



Rennan Liberato Rodrigues

**Comportamento mecânico de compósitos
cimentícios reforçados com tecido de fibras de
vidro e sisal: aspectos estruturais e
durabilidade**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Flávio de Andrade Silva

Coorientador: Daniel Carlos Taissum Cardoso

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2022



Rennan Liberato Rodrigues

**Comportamento mecânico de compósitos
cimentícios reforçados com tecido de fibras de
vidro e sisal: aspectos estruturais e
durabilidade**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Flávio de Andrade Silva

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso

Coorientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Elisa Dominguez Sotelino

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Prof. Cláudia Maria de Oliveira Campos

Departamento de Engenharia Civil – UFF

Rio de Janeiro, 25 de Fevereiro de 2022

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Rennan Liberato Rodrigues

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual Vale do Acaraú – UeVA – em 2019. Principais áreas de interesse: Materiais compósitos, concreto têxtil e estruturas de concreto.

Ficha Catalográfica

Rodrigues, Rennan Liberato

Comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com tecido de fibras de vidro e sisal: aspectos estruturais e durabilidade / Rennan Liberato Rodrigues; orientador: Flávio de Andrade Silva; coorientador: Daniel Carlos Taissum Cardoso. – 2022.

106f.: il. color.; 29,7 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2022.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Concreto têxtil. 3. Fibra de vidro. 4. Fibra de sisal. 5. Ambiente salino. I. Silva, Flávio de Andrade. II. Cardoso, Daniel Carlos Taissum. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV. Título.

CDD: 624

Ao meu pai, seu Renato.

Agradecimentos

Gostaria primeiramente agradecer a Deus pela oportunidade dada de realizar esse objetivo que tanto almejei e por fim conquistei. Toda honra e glória tem que ser dada a Ele.

Agradeço ao meu orientador, Flávio de Andrade Silva, pela paciência e inspiração, pelos momentos de incentivo e por todo conhecimento compartilhado. Muito obrigado por acreditar no meu trabalho, espero poder continuar contribuindo. Estarei sempre à disposição.

Ao meu coorientador, Daniel Carlos Taissum Cardoso, por todas as sugestões prontamente acolhidas, pelo incentivo a sempre querer mais e pela inspiração profissional.

Muito obrigado aos técnicos do laboratório de estruturas da PUC-Rio, que me auxiliaram nos momentos cruciais dos processos experimentais: Euclides, José Nilson, Rogério, Marques e, principalmente ao Jhansen, que esteve ao meu lado em todos os momentos complicados no laboratório, incentivando a nunca desistir e dando palavras de força que foram essenciais para chegar até aqui. Agradeço também a toda equipe que faz parte da PUC-Rio que demonstrou ser uma rede de apoio incrível e, principalmente, à grade docente que sempre me inspirou profissionalmente.

Agradeço aos amigos que fiz ao longo dessa jornada, em especial, ao Thiago Andrade com quem eu compartilhei momentos de fragilidade e desespero bem como momentos alegres e de vitória. Agradeço também a todos os meus amigos que deixei na minha cidade natal pelo incentivo de sempre, principalmente à Jeysa e a sua mãe, tia Expedita, que já transcendeu a barreira de amizade e se tornou família. Eu ainda vou retribuir tudo que vocês fizeram para eu chegar até aqui, eu prometo.

Minha gratidão eterna aos meus pais, dona Socorro e seu Renato, por apostarem e acreditarem no meu sonho, por investirem tempo, saudade, amor e tudo que podiam em mim. Só eu sei da dificuldade que é e isso só aumenta minha vontade de retribuir tudo para vocês da forma mais bonita que eu puder. Isso aqui é por vocês e para vocês, sempre vai ser.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

