d-B rompida.



Os gráficos a) e b) da Figura 54 apresentam as curvas de deslocamento verticais medidas no centro do vão pela carga aplicada das vigas rompidas com a idade de 33 dias, VT-3/7d-A e VT-3/7d-B, e de 61 dias, VT-28d-A e VT-28d-B, respectivamente. Na Tabela 12 constam os valores máximos das cargas obtidas para cada viga e as médias por grupo e global. Durante o ensaio da primeira viga, VT-3/7d-A, identificou-se um ruído na leitura de dados, gerando picos de valores em todos os canais de dados por alguns segundos. O problema foi atribuído a uma incompatibilidade entre a versão do software e os equipamentos de leitura utilizados. A situação foi solucionada para ruptura das demais vigas empregando o uso da versão anterior do software, onde não foram mais constatados tais ruídos. Apesar de a remoção dos intervalos gerados por esse ruído ter resultado em algumas lacunas na curva da viga VT-3/7d-A, isso não prejudicou a análise dos dados obtidos.

Figura 54. Gráficos da carga em função dos deslocamentos verticais no centro do vão para as vigas testemunho VT-3/7d-A e VT-3/7d-B (a) e VT-28d-A e VT-28d-B (b).

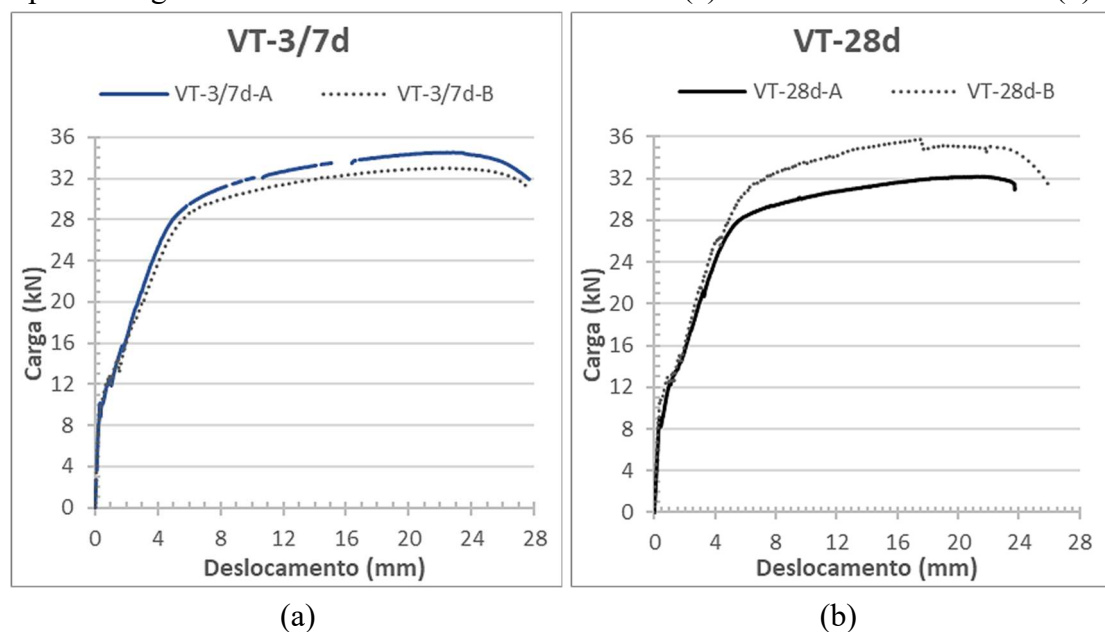


Tabela 12. Cargas máximas, em kN, obtidas nas rupturas das vigas testemunho nas diferentes idades ensaiadas e os desvios padrão e médias correspondentes.

Repetição:	Idade de ruptura:	
	33 dias (VT-3/7d)	61 dias (VT-28d)
A	34,55	32,18
B	33,01	35,79
Média por grupo	33,78	33,99
Desvio padrão por grupo	1,09	2,56
Média global	33,88	
Desvio padrão global	1,61	

Na Tabela 13 está apresentada a ANOVA realizada para verificar se houve diferença significativa entre o valor médio da carga máxima obtida nos dois grupos de vigas testemunho.

Tabela 13. ANOVA realizada para verificar se a diferença de idade do concreto impacta significativamente o valor de carga máxima obtido no ensaio de flexão à 4 pontos.

	SQ	GL	MQ	F (calculado)	F (tabelado)
Idade					
do	0,040996	1	0,040996	0,010624	18,51
concreto					
Erro	7,717915	2	3,858958		

SQ: soma quadrática GL: graus de liberdade
MQ: média quadrática F: valores da distribuição F

A análise estatística resultou em um F calculado muito inferior ao F tabelado, demonstrando que a variável analisada (idade do concreto) não influencia o valor de carga máxima obtido no ensaio. A caracterização do concreto apresentada no item 4.1.1 corrobora para essa conclusão, de que não houve evolução significativa das propriedades do concreto de 33 para 61 dias. Sendo assim, considerou-se que não houve diferença de desempenho entre as vigas testemunho de diferentes idades.

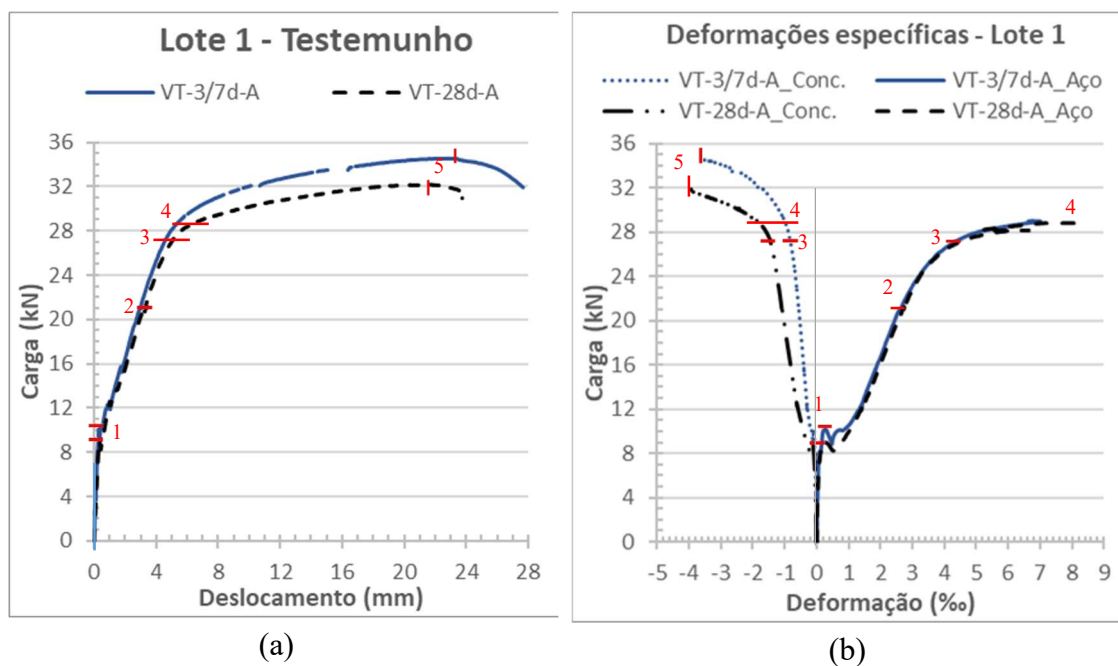
Para os casos em que se fez necessária a comparação com a carga máxima da viga testemunho, adotou-se a média das cargas máximas das quatro vigas como referência, que tem o valor de 33,88 kN. Para a apresentação dos resultados dos demais lotes adotou-se apenas uma única curva de referência, evitando o excesso de informação que dificultaria a observação dos dados. A curva escolhida foi a da viga VT-3/7d-B, uma vez que esta foi a viga com desempenho mais próximo do valor médio obtido para o lote de vigas testemunho. Já para a análise das deformações específicas do concreto e do aço foram utilizadas as curvas da viga instrumentada VT-28d-A ou VT-3/7d-A.

Na Figura 55 estão apresentados os gráficos da carga x deslocamento e carga x deformações específicas obtidos durante o ensaio de flexão das vigas testemunho instrumentadas. Os valores negativos de deformação específica referem-se à compressão do concreto e os valores positivos à tração no aço. Na Tabela 14 estão apresentados os valores medidos nos diferentes instantes em que se observaram mudanças de comportamento da curva, conforme numeração indicada na Figura 55.

As curvas obtidas para as vigas testemunhos estão de acordo com o comportamento clássico de uma viga de concreto armado (CARVALHO e FILHO, 2014 e CHEN, 2007). É possível identificar na Figura 55 os diferentes níveis de deformação: o estágio I, estado elástico, ocorre até o instante identificado pelo número 1; o estágio II, estado de fissuração, ocorre até o instante 3 ou 4; e o estágio III, estado plástico, pode ser identificado a partir do instante 4.

As primeiras fissuras observadas visualmente ocorreram com a carga aproximadamente de 10 kN, fato que também pode ser constatado nas curvas de deformação do aço e do concreto que apresentaram uma pequena queda e o descolamento da origem a partir da carga de 9 kN, aproximadamente. Apesar de não ter sido possível acompanhar o aço até o término do ensaio, é possível identificar que o dimensionamento da viga para trabalhar no domínio 2 foi atendido, pois a deformação específica do concreto se manteve abaixo de 3,5‰, e inclusive de 2‰, até o estágio avançado do escoamento do aço. Além disso, o esmagamento do concreto na face superior da viga só foi identificado visualmente próximo ao término dos ensaios, sendo estes interrompidos por motivo de segurança para evitar o colapso completo das vigas sobre a mesa da prensa.

Figura 55. Curva da carga em função o deslocamento do centro do vão (a) e as deformações específicas do aço e do concreto nas vigas testemunho instrumentadas (b).



Na Figura 55-b nota-se que a deformação do aço é praticamente nula antes da fissuração do concreto. Porém, logo após a fissuração (1) ocorre a acomodação da armadura a uma deformação do aço em torno de 1‰ e então se observa o início do comportamento elasto-plástico do aço. A mudança de inclinação da curva ocorre em torno da deformação de 2,6‰ (2), podendo ser identificado como o início aproximado do escoamento do aço. O escoamento do aço fica bem definido para uma deformação em torno de 4,2‰ (3), onde nota-se que há a mudança da inclinação da curva do concreto. Na curva da carga pelo deslocamento (Figura 55-a), o patamar de escoamento do aço fica bem definido para a carga em torno de 29kN (4), carga para qual ocorre também a ruptura dos extensômetros por excesso de deformação.

Tabela 14. Deformações específicas obtidas no centro da viga para o concreto e para o aço, com os respectivos valores de carga e deslocamento do centro da viga no mesmo instante de tempo.

Instante	Viga	Carga (kN)	Deslocamento vertical (mm)	ϵ_s (‰)	ϵ_c (‰)
(1) Fissuração do concreto	VT-3/7d-A	10,18	0,32	0,3	-0,1
	VT-28d-A	9,11	0,34	0,2	-0,1
(2) Mudança de inclinação da curva do aço	VT-3/7d-A	20,96	2,95	2,6	-0,56
	VT-28d-A	21,04	3,17	2,7	-1,08
(3) Escoamento do aço	VT-3/7d-A	27,85	4,87	4,87	-0,87
	VT-28d-A	27,58	5,27	4,91	-1,50
(4) Ruptura do extensômetro do aço)	VT-3/7d-A	28,99	5,58	7,00	-1,00
	VT-28d-A	28,85	6,70	8,24	-1,80
(5) Deformação máxima do concreto	VT-3/7d-A	34,51	22,61	-	-3,52
	VT-28d-A	31,88	17,56	-	-3,93

**Instantes estão representados na Figura 55.b com os números entre parênteses.
* valor negativos indicam compressão e positivos tração*

4.2.2. Lote 2 – Idade de ruptura

Todas as vigas do lote 2, ensaiadas após 3, 7 e 28 dias da execução do reforço, apresentaram o mesmo comportamento durante o ensaio de flexão e um padrão de fissuração similar, conforme exemplificado na Figura 56.

Figura 56. Viga V3c-7d-B rompida.



Nos gráficos da Figura 57 estão apresentadas as curvas dos deslocamentos verticais do centro da viga em função da carga aplicada para as repetições A e B das vigas do lote 2. Observa-se que o início da fissuração das vigas ocorreu a cargas mais altas do que quando comparada as vigas testemunho e houve um aumento expressivo da carga máxima resistida pela viga reforçada, conforme Tabela 15.

Figura 57. Gráficos dos deslocamentos verticais no centro do vão pela carga para as vigas do lote 2 a) V3c-3d-A e V3c-3d-B; b) V3c-7d-A e V3c-7d-B; c) V3c-28d-A e V3c-28d-B; e d) compilação das curvas referentes às diferentes idades ensaiadas.

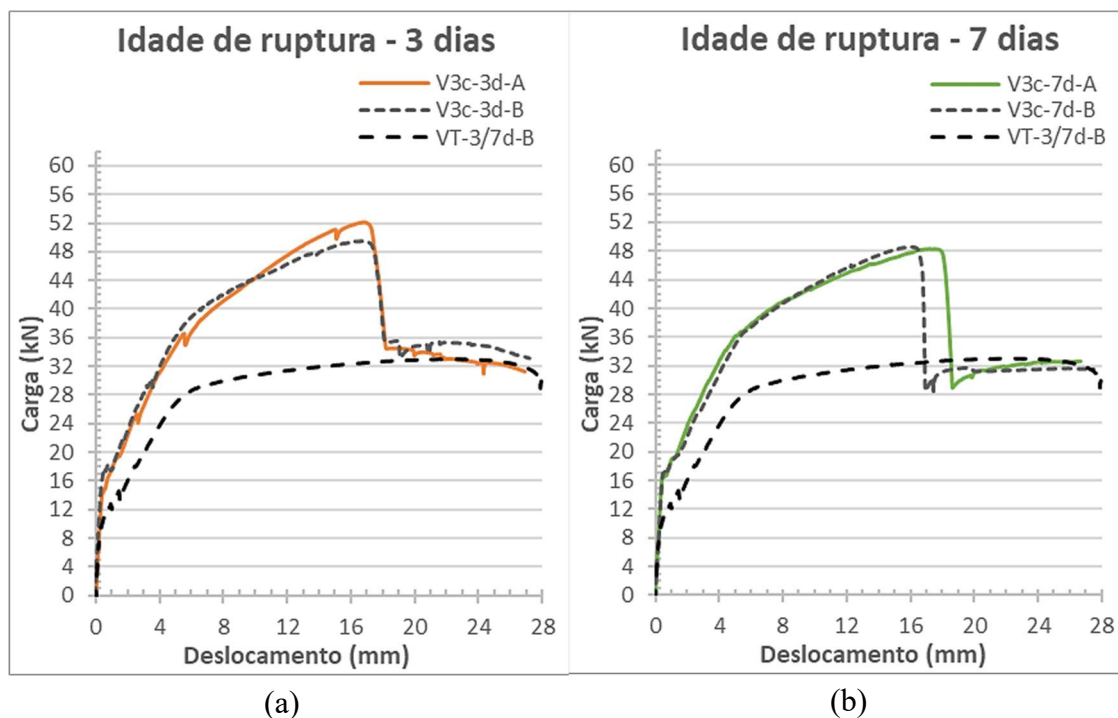
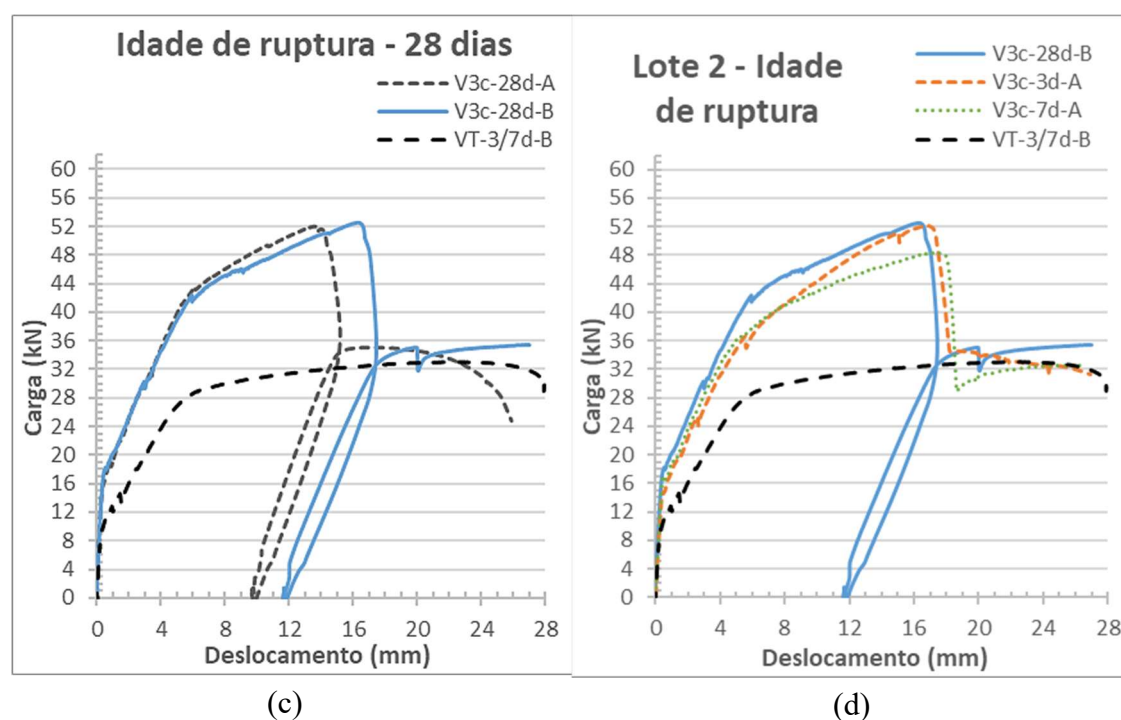
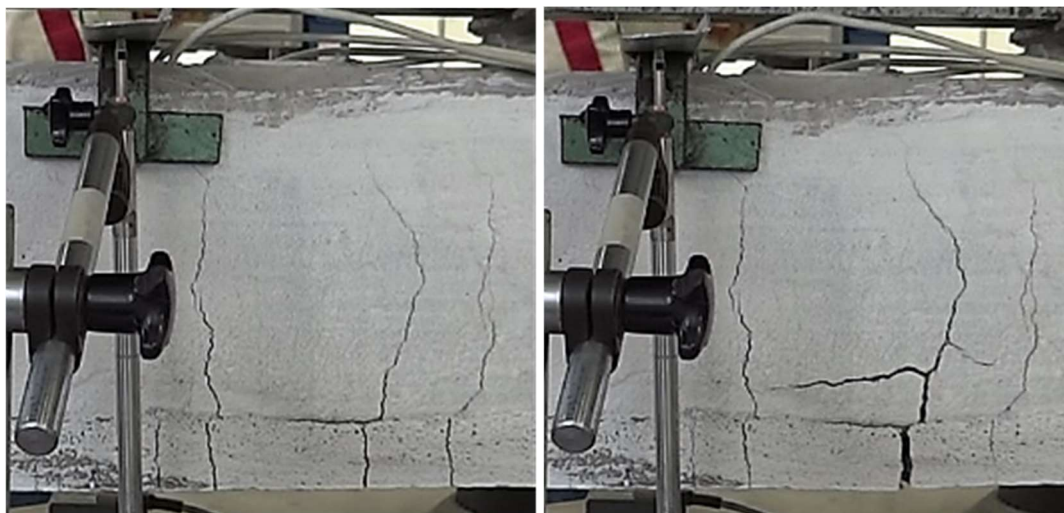


Figura 57. Gráficos dos deslocamentos verticais no centro do vão pela carga para as vigas do lote 2 a) V3c-3d-A e V3c-3d-B; b) V3c-7d-A e V3c-7d-B; c) V3c-28d-A e V3c-28d-B; e d) compilação das curvas referentes às diferentes idades ensaiadas.



O processo de ruptura do reforço se iniciava com o alargamento de uma das fissuras na região central da viga, seguido de sua abertura abrupta e da formação de fissuras horizontais a partir da fissura predominante. O momento de ruptura era identificado primeiramente pela redução da carga resistida pela viga, sendo seguido pela audível fissuração e um estalo que acompanhava a abertura abrupta da fissura central. Após esse instante, ocorria a perda completa da capacidade resistente acrescida pelo reforço, retornando ao mesmo patamar de escoamento observado nas vigas testemunho. Nas vigas de 3 dias não foi identificada visualmente a abertura abrupta como nas demais, porém a perda de carga instantânea ocorreu da mesma forma. Na Figura 58 está apresentado o registro fotográfico do instante imediatamente antes e depois da ruptura do reforço da viga V3c-7d-A para fins de exemplificação. Nas rupturas abruptas, foi possível notar ainda que imediatamente após a ruptura ocorria um leve relaxamento do têxtil promovendo uma diminuição da abertura da fissura. No APÊNDICE B consta o registro sequenciado da abertura de fissura da viga V3c-28d-A, onde pode ser observado o relaxamento do têxtil promovendo a redução da fissura aberta na ruptura.

Figura 58. Momento da ruptura da viga V3c-7d-A que se deu de forma abrupta.



Após a ruptura do reforço, quando a taxa de carregamento foi alterada para 3mm/min, ocorreu o alargamento de todas as fissuras formadas e a carga se manteve em um nível próximo ao valor máximo das vigas testemunho, conforme pode ser observado nos gráficos da Figura 57. Em duas vigas, V3c-7d-A e V3c-28d-B, após a ruptura inicial ocorreu descolamento da camada de reforço na continuidade do ensaio, como pode ser notado na Figura 59.

Figura 59. Descolamento do reforço da viga V3c-28d-B observado na continuação do ensaio após ruptura inicial.



A série B de repetição apresentou de forma geral um resultado muito próximo em relação à série A. Na viga V3c-28d-A observou-se que o deslocamento do centro do vão foi menor do que para o valor de carga máxima, diferenciando-se do resultado dos demais ensaios. Essa variação pode ser atribuída a uma diferente resposta do têxtil aos esforços solicitantes em função do posicionamento final das camadas ou da aderência efetiva em parte das malhas, resultado de interferências não controladas durante a execução dos reforços. Além dos gráficos, os principais dados obtidos nos ensaios do presente lote estão agrupados na Tabela 15.

Tabela 15. Dados dos ensaios de flexão das vigas do lote 2.

Viga	Individual				Por grupo	
	Carga de fissuração (kN)	Carga máxima (kN)	Deslocamento na ruptura (mm)	Incremento em relação a VT	Carga máxima (kN)	Incremento em relação a VT
VT (média)	9,9 (0,74)	33,88 (1,61)	~ 22	-	-	-
V3c-3d-A	14,00	52,10	16,70	53,78%	50,8 (1,84)	49,94%
V3c-3d-B	16,05	49,50	16,71	46,10%		
V3c-7d-A	16,96	48,31	17,17	42,59%	48,45 (0,19)	42,99%
V3c-7d-B	16,96	48,58	16,05	43,39%		
V3c-28d-A	15,82	52,01	13,67	53,51%	52,26 (0,35)	54,25%
V3c-28d-B	16,15	52,51	16,22	54,99%		
V3c-3/7/28d (média)	15,99 (1,09)	-	16,09 (1,25)	-	50,50 (1,92)	49,06%

*Valores de desvio padrão entre parênteses

Os resultados encontrados foram consistentes e não apresentaram diferenças significativas entre si. As médias obtidas para as cargas máximas tiveram desvios padrão baixos e um elevado incremento de carga, independentemente da idade de ruptura analisada.

Para identificar se houve diferença significativa dos valores de carga máxima obtidos para as diferentes idades do reforço, fez-se a ANOVA que está apresentada na Tabela 16. O limite de decisão para comparação de médias foi calculado em 2,3 MPa. Assim, as médias das cargas máximas para as vigas de 3 e 28 dias não se diferenciam entre si e as de 3 e 7 dias ficam praticamente sobre o limite definido.

Tabela 16. ANOVA realizada para verificar se a diferença de idade de ruptura das vigas reforçadas impacta significativamente no valor de carga máxima obtido no ensaio de flexão à 4 pontos.

	SQ	GL	MQ	F (calculado)	F (tabelado)
Idade de ruptura	14,82123	2	7,410617	6,277612	9,55

Tabela 16. ANOVA realizada para verificar se a diferença de idade de ruptura das vigas reforçadas impacta significativamente no valor de carga máxima obtido no ensaio de flexão à 4 pontos.

Erro	3,54145	3	1,180483		
Limite de decisão	$LD = 3 \cdot \sqrt{\frac{MQ}{2}} \rightarrow LD = 2,30 \text{ kN}$				
Diferença entre médias	3 e 7 dias	3 e 28 dias	7 e 28 dias		
	2,36 kN	1,46 kN	3,82 kN		
<i>SQ: soma quadrática GL: graus de liberdade</i> <i>MQ: média quadrática F: valores da distribuição F</i>					

Complementando a análise, foi realizada a ANOVA para os grupos dois a dois, apresentados na Tabela 17. Nota-se que apenas na comparação entre 7 e 28 dias o F calculado é maior do que o F tabelado e poderia se afirmar que houve diferença no parâmetro medido decorrente da variação da idade de ruptura. Entretanto, na comparação entre as vigas de 3 e 7 dias e 3 e 28 dias, estatisticamente não é possível afirmar que há diferença nos resultados encontrados, logo não é possível afirmar que há diferença significativa entre os valores encontrados para quaisquer grupos. Além disso, ressalta-se que as vigas da série A e B para as idades de 7 e 28 dias apresentaram valores muito próximos para as cargas máximas e isso interferiu diretamente na análise estatística. Entretanto, esse padrão de repetição encontrado não é usual para esse tipo de experimento e se houvesse mais repetições é provável que o erro fosse maior, tornando o limite de decisão maior. Sendo assim, entende-se que as idades analisadas na variável idade de ruptura não apresentam influência significativa na capacidade resistente das vigas reforçadas.

Tabela 17. ANOVA realizada entre grupos do lote 2 para verificar se a diferença de idade de ruptura das vigas reforçadas impacta significativamente no valor de carga máxima obtido no ensaio de flexão a 4 pontos.

	3 e 7 dias		3 e 28 dias		7 e 28 dias	
	F_{calc}	F_{tab}	F_{calc}	F_{tab}	F_{calc}	F_{tab}
Idade de ruptura (GL=1)	3,25	18,51	1,22	18,51	180,29	18,51

Tabela 17. ANOVA realizada entre grupos do lote 2 para verificar se a diferença de idade de ruptura das vigas reforçadas impacta significativamente no valor de carga máxima obtido no ensaio de flexão a 4 pontos.

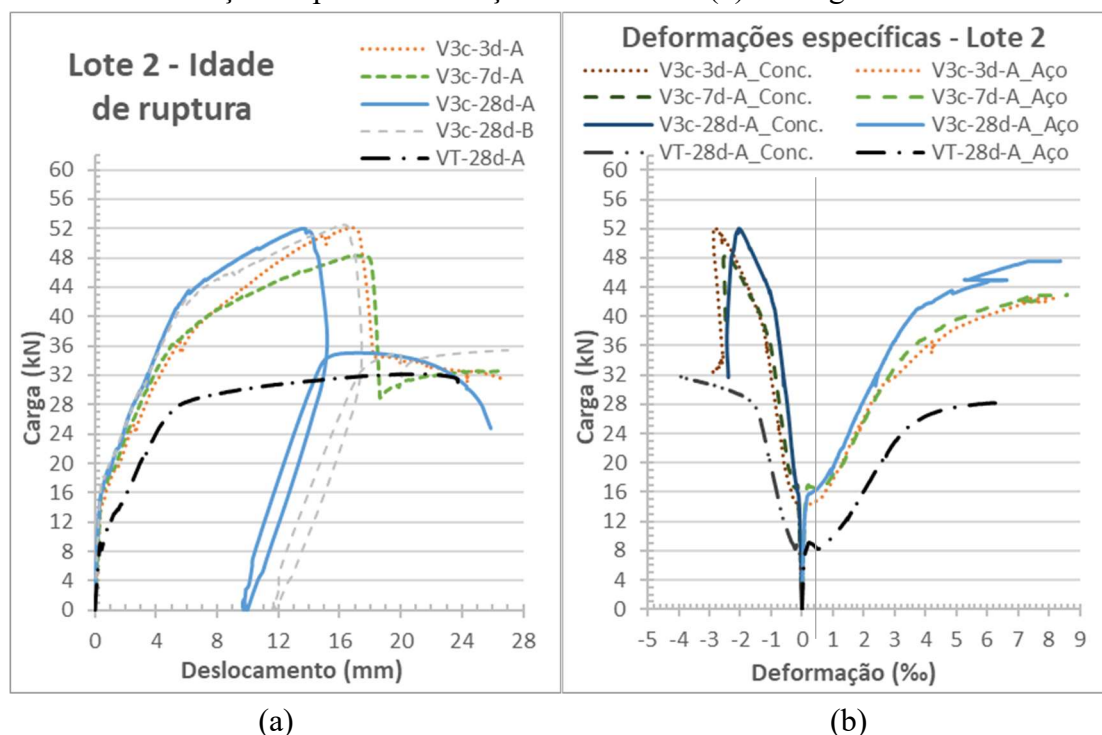
	3 e 7 dias	3 e 28 dias	7 e 28 dias
Erro (GL=2)			
Limite de decisão	2,77 kN	2,81 kN	0,60 kN
Diferença entre médias	2,36 kN	1,46 kN	3,82 kN

SQ: soma quadrática GL: graus de liberdade
MQ: média quadrática F: valores da distribuição F

É importante ressaltar que a argamassa utilizada no experimento possui uma elevada resistência adesiva à tração e é composta de CP-V ARI. Não foi escopo da presente pesquisa verificar se uma argamassa com diferentes propriedades forneceria os mesmos resultados, limitando-se a investigar que, empregando uma argamassa com propriedades favoráveis a um bom desempenho a baixas idades, o reforço apresentaria resultados significativos inclusive a idades mais recentes.

Apesar de considerar que as cargas máximas obtidas foram indiferentes para as distintas idades ensaiadas, é possível identificar algumas variações de desempenho entre os grupos. Nos gráficos da Figura 60 estão apresentadas as deformações específicas do aço e do concreto. Constata-se que nas vigas de 28 dias o início do escoamento ocorreu com cargas mais altas e a deformação do concreto na viga V3c-28d-A foi inferior em relação às outras. Esse comportamento indica que a rigidez das vigas com 28 dias é maior do que o das com menor idade. Da caracterização da argamassa apresentada no item 4.1.2 obteve-se que houve uma evolução considerável da resistência à compressão entre 7 e 28 dias, podendo-se inferir que sua rigidez também aumentou com um maior tempo de cura. Sendo assim, observa-se que além do têxtil a matriz cimentícia utilizada no reforço tem influência na rigidez resultante da viga reforçada.

Figura 60. Gráficos da carga em função do deslocamento vertical (a) e das deformações específicas do aço e do concreto (b) das vigas do Lote 2.



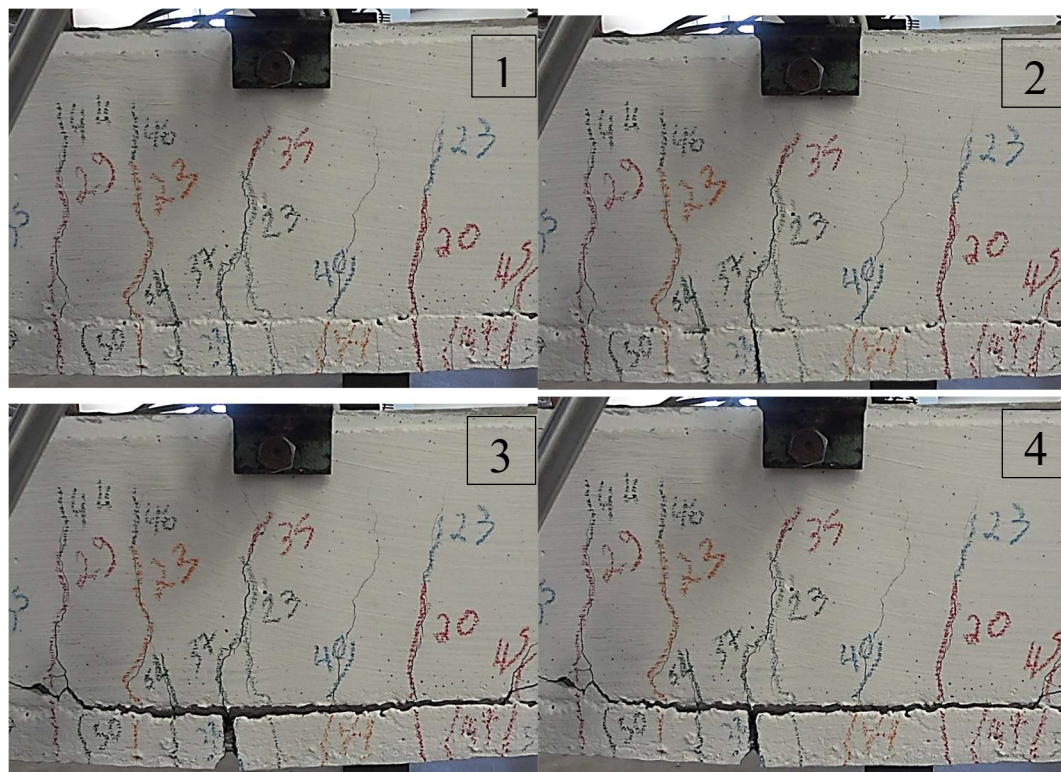
Pelas observações dos aspectos analisados, constata-se que as vigas do lote 2, uma vez que tinham a mesma taxa de armadura têxtil, atingiram a mesma carga máxima, independentemente da idade do reforço no ensaio de flexão a 4 pontos. Pode-se ressaltar também que o modo de ruptura de todas as vigas se deu por deslizamento das fibras do têxtil dentro da matriz cimentícia e que o tempo maior de cura do reforço antes do ensaio promoveu um aumento de rigidez na viga, influenciando o comportamento do ensaio antes do início do escoamento do aço.

4.2.3. Lote 3 – Número de camadas

As vigas do Lote 3 apresentaram comportamento muito similar às vigas do lote 1, diferenciando-se apenas nas vigas reforçadas com 4 camadas de têxtil que apresentaram o modo de ruptura ligeiramente diferente. Nessas vigas, além de ocorrer o deslizamento das fibras dentro da matriz como nas demais, a camada de reforço perdeu aderência na região central e ocorreu seu descolamento juntamente com a abertura abrupta da fissura central. Na Figura 61-a estão apresentadas as imagens do momento da ruptura da viga V4c-28d-A na ordem cronológica, sendo indicadas pela numeração crescente e referente

a uma duração de 2 segundos. Na Figura 61-b e na Figura 61-c é possível observar o reforço descolado após o término do ensaio.

Figura 61. Momento da ruptura da viga V4c-28d-A com descolamento da camada de reforço (a) e detalhe do reforço após término do ensaio das vigas V4c-28d-A (b) e V4c-28d-B(c).



(a)



(b)

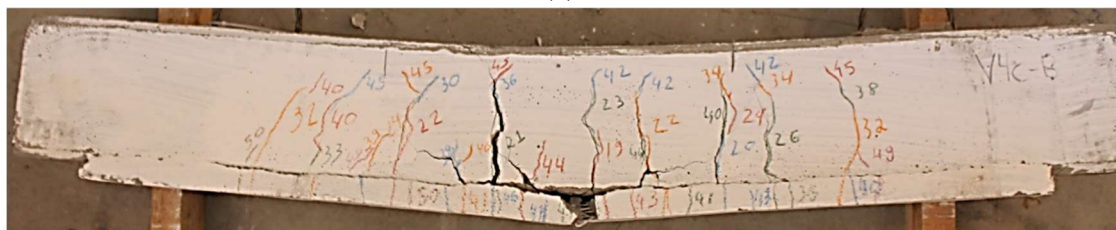
(c)

Apesar da diferença no número de camadas de reforço, o padrão de fissuração observado no lote 3 (Figura 62) foi o mesmo do observado nas demais vigas do programa experimental.

Figura 62. Viga V2c-28d-B (a) e V4c-28d-B(b) rompidas.



(a)



(b)

Nos gráficos da Figura 63 estão apresentados os resultados do ensaio à flexão das vigas reforçadas com 2 camadas e 4 camadas. Além das vigas do lote 3, também foram incluídos os dados obtidos das vigas de 28 dias do Lote 2, uma vez que elas foram reforçadas sob as mesmas condições, tendo o mesmo tempo de cura, porém com 3 camadas de têxtil, um número intermediário para variável estudada no presente lote.

Figura 63. Gráficos dos deslocamentos verticais no centro do vão pela carga para: as vigas do lote 3, V2c-28d-A e V2c-28d-B (a) e V4c-28d-A e V4c-28d-B (b); V3c-28d-A e V3c-28d-B (c); e compilação das vigas reforçadas com diferentes números de camadas.

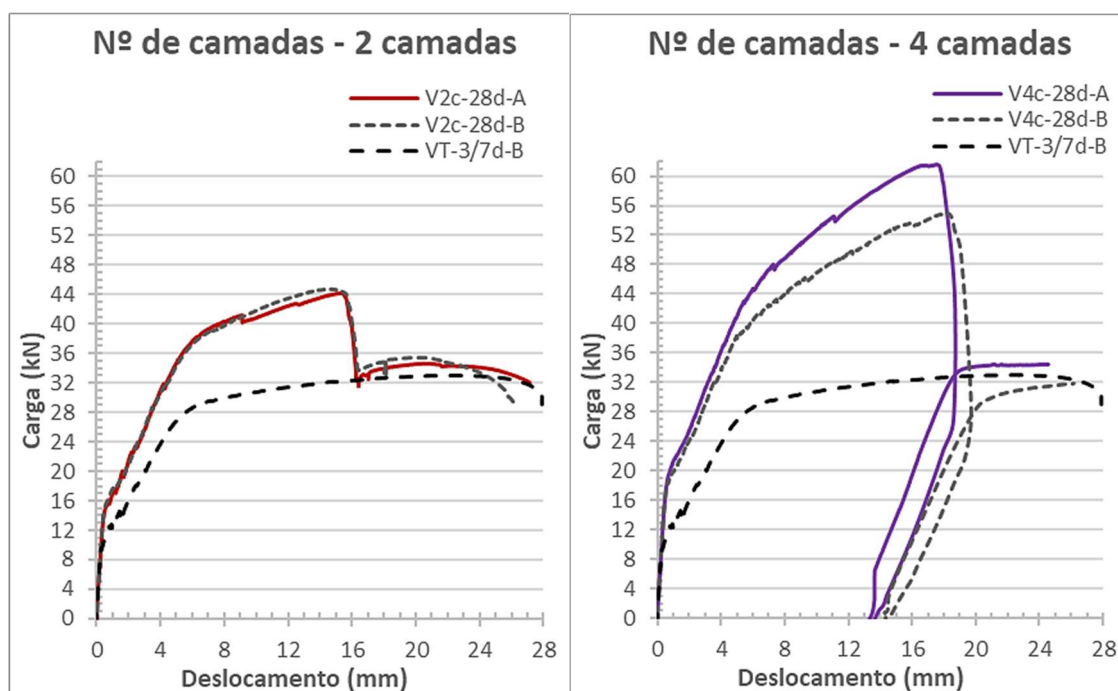
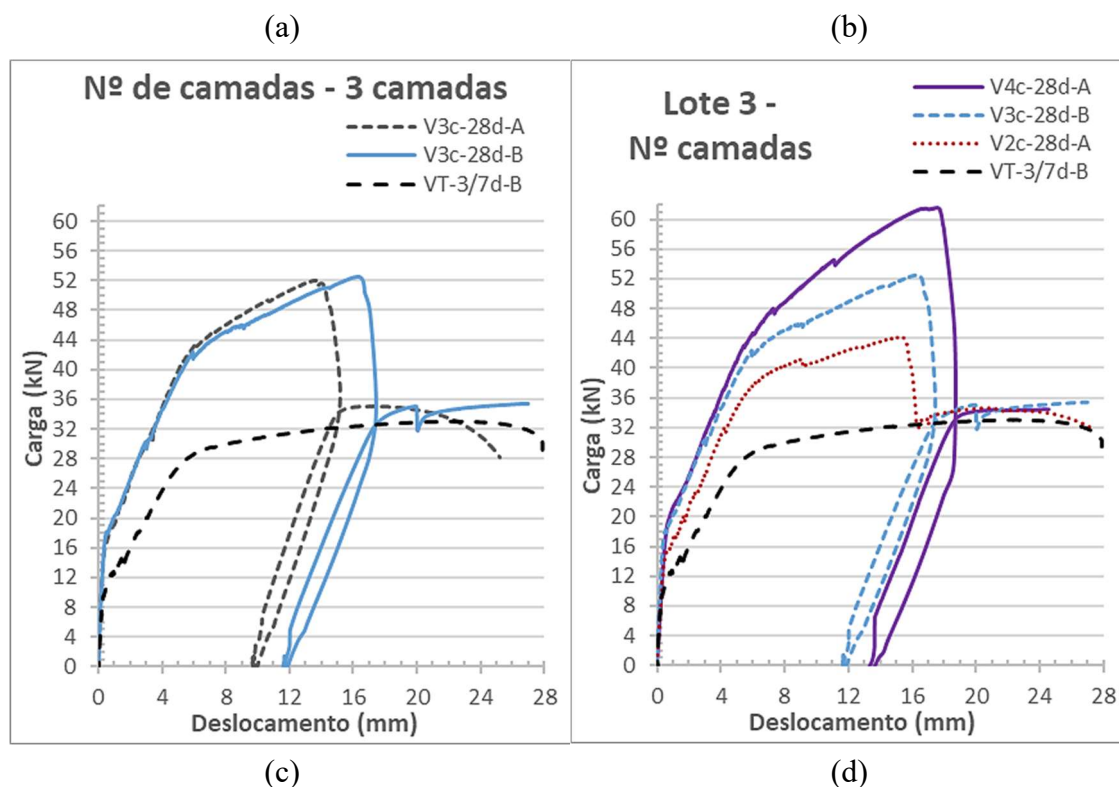


Figura 63. Gráficos dos deslocamentos verticais no centro do vão pela carga para: as vigas do lote 3, V2c-28d-A e V2c-28d-B (a) e V4c-28d-A e V4c-28d-B (b); V3c-28d-A e V3c-28d-B (c); e compilação das vigas reforçadas com diferentes números de camadas.



Na Tabela 18 estão apresentados os principais dados obtidos nos ensaios do presente lote. O aumento de número de camadas impactou tanto o valor da capacidade resistente da viga como no deslocamento vertical no momento da ruptura, que foram maiores para um maior número de camadas. Além disso, percebe-se um sutil aumento da carga que promoveu a fissuração da viga com o aumento do número de camadas de têxtil.

Tabela 18. Dados dos ensaios de flexão das vigas do lote 3.

Viga	Individual				Por grupo	
	Carga de fissuração (kN)	Carga máxima (kN)	Deslocamento na ruptura (mm)	Incremento em relação a VT	Carga máxima (kN)	Incremento em relação a VT
VT (média)	9,9 (0,74)	33,88 (1,61)	~ 22	-	-	-
V2c-28d-A	13,49	44,16	15,39	30,34%	44,44	31,15%
V2c-28d-B	13,36	44,71	14,34	31,97%	(0,39)	
V3c-28d-A	15,82	52,01	13,67	53,51%	52,26	54,25%
V3c-28d-B	16,15	52,51	16,22	54,99%	(0,35)	
V4c-28d-A	16,30	61,60	17,57	81,82%	58,28	72,00%
V4c-28d-B	16,45	54,95	18,18	62,19%	(4,70)	

*Valores de desvio padrão entre parênteses

Com a finalidade de confirmar que de fato as carga máximas atingidas para as vigas reforçadas com diferente número de camadas diferem entre si, foi realizada a ANOVA dos resultados e a comparação entre as médias obtidas, apresentada na Tabela 19.

Tabela 19. ANOVA realizada para verificar se a diferença do número de camadas das vigas reforçadas impacta significativamente no valor de carga máxima obtido no ensaio de flexão à 4 pontos.

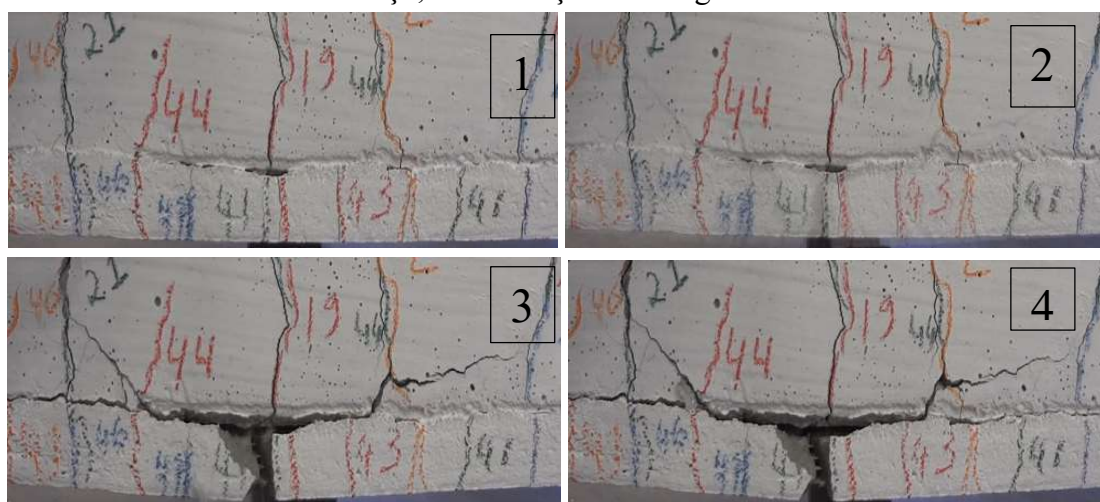
	SQ	GL	MQ	F (calculado)	F (tabelado)
Nº de camadas	192,63763	2	96,31882	12,90704411	9,55
Erro	22,3875	3	7,4625		
Limite de decisão	$LD = 3 \cdot \sqrt{\frac{MQ}{2}} \rightarrow LD = 5,79kN$				
Diferença entre médias	2 e 3 camadas		3 e 4 camadas		2 e 4 camadas
	7,83 kN		6,02 kN		13,84 kN

SQ: soma quadrática GL: graus de liberdade
MQ: média quadrática F: valores da distribuição F

A série B de repetição apresentou valores próximos aos das vigas reforçadas com 2 camadas de têxtil, entretanto a viga com 4 camadas teve uma variação maior. Como a ruptura do reforço com 4 camadas foi acompanhado do descolamento na interface com a viga, especula-se que para um número maior de camadas a limitação da ação do reforço não se dê somente pela perda de aderência entre o têxtil e a matriz cimentícia, mas também pela falta de aderência entre a matriz cimentícia e o substrato.

Com a abertura de uma fissura no ponto de maior momento, as vigas reforçadas, apresentaram ruptura a partir da progressão dessa fissura central, ocasionando o deslizamento do têxtil. Já na viga V4c-28d-B, ao verificar o momento de ruptura de seu reforço, apresentado na Figura 64, observa-se que não havia uma fissura central de maior abertura como foi observado nas demais vigas. Nesta viga, a abertura da fissura central ocorre concomitantemente ao descolamento, não sendo possível identificar qual evento ocorreu primeiro. Sendo assim, é possível deduzir que a ruptura do reforço com mais camadas dependeria de um número maior de fatores e de suas combinações, apresentando uma maior variabilidade de resultado.

Figura 64. Momento da ruptura da viga V4c-28d-B com descolamento da camada de reforço, com duração de 2 segundos.



**Numeração indica a ordem cronológica.*

Outra possibilidade é que a variação entre os resultados pode ter decorrido de algum ruído incorporado durante a execução do reforço que afetou a adesão do reforço ao substrato, passando a limitar o seu desempenho. Considerando a possibilidade de essa repetição não ter alcançado o resultado em potencial devido a uma falha executiva, foi realizada a

ANOVA incluindo apenas o resultado da viga V4c-28d-A para o nível correspondente a 4 camadas, apresentada na Tabela 20.

Tabela 20. ANOVA realizada para verificar a influência do número de camadas das vigas reforçadas no valor de carga máxima, desconsiderando a viga V4c-28d-B.