Resumo

Rodrigues; Rennan Liberato; de Andrade Silva, Flávio (orientador); Cardoso, Daniel Carlos Taissum (coorientador). **Comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com tecido de fibras de vidro e sisal: aspectos estruturais e durabilidade.** Rio de Janeiro, 2022. 106p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A necessidade de estruturas mais leves e esbeltas tem motivado a pesquisa por materiais alternativos, o que levou, nas últimas décadas, ao concreto têxtil (TRC) ou argamassa de cimento reforçada com tecido (FRCM). Além da leveza e finura, vale ressaltar a alta ductilidade deste tipo de compósito. No entanto, ainda são poucos os estudos sobre o comportamento mecânico desse material, principalmente quando submetido a situações de alta agressividade ambiental. Portanto, o objetivo deste estudo é analisar o comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais e tecido de fibra sintética. Para isso, foram desenvolvidos compósitos em formato de placas e vigas de seção I fabricados com dois tipos de matrizes, que variavam quanto ao teor de hidróxido de cálcio, reforçados com diferentes porcentagens de tecido de fibra de vidro álcali resistente e de fibra de sisal. As amostras foram submetidas a ensaios de tração direta e flexão a quatro pontos tanto em condições normais quanto após envelhecimento acelerado em câmara de névoa salina. Concluiu-se que, embora os elementos reforçados com tecido de fibra de vidro apresentem um desempenho satisfatório em condições normais de ensaio, quando colocados em ambientes salinos há uma degradação considerável tanto da fibra quanto da interface entre o tecido e a matriz, prejudicando a performance do compósito. Observou-se também que a matriz com baixo teor de hidróxido de cálcio auxiliou na preservação da capacidade resistente dos tecidos utilizados no estudo, com destaque para o desempenho compósito reforçado com fibra de vidro ensaiado em condições normais e o reforçado com fibra de sisal nas duas condições de ensaio propostas.

Palavras – chave

Concreto têxtil; Fibra de vidro; Fibra de sisal; Ambiente salino

Abstract

Rodrigues, Rennan Liberato; de Andrade Silva, Flávio (advisor); Cardoso, Daniel Carlos Taissum (co-advisor). **Mechanical behavior of cement based composites reinforced with glass and sisal fabric: structural aspects and durability.** Rio de Janeiro, 2022. 106 p. M.Sc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The need for lighter and slender structures has led civil engineers to look for alternative materials, which has led, in recent decades, to cementitious composites reinforced with fabrics. This new type of material is known as textile reinforced concrete (TRC) or Fabric Reinforced Cement Mortar (FRCM). In addition to the lightness and slimness, it is worth mentioning the high ductility of the material. Nevertheless, there are still only a few studies on durability and mechanical mechanisms when it occurs in situations with high environmental aggressiveness, such as coastal areas. Therefore, the objective of this study is to analyze the influence of saline environments on cementitious composites reinforced with natural sisal and alkali resistant glass fabrics. Two types of matrices were developed: one with a high calcium hydroxide content, only with Portland cement and the other with a lower content, due to the partial replacement of Portland cement by Metacaulim and fly ash. The TRC specimens were placed for accelerated aging in a salt steam walk-in chamber with a concentration of 3.5% NaCl and 70 °C. After 1000 hours of aging, the specimens were removed from the chamber and subjected to direct tensile tests. The degradation mechanisms were discussed and a comparison between the mechanical behavior of the two composite systems were addressed.

Keywords

Textile Reinforced Concrete, Glass fiber, Sisal Fiber, Saline environments.

Sumário

| | |
|--|----|
| Resumo | 6 |
| Abstract | 7 |
| Lista de Figuras | 10 |
| Lista de tabelas | 13 |
| 1. Introdução | 14 |
| 1.1. Motivação | 14 |
| 1.2. Objetivos | 15 |
| 1.3. Organização da Dissertação | 15 |
| 2 Revisão Bibliográfica | 17 |
| 2.1. Matrizes cimentícias reforçadas com fibras | 17 |
| 2.2. Concreto têxtil | 20 |
| 2.2.1. Matriz | 23 |
| 2.2.2. Tecido | 24 |
| 2.3. Comportamento mecânico do concreto têxtil | 26 |
| 2.4. Interface tecido-matriz em concreto têxtil | 34 |
| 2.5. Durabilidade do concreto têxtil em ambientes agressivos | 37 |
| 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL | 43 |
| 3.1. Introdução | 43 |
| 3.2. Materiais utilizados | 43 |
| 3.2.1. Matriz cimentícia | 43 |
| 3.2.2. Reforços têxteis | 51 |
| 3.3. Fabricação dos compósitos | 54 |
| 3.4. Fabricação dos elementos estruturais | 56 |
| 3.5. Estudo da degradação em Câmara de névoa salina | 61 |