	SQ	GL	MQ	F (calculado)	F (tabelado)
Nº de camadas	201,73363	2	100,8668	730,2574842	19,00
Erro	0,27625	2	0,138125		
Limite de decisão	$LD = 3 \cdot \sqrt{\frac{MQ}{2}} \rightarrow LD = 0,79 \text{ kN}$				
Diferença entre médias	2 e 3 camadas		3 e 4 camadas		2 e 4 camadas
	7,83 kN		9,34 kN		17,17 kN

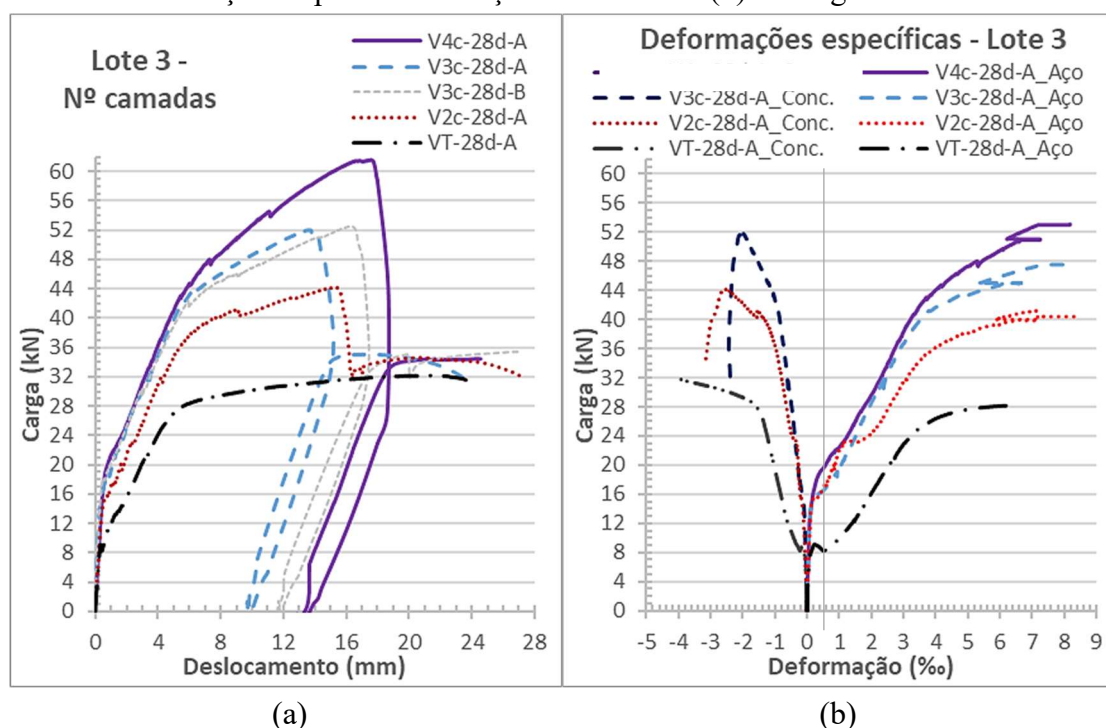
SQ: soma quadrática GL: graus de liberdade
MQ: média quadrática F: valores da distribuição F

Observando as ANOVA apresentadas, incluindo (Tabela 19) e excluindo (Tabela 20) a viga V4c-28d-B, pode-se afirmar que o F calculado é maior que o F tabelado, indicando que os valores encontrados para a carga máxima para os diferentes números de camadas de reforço diferem entre si. Ao excluir a repetição da viga de 4 camadas, a diferença da capacidade resistente em função do número de camadas fica mais evidente ainda. A capacidade resistente da viga testemunho, excluindo a V4c-28d-B, aumentou em 31,15%, 54,25% e 82% para o reforço com 2, 3 e 4 camadas, respectivamente.

Na Figura 65 estão apresentados os gráficos do deslocamento vertical pela carga e das deformações específicas do concreto e do aço pela carga. É possível notar que as curvas das vigas V4c-28d-A e V3c-28d-A (e da V3c-28d-B) apresentam mesmo comportamento até o início do escoamento do aço, e então passam a se distanciar. Já a curva da viga V2c-28d-A desde a fissuração do concreto já apresentou valores reduzidos de carga para os mesmos deslocamentos e deformações que as demais. Assim como nas vigas do Lote 2, foi observado um aumento da rigidez influenciado pelas propriedades da matriz cimentícia. Pode-se constatar no Lote 3 que a rigidez da viga tende a aumentar com um maior número de camadas de reforço. Entretanto, o aumento de rigidez, observando o

distanciamento das curvas, foi menor no acréscimo da terceira camada de reforço e não foi notado no acréscimo da quarta camada de têxtil. O comportamento observado pode indicar uma tendência, para as condições de têxtil e argamassa utilizados, de que a partir na terceira camada de têxtil o reforço não mais contribui para um melhor desempenho nos estádios iniciais do ensaio, limitando-se a proporcionar o aumento da carga de ruptura.

Figura 65. Gráficos da carga em função do deslocamento vertical (a) e das deformações específicas do aço e do concreto (b) das vigas do Lote 3.



4.2.4. Lote 4 – Fissuração prévia

As vigas do lote 4 diferiram do comportamento das vigas do lote 2 e lote 3 apenas quanto à carga de fissuração, pois não apresentaram o mesmo aumento em relação a viga testemunho observado nas demais vigas reforçadas. No caso das vigas V3c-28d-F100-A e B, houve ainda uma redução da carga de fissuração em relação à viga testemunho. A ruptura observada foi por deslizamento do têxtil dentro da matriz, sem a ocorrência do descolamento da camada de reforço. Na Figura 66 é possível observar as vigas antes e após o ensaio de flexão como exemplo do padrão de fissuração. Nota-se que as primeiras fissuras mapeadas no ensaio de flexão correspondiam às fissuras que surgiram na

fissuração prévia antes da execução do reforço, sendo reabertas a uma carga de 6 kN, para a V3c-28d-F100-A, e 8 kN, para a V3c-28d-F50-B.

Figura 66. Viga V PF 50 B e V PF 100 A após a pré-fissuração e após o ensaio de flexão.



Os resultados dos ensaios à flexão das vigas do lote 4 estão apresentados nos gráficos da Figura 67 e na Tabela 21. Também foram incluídos os resultados das vigas V3c-28d-A e V3c-28d-B, do lote 2, uma vez possui mesmos parâmetros de execução com exceção de não ter sofrido uma fissuração prévia.

Figura 67. Gráficos dos deslocamentos verticais no centro do vão pela carga para: as vigas do lote 4, V3c-28d-F50-A e V3c-28d-F50-B (a) e V3c-28d-F100-A e V3c-28d-F100-B (b); as vigas de 28 dias do lote 2 nomeadas como V3c-28d-A e V3c-28d-B (c); e compilação das curvas das vigas reforçadas após diferentes níveis de fissuração prévia (d).

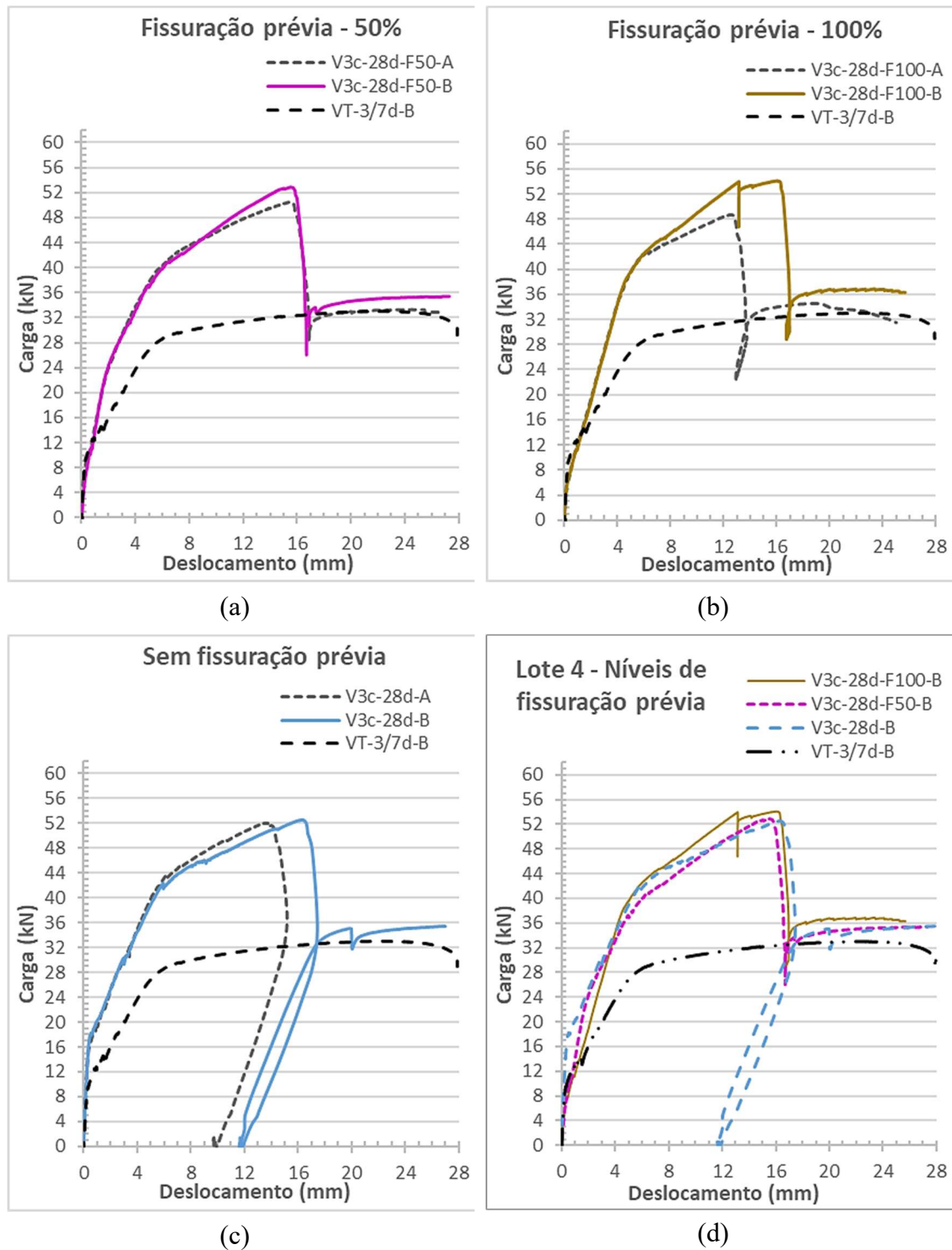


Tabela 21. Dados dos ensaios de flexão das vigas do lote 4.

Viga	Individual				Por grupo	
	Carga de fissuração (kN)	Carga máxima (kN)	Deslocamento na ruptura (mm)	Incremento em relação a VT	Carga máxima (kN)	Incremento em relação a VT
VT (média)	9,90 (0,74)	33,88 (1,61)	~ 22	-	-	-
V3c-28d-A	15,82	52,01	13,67	53,51%	52,26	54,25%
V3c-28d-B	16,15	52,51	16,22	54,99%	(0,35)	
V3c-28d-F50-A	9,98	50,46	15,38	48,94%	51,67	52,51%
V3c-28d-F50-B	7,85	52,88	15,50	56,08%	(1,71)	
V3c-28d-F100-A	5,47	48,66	12,51	43,62%	51,38	51,64%
V3c-28d-F100-B	6,07	54,09	16,06	59,65%	(3,84)	
V3c-28d-F0/50/100	-	-	14,89 (1,48)	-	51,77 (0,45)	52,80%

**Valores de desvio padrão entre parênteses*

Nota-se dos dados obtidos que as vigas V3c-28d-F100-A e V3c-28d-F100-B apresentaram uma variação entre si mais evidente que as demais repetições do programa experimental. A carga máxima atingida durante o ensaio teve um desvio padrão de 3,84 kN e a ruptura da viga da série A ocorreu para um deslocamento de 12,51 mm, menor do que o registrado nas demais vigas. Atribui-se a essa variação a presença das fissuras pré-existentes, que podem induzir uma concentração de tensões em pontos fragilizados, antecipando sua ruptura. Também foi observado uma queda abrupta na carga aplicada da viga V3c-28d-F100-B, que deve duração de cerca 2 segundos, para o deslocamento vertical em torno de 13 mm. Especula-se que esse descarregamento momentâneo possa indicar que houve um deslizamento pontual devido a abertura de fissuras já existentes naquele ponto e que interferiu na aderência entre têxtil e matriz. Porém, por ser pontual, deve ter ocorrido uma redistribuição dos esforços, permitindo que o têxtil continuasse a ser solicitado e ocorrendo novo acréscimo de carga. A ruptura do reforço se deu então para um novo deslizamento definitivo que interrompeu a transferência de esforços para o têxtil. Para verificar a influência da fissuração prévia no valor da carga máxima atingida, fez-se a ANOVA dos dados obtidos, apresentada na Tabela 22.

Tabela 22. ANOVA realizada para verificar se diferentes níveis de fissuração da viga antes da execução do reforço impactam significativamente no valor de carga máxima obtido no ensaio de flexão à 4 pontos.

	SQ	GL	MQ	F (calculado)	F (tabelado)
Níveis de fissuração prévia	0,8122	2	0,4061	0,0684634	9,55
Erro	17,7957	3	5,9319		
Limite de decisão	$LD = 3 \cdot \sqrt{\frac{MQ}{2}} \rightarrow LD = 5,17kN$				
Diferença entre médias	50% e sem fissuração prévia	100% e sem fissuração prévia	50% e 100%		
	0,59 kN	0,88 kN	0,30 kN		

*SQ: soma quadrática GL: graus de liberdade
MQ: média quadrática F: valores da distribuição F*

Constata-se que apesar da variação entre as repetições das vigas V3c-28d-F100, o F calculado é muito inferior que o F tabelado, indicando que a variação dos níveis de fissuração prévia não impacta os valores de carga máxima obtidos. Na análise das médias obtidas a diferença entre elas é muito inferior ao limite de decisão, de forma que se pode assumir que não há diferenciação significativa entre elas.

Apesar de ser constatado que o nível de fissuração prévia não influenciou significativamente o valor da carga máxima do ensaio, as vigas submetidas à carregamento antes da etapa de reforço tiveram comportamento diferenciado na primeira etapa do ensaio. O aumento da carga de fissuração observado em todas as vigas reforçadas dos demais lotes não se repetiu para as vigas que foram previamente fissuradas. As curvas do deslocamento vertical pela carga das vigas previamente fissuradas apresentaram um comportamento mais contínuo, sem diferença evidente de inclinação no ponto que corresponderia a fissuração da viga reforçada, conforme apresentado no gráfico das vigas da série B na Figura 68. Nas vigas da série A é possível complementar a análise através da observação das deformações específicas obtidas, Figura 69, constatando-se que a

fissuração da V3c-28d-F50-A ocorreu próxima a 10,0 kN e da V3c-28d-F100-A em torno de 5,8 kN.

Figura 68. Gráfico detalhando o início da curva de deslocamento vertical pela carga das vigas do Lote 4.

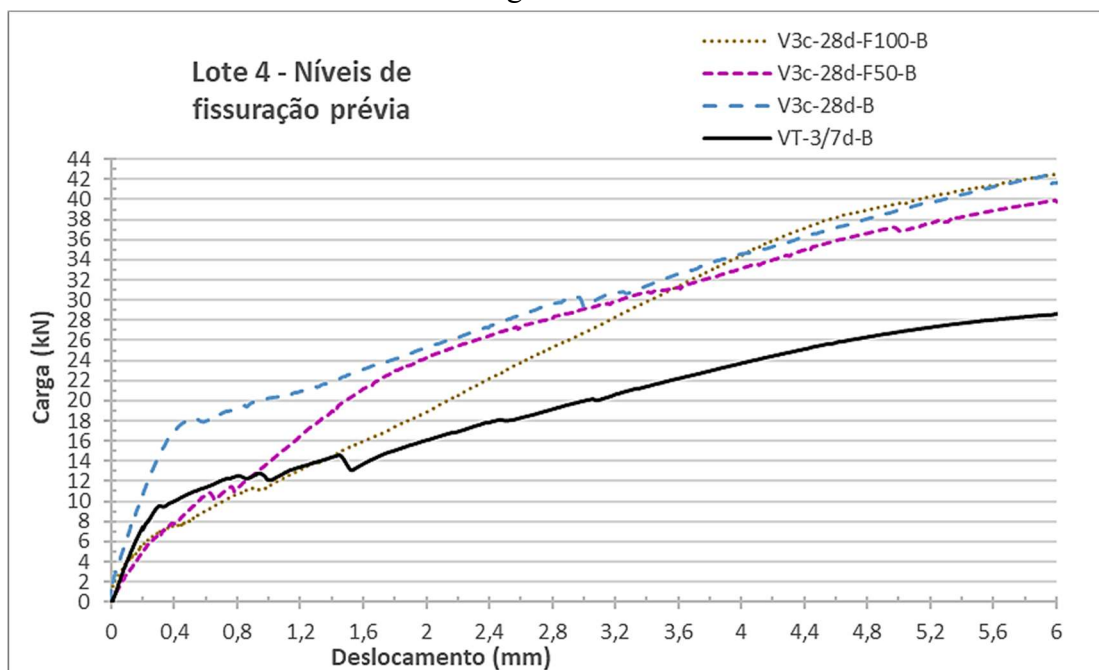


Figura 69. Gráficos completo (a e b) e detalhado (c e d) do deslocamento e das deformações específicas do aço e do concreto para os diferentes níveis de fissuração prévia das vigas reforçadas da série A do lote 4.

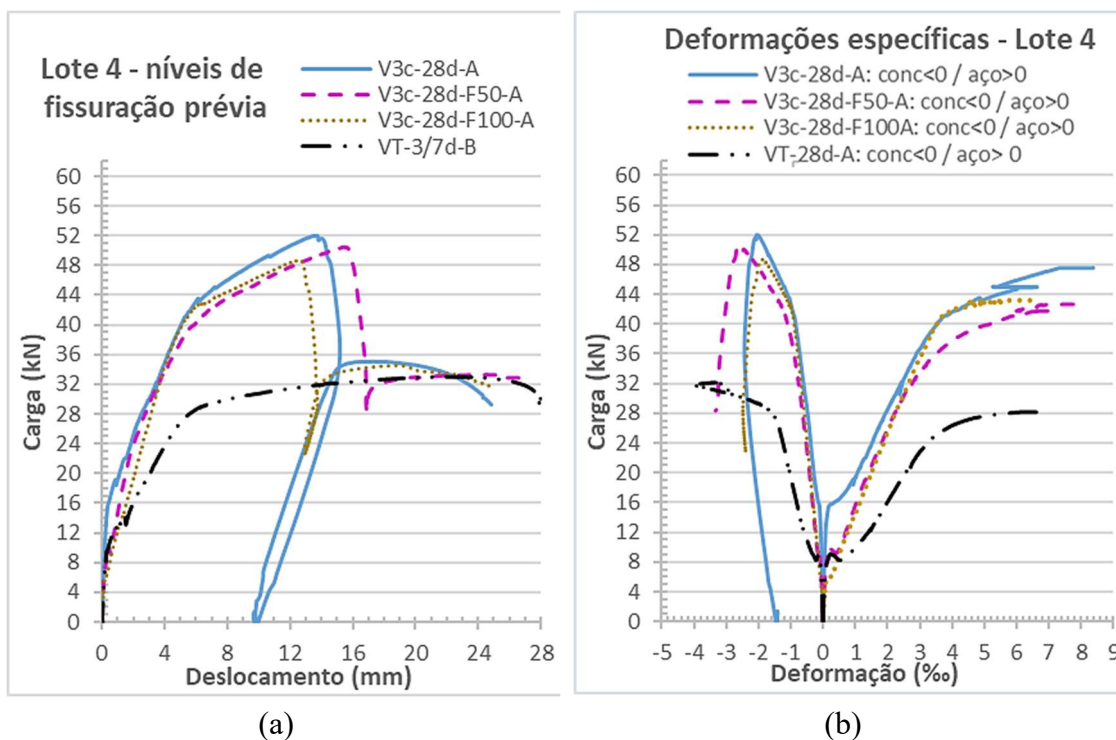
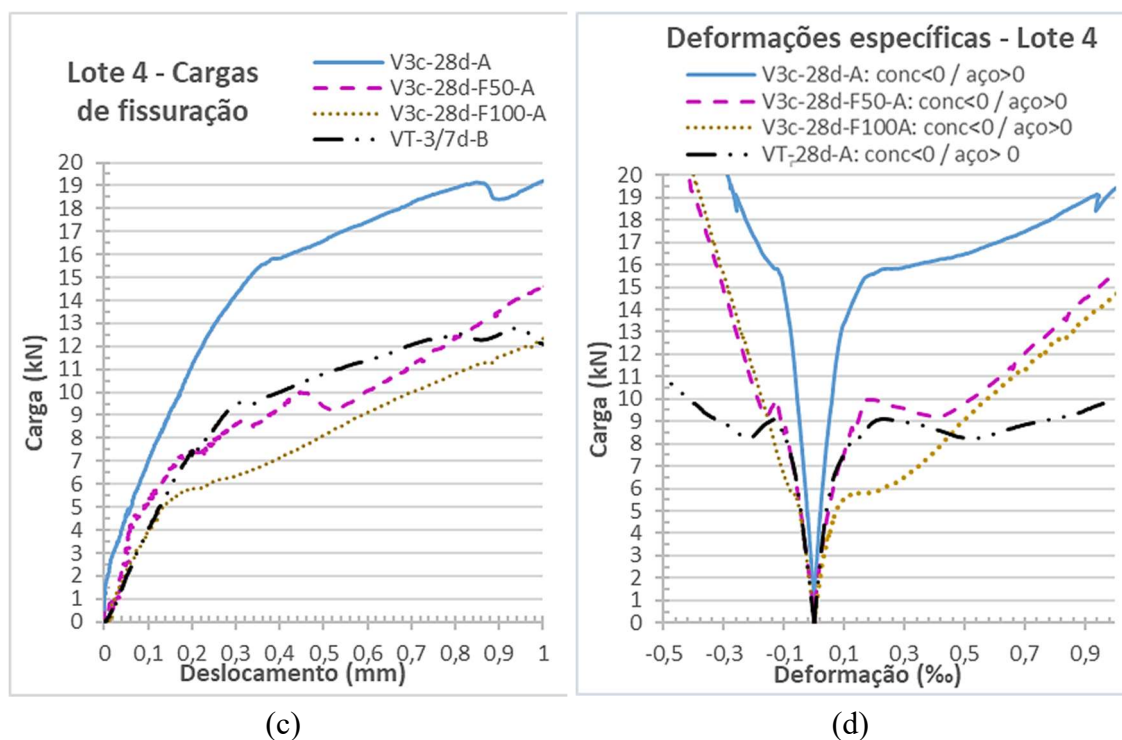


Figura 69. Gráficos completo (a e b) e detalhado (c e d) do deslocamento e das deformações específicas do aço e do concreto para os diferentes níveis de fissuração prévia das vigas reforçadas da série A do lote 4.



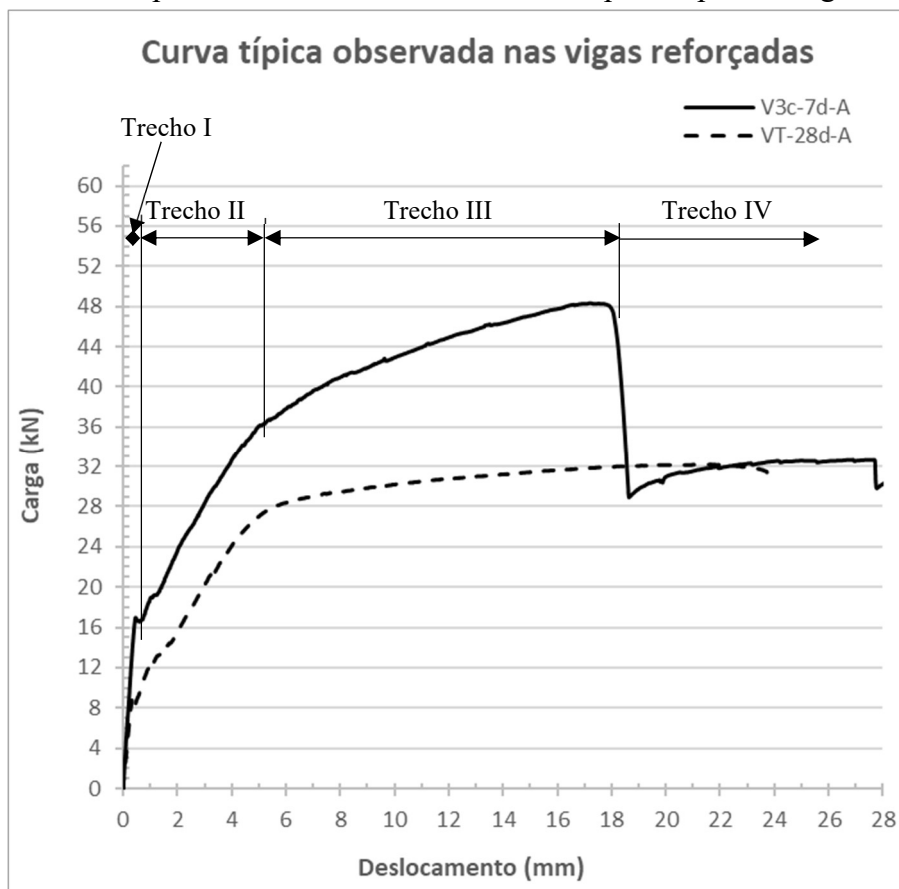
4.3.DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nos itens subsequentes serão apresentadas as observações globais constatadas no estudo experimental desenvolvido.