| | |
|---|----|
| 3.6. Ensaio de tração direta | 62 |
| 3.7. Ensaio de flexão a quatro pontos | 65 |
| | |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 67 |
| 4.1. Introdução | 67 |
| 4.2. Comportamento mecânico dos materiais compósitos na condição não-envelhecida | 67 |
| 4.3. Comportamento Mecânico dos Perfis Estruturais na condição não-envelhecida | 74 |
| 4.4. Efeito do Envelhecimento Acelerado nos Materiais Compósitos e Perfis Estruturais | 80 |
| | |
| 5. Conclusões e sugestões | 95 |
| 5.1 Conclusões | 95 |
| 5.2 Sugestões para futuros trabalhos | 96 |
| | |
| Referências Bibliográficas | 98 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1- Tecido técnico em diversas escalas [39]..... | 24 |
| Figura 2.2 - Configurações diferentes para têxteis (a) woven (b) e (c) knitted. Adaptado [40]..... | 25 |
| Figura 2.3 - Tensão versus deformação de um compósito TRC. Adaptado de [35][30] | 27 |
| Figura 3.1 – Molde de tronco de cone, dimensões em cm..... | 46 |
| Figura 3.2– Passos para obtenção do espalhamento das matrizes. | 47 |
| Figura 3.3– Ensaio de resistência à compressão..... | 49 |
| Figura 3.4– (a) Curva tensão x deformação das matrizes e (b) análise das resistências das matrizes ao longo das idades de ensaio..... | 50 |
| Figura 3.5– Tecido de fibra de vidro | 51 |
| Figura 3.6– Área da seção transversal da (a) trama e (b) urdume..... | 52 |
| Figura 3.7– Detalhes do tecido e da ligação entre trama e urdidura. | 52 |
| Figura 3.8 - Fibras de Sisal (a) emaranhadas; (b) alinhadas e (c) cortadas e medidas..... | 53 |
| Figura 3.9 – Imagens obtidas do (a) comprimento longitudinal e da (b) seção transversal da fibra por um microscópio estereoscópio Nikon, modelo SMZ800N; (c) Imagem da seção transversal obtida pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo Jeol JSM 6510LV..... | 54 |
| Figura 3.10 – Nomenclatura dada às amostras..... | 55 |
| Figura 3.11- Processo de moldagem das amostras com reforço têxtil de (a) vidro e (b) sisal..... | 55 |
| Figura 3.12 – Reforço de tecido de fibra de vidro em formato de I..... | 57 |
| Figura 3.13 – Reforço de fibra de sisal em formato de I..... | 57 |
| Figura 3.14 – Taxa de reforço para as vigas (a) MAV2, (b) MAV6 e (c) MBS6. | 59 |
| Figura 3.15 – Processo de fabricação das vigas reforçadas com (a), (b), (c), (d) tecido de fibra de vidro e (e)(f)(g) tecido de fibra de sisal. | 60 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.16 – Câmaras de Névoa Salina | 61 |
| Figura 3.17 – Armazenamento das placas no interior da câmara de névoa salina..... | 62 |
| Figura 3.18 – Armazenamento das vigas em câmara de névoa salina | 62 |
| Figura 3.19 – Modelo esquemático para o ensaio de tração direta.(Adaptado de [73])..... | 63 |
| Figura 3.20 – Torquímetro de estalo. | 64 |
| Figura 3.21 – (a) Área de corpo livre padronizada e (b)setup do ensaio de tração direta. | 65 |
| Figura 3.22 – (a) <i>Setup</i> de ensaio e (b) detalhamento da viga (Adaptado de [88])..... | 66 |
| Figura 4.1- Curvas tensão de tração versus deformação características dos compósitos das séries MAV2-CN e MBV2-CN..... | 68 |
| Figura 4.2 – O padrão de fissuração dos compósitos por meio de CID: (a) MAV2 - CN e (b) MBV2 – CN..... | 69 |
| Figura 4.3 - Curvas tensão de tração versus deformação características dos compósitos das séries MAV6-CN e MBV6-CN..... | 70 |
| Figura 4.4 - O padrão de fissuração dos compósitos por meio de CID: (a) MAV6 - CN e (b) MBV6 – CN..... | 71 |
| Figura 4.5 - Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação características dos compósitos das séries MAS6 - CN e MBS6 - CN..... | 72 |
| Figura 4.6 – O padrão de fissuração dos compósitos por meio de CID: (a) MAS6 - CN e (b) MBS6 – CN..... | 73 |
| Figura 4.7 – Padrão de fissuração e ruptura para as séries (a) MAV2 e MBV2 e (b) MAV6, MBV6, MAS6 e MBS6. | 73 |
| Figura 4.8 – Comparativo entre os compósitos reforçados com fibra de vidro e de sisal. | 74 |
| Figura 4.9 - Curva força <i>versus</i> deflexão da viga MAV2 CN. | 75 |
| Figura 4.10 – Fissuras aparentes da Viga MAV2 CN | 76 |
| Figura 4.11 - Curva força <i>versus</i> deflexão das vigas MAV6 CN e MAV2 CN. | 76 |
| Figura 4.12 – Fissuras aparentes da Viga MAV6 CN | 77 |
| Figura 4.13 – Padrão de ruptura para as vigas MAV2 CN e MAV6 CN . . | 78 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.14 - Curva força <i>versus</i> deflexão da viga reforçada com tecido de vidro MBS6 CN. | 78 |
| Figura 4.15 - Modo de ruptura para Viga MBS6 CN..... | 79 |
| Figura 4.16 – Fissuras aparentes da Viga MBS6 CN..... | 80 |
| Figura 4.17 - Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação características dos compósitos das séries MAV2 - NS e MBV2 – NS | 81 |
| Figura 4.18 - O padrão de fissuração dos compósitos por meio de CID: (a) MAV2 - NS e (b) MBV2 – NS. | 82 |
| Figura 4.19 - Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação características dos compósitos das séries MAV6 - NS e MBV6 - NS. | 83 |
| Figura 4.20 - O padrão de fissuração dos compósitos por meio de CID: (a) MAV6 – NS e (b) MBV6 – NS. | 84 |
| Figura 4.21 - Curvas tensão de tração <i>versus</i> deformação características dos compósitos das séries MAS6 – NS e MBS6 – NS..... | 85 |
| Figura 4.22 – O padrão de fissuração dos compósitos por meio de CID: (a) MAS6 – NS e (b) MBS6 – NS. | 86 |
| Figura 4.23 - Curva força <i>versus</i> deflexão da viga reforçada com tecido de vidro MAV2 NS submetida a câmara de nevoa salina. | 87 |
| Figura 4.24 – Fissuras aparentes da Viga MAV2 NS | 88 |
| Figura 4.25 - Curva força <i>versus</i> deflexão da viga reforçada com tecido de vidro MAV6 NS submetida a câmara de nevoa salina. | 89 |
| Figura 4.26 – Modo de Ruptura das vigas MAV2 e MAV6..... | 89 |
| Figura 4.27 – Fissuras aparentes da Viga MAV6 NS | 90 |
| Figura 4.28 – Fragmentos de fibras de vidro retiradas das vigas MAV6 CN (acima) e MAV6 NS (abaixo)..... | 90 |
| Figura 4.29 - Interface entre a matriz e o tecido de vidro da viga (a) MAV6 CN e (b) MAV6 NS..... | 91 |
| Figura 4.30 - Curva força <i>versus</i> deflexão da viga MBS6 NS. | 92 |
| Figura 4.31 – Modo de ruptura da Viga MBS6 NS. | 92 |
| Figura 4.32 – Fissuras aparentes da Viga MBS6 NS. | 93 |
| Figura 4.33 – Fibras retiradas das Vigas (a) MBS6 CN e (b) MBS6 NS .. | 93 |
| Figura 4.34 – Detalhe na interface das Vigas (a) MBS6 CN e (b) MBS6 NS | 94 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Tipos de Matrizes Utilizadas em Concreto Têxtil..... | 23 |
| Tabela 2.2 - Configurações diferentes para têxteis (a) woven (b) e (c) knitted. Adaptado [40]. | 26 |
| Tabela 3.1– Traço correspondente a 1 m ³ de matriz..... | 44 |
| Tabela 3.2– Valores de espalhamento obtidos com a variação de superplastificante e água. | 47 |
| Tabela 3.3– Resistências à compressão das matrizes | 50 |
| Tabela 3.4– Deformação e módulo de elasticidade das matrizes | 51 |
| Tabela 3.5– Especificações técnicas do tecido. (<i>Fonte: Adfors Saint Gobain</i>) | 52 |
| Tabela 4.1 - Resultados obtidos nos ensaios de tração direta para as séries MAV2 -CN e MBV2-CN..... | 68 |
| Tabela 4.2 - Resultados obtidos nos ensaios de tração direta para as séries MAV6 - CN e MBV6 - CN..... | 71 |
| Tabela 4.3 - Resultados obtidos nos ensaios de tração direta para as séries MAS6 - CN e MBS6 - CN..... | 72 |
| Tabela 4.4 - Resultados para Viga MAV2 CN. | 75 |
| Tabela 4.5 - Resultados para Viga MAV6 CN. | 77 |
| Tabela 4.6- Resultados para Viga MBS6 CN | 79 |
| Tabela 4.7 - Resultados obtidos nos ensaios de tração direta para as séries MAV2 - NS e MBV2 - NS. | 82 |
| Tabela 4.8 - Resultados obtidos nos ensaios de tração direta para as séries MAV6 - NS e MBV6 - NS | 84 |
| Tabela 4.9 - Resultados obtidos nos ensaios de tração direta para as séries MAV6 - NS e MBV6 - NS | 86 |
| Tabela 4.10- Resultados da Viga MAV2 NS | 87 |
| Tabela 4.11 - Resultados da Viga MAV6 NS..... | 89 |
| Tabela 4.12 - Propriedades mecânicas da Viga MBS6 NS | 92 |