4.3.1. Comportamento da curva carga x deslocamento no ensaio de flexão

Apesar de serem avaliadas diferentes variáveis nos lotes 2, 3 e 4, todas as vigas reforçadas tiveram o mesmo padrão de comportamento durante o ensaio de flexão a quatro pontos, exemplificado pela viga V3c-7d-A na Figura 70.

Figura 70. Curva típica obtida do ensaio de flexão a 4 pontos para as vigas reforçadas.



No trecho I, a viga encontra-se no estado elástico, onde as tensões de tração não superaram as resistências do concreto e da matriz cimentícia do reforço, promovendo pequenas deformações e, conseqüentemente, pequenos deslocamentos verticais.

O início do trecho II ocorre quando os materiais cimentícios têm sua resistência à tração superada e fissuram, deixando de contribuir efetivamente para o equilíbrio da seção. As tensões de tração impostas à seção passam a ser resistidas pelas armaduras de aço e têxtil. Nesse trecho, observa-se um comportamento linear na curva, refletindo o comportamento elástico da fibra de vidro que compõe o têxtil e do aço antes do seu escoamento. Em comparação com a viga testemunho representada, percebe-se que não há uma grande mudança na inclinação da curva, isso indica que, nessa etapa, o comportamento do aço é predominante no sistema, havendo pouca contribuição da armadura têxtil.

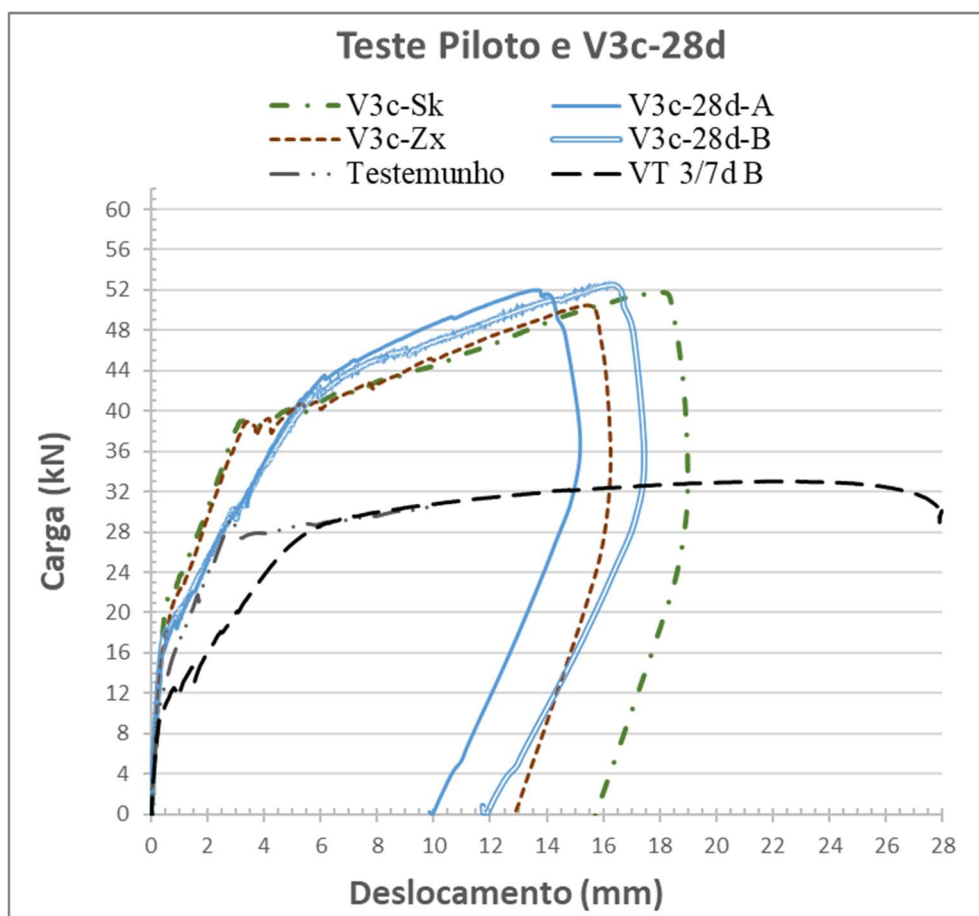
O aumento da carga faz com que o aço atinja sua tensão de escoamento, dando início ao trecho III. Com o aço escoando, o aumento da carga passa a depender prioritariamente da armadura têxtil. Isso fica evidente ao observar que a curva nesse trecho se mantém linear,

coerente com o comportamento da fibra de vidro, porém altera sua inclinação, refletindo a redução da contribuição do aço.

O trecho IV inicia com a ruptura do reforço, promovendo a queda abrupta da carga agregada. Após a ruptura, a carga resistida retorna ao patamar de carga atingido pelas vigas não reforçadas, indicando que o reforço perdeu sua funcionalidade e não influencia mais o comportamento da viga.

Ao analisar as curvas das vigas do teste piloto comparativamente às do programa experimental (Figura 71), percebe-se que há o mesmo padrão de comportamento. O aço e o concreto das vigas do teste piloto foram diferentes dos utilizados no programa experimental, de modo que as vigas testemunhos diferem entre si. As vigas do teste piloto tiveram uma rigidez maior do que a observada nas vigas do programa experimental. Apesar dessas diferenças em suas propriedades, observa-se que as vigas reforçadas do teste piloto apresentaram a mesma inclinação da curva no trecho II que sua viga testemunho, indicando o mesmo comportamento observado no programa experimental de que nesse trecho há pouca contribuição do têxtil. Já no trecho III, a inclinação da curva das vigas do teste piloto foi praticamente a mesma observada nas vigas do lote 2 e 4, onde também foram reforçadas com 3 camadas. Apesar do fato de as tiras de têxteis do teste piloto conterem 9 urdumes ao invés de 8, a diferença de área de têxtil não foi significativa para influenciar a inclinação do trecho III. Essa similaridade de inclinação da curva no trecho III, mesmo que para vigas com diferentes rigidezes, confirma que nesse trecho as propriedades do têxtil contribuem predominantemente para o comportamento da viga.

Figura 71. Curvas carga x deslocamento do teste piloto e da viga V3c-28d-A e V3c-28d-B.



O comportamento observado nas vigas para o trecho I, II e III corresponde ao comportamento usual identificado em outros trabalhos similares (RAOOF, KOUTAS e BOURNAS, 2017; ELGHAZY *et al.*, 2018; EBEAD *et al.*, 2017; ELSANADEDY *et al.*, 2013). Quanto à transição do trecho III para o IV observa-se na literatura existente uma variação maior das possibilidades de comportamento que é diretamente influenciado pelo modo de ruptura. As formas de ruptura mais usuais estão relacionadas ao descolamento total ou parcial da camada de reforço ou por escorregamento do têxtil dentro da matriz cimentícia (ELSANADEDY *et al.*, 2013; AWANI, EL-MAADDAWY e ISMAIL, 2017; EBEAD *et al.*, 2017; ELGHAZY *et al.*, 2018).

De maneira simplificada, pode-se dizer que o escorregamento do têxtil dentro da matriz pode se dar de forma gradual devido à ruptura das fibras mais externas, configurando a ruptura telescópica promovendo uma pseudo-ductilidade, conforme apresentado no item 2.1.2, ou por perda de aderência entre o têxtil e a matriz cimentícia, promovendo uma

perda instantânea da capacidade resistente do reforço (BADANOIU e HOLMGREN, 2003; LORETO *et al.*, 2014; D'AMBRISI e FOCACCI, 2011). No presente estudo foi observado o deslizamento do têxtil por perda de aderência, onde todas as vigas reforçadas submetidas ao ensaio de flexão apresentaram uma queda abrupta da capacidade resistente.

Outra observação notável sobre os ensaios realizados é que as curvas obtidas para série A e B de uma mesma configuração de viga apresentaram resultados muito similares para os trechos I e II. Com exceção da viga reforçada com 4 camadas do lote 3, as demais vigas do programa experimental e do teste piloto praticamente se sobrepõem. Essa diferença na curva V4c-28d-B em relação as demais reforça a hipótese apresentada no item 4.2.3, de que essa repetição teve ruídos incorporados em sua execução. A uniformidade observada nos trechos iniciais deve-se a homogeneidade dos materiais que governam o comportamento nesses trechos, o concreto e a argamassa no trecho I e o aço no trecho II. Tanto o concreto, que foi executado em um único preparo por uma central de concreto, quanto a argamassa e o aço oriundos de processo industrial tendem a apresentar uma pequena variabilidade garantindo a semelhança entre todas as vigas. Esse comportamento sobreposto das curvas nos trechos iniciais evidencia que o programa experimental teve poucos ruídos incorporados na execução das vigas e na execução do reforço no que se refere à matriz cimentícia.

As pequenas variações de comportamento observadas nas cargas máximas das vigas ocorreram a partir do trecho III, onde o têxtil governa o comportamento da viga. Atribuiu-se essas variações observadas às tiras de têxteis que apresentavam pequenas diferenças entre si quanto à distância entre os feixes da trama e do urdume e que foram posicionadas manualmente durante a execução do reforço, podendo ter ocorrido diferença em seu posicionamento. Além disso, por se tratar de um material flexível, não é possível garantir que a acomodação final dos têxteis foi idêntico em todas as vigas.

4.3.2. Padrão de ruptura

Apesar de haver variações entre as vigas dos diferentes lotes estudados, todas as vigas apresentaram o mesmo tipo de ruptura: as vigas reforçadas tiveram uma queda abrupta da capacidade resistente ao ocorrer o deslizamento do têxtil no ponto de abertura de uma fissura central, conforme pode ser observado na Figura 72. Com exceção da viga V4c-28d-B, conforme discutido no item 4.2.3, que pode ter tido seu ensaio interrompido por

uma perda de aderência com o substrato concomitante ao deslizamento do têxtil, nota-se a consistência do comportamento observado quando ao modo de ruptura. Sendo assim, pode-se dizer que para o reforço executado, o fator limitante de seu desempenho foi a aderência entre o têxtil e a matriz cimentícia.

Figura 72. Fissura central, com medida máxima em torno de 5 mm, no centro do vão da viga V3c-28d-F100-A, logo após sua ruptura por deslizamento do têxtil dentro da matriz cimentícia. (a) vista lateral; (b) vista de baixo para cima



(a)



(b)

Esse mesmo modo de ruptura foi observado por Ebead *et al.* (2017), que reforçou vigas com têxteis de fibra carbono e observou que para 1 e 2 camadas de têxtil, mesmo quando se tratava de vigas com diferentes taxas de armadura de aço, o reforço se rompeu devido ao escorregamento do têxtil.

Quanto ao modo de ruptura para as vigas com 4 camadas de reforço estarem associadas ao descolamento na região central da viga, observaram-se comportamentos similares em outras pesquisas. Ebead *et al.* (2017) executaram vigas com uma, duas e três camadas de reforço. Nos casos com uma e duas camadas os autores observaram o deslizamento do têxtil, enquanto para o reforço com quatro camadas a ruptura se deu por deslocamento parcial do reforço, essas observações corroboram com os resultados da presente pesquisa. Loreto *et al.* (2014) estudaram lajes e Babaeidarabad, Loreto e Nanni (2014) vigas. Ambos os trabalhos realizaram reforços com 1 e 4 camadas de têxtil de PBO, obtendo o mesmo padrão de ruptura: deslizamento do têxtil para o reforço com 1 camada e descolamento do reforço com 4 camadas.

Além do padrão de ruptura ser sempre o mesmo, percebe-se que, com pequenas variações, todas as rupturas se deram para deslocamentos verticais no centro do vão próximos a 16 mm. Isso ocorreu inclusive para a viga do teste piloto que foi reforçada com a mesma argamassa do programa experimental. Pode-se deduzir dessa observação que ao atingir determinado nível de deformação específica do têxtil, uma vez que essa deformação está relacionada ao deslocamento vertical da viga, os esforços atuantes superaram a aderência existente entre o têxtil e a argamassa. A viga do teste piloto que foi executada com outra argamassa também teve ruptura por deslizamento do têxtil, porém ocorreu para um deslocamento vertical de 18 mm. É provável que a argamassa utilizada na viga V3c-Sk tenha tido uma maior aderência com o têxtil, o que postergou o seu escorregamento e permitiu que o material fosse mais solicitado e portanto a viga resistisse a um deslocamento vertical um pouco maior.

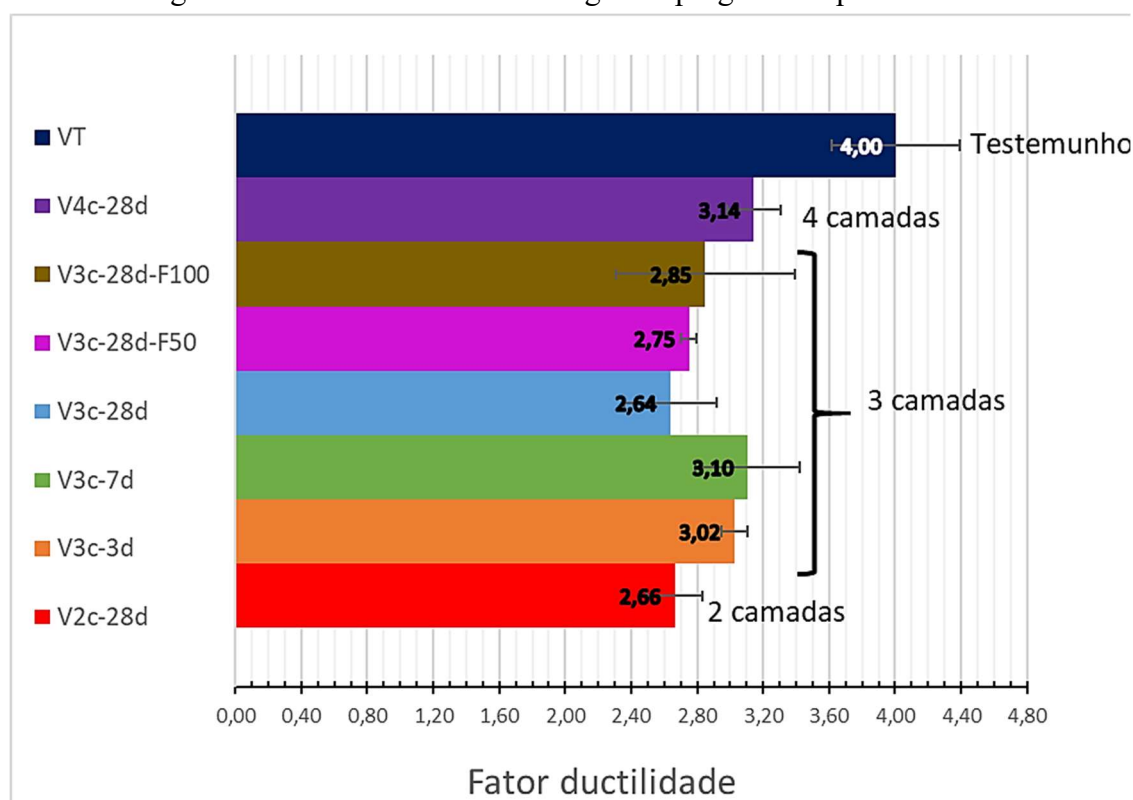
4.3.3. Ductilidade na flexão

Observando as curvas de carga pelo deslocamento vertical das vigas reforçadas de diferentes maneiras, tanto as do programa experimental como as do teste piloto, percebe-se que em todas elas o valor de deflexão correspondente ao ponto de escoamento do aço da viga testemunho se manteve, diferenciando-se entre si apenas o valor da carga aplicada. Esse mesmo comportamento ocorreu nas vigas reforçadas dos estudos de Elsanadedy *et al.* (2013), D'ambrisi e Focacci (2011) e Ebead *et al.* (2017).

Outro fato em comum das vigas reforçadas é que todas tiveram sua ruptura após o escoamento do aço, entretanto houve a redução da ductilidade em relação a viga sem

reforço. Essa diminuição do trecho dúctil da curva já era esperada, uma vez que o têxtil de fibra de vidro é um material frágil. A carga máxima para a viga testemunho ocorreu para deslocamentos em torno 22 mm, enquanto para as vigas reforçadas os valores médios foram de 16 mm. Na Figura 73 está apresentado o gráfico em barras com o fator ductilidade das vigas, obtido pela relação entre os deslocamentos correspondentes à carga máxima e ao escoamento do aço, com indicação dos respectivos desvios padrão. Percebe-se que houve uma redução no fator ductilidade para as vigas reforçadas, sendo ligeiramente maior para as vigas com maior número de camadas. Isso pode estar associado a uma melhor distribuição de tensões entre as camadas, permitindo que o têxtil tenha deformações ligeiramente maiores antes de perder a aderência com a matriz cimentícia. As vigas com menor idade de reforço também apresentaram valores ligeiramente mais altos, indicando a influência do tempo de cura da argamassa.

Figura 73. Fator ductilidade das vigas do programa experimental.

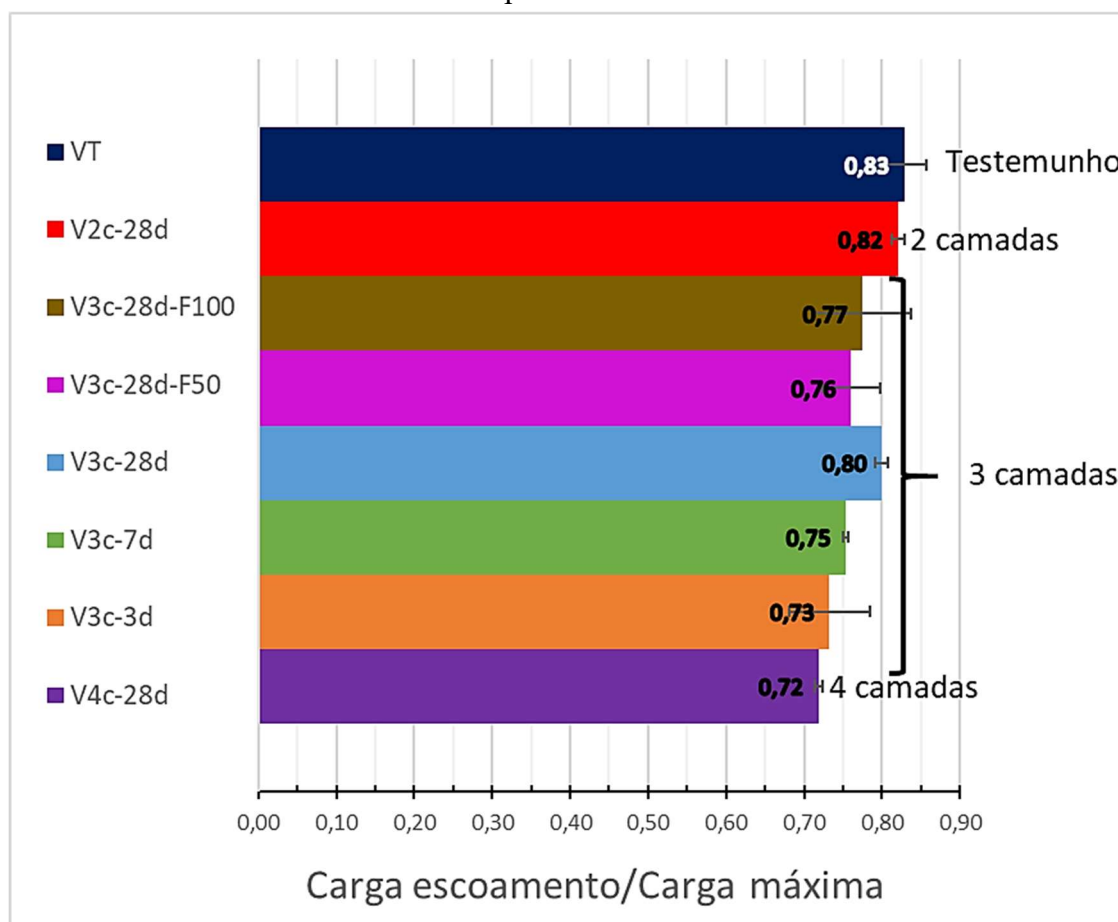


Independentemente do número de camadas e da configuração do reforço, o fator ductilidade médio das vigas reforçadas corresponde a 72% em relação à viga testemunho. Para fins de mensuração, podem-se citar os valores obtidos por outros estudos. Ebead *et al.* (2017) reforçaram vigas à flexão utilizando 1 e 3 camadas de têxtil de fibra de carbono

e obtiveram um percentual do fator ductilidade em torno de 45% da viga não reforçada, já para reforço com 1 e 2 camadas de PBO encontraram um percentual médio de 69%. Elsanadedy *et al.* (2013) utilizaram têxtil de fibra de basalto em reforços de vigas à flexão com 5 e 10 camadas para dois tipos de matriz cimentícia, obtendo percentuais do fator ductilidade entre 40 e 49% em relação à viga controle. Ebead *et al.* (2017) e Loreto *et al.* (2014) executaram reforço em lajes utilizando têxtil de PBO com 1 e 4 camadas, encontrando percentuais mais baixos de 40 e 25%, respectivamente.

Apesar de o reforço ter promovido uma redução da ductilidade da viga, nota-se um melhor indicativo quanto à carga correspondente ao escoamento do aço nas vigas reforçadas, apresentando um percentual menor em relação à carga máxima resistida quando comparada às vigas testemunho. Quando o aço atinge o escoamento, a deflexão da viga e a abertura de fissuras serão visualmente excessivas e indicarão o risco de ruptura aos usuários. Portanto, quanto maior a diferença entre a carga de ruptura em relação a carga de escoamento, a viga pode ser considerada mais segura. Na Figura 74 está indicada a relação da carga de escoamento pela carga máxima, com indicação dos respectivos desvios padrão. Observa-se que quanto maior o número de camadas, menor é essa relação.

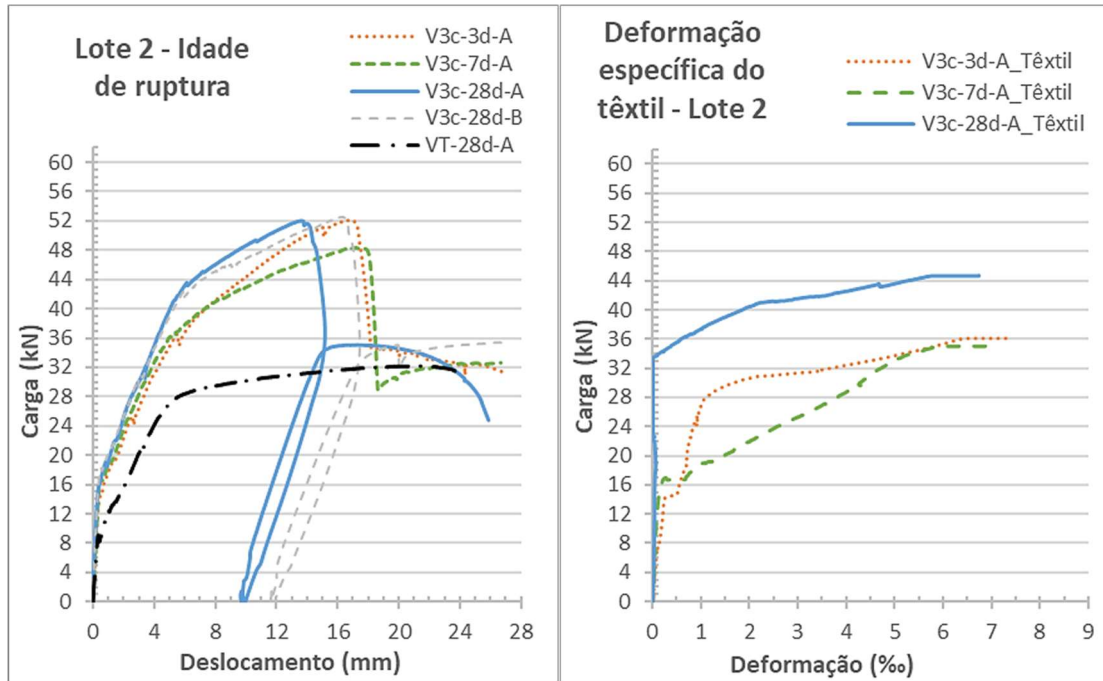
Figura 74. relação da carga de escoamento pela carga máxima das vigas do programa experimental.



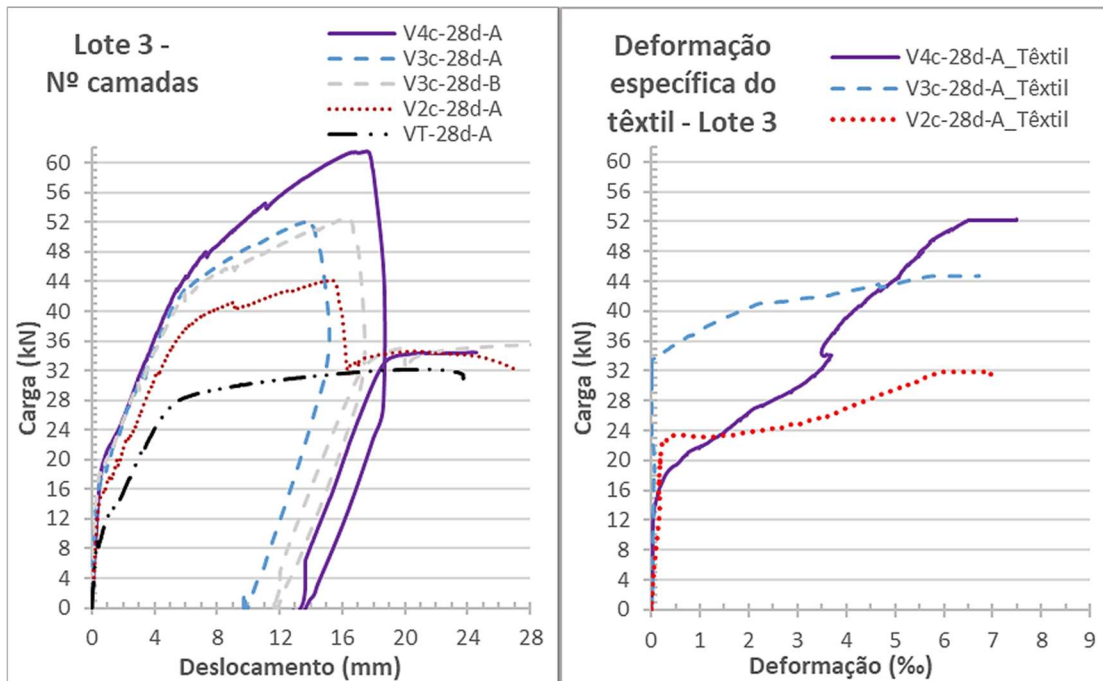
4.3.4. Deformação específica do têxtil

Na Figura 75 estão apresentadas para cada lote as curvas obtidas dos extensômetros fixados na última camada do têxtil. Ao lado dos gráficos da deformação específica do têxtil constam as curvas da carga em função do deslocamento vertical da viga dos respectivos lotes. As leituras foram realizadas até a ruptura dos extensômetros.

Figura 75. Curvas da carga pelo deslocamento e as deformações específicas do têxtil das vigas do lote 2 (a), lote 3 (b) e lote 4 (c).

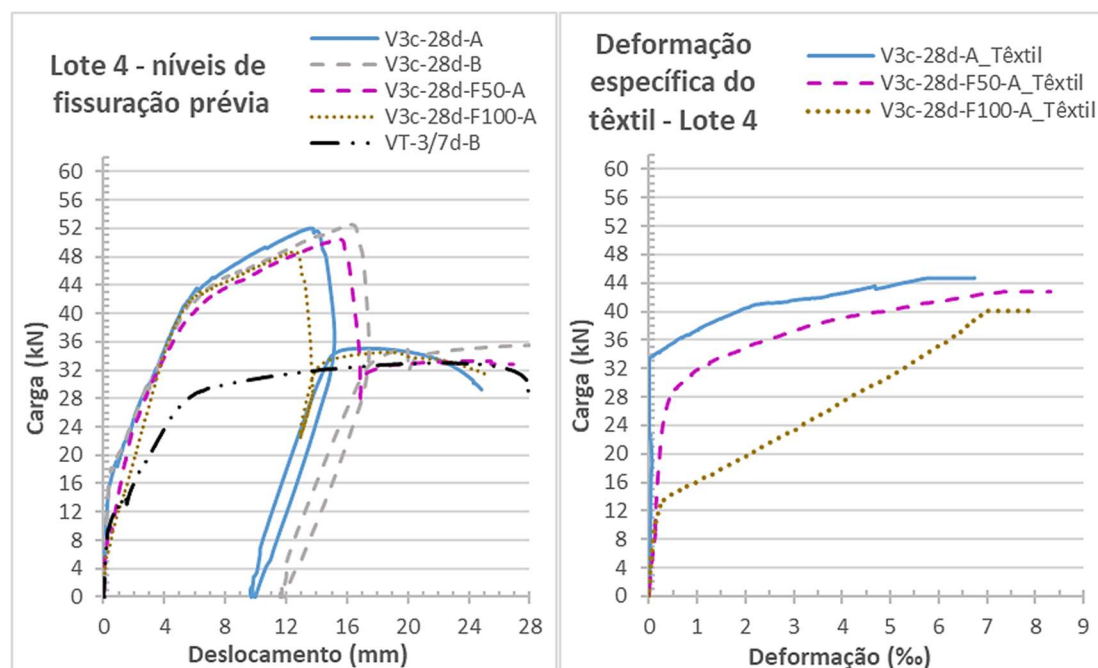


(a)



(b)

Figura 75. Curvas da carga pelo deslocamento e as deformações específicas do têxtil das vigas do lote 2 (a), lote 3 (b) e lote 4 (c).



(c)

Em todas as vigas reforçadas, o têxtil só apresentou deformações para cargas superiores à carga de fissuração do concreto. Esse comportamento é consistente com a configuração do reforço, uma vez que o têxtil foi executado sem nenhum tipo de protensão. Os urdumes foram posicionados livremente nas camadas de reforço, de forma que apenas após a fissuração do concreto as deformações foram suficientes para tensionar os urdumes e fazer as camadas de reforço contribuírem para o equilíbrio da seção.

O extensômetro utilizado não permitiu leituras mais prolongadas durante o ensaio, sendo interrompidas antes do término do mesmo. Nota-se que não existe um padrão de comportamento das curvas observadas. Na viga V3c-28d-A, observa-se que o urdume monitorado não apresentou nenhuma deformação até a carga de 32kN, quando então passou a sofrer grandes deformações para pouco acréscimo de carga. Já para as vigas V3c-7d-A, V4c-28d-A e V3c-28d-F100-A as deformações iniciaram logo após a fissuração e foram aumentando juntamente com a carga até a interrupção da leitura. Nas vigas V2c-28d-A e V3c-28d-F50-A, também houve uma solicitação tardia do urdume, apresentando uma leve evolução da carga ao longo do acréscimo de deformação. Na viga V3c-3d-A, o urdume apresentou deformações logo após a fissuração e depois não evoluiu mais, voltando a deformar apenas para cargas mais elevadas após o escoamento do aço.

Isso pode ter ocorrido devido a uma acomodação do têxtil no processo de abertura de fissuras. Por último, pode-se destacar a deformação observada na viga V3c-28d-F100-A, o comportamento da curva diferenciou-se das demais pela relação linear entre carga e deformação. Isso pode ser atribuído à existência de mais fissuras, de modo que a partir da fissuração da matriz cimentícia o urdume monitorado teve menos influência da contribuição do concreto no equilíbrio da seção e a curva apresentou o comportamento linear-elástico da fibra de vidro.

Especula-se dois motivos para essa variação de comportamento das curvas. A primeira poderia estar relacionada à imprecisão no sistema de fixação do extensômetro, de modo que as fibras podem ter começado a se deformar antes da primeira leitura, mas não foi registrado pelo extensômetro devido a uma interferência de uma eventual resina residual ou ainda do próprio adesivo utilizado.

Outra possibilidade é atribuída a falta de protensão nos têxteis e a variações existentes entre os urdumes quanto ao seu posicionamento final e suas características retilíneas. Além disso, ainda existe a possibilidade de terem se formado pontos sem aderência entre o têxtil e a matriz cimentícia, interferindo na transmissão de esforços e impactando como o têxtil se deforma. O monitoramento do têxtil foi realizado em um único ponto de um urdume, não representando o comportamento da tira de têxtil como um todo. Além disso, a deformação do extensômetro era limitada, não permitindo acompanhar como o urdume se comportou ao longo do ensaio.

A falta de padrão da deformação dos urdumes monitorados nas diferentes vigas pode estar relacionada com o comportamento observado entre as vigas da série e A e B de uma mesma configuração de viga, onde as curvas do ensaio de flexão se sobrepõem no trecho I e II e se diferem no trecho III em que o têxtil apresenta maior influência. De modo geral, pode-se dizer que não é possível compreender das curvas obtidas para as deformações específicas como o têxtil se comporta ao longo de todo o ensaio, mas é possível constatar que existe um comportamento menos homogêneo e que existem mais fatores que influenciam em seu desempenho. Ombres (2011, p. 150), Elghazy *et al.* (2018, p. 742) e Elghazy *et al.* (2018, p. 10) também obtiveram algumas variações no comportamento do têxtil monitorado, principalmente quanto à carga que promoveu o início da deformação do têxtil.

4.3.5. Análise das cargas de fissuração e escoamento

Além da influência da carga máxima, o reforço nas diferentes configurações apresentou influência ao longo do ensaio de flexão. Isso pode ser observado em dois pontos específicos da curva da carga pelo deslocamento: na fissuração do concreto e no escoamento do aço. Na Tabela 23 estão apresentados os valores das cargas correspondentes à fissuração e ao escoamento do aço com os respectivos deslocamentos verticais de cada viga.

Tabela 23. Cargas de fissuração e os respectivos deslocamentos verticais medidos no centro do vão das vigas no ensaio de flexão.

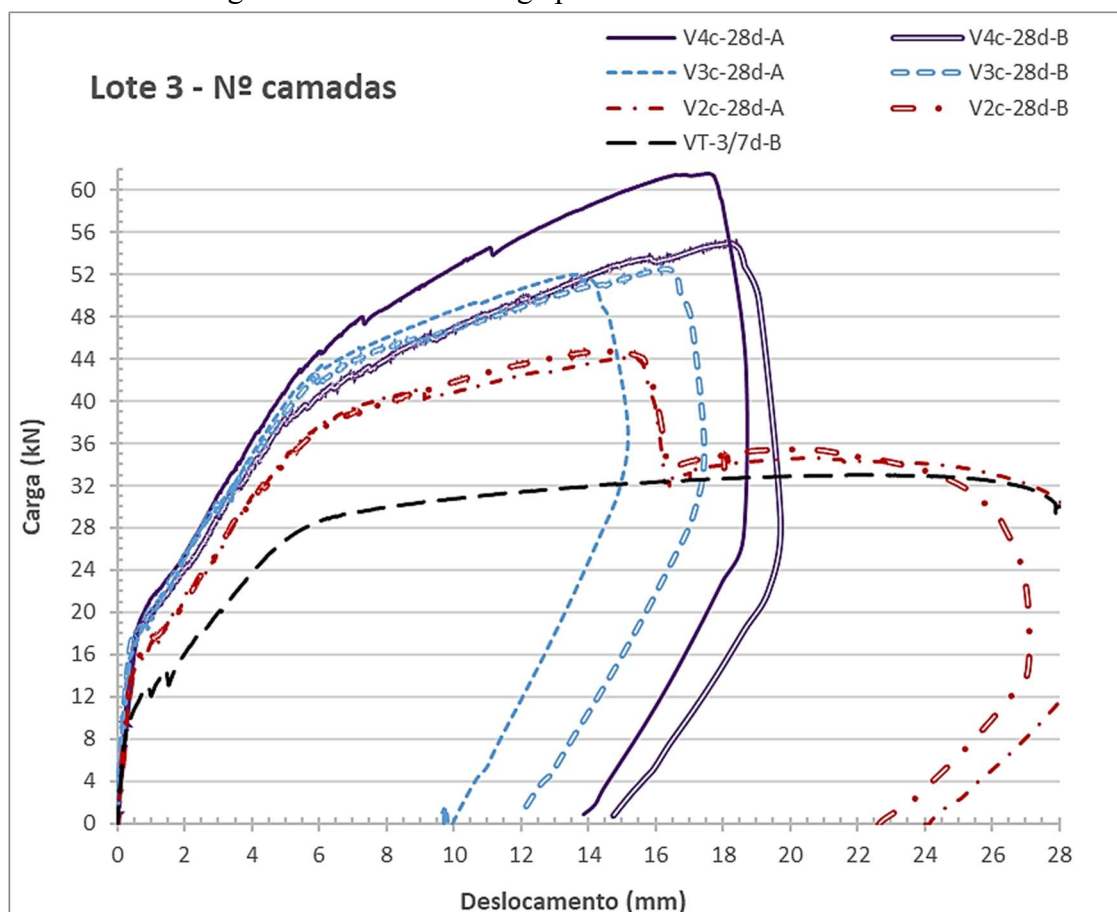
Vigas	Carga - fissuração do concreto (kN)		Deslocamento para fissuração (mm)	Carga - escoamento do aço (kN)		Deslocamento para escoamento (mm)
<i>Programa Experimental</i>						
VT	9,90 (0,74)	-	0,33 (0,03)	28,03 (0,37)	-	5,22 (0,22)
V2c-28d	13,43 (0,09)	36%	0,42 (0,01)	36,44 (0,05)	30%	5,59 (0,08)
V3c-3d	15,03 (1,45)	52%	0,39 (0,01)	37,17 (1,24)	33%	5,53 (0,15)
V3c-7d	16,96 (0,00)	71%	0,47 (0,02)	36,50 (0,31)	30%	5,37 (0,29)
V3c-28d	15,99 (0,23)	62%	0,37 (0,01)	41,79 (0,16)	49%	5,67 (0,08)
V3c-28d-F50	8,92 (1,51)	-10%	0,43 (0,04)	39,24 (0,60)	40%	5,62 (0,06)
V3c-28d-F100	5,77 (0,42)	-42%	0,20 (0,05)	39,69 (0,25)	42%	5,02 (0,07)
V4c-28d	16,38 (0,09)	65%	0,49 (0,01)	41,84 (3,09)	49%	5,69 (0,16)
<i>Teste Piloto</i>						
Testemunho	9,18	-	0,23	29,38	-	2,86
V3c-Sk	18,22	98%	0,42	38,98	33%	3,15
V3c-Zx	16,46	79%	0,42	38,84	32%	3,35
V3c-Zx-Anc	15,48	69%	0,30	37,76	29%	3,13

*Valores de desvio padrão entre parênteses

As vigas que foram reforçadas sem serem submetidas à fissuração prévia apresentaram uma carga de fissuração mais elevada. As propriedades da matriz cimentícia e principalmente do têxtil proporcionaram uma rigidez à flexão equivalente superior em relação à viga não reforçada, permitindo que a seção resistisse a cargas mais elevadas antes da fissuração do concreto e da matriz cimentícia. Essa influência pelo sistema de

reforço pode ser notada principalmente no lote 3 (Figura 76), onde a carga de fissuração aumenta conforme um maior número de camadas, sendo mais evidente até terceira camada de têxtil. Em relação à viga testemunho, tem-se um aumento da carga de fissuração de 36%, 62% e 65% para as vigas reforçadas com 2, 3 e 4 camadas respectivamente.

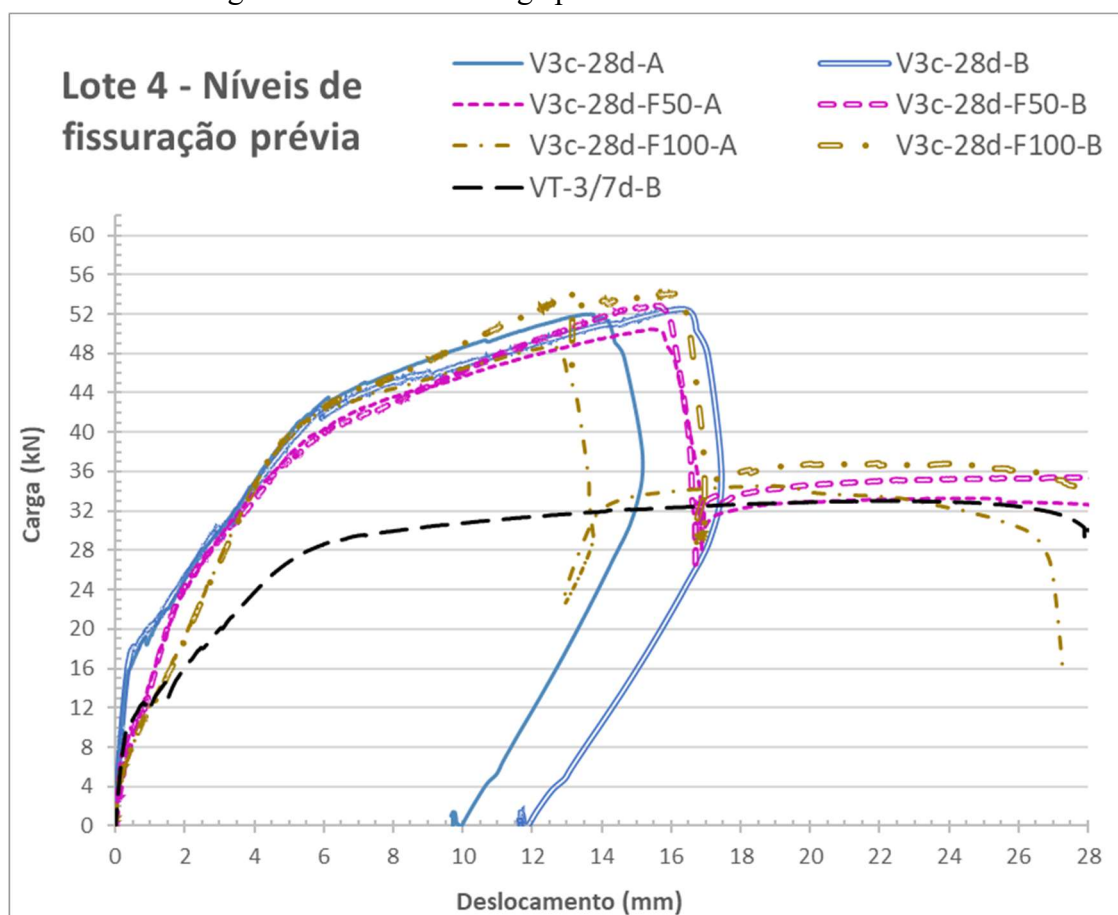
Figura 76. Curvas da carga pelo deslocamento do lote 3.



No Lote 4 o concreto já se encontrava fissurado alterando a rigidez equivalente da viga, proporcionando um comportamento diferente no trecho I como pode ser observado na Figura 77. Nota-se que a viga V3c-28d-F50-A teve um comportamento similar a viga testemunho, com a carga de fissuração ligeiramente maior. Pode-se dizer que o reforço não promoveu o mesmo aumento da carga de fissuração observado nas vigas íntegras, porém restaurou o comportamento da viga submetida a um nível de fissuração prévia intermediário. Já a V3c-28d-F100-A teve sua carga de fissuração reduzida quando comparadas à viga testemunho, indicando que o reforço não teve influência para postergar o início da fissuração da viga nem de reparar o dano causado pela fissuração prévia.

Porém, no trecho II das vigas V3c-28d-F50 e V3c-28d-F100 a transferência de esforços para o têxtil se tornou mais eficiente, aumentando a rigidez da viga nesse trecho quando comparada as vigas sem fissuração prévia (V3c-28d), conforme pode ser observado na Figura 77. Isso foi atribuído à ausência da contribuição do concreto para resistir aos esforços de tração no trecho inicial, proporcionando uma sollicitação maior do têxtil desde o início do ensaio.

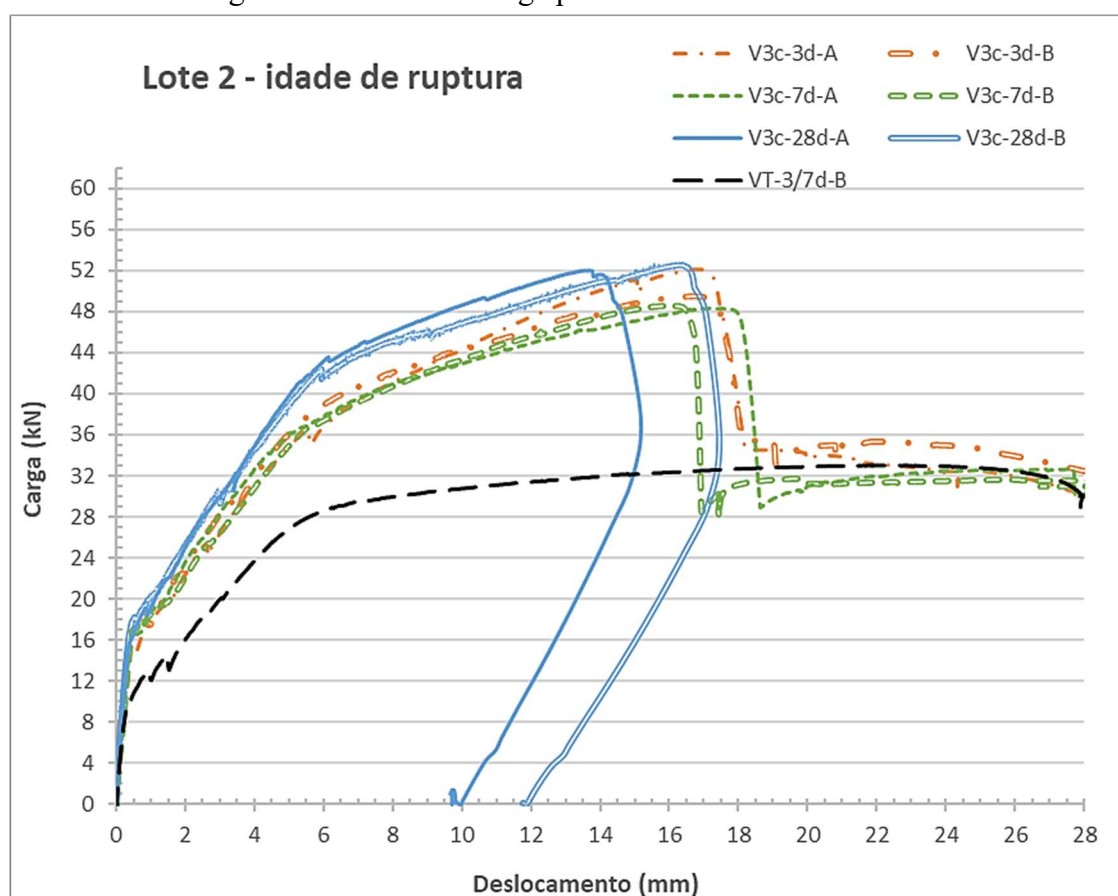
Figura 77. Curvas da carga pelo deslocamento do lote 4.



Em relação ao ponto de escoamento do aço, notam-se comportamentos diferentes entre as vigas reforçadas. No lote 3 existe uma diferença devido à variação do número de camadas, apresentando um aumento em relação à viga testemunho de 30,0%, 49,1% e 49,3% para 2, 3 e 4 camadas respectivamente. No lote 4, as vigas submetidas a fissuração prévia apresentaram uma pequena redução da carga de escoamento, correspondendo a um aumento em relação à viga testemunho de 49,1%, 40,0% e 41,6% para as vigas sem fissuração prévia (0%), fissuradas no nível intermediário (50%) e no nível superior (100%), respectivamente. Porém, a maior diferença foi observada no lote 2, em que a

carga de escoamento da viga com 28 dias de idade do reforço foi maior do que as de menor idade. Além disso, as de 3 e 7 dias não apresentaram diferença entre si (Figura 78), deixando evidente a influência da característica da matriz cimentícia adotada no desempenho da viga durante o ensaio.