1. Introdução

1.1. Motivação

A indústria da construção civil almeja continuamente estruturas mais leves e esbeltas, o que tem motivado a busca de materiais novos para suprir essa necessidade. O concreto reforçado com tecido surge como alternativa de solução para essa demanda.

Surgindo no início dos anos 1990, o conceito de concreto têxtil vem sendo bastante difundido no mundo e consiste em um compósito de matriz cimentícia reforçado com múltiplas camadas de tecido 2D ou 3D. Os tecidos podem ser poliméricos, sintéticos, metálicos ou orgânicos.

O concreto têxtil tem como vantagens a fabricação de peças muito finas e complexas, sem risco de corrosão e com propriedades pré-determinadas. Embora os compósitos reforçados com fibras venham sendo estudados desde o início dos anos 1970, o uso de reforço têxtil em matrizes cimentícias é mais recente e a compreensão sobre o seu comportamento mecânico ainda apresenta lacunas. Quanto à durabilidade desse material, as contribuições são ainda escassas.

A matriz utilizada para esse tipo de compósito requer certas especificações que garanta a proteção do reforço têxtil e promova um comportamento mecânico satisfatório. Como exemplos desses requisitos destacam-se a finura do agregado miúdo e a ausência de agregado graúdo que auxiliam na penetração da matriz entre os cordões do tecido, que por sua vez podem ser de variados materiais e geometrias. O comportamento mecânico desses compósitos depende tanto da matriz quanto do tecido utilizado e, principalmente, da aderência entre esses dois materiais. A aderência entre matriz e tecido é crucial para o desempenho mecânico das peças, sendo uma das principais características da interface.

Devido a seu elevado desempenho mecânico, os concretos têxteis podem ser usados para o reparo ou reforço de elementos estruturais já existentes de concreto

armado ou outro material e para a construção de novos elementos, estruturais e não estruturais.

Porém, pouco se sabe do comportamento mecânico desse material quando submetido a condições peculiares, como a exposição à ambientes salinos, principalmente a nível estrutural. Desta forma, este estudo se propõe a analisar o comportamento do concreto têxtil reforçado com tecido de fibra de vidro e fibra de sisal através de ensaios mecânicos realizados em compósitos em formato de placa e de vigas com seção I, bem como o seu desempenho após serem submetidos a ambientes salinos.