Figura 78. Curvas da carga pelo deslocamento do lote 2.



O comportamento observado no ensaio de flexão pode ser mais bem compreendido pela caracterização da argamassa realizada e apresentada no item 4.1.2.1. Os valores de resistência à compressão da argamassa para 3, 7 e 28 dias foram de 54,4 MPa, 65,0 MPa e 77,1 MPa respectivamente. Isso corresponde a um aumento de 19% e 42% para as idades de 7 e 28 dias, respectivamente, em relação a resistência obtida para 3 dias. Já os valores de resistência à tração da argamassa para 3, 7 e 28 dias foram respectivamente de 7,71 MPa, 7,73 MPa e 10,08 MPa, apresentando um aumento da resistência à tração da argamassa de 0,3% e 31% para as idades de 7 e 28 dias em relação a idade de 3 dias.

Da caracterização da argamassa tem-se que a resistência à compressão teve uma evolução tanto da idade de 3 para 7 dias, quanto da idade de 7 para 28 dias. Já os valores de

resistência à tração não apresentaram diferença entre as idades de 3 e 7 dias e o aumento se deu apenas entre o período de 7 e 28 dias, configurando o mesmo padrão observado nas curvas do ensaio de flexão quanto a carga de escoamento do aço.

Constatou-se então que com uma idade maior de cura do reforço, a malha têxtil oferece maior contribuição antes do escoamento do aço e essa contribuição está mais relacionada à resistência à tração do que à compressão. Especula-se que a pouca idade do reforço influencia na transferência de esforços da matriz cimentícia para o têxtil, de forma que para uma mesma sollicitação do têxtil que permite resistir a uma carga específica é necessário a formação de fissuras maiores nas idades de 3 e 7 dias quando comparadas ao reforço de 28 dias.

As vigas do lote 4 foram ensaiadas quando o reforço tinha a idade de 32 dias e apresentaram uma carga de escoamento similar a das vigas íntegras. Isso indica que apesar de possuírem as fissuras pré existentes ao serem reforçadas e a sollicitação do têxtil se dar desde o trecho I da curva, a transferência dos esforços foi mais eficiente do que as vigas de menor idade, corroborando para o entendimento que a idade de cura do reforço interfere na transferência de esforços para o têxtil.

Apesar de existir essa diferença de desempenho no ponto de escoamento do aço para as vigas de 3 e 7 dias do lote 2, todas as vigas tiveram comportamento similar na ruptura do reforço, conforme discutido nos itens 4.3.2 e 4.3.3. Tem-se que as rupturas ocorreram por deslizamento e se deram para deformações e cargas bastante próximas, independentemente da idade do reforço. Assim, é razoável admitir que o nível de aderência atingido entre a matriz cimentícia e o têxtil e o comportamento do conjunto foram o mesmo independente da idade do reforço. Por outro lado, é notável que existe uma interferência na transferência de esforços para o têxtil que limita a carga resistida para um mesmo deslocamento vertical da viga.

Observando os resultados do teste piloto em que foram utilizados dois tipos de argamassa, tem-se que o deslizamento do têxtil se deu para deslocamentos verticais diferentes. O deslizamento do têxtil da viga V3c-Sk se deu para um deslocamento vertical maior, indicando a possibilidade de que a argamassa utilizada apresentou uma melhor aderência com o têxtil (Figura 71). Isso também pode ser notado na carga de fissuração, que é um pouco superior na viga V3c-Sk, conforme pode ser observado na Tabela 23. Apesar de a

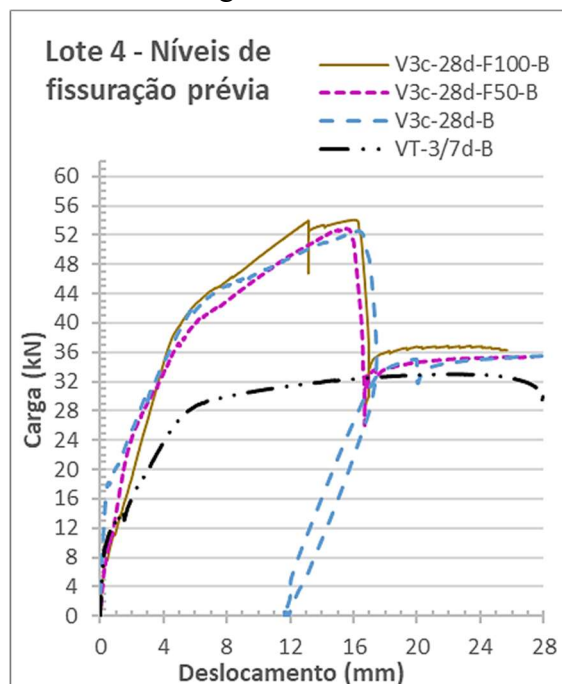
ruptura indicar essa possibilidade de melhor aderência, a carga de escoamento para as vigas V3c-Sk e V3c-Zx foram praticamente as mesmas, de 38,98 e 38,84 kN respectivamente. Analisando a caracterização das argamassas, apresentada na Tabela 10, tem-se que os valores de resistência à compressão das argamassas foram bem diferentes, 47,20 MPa para V3c-Sk e 73,27 MPa para V3c-Zx, porém os de resistência à tração da flexão foram praticamente o mesmo, 6,82 MPa para V3c-Sk e 6,46 MPa para V3c-Zx.

Tanto os comportamentos das curvas do ensaio de flexão obtidos no programa experimental, quanto no teste piloto, indicam que a aderência entre a matriz cimentícia e o têxtil pode estar relacionada à carga de fissuração e ao deslocamento vertical em que ocorre o deslizamento do têxtil, mas que não deve estar relacionada a carga de escoamento. Os dados indicam que a transferência de esforços que permite atingir uma carga de escoamento maior ou menor deve estar mais relacionada com a aderência entre a matriz cimentícia e a própria viga. Além disso, percebe-se que o valor da resistência à tração na flexão da matriz cimentícia indica indiretamente uma maior ou menor aderência ao substrato. Sendo assim, a carga de escoamento inferior para as idade de 3 e 7 dias do lote 2 pode ser atribuída aos valores mais baixos de aderência ao substrato, indicados indiretamente pelos valores de resistência à tração à flexão da argamassa.

4.3.6. Efeito da fissuração prévia

O efeito mais perceptível provocado pela fissuração prévia nas vigas reforçadas foi a reabertura das fissuras existentes para cargas mais baixas. Na Figura 79 percebe-se que o aumento da carga de fissuração observado nas vigas íntegras reforçadas não se repetiu nas vigas previamente fissuradas reforçadas. Porém, após o estágio inicial do ensaio, as curvas das vigas submetidas à fissuração prévia e as íntegras tiveram comportamento parecidos, com as diferenças discutidas no item 4.3.5.

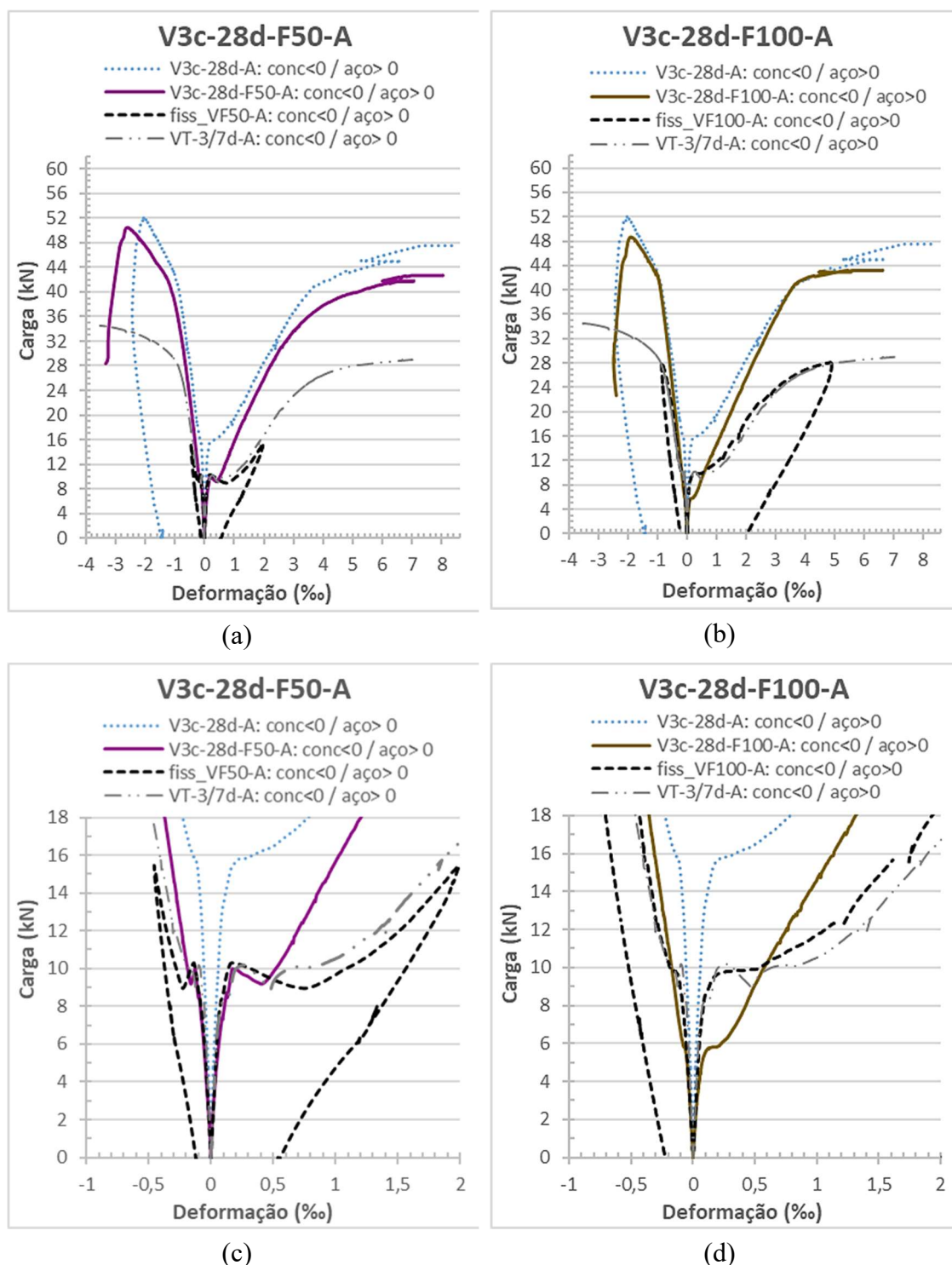
Figura 79. Gráficos dos deslocamentos verticais no centro do vão pela carga para as vigas do lote 4.



Resultado semelhante foi obtido por Verbruggen, Tysmans e Wastiels (2014), que submeteu vigas a um carregamento prévio ultrapassando a carga de fissuração. Os autores concluíram que a fissuração prévia não impactou a capacidade resistente da viga ou o modo de ruptura, tendo afetado apenas a rigidez inicial abaixo da carga aplicada previamente ao reforço.

Na Figura 80 é possível observar o comportamento do aço e do concreto durante a fissuração prévia das vigas da série A do lote 4 e após receberem o reforço, comparando-as à viga testemunho (VT-3/7d-A) e à viga reforçada íntegra (V3c-28d-A).

Figura 80. Deformações específicas do aço e do concreto das vigas da série A na fissuração prévia e após terem sido reforçadas: V3c-28d-F50-A em (a) e (c) e V3c-28d-F100-A em (b) e (d).



Nota-se que na viga V PF 50 A as curvas da carga em função da deformação específica do aço e do concreto antes e depois do reforço se sobrepuseram até a fissuração do concreto. Porém, após a carga de fissuração, a viga reforçada passou a apresentar um

aumento imediato da carga em função da deformação, diferentemente da viga sem reforço. Nos gráficos (c) e (d) da Figura 80, é notável a diferença de inclinação entre a curva de deformação do aço das vigas reforçadas e da viga testemunho. Essa diferença indica a contribuição do têxtil no equilíbrio da seção que se deu logo após a fissuração do concreto.

Para a viga V3c-28d-F100-A, a fissuração prévia foi, conforme esperado, mais influente no comportamento da viga após execução do reforço. Observa-se que houve uma redução da carga correspondente a reabertura de fissuras, em torno de 6 kN comparada ao valor de 10kN registrado na fissuração prévia, representando uma redução em torno de 42%. Assim como na V3c-28d-F50-A, a atuação do reforço na contribuição do equilíbrio da seção também ocorreu logo após a fissuração. Destaca-se ainda que a curva da viga V3c-28d-F100-A se apresentou mais retilínea até o ponto de escoamento do aço do que da viga V3c-28d-F50-A. Isso provavelmente se deu pela existência de um número maior de fissuras e com aberturas maiores, o que permitiu que o têxtil e o aço fossem solicitados mais livremente, caracterizando a curva do ensaio com o aspecto linear-elástico das armaduras.

4.3.7. Capacidade resistente

Os resultados obtidos tanto no teste piloto quanto no programa experimental, apresentados no item 3.10.2 e 4.2, respectivamente, evidenciaram que o reforço com têxtil promoveu um aumento da capacidade resistente para todas as configurações estudadas.

Os valores experimentais e estimados no item 3.4.2 para as cargas máximas estão apresentados na Tabela 24. Nota-se que os valores obtidos foram coerentes com os estimados.

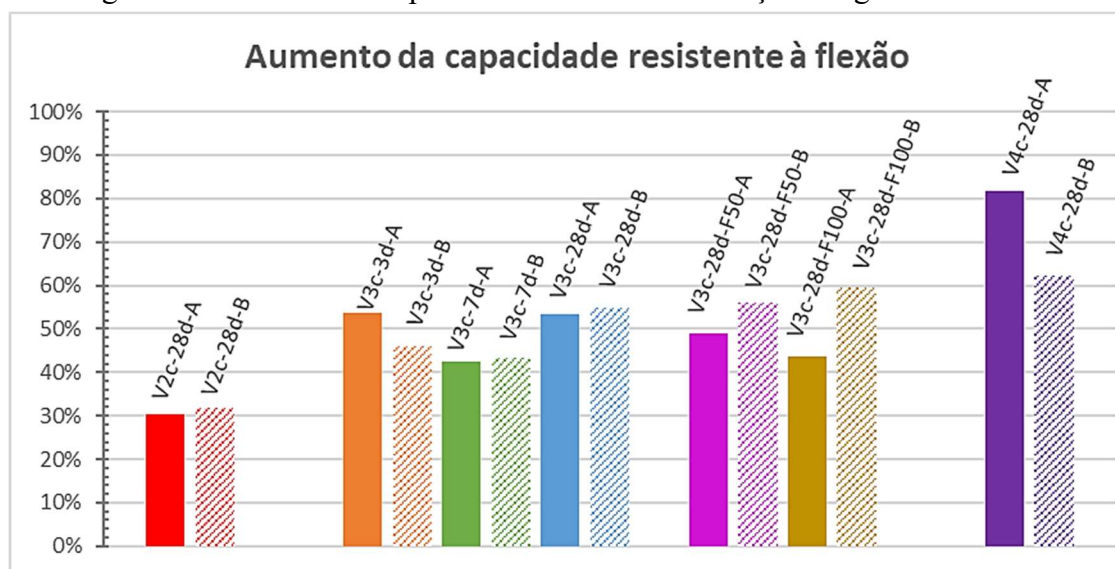
Tabela 24. Cargas máximas experimentais e estimadas para as diferentes configurações de reforço.

Vigas		P_u (kN)	Aumento	P_u estimado (kN)	Aumento estimado
Testemunho	Lote 1	33,88 (1,61)	-	30,21	
2 camadas	V2c-28d	44,44 (0,39)	31,15%	40,59	34%
	V3c-3d	50,08 (1,84)	49,94%		
3 camadas	V3c-7d	48,45 (0,19)	42,99%	46,11	53%
	V3c-28d	52,26 (0,35)	54,25%		
	V3c-28d-F50	51,67 (1,71)	52,51%		
	V3c-28d-F50	51,38 (3,84)	51,64%		
4 camadas	V4c-28d	58,28 (4,70)	72,00%	51,97	72%

*Valores de desvio padrão entre parênteses

Na Figura 81 estão indicados os incrementos obtidos para carga máxima de cada viga do programa experimental.

Figura 81. Aumento da capacidade resistente em relação a viga testemunho.

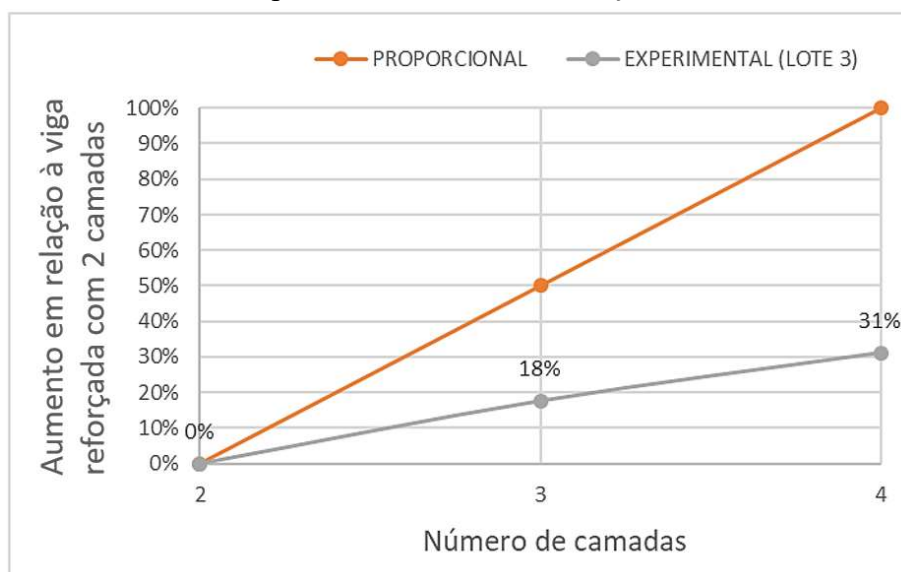


Os valores obtidos foram expressivos considerando que o têxtil utilizado foi de fibra de vidro e com um número reduzido de camadas. Raouf, Koutas e Bournas (2017) ensaiaram vigas de dimensões similares às do presente estudo com diferentes configurações de reforço, dentre delas 7 camadas com têxtil de fibra de vidro, com densidade em torno de

220g/m², obtendo um incremento de 21,7% na capacidade resistente à flexão. Diversos outros fatores que diferenciam as pesquisas podem explicar a variação dos resultados, entretanto pretende-se evidenciar o elevado potencial do têxtil adotado no presente programa quanto ao desempenho obtido como reforço à flexão. Para reforço com 2 camadas obteve-se valores correspondentes a um incremento de 30%.

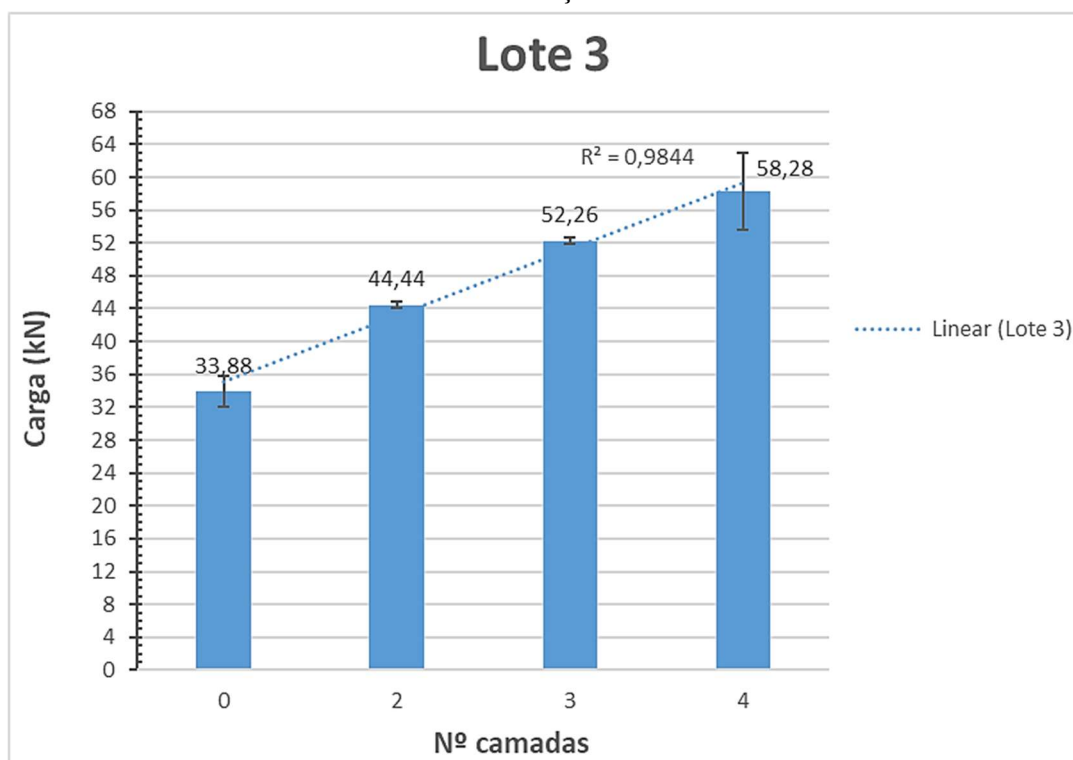
No lote 3 foi verificada a influência do número de camadas no resultado do ensaio. O aumento da capacidade resistente foi maior para um maior número de camadas, porém não foi proporcional ao aumento do número de camadas, conforme observado na Figura 82. Esse resultado é consistente com o encontrado por outros autores (RAOOF, KOUTAS e BOURNAS, 2017; AWANI, EL-MAADDAWY e ISMAIL, 2017; LORETO *et al.*, 2014; e D'AMBRISI e FOCACCI, 2011).

Figura 82. Aumento da capacidade resistente em função do número de camadas.

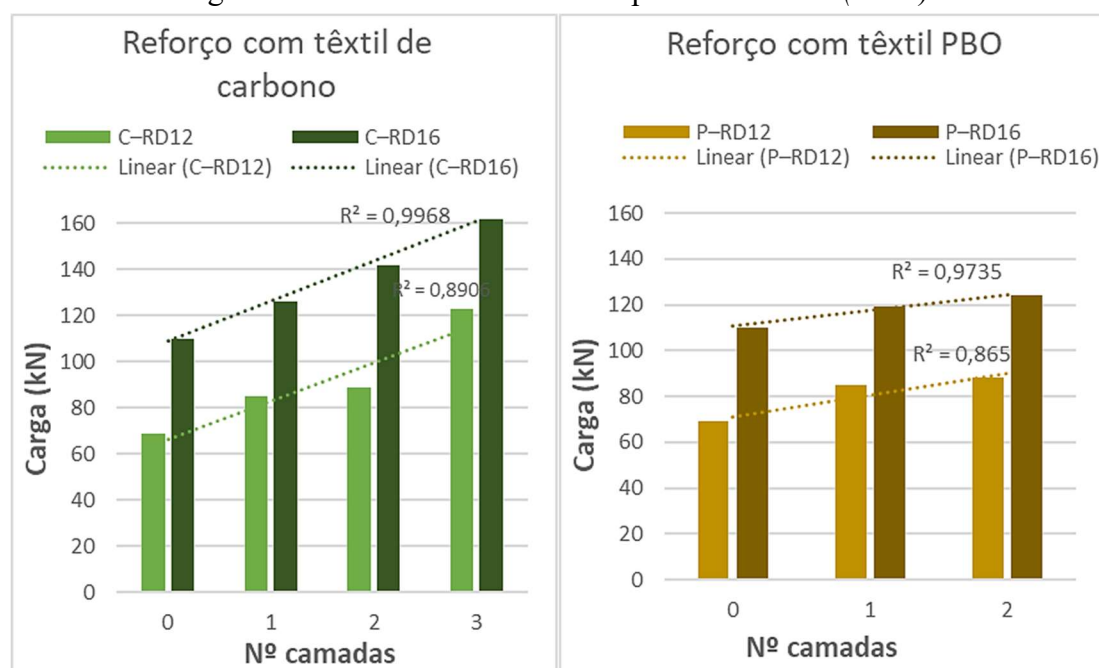


Apesar de não existir uma proporcionalidade entre o aumento de carga e o aumento de área de têxtil utilizada no reforço, observa-se que, para o intervalo de número de camadas estudados, existe uma tendência linear para o comportamento das curvas, com coeficiente de determinação de 0,9938. Na Figura 83 estão apresentados os valores das cargas máximas obtidas para as vigas testemunho (Lote 1), com zero camadas de reforço, e para as vigas do Lote 3 com a indicação do desvio padrão.

Figura 83. Capacidade resistente da viga em função do número de camadas de reforço.



Ebead *et al.* (2017) também estudaram de forma isolada a variação do número de camadas de reforço têxtil, sem variar outros parâmetros na configuração do reforço e das vigas. Em seu programa experimental foram utilizados dois tipos de viga, uma com taxa de armadura longitudinal de 0,72%, denominada RD12, e outra com 1,27%, denominada RD16. Para o reforço foram utilizados têxtil de fibras de carbono e têxtil de fibra PBO, variando apenas o número de camadas. Apesar de variações no tipo de têxtil e configurações das vigas, observa-se um mesmo padrão linear de carga máxima obtida nos ensaios em função do aumento do número de camadas de reforço, conforme apresentado na Figura 84.

Figura 84. Resultados encontrados por Ebead *et al.* (2017).

4.3.8. Estado limite de serviço

Além da análise quanto à capacidade resistente da viga à flexão, obteve-se bons resultados ao analisar o incremento de carga para o estado de limite de serviço. Para fins de análise, foi adotada a referência da NBR 6118 (2014) quando a aceitabilidade sensorial que limita os deslocamentos a $l/250$ e $l/350$, correspondendo a 5,6 mm e 4 mm de deflexão, respectivamente.

Na Tabela 25 estão apresentados os incrementos percentuais de carga obtidos para os dois estágios definidos. A diferença mais evidente se deu no lote 1 entre as vigas de menor idade e de 28 dias, conforme já foi discutido no item 4.3.5, onde a viga de 28 dias teve um incremento em torno de 42% e as de menor idade apenas de 28%.

Nas vigas do lote 4 também é possível identificar uma pequena variação. Conforme já apresentado no item 4.3.6, as vigas que sofreram fissuração prévia não tiveram um aumento da carga de fissuração e isso impactou o desempenho da viga ao longo do ensaio. Essa ausência de uma carga mais elevada no início do trecho II (Figura 70) pode justificar a redução no incremento notadas nas vigas V3c-28d-F50, que teve incrementos de 35% para os deslocamentos de serviço definidos, inferior aos 42% observada na viga sem fissuração prévia. Já nas vigas V3c-28d-F100, o nível mais elevado de fissuração prévia

pode ter permitido uma maior sollicitação do têxtil já no início do trecho II da curva, o que promoveu um leve aumento da rigidez da viga no trecho II e isso resultou em cargas mais altas para os mesmos deslocamentos analisados, correspondendo a incremento de 39% e 44% para os deslocamentos de 4,0 mm e 5,6 mm, respectivamente.

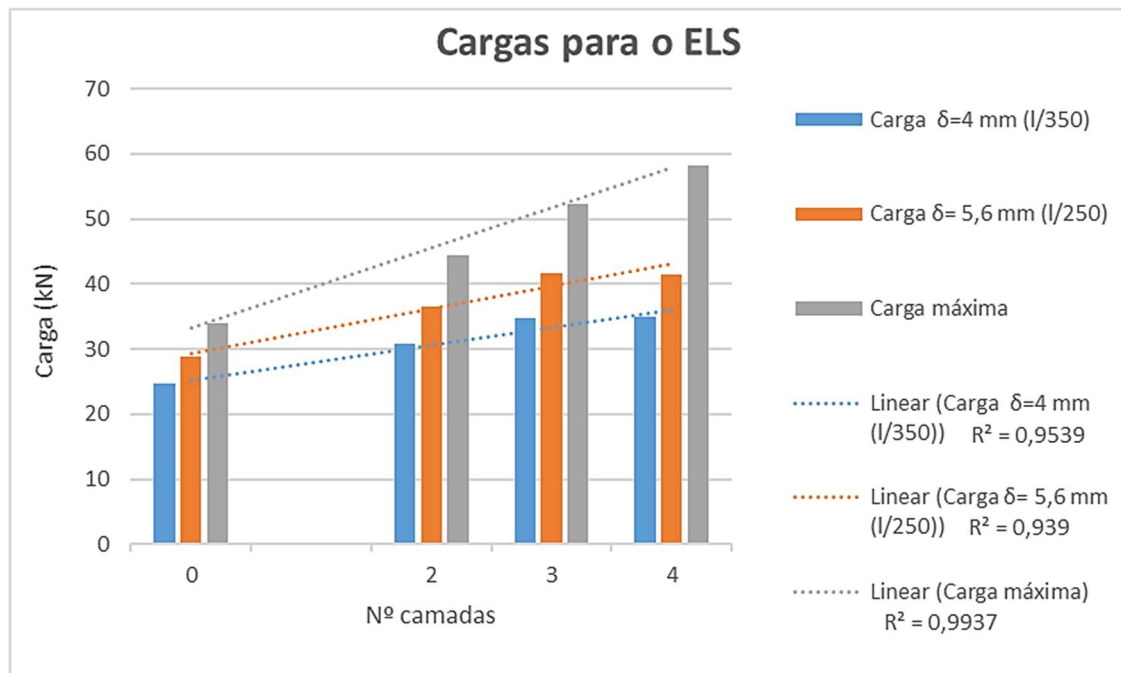
Tabela 25. Incrementos de carga obtidos para cada viga reforçada para os deslocamentos limites a $l/250$ e $l/350$.

Viga	Carga para $\delta=4$ mm (kN)	Incremento em relação a VT média	Carga para $\delta=5,6$ mm (kN)	Incremento em relação a VT média
VT média	24,76 (1,00)	-	28,77 (0,95)	-
V2c-28d	30,81 (0,25)	24%	36,45 (0,26)	27%
V3c-3d	31,50 (0,56)	27%	36,49 (2,10)	27%
V3c-7d	31,75 (1,30)	28%	36,88 (0,13)	28%
V3c-28d	34,73 (0,21)	40%	41,57 (0,42)	44%
V3c-28d-F50	33,48 (0,48)	35%	39,25 (0,47)	36%
V3c-28d-F100	34,47 (0,08)	39%	41,47 (0,12)	44%
V4c-28d	35,04 (1,77)	42%	41,48 (2,64)	44%

**Valores de desvio padrão entre parênteses*

Em relação ao lote 3, observa-se que as cargas para o estado limite de serviço continuam apresentado a tendência linear devido à variação de número de camadas (Figura 85), porém não há diferença entre o incremento obtido para as vigas de 3 e 4 camadas no estado limite de serviço, sendo para ambas um incremento em torno de 40% (Tabela 25).

Figura 85. Tendência linear do aumento da carga em função do número de camadas para diferentes pontos do ensaio à flexão.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são elencadas conclusões a partir da execução do programa experimental e da análise dos resultados. Também são apresentadas sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros, dando continuidade aos estudos sobre o tema.

5.1. CONCLUSÕES

Esta pesquisa realizou o estudo da aplicação do concreto têxtil como reforço de vigas de concreto armado submetidas à flexão, onde as variáveis estudadas no programa foram o número de camadas, idade de ruptura do reforço e o nível de fissuração prévia (50 e 100% da carga correspondente ao patamar de escoamento da curva carga x deslocamento do ensaio de flexão). A pesquisa teve um caráter exploratório para avaliar tanto a técnica de reforço como o potencial do têxtil de fibra de vidro AR de fabricação nacional adotado no programa experimental.

Para todas as configurações de reforço executadas obteve-se um aumento significativo da capacidade resistente da viga. As cargas máximas obtidas no ensaio de flexão para as vigas reforçadas apresentaram um aumento em relação à viga testemunho que variaram de 30,34%, viga da série A com 2 camadas de têxtil, a 81,82%, para viga da série B com 4 camadas de têxtil. Convém destacar, entretanto, que os aumentos tão significativos da capacidade resistente se devem à adoção de uma taxa de armadura baixa, uma vez que um dos principais objetivos do trabalho consistiu em maximizar as solicitações no têxtil.

No lote 2 foi verificada a influência da idade de ruptura no ensaio de flexão. Constatou-se que não há diferença significativa na capacidade resistente das vigas com reforço de idades de 3, 7 e 28 dias. As vigas reforçadas, todas com 3 camadas de têxtil, apresentaram uma carga máxima média de 50,50 kN, com desvio padrão de 1,92 kN, o que representa um incremento de 49,06% em relação à viga testemunho.

A diferença observada nos ensaios das vigas com diferentes idades do reforço ocorreu antes do patamar de escoamento da curva carga x deslocamento. Para as vigas de menor idade, as cargas resistidas foram menores quando comparadas ao mesmo deslocamento das vigas com idade de 28 dias para reforço, indicando que a viga de maior idade

apresentou uma rigidez maior no trecho entre a fissuração do concreto e o escoamento do aço em relação às vigas de menor idade. Esse comportamento ficou mais evidente na comparação da carga de escoamento – com valores de 37,17, 36,50 e 41,79 kN para as idades de 3, 7 e 28 dias respectivamente - podendo esta ser relacionada de forma indireta aos valores obtidos para resistência à tração na flexão dos corpos de prova prismáticos – com valores de 7,71, 7,73 e 10,08 MPa para idade de 3, 7 e 28 dias respectivamente. Esse mesmo padrão de comportamento foi observado no teste piloto, em que o valor da resistência à tração dos corpos de prova prismáticos (6,82 e 6,46 MPa) e a carga de escoamento (38,98 e 38,84 kN) foram próximos, ainda que se tratassem de vigas reforçadas com argamassas distintas e que apresentaram diferentes valores de resistência à compressão (47,20 e 73,27 MPa).

No lote 3 foi verificada a influência do número de camadas, onde constatou-se que há uma diferença significativa nos valores de carga máxima obtidos para as vigas reforçadas com 2, 3 e 4 camadas. Os reforços promoveram um aumento médio em relação à viga testemunho de 31,15%, 54,25% e 72,00% para 2, 3 e 4 camadas de têxtil, respectivamente, com uma tendência linear entre o percentual de aumento de carga e aumento de área de têxtil.

Constatou-se ainda um comportamento similar para as vigas com 3 e 4 camadas antes do escoamento do aço, destacando-se que o aumento da carga de fissuração em relação à testemunho foi de 36%, 62% e 65% e da carga de escoamento foi de 30,0%, 49,1% e 49,3% para as vigas com 2, 3 e 4 camadas respectivamente. Isso indica que o acréscimo da quarta camada promove um aumento da carga máxima, porém não provoca diferença significativa nos estágios iniciais do ensaio.

Analisando o desempenho do reforço para deslocamentos correspondentes ao estado limite de serviço (ELS), com valores correspondentes a $l/250$ e $l/350$, observa-se que o aumento da carga resistida é um pouco menor do que o valor observado em relação à carga máxima. O aumento de carga para o ELS variou entre 24%, para 2 camadas de têxtil, e 44%, para viga com 4 camadas. As vigas com 3 camadas de têxtil e idade de 28 dias apresentaram o mesmo aumento observado para viga de 4 camadas. Já as vigas com 3 camadas de 3 e 7 dias apresentaram um incremento de carga reduzido, em torno de 28% para os deslocamentos analisados.

No lote 4, verificou-se que os dois níveis de fissuração prévia executados impediram que o reforço promovesse o aumento da carga de fissuração observada nas demais vigas. Para as vigas submetidas ao nível superior de fissuração, obteve-se inclusive uma carga de fissuração inferior à da viga testemunho. Apesar disso, as vigas com fissuração prévia apresentaram uma rigidez levemente maior no trecho entre a fissuração do concreto e o escoamento do aço, de forma que as cargas de escoamento obtidas se aproximaram dos valores da viga reforçada íntegra, correspondendo a um aumento em relação à viga testemunho de 49,1%, 40,0% e 41,6%, para os níveis de fissuração de 0% (sem fissuração prévia), 50% e 100% respectivamente. Por fim, constatou-se que apesar da fissuração prévia afetar consideravelmente a carga de fissuração e reduzir um pouco a carga de escoamento, as cargas máximas obtidas não tiveram diferenças significativas entre si. Para o lote 4 foi obtida uma carga média de 51,77 kN, com desvio padrão de 0,45 kN, correspondendo um aumento em relação a carga máxima da viga testemunho de 52,80%.

Independentemente do lote estudado, o modo de ruptura dos reforços de todas as vigas ocorreu por deslizamento do têxtil dentro da matriz cimentícia, junto à abertura de uma fissura no centro da viga, resultando em uma queda abrupta da capacidade resistente da viga para uma carga próxima à da viga testemunho. Nas vigas com 4 camadas de têxtil também foi observado um descolamento na região central concomitantemente à abertura da fissura em que se identificou o deslizamento, indicando que para 4 camadas a limitação da ação do reforço não se deu somente pela perda de aderência entre o têxtil e a matriz cimentícia, mas também pela falta de aderência entre a matriz cimentícia e o substrato.

Houve uma redução da ductilidade das vigas promovida pela execução do reforço. A carga máxima das vigas testemunho se deu para valores de deslocamento vertical em torno de 22 mm, enquanto para as vigas reforçadas foi de 16 mm, indicando que a deformação imposta ao têxtil ao atingir um flecha de 16 mm proporcionou esforços na interface do reforço que ultrapassaram a aderência entre o têxtil e a argamassa. O fator de ductilidade médio das vigas reforçadas, definido pela relação entre os deslocamentos para as cargas máxima e de escoamento, variou entre 67 e 79% do fator médio das vigas testemunho, que foi igual a 4,0.

A estimativa teórica para as cargas máximas com diferentes números de camadas foi feita com uso de simplificações e algumas suposições referente aos dados do têxtil. Apesar

disso, os valores obtidos apresentaram coerência com os encontrados experimentalmente, indicando que a abordagem se mostrou adequada para orientar a montagem do programa experimental.

A concretagem única de todas as vigas, o jateamento realizado em uma única etapa, o uso de argamassa industrializada, a padronização de todas as etapas do procedimento de reforço, a execução pelo mesmo operador, a realização dos reforços em curto intervalo de tempo, entre outras, foram algumas das medidas adotadas para garantir a mitigação de ruídos incorporados ao experimento. O resultado positivo dos cuidados adotados pode ser constatado na similaridade dos dados obtidos para a série A e B das vigas reforçadas.

As observações apresentadas nesta dissertação constituem um conhecimento inicial acerca do emprego do têxtil para reforço de vigas de concreto armado. Uma compreensão mais ampla do tema demanda análises adicionais, bem como execução de ensaios complementares do têxtil, da matriz cimentícia e da argamassa reforçada com têxtil propriamente dita.

5.2.SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O concreto têxtil ainda é um material novo e demanda muitos estudos para melhor compreensão de seus mecanismos e formas de emprego. A sua aplicação como reforço e reparos de vigas, como foi abordada nesse trabalho exploratório, apresentou resultados promissores. No entanto, diversos tópicos merecem ser avaliados e discutidos com o propósito de dar continuidade e complementar esta dissertação. A seguir apresentam-se algumas sugestões:

- Caracterização do têxtil de fibra de vidro, identificando seu módulo de elasticidade, deformação última, área da seção transversal e resistência à tração do urdume e da tela, com a finalidade de melhorar a compreensão dos resultados obtidos na execução do reforço;
- Caracterização do têxtil imerso na matriz cimentícia, obtendo parâmetros para avaliar o desempenho do sistema de reforço isoladamente, como resistência à tração, módulo de elasticidade equivalente, tipo e ruptura, entre outros;

- Estudar diferentes configurações do sistema de reforço isolado, analisando como o número de camadas de têxtil, número de urdumes, espessura das camadas de argamassa e outros fatores podem afetar as propriedades do sistema;
- Estudar outros tipos de argamassas com diferentes propriedades para avaliar como essas variações impactam na aderência do reforço com o substrato e na aderência da própria matriz cimentícia com o têxtil;
- Estudar outras formas de preparo do substrato além do jateamento com granalha de aço, como o apicoamento e utilização de pinturas de aderência, com a finalidade de encontrar outras técnicas eficientes que facilitem a execução experimental dentro do laboratório, além de explorar técnicas usualmente empregadas na construção civil;
- Estudar a execução de reforço em vigas carregadas, verificando a eficiência do reforço em uma situação mais próxima da real;
- Explorar o desempenho de outros têxteis compostos por diferentes fibras, como carbono, aramida, basalto e PBO;
- Executar reforço em vigas com dimensões semelhantes às usualmente executadas em construções de concreto armado, para validar os resultados encontrados nas vigas de tamanho reduzido;
- Realizar modelagem numérica para diferentes configurações de reforço e comparar com os resultados experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADFORS. **Adfors Saint Gobain**. Disponível em: <<http://www.adfors.com/us/pt/tecidos-industriais/interiorexterior-reinforcement/srg-strengthening-reinforcement-grid>>.

Acesso em: 02 julho 2018.

ALDEA, C.; GRIES, T.; ROYE, A. 2 Definitions. In: BRAMESHUBER, W. **Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report**. Bagnaux, France: RILEM Publications SARL, 2006. p. 5-9.

ARBOLEDA, D. **Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM)**. Tese de doutorado. Miami: University of Miami. 2014. p. 147.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão: NBR 7215:1996 Versão Corrigida:1997., 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone: NBR NM 67, Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado: NBR 13278, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão: NBR 13279, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência potencial de aderência à tração: NBR 15258, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade

dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica: NBR 15630:2008 Versão Corrigida:2009, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Execução de concreto dosado em central - procedimento: NBR 7212, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Edificações habitacionais - desempenho: NBR 15575 , Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto — Procedimento: NBR 6118 , Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento: NBR 12655, Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência: NBR 13276, Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova: NBR 5738:2015 Versão Corrigida:2016, Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland e outros materiais e pó - Determinação da massa específica: NBR 16605, Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland - Requisitos: NBR 16697, Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos: NBR 5739, Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013. Materiais metálicos — Ensaio de Tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. NBR ISO 6892-1:2013 Versão Corrigida:2015, Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018. Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão: NBR 8522, Rio de Janeiro, 2017.

AWANI, O.; EL-MAADDAWY, T.; ISMAIL, N. Fabric-reinforced cementitious matrix: A promising strengthening technique for concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 132, 2017. 94-111. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.125>>.

BABAEIDARABAD, S.; LORETO, G.; NANNI, A. Flexural Strengthening of RC Beams with an Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix. **Journal of Composites for Construction**, V. 18, issue 5, outubro 2014. (04014009) 1-12. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000473](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000473)>.

BADANOIU, A.; HOLMGREN, J. Cementitious composites reinforced with continuous carbon fibres for strengthening of concrete structures. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, issue 3, abril 2003. 387-394. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00054-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00054-9)>.

BANHOLZER, B.; BROCKMANN, T.; BRAMESHUBER, W. Material and bonding characteristics for dimensioning and modeling of textile reinforced concrete (TRC) elements. **Materials and Structures**, 39, 13 Julho 2006. 749-763. Disponível em: <<https://doi.org/10.1617/s11527-006-9140-x>>.

BEBER, A. J. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono**. Tese de doutorado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2003. p. 317.

BRAMESHUBER, W. **Report REP036**: Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report. RILEM Technical Committee TC 201- TRC: Textile Reinforced Concrete. [S.l.]: [s.n.]. 2006. p. 292.

BRAMESHUBER, W. **Proceedings PRO075**: International RILEM Conference on Material Science - 2nd ICTRC - Textile Reinforced Concrete - Theme 1. [S.l.]: [s.n.]. 2010. p. 374.

BRAMESHUBER, W. **Proceedings PRO098: FERRO-11** – 11th International Symposium on Ferrocement and 3rd ICTRC - International Conference on Textile Reinforced Concrete. RILEM Technical Committee TC 201-TRC: Textile Reinforced Concrete. [S.l.]: [s.n.]. 2015. p. 540.

BRAMESHUBER, W. Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete. **Materials and Structures**, v. 49 n°12, Dezembro 2016. 4923-4927.

BRAMESHUBER, W. et al. 4 Concrete/matrix. In: BRAMESHUBER, W. **Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report**. Bagnaux, France: RILEM Publications SARL, 2006. p. 29-56.

CARVALHO, R. C.; DE FIGUEIREDO FILHO, J. R. **Cálculo e detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**: segundo a NBR 6118:2014. 4ª. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2014. 415 p.

CENTROPLAC. **Centroplac**. Disponível em: <<http://centroplac.com.br/produtos/detalhes/tecido-estrutural-fibra-de-vidro>>. Acesso em: 02 julho 2018.

CHEN, W.-F. **Plasticity in Reinforced Concrete**. Fort Lauderdale: J. Ross Publishing, 2007. Publicação original por New York: McGraw-Hill, 1982.

CPWD. **CENTRAL PUBLIC WORKS DEPARTMENT. Handbook on Repairs and Rehabilitation of RCC Buildings**. New Delhi: Director Generak Works (DGW); Central Public Works Departmente (CPWD), Government of India, 2002. Disponível em: <<https://theconstructor.org/wp-content/uploads/2016/09/handbook-rrs.pdf>>. Acesso em: 23 agosto 2019.

CSI. CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. The Cement Sustainability Initiative – Recycling Concrete, 2009. Disponível em: <<http://www.wbcscement.org/index.php/key-issues/sustainability-with-concrete/concrete-recycling>>. Acesso em: 12 março 2018.

D'AMBRISI, A.; FOCACCI, F. Flexural Strengthening of RC Beams with Cement-Based Composites. **Composites for Construction**, v. 15 issue 5, Outubro 2011. 707-720. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000218](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000218)>.

DENARDI, A. **Concreto têxtil**: uma revisão bibliográfica sobre desenvolvimentos, aplicações e perspectivas de estudos e empregos no Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2016. p. 108.

DNIT. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Obras em 2.500 pontes e viadutos em todo o país vão contar com investimento de quase R\$ 6 bilhões, maio 2015. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/noticias/obras-em-2.500-pontes-e-viadutos-em-todo-o-pais-vao-contar-com-investimento-de-quase-r-6-bilhoes/>>. Acesso em: 23 novembro 2017.

DONNINI, J.; CORINALDESI, V.; NANNI, A. Mechanical properties of FRCM using carbon fabrics with different. **Composites Part B: Engineering**, v. 88, 1 março 2016. 220-228. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.11.012>>.

EBEAD, U. et al. Effectiveness of Fabric-Reinforced Cementitious Matrix in Strengthening Reinforced Concrete Beams. **Journal of Composites for Construction**, v. 21, issue 2, abril 2017. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000741](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000741)>.

ELGHAZY, M. et al. Corrosion-Damaged RC Beams Repaired with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix. **Journal of Composites for Construction**, v. 22, issue 5, outubro 2018. (04018039) 1-13. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0000873](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000873)>.

ELGHAZY, M. et al. Post-repair flexural performance of corrosion-damaged beams rehabilitated with fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM). **Construction and Building Materials**, v.166, 30 março 2018. 732-744. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.128>>.

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

FHD. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Corrosion costs and preventive strategies in the United States. **NACE INTERNATIONAL**, Ohio, 2002. Disponível em: <<https://www.nace.org/uploadedFiles/Publications/ccsupp.pdf>>. Acesso em: 17 novembro 2017.

FIBERTEX. **Fibertex**. Disponível em: <<http://www.fibertex.com.br/produtos/construcao-civil/>>. Acesso em: 02 julho 2018.

GIL, L.; ESCRIG, C.; BERNAT, E. Bending Performance of Concrete Beams Strengthened with Textile Reinforced Mortar TRM. **Key Engineering Materials**, v.601, 12 março 2014. 203-206. Disponível em: <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.601.203>>.

GRIES, T. et al. 3 Textiles. In: BRAMESHUBER, W. **Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report**. Bagnaux, France: RILEM Publications SARL, 2006. p. 11-27.

HEGGER, J. et al. 6.2 Mechanical behaviour of textile reinforced concrete. In: BRAMESHUBER, W. **Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report**. Bagnaux, France: RILEM Publications SARL, 2006. p. 133-183.

HEGGER, J.; BRAMESHUBER, W.; WILL, N. **Proceedings PRO050: First International RILEM Symposium on Textile Reinforced Concrete**. [S.l.]: RILEM Technical Committee TC 201-TRC: Textile Reinforced Concrete. 2006. p. 418.

HEGGER, J.; VOSS, S. Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile. **Engineering Structures**, v. 30 issue 7, julho 2008. 2050-2056. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.01.006>>.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 05 fev. 2019.

JABR, A.; EL-RAGABY, A.; GHRIB, F. Effect of the Fiber Type and Axial Stiffness of FRCM on the Flexural Strengthening of RC Beams. **Fibers**, (5, 2), 6 janeiro 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/fib5010002>>.

KÖCKRITZ, U. et al. **Innovative technology for the manufacture of textile reinforcements for concrete**. 1st International RILEM Conference on Textile Reinforced Concrete (ICTRC). [S.l.]: RILEM Publications SARL. 2006. p. 3-12.

KULAS, C. **Actual applications and potential of textile-reinforced concrete**. GRCA CONGRESS. Dubai: [s.n.]. 2015. p. 1-11.

LARRINAGA, P. et al. **Experimental Study of the Flexural Behaviour of Low Performance RC Beams Strengthened with Textile Reinforced Mortar**. International RILEM Conference on Material Science – MATSCI, ICTRC. Aachen: RILEM Publications SARL. 2010. p. 235-244.

LORETO, G. et al. Performance of RC Slab-Type Elements Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious-Matrix Composites. **Journal of Composites for Construction**, v.18, issue 3, junho 2014. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000415](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000415)>.

MORASSUTTI, D. S. **Passarela em Concreto Armado e Concreto Têxtil: comparativo entre metodologias de dimensionamento**. Trabalho de Conclusão de Curso. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2016. p. 87.

NAAMAN, A. **Textile reinforced cement composites: competitive status and research directions**. International RILEM Conference on Materials Science. Aachen: RILEM Publications SARL. 2010. p. 3-22.

NIPPON. **Nippon Electric Glass**. Disponível em: <<http://www.neg.co.jp/en/product/fiber/a-fabric>>. Acesso em: 02 julho 2018.

NORA, J. **Análise experimental do Concreto Têxtil como reforço à flexão de vigas de concreto armado**. Trabalho de Conclusão de Curso. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2018. p. 118.

OMBRES, L. Flexural analysis of reinforced concrete beams strengthened with a cement based high strength composite material. **Composite Structures**, v. 94, issue 1, dezembro 2011. 143-155. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2011.07.008>>.

PELED, A. Confinement of damaged and nondamaged structural concrete with FRP and TRC sleeves. **Composites for Construction**, V. 11, ISSUE 5, OUTUBRO 2007. 514-522. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2007\)11:5\(514\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2007)11:5(514))>.

PELED, A. et al. Influences of textile characteristics on the tensile properties of warp knitted cement based composites. **Cement & Concrete Composites**, v.30, issue 3, março 2008. 174-183. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.09.001>>.

PELED, A.; BENTUR, A. Geometrical characteristics and efficiency of textile fabrics for reinforcing cement composites. **Cement and Concrete Research**, v. 30, ISSUE 5, maio 2000. 781-790. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00239-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00239-8)>.

PELED, A.; BENTUR, A.; MOBASHER, B. **Textile Reinforced Concrete**. 1^a. ed. Londres: CRC Press, 2017. 489 p.

PINO, V. et al. Repair of Damaged Prestressed Concrete Girders with FRP and FRCM Composites. **Journal of Composites for Construction**, v. 21, issue 3, junho 2017. (04016111) 1-14. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000773](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000773)>.

RAMBO, D. A. S. **Efeito da temperatura no comportamento mecânico de compósitos refratários reforçados com tecidos de basalto e carbono**. Tese de doutorado. Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós- Graduação e Pesquisa de Engenharia. 2016. p. 228.

RAOOF, S. M.; KOUTAS, L. N.; BOURNAS, D. A. Textile-reinforced mortar (TRM) versus fibre-reinforced polymers (FRP) in flexural strengthening of RC beams. **Construction and Building Materials**, v. 151, 1 outubro 2017. 279-291. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.023>>.

REINHARDT, H.-W. et al. 6 Composite Materials. In: BRAMESHUBER, W. **Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report**. Bagnaux, France: RILEM Publications SARL, 2006. p. 83-131.

SCHEERER, S.; SCHLADITZ, F.; CURBACH, M. **Textile reinforced concrete—from the idea to a high performance material**. Proceedings of the FERRO-11 and 3rd ICTRC in Aachen. Bagnaux, France: Rilem Publications SARL. 2015. p. 15-33.

SOLIDIAN. **Solidian**. Disponível em: <<https://www.solidian.com/en/textile-reinforced-concrete/>>. Acesso em: 02 julho 2018.

TEGAPE. **Tegape**. Disponível em: <http://www.tegape.com.br/atuacao_interna/id/73/fibra-de-vidro-alkali-resistente--tela>. Acesso em: 02 julho 2018.

TEXIGLASS. **Texiglass**. Disponível em: <http://texiglass.com.br/2018/view/produtos/construcao_civil.php>. Acesso em: 02 julho 2018.

TRUONG, B. T. et al. Experimental investigations of reinforced concrete beams repaired/reinforced by TRC composites. **Composite Structures**, v. 168, 15 maio 2017. 826-839. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.02.080>>.

VALIVONIS, J.; SKUTURNA, T. Cracking and strength of reinforced concrete structures in flexure strengthened with carbon fibre laminates. **Journal of Civil Engineering and Management**, v.13, n. 4, 2007. 317-323. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2007.9636452>>.

VERBRUGGEN, S.; TYSMANS, T.; WASTIELS, J. TRC or CFRP strengthening for reinforced concrete beams: An experimental study of the cracking behaviour. **Engineering Structures**, v. 77, 15 outubro 2014. 49-56. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.07.040>>.

VETROTEX. **Vetotrex**. Disponível em: <<https://www.vetrotextiles.com/applications/construction>>. Acesso em: 02 julho 2018.

APÊNDICE A – Caracterização dos materiais

a) Dados fornecidos pelo fabricante da argamassa Zentrifix-CR.

Tabela A1. Dados da argamassa Zentrifix CR.

<i>Base química</i>	Cimento Portland, areia de quartzo, fibras sintéticas e resina sintética
<i>Embalagem</i>	Saco com 25 kg
<i>Prazo de validade</i>	12 meses
<i>Tempo de trabalhabilidade</i>	15 minutos (20°C e 50% de umidade relativa)
<i>Densidade</i>	2,15 kg/l (NBR 13278 (2005))
<i>Granulometria máxima</i>	Diâm. Máx. do agregado 2,0 mm
<i>Resistência à Compressão</i>	24 horas > 35 MPa
	03 dias > 45 MPa
	07 dias > 55 MPa
	28 dias > 70 MPa (NBR 7215 (1996))
<i>Resistência à flexão</i>	24 horas > 5,0 MPa
	03 dias > 7,0 MPa
	07 dias > 8,0 MPa
	07 dias > 9,0 MPa (NBR 7215 (1996))
<i>Resistência adesiva à tração</i>	> 2 MPa (28 dias) (NBR 15258 (2005))
<i>Módulo de Deformação</i>	31 GPa (NBR 8522(2008))
<i>Proporção da mistura</i>	Aplicação Manual: 3,25 – 3,5 litros de água / saco de 25 kg (relação água:pó 0,13-0,14).
<i>Consumo</i>	74 sacos de 25 kg para 1m ³
<i>Preparo</i>	Zentrifix CR é monocomponente e deve ser misturado apenas com água limpa. O pó deve ser adicionado à água e misturado até a obtenção de uma argamassa homogênea. Recomenda-se o uso de misturadores mecânicos de baixa rotação (400 a 500 rpm).

(fonte: ficha técnica fornecida pela MC-BAUCHEMIE)

- b) Caracterizações dos materiais utilizados para dosagem do concreto, fornecidas pela empresa responsável pela concretagem.

Tabela A2. Dados do cimento.

Tipo: CP V-ARI Marca: Itambé Massa específica: 3,09 g/cm ³ (NBR 16605 (2017))										
Químicos	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Perda fogo (%)	CaO livre (%)	Resíduo Insolúvel (%)	Equivalente alcalino (%)
Média	4,39	19,29	2,87	61,25	3,68	3,10	3,62	1,03	0,73	0,65
Desvio padrão	0,12	0,14	0,05	0,19	0,28	0,06	0,10	0,15	0,13	0,03
Mínimo	4,21	19,11	2,81	60,95	3,35	3,02	3,45	0,81	0,51	0,62
Máximo	4,58	19,60	2,96	61,57	4,14	3,20	3,74	1,29	0,97	0,69

Físicos	Exp Quen te (mm)	Tempo de pega (h:min)		Cons. Normal (%).	Blaine (cm ² /g)	#200 (%)	#325 (%)	Resistência à compressão (NBR 16697 (2018))			
		Início	Fim					1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
Média	0,50	03:07	03:53	29,2	4,509	0,06	0,34	25,5	39,8	46,4	55,1
Desvio padrão	0,45	00:09	00:14	0,2	58,04	0,02	0,12	0,9	1,3	0,7	1,0
Mínimo	0,00	02:50	03:30	29,0	4,420	0,03	0,20	24,0	37,9	45,1	53,0
Máximo	1,00	03:20	04:15	29,7	4,590	0,10	0,50	26,5	41,8	47,6	56,0

Tabela A3. Dados dos agregados

Propriedade	Unidade	NM 52:2009 NM 46:2001		NM 53:2009	
		Areia fina	Areia média	Brita 0	Brita 1
Massa específica agregado seco	g/cm ³	2,62	2,58	2,95	2,93
Massa específica saturado superfície seca	g/cm ³	2,63	2,60	2,94	2,93
Massa específica aparente	g/cm ³	2,64	2,63	2,94	2,92
Material passante na peneira 75 mm por lavagem	%	1,2	0,8	-	-

Tabela A4. Composição granulométrica dos agregados utilizados no concreto das vigas.

Composição granulométrica (NM 248:2003)

Peneiras (aberturas)	Areia fina		Areia média		Brita 0		Brita 1	
	Retida	Acumulada	Retida	Acumulada	Retida	Acumulada	Retida	Acumulada
25 mm	-	-	-	-	0	0	0	0
19 mm	-	-	-	-	0	0	0	0
12,5 mm	-	-	-	-	0	0	3	3
9,5 mm	-	-	-	-	30	30	80	83
6,3 mm	-	-	-	-	58	88	17	100
4,75 mm	0	0	0	0	11	99	0	100
2,36 mm	0	0	1	1	1	100	0	100
1,18 mm	0	0	5	6	0	100	0	100
600µm	0	0	10	16	0	100	0	100
300 µm	2	2	45	61	0	100	0	100
150 µm	65	67	35	96	0	100	0	100
Fundo	33	100	4	100	0	100	0	100
Módulo de finura	0,69		1,80		6,29		7,03	
Diâmetro máximo	0,30 mm		2,36 mm		12,5 mm		19,0 mm	

c) Caracterização do concreto – valores, em MPa, de resistência à compressão do concreto do programa experimental para diferentes idades.

	7 dias	14 dias	28 dias	63 dias	93 dias
CP I	27,6	36,1	35,9	35,5	35,9
CP II	27,5	35,6	37,8	36,4	38,6
CP III	24,5	37,5	36,3	38,8	38,9
Média	27,6	36,4	36,7	36,9	38,8
Desvio padrão	1,76	0,98	1,00	1,71	1,65

- d) Ruptura de controle - valores de resistência à compressão do concreto nos dias dos ensaios à flexão das vigas.

Evento:	Obtenção da resistência para estimativa teórica da carga de fissuração prévia	Ensaio das vigas V3c-3/7d	Ensaio das vigas V3c-28d e V2c/4c-28d	Ensaio das vigas V3c-28d-F50/100
Idade do concreto:	27 dias	33 dias	54 dias	61 dias
CP I	37,7	38,46	36,0	35,6
CP II	38,8	38,49	38,3	38,8
CP III	-	38,54	37,9	39,4
Média	38,3	38,5	37,4	37,9
Desvio padrão	0,78	0,00	1,23	2,04

- e) Caracterização da argamassa – valores, em MPa, de resistência à compressão da argamassa do programa experimental para diferentes idades.

	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	63 dias
CP I	52,9	58,5	55,0	77,1	77,9
CP II	50,1	65,0	67,2	72,5	61,4
CP III	54,4	59,0	64,8	53,8	54,5
Valor Máximo	54,4	65,0	67,2	77,1	77,9
Desvio padrão	2,2	3,6	6,5	12,3	12,0

- f) Caracterização da argamassa – valores, em MPa, de resistência à tração na flexão da argamassa do programa experimental para diferentes idades.

	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias	63 dias
CP I	7,50	7,50	9,38*	9,84	10,31
CP II	7,08*	7,97	8,20	10,31	9,89
CP III	7,92	6,56*	8,20	8,91*	10,31
Média	7,71	7,73	8,20	10,08	10,17
Maior desvio absoluto em relação à média	0,21	0,23	0	0,23	0,28

*Valores descartados por excederem o desvio absoluto de 0,3 MPa recomendado pela NBR 13279

g) Controle do reforço executado- índice de consistência e valores de resistência à compressão a 28 dias dos corpos de prova da argamassa empregada em cada reforço

Viga	Índice de consistência (mm)	Resistência à compressão (MPa) (Idade de ruptura de 28 dias)								
		Cura junto à viga				Cura na câmara úmida				
		CP I	CP II	CP III	Valor adotado	CP I	CP II	CP III	Valor adotado	
V2c-28d-A	238,8 (0,6)	63,3	74,6	59,6	74,6 (7,8)	69,4	69,4	45,1	69,4 (14,0)	
V2c-28d-B	236,6 (5,9)	60,8	71,4	70,1	71,4 (5,8)	67,8	65,7	73,0	73 (3,8)	
V3c-3d-A	249,6 (1,5)	36,0*	50,3	50,4	50,4 (8,3)	65,8	63,4	59,9	65,8 (3,0)	
V3c-3d-B	239,8 (2,2)	42,6	48,3	51,5	51,5 (4,5)	68,9	71,7	77,5	77,5 (4,4)	
V3c-7d-A	238,9 (2,0)	56,0	57,2	67,3	67,3 (6,2)	68,8	70,4	72,5	72,5 (1,9)	
V3c-7d-B	244,9 (1,6)	58,7	62,2	61,9	62,2 (1,9)	61,6	51,6	66,0	66,0 (7,4)	
V3c-28d-A	242,0 (4,0)	73,9	50,8	65,0	73,9 (11,7)	70,7	73,7	69,5	73,7 (2,2)	
V3c-28d-B	231,5 (0,8)	60,4	50,1	77,4	77,4 (13,8)	76,8	56,7	63,7	76,8 (10,2)	
V3c-28d-F50-A	237,0 (0,1)	65,6	56,9	58,1	65,6 (4,7)	66,9	55,0	64,4	66,9 (6,3)	
V3c-28d-F50-B	228,5 (2,6)	47,9	58,3	63,1	63,1 (7,8)	63,5	55,3	64,3	64,3 (5,0)	
V3c-28d-F100-A	223,7 (3,8)	67,1	71,5	70,2	71,5 (2,3)	64,8	77,2	65,3	77,2 (7,0)	
V3c-28d-F100-B	244,9 (2,8)	62,7	62,5	58,5	62,7 (2,4)	64,4	68,7	47,5	68,7 (11,2)	
V4c-28d-A	249,0 (2,2)	73,1	-	77,1	77,1 (2,8)	66,8	68,9	66,8	68,9 (1,2)	
V4c-28d-B	241,2 (2,1)	44,1	71,6	61,0	71,6 (13,9)	67,7	57,9	67,9	67,9 (5,7)	
Média do índice de consistência das vigas reforçadas:	239,0 (7,4)	Média das resistências à compressão das vigas reforçadas:				67,2 (8,6)	Média das resistências à compressão das vigas reforçadas:			70,6 (4,5)

1) Devido à dificuldade de adensamento os corpos de prova, optou-se por adotar como valor de resistência à compressão o maior valor obtido dentre os corpos de prova de cada amostra;

2) Desvio padrão da amostra informado entre parênteses

h) Pesagem do têxtil AR-360-RA-4R da TEXIGLAS

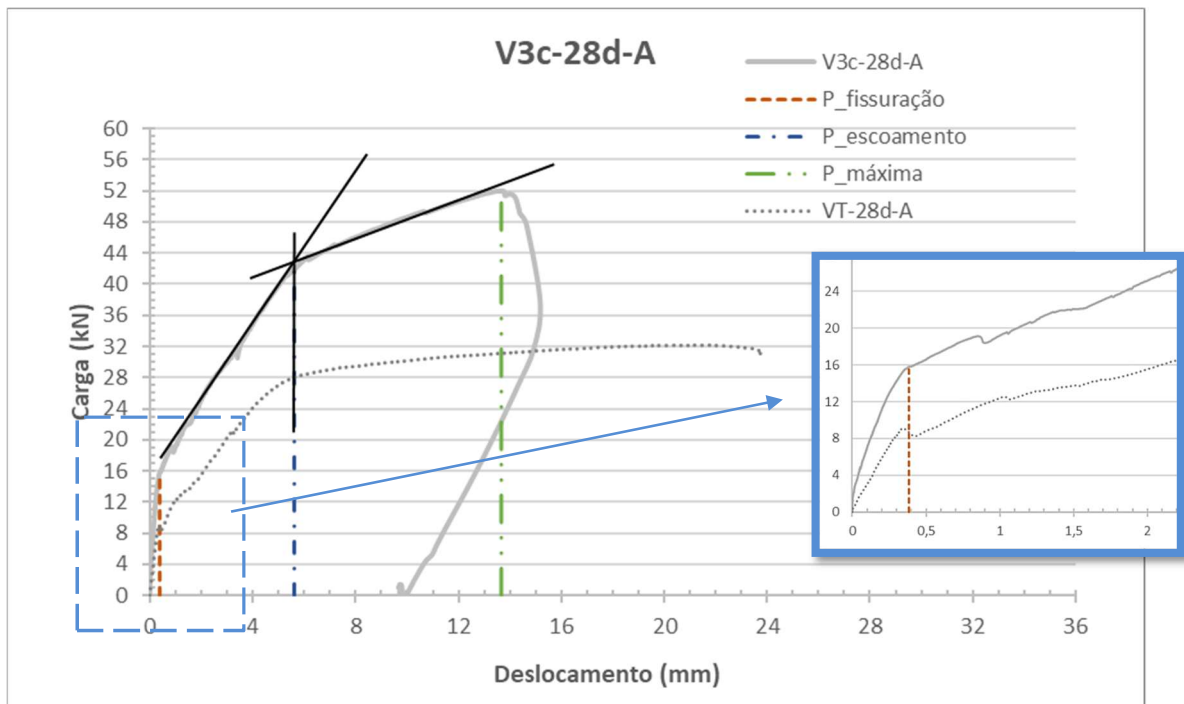
	Peso (g)	Área (m ²)	Peso/m ² (g/m ²)
CP I	2,1	0,0038	552,63
CP II	16,6	0,031968	519,27
CP III	7,0	0,01472	475,54
CP IV	3,2	0,007268	440,29
	Valor médio:		497
	Desvio padrão:		49

APÊNDICE B - Dados do ensaio de flexão

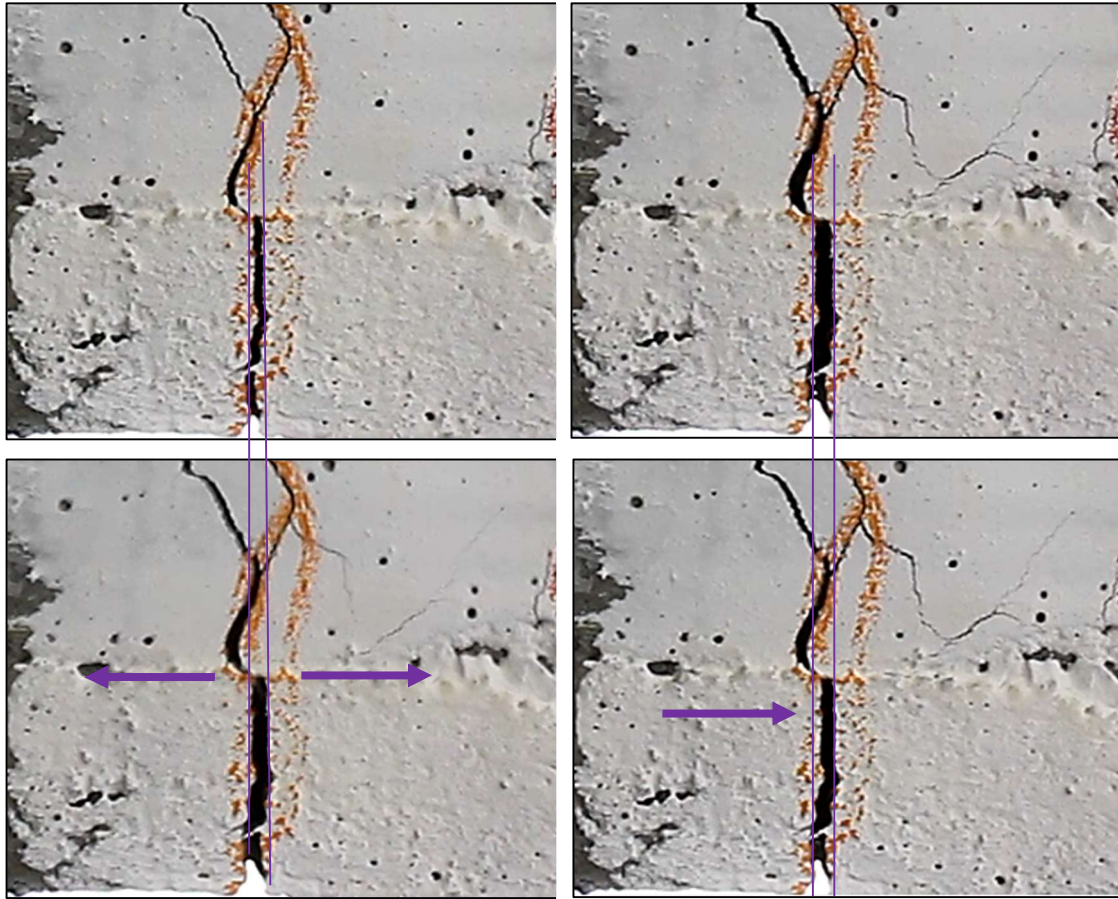
- a) Valores de carga para os instantes definidos como fissuração do concreto, escoamento do aço e carga máxima.

	Vigas	Carga - fissuração do concreto (kN)	Deslocamento para fissuração (mm)	Carga - escoamento do aço (kN)	Deslocamento para escoamento (mm)	Carga máxima (kN)	Deslocamento na ruptura (mm)
Programa experimental	VT-3/7d-A	10,18	0,32	28,29	5,11	34,55	22,84
	VT-3/7d-B	9,51	0,30	27,89	5,51	33,01	22,10
	VT-28d-A	9,11	0,34	27,58	5,27	32,18	21,15
	VT-28d-B	10,79	0,37	28,37	5,00	35,79	17,61
	V2c-28d-A	13,49	0,42	36,47	5,53	44,16	15,39
	V2c-28d-B	13,36	0,41	36,40	5,64	44,71	14,34
	V3c-3d-A	14,00	0,39	36,29	5,42	52,10	16,70
	V3c-3d-B	16,05	0,38	38,05	5,63	49,50	16,71
	V3c-7d-A	16,96	0,45	36,28	5,16	48,31	17,17
	V3c-7d-B	16,96	0,48	36,72	5,57	48,58	16,05
	V3c-28d-A	15,82	0,38	41,90	5,61	52,01	13,67
	V3c-28d-B	16,15	0,36	41,67	5,72	52,51	16,22
	V3c-28d-F50-A	9,98	0,45	39,66	5,66	50,46	15,38
	V3c-28d-F50-B	7,85	0,40	38,81	5,57	52,88	15,50
	V3c-28d-F100-A	5,47	0,16	39,86	5,07	48,66	12,51
	V3c-28d-F100-B	6,07	0,23	39,51	4,97	54,09	16,06
Teste piloto	V4c-28d-A	16,30	0,48	44,02	5,80	61,60	17,57
	V4c-28d-B	16,45	0,49	39,65	5,58	54,95	18,18
	Testemunho	9,18	0,23	29,38	2,86	30,53	9,93
	V3c-Sk	18,22	0,42	38,98	3,15	51,82	18,02
	V3c-Zx	16,46	0,42	38,84	3,35	50,50	15,42
	V3c-Zx-Anc	15,48	0,30	37,76	3,13	44,52	11,66

- b) Os valores das cargas de fissuração e de escoamento do aço foram identificados graficamente conforme exemplificado na figura abaixo:



c) Registro fotográfico do processo de ruptura

Processo de ruptura da viga V3c-28d-A*Abertura abrupta**Relaxamento do têxtil reduzindo abertura da fissura*

Processo de ruptura da viga V4c-28d-A