1.2. Objetivos

Este estudo tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico de compósitos em formato de placa reforçados com tecido de fibra de vidro e tecido de fibra de sisal através de ensaio de tração direta. Para isso, foram analisadas variáveis como tipo de matriz utilizada, tipo de reforço e taxa de reforço usado.

Além disso, esta pesquisa avalia o comportamento do concreto reforçado com tecido em elementos estruturais. Vigas de perfil I foram fabricadas com reforço de tecido de fibra de vidro e de sisal e ensaiadas à flexão a quarto pontos.

Por fim, todos os elementos fabricados neste trabalho foram ensaiados e tiveram seus comportamentos mecânicos analisados após envelhecimento em câmara de névoa salina.

1.3. Organização da Dissertação

O Capítulo 1 traz a introdução e os objetivos da pesquisa.

O Capítulo 2 traz a revisão bibliográfica acerca de concreto têxtil, seus principais constituintes e aplicações, seu comportamento mecânico e a importância da aderência de diversos tipos de tecido. Também cita trabalhos relacionados à durabilidade de concretos têxteis em ambientes agressivos.

O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento dos compósitos e dos elementos estruturais, os processos de fabricação, os ensaios mecânicos realizados, além da especificação do processo de envelhecimento acelerado dos compósitos.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos ensaios realizados tanto nos compósitos quanto nas vigas ensaiados em condições normais e após o envelhecimento acelerado em câmara de névoa salina, trazendo análises e discussões acerca dos dados obtidos.

O Capítulo 5 são apresentadas conclusões e sugestões para continuidade da pesquisa.

2 Revisão Bibliográfica

2.1. Matrizes cimentícias reforçadas com fibras

O concreto é tido como um material que contém uma série de características que justificam o seu uso, tais como a infinidade de formas que ele pode tomar, o baixo custo e a sua capacidade de se adequar a variadas condições de produção. Em contrapartida, sua baixa relação peso/resistência, o seu comportamento frágil e sua baixa capacidade de deformação quanto submetido a esforços de tração fez com que novas tecnologias fossem desenvolvidas e agregadas ao material. A partir disso, surgiu o concreto armado, onde a limitação de resistência a tração foi compensada, porém, dependendo do ambiente em que essa alternativa é utilizada, o desempenho do elemento estrutural é comprometido.

Concretos e argamassas são materiais frágeis que apresentam baixa resistência à tração e baixa capacidade de deformação. A presença de fibras como reforço pode promover um aumento da tenacidade destes materiais, fazendo com que o compósito resultante seja capaz de sustentar solicitações de tração e compressão. Embora a incorporação de fibras não deva substituir totalmente o uso da armadura de barras de aço nos concretos, a melhora no nível da tenacidade, acarretada pela presença de fibras, permite uma redução significativa na taxa da referida armadura sem comprometer a integridade estrutural dos elementos produzidos[1,2].

O uso de fibras curtas surgiu da incessante procura da indústria da construção civil por materiais alternativos aos convencionais que, além de serem menos prejudiciais à natureza com a vantagem de produzirem menos CO₂, suportam ambientes adversos não suportados pelos materiais convencionais [3-5]. Na construção civil utilizam-se muitos materiais à base de cimento reforçado com fibras, com aumento significativo deles nos últimos anos, principalmente nos países desenvolvidos, que investem de forma considerável nessa área. Estima-se que

atualmente a produção mundial de compósitos seja de aproximadamente 30 milhões de toneladas por ano [5].

As fibras podem ser de diferentes tipos tais como: naturais (sisal, coco, juta entre outras), sintéticas (nylon, PVA, polietileno, polipropileno entre outras) e metálicas (aço), sendo que hoje dispõe-se de uma variedade enorme de fibras que podem ser classificadas em baixo e alto módulo de elasticidade. No entanto, as fibras de baixo módulo pouco acrescentam nas resistências à tração e compressão de compósitos, podendo ainda diminuir a resistência à compressão quando presente em grandes teores [6].

No Brasil, uma das primeiras linhas de pesquisa em relação a compósitos reforçados com fibras naturais data de 1979 desenvolvida pelo pesquisador Khosrow Ghavami na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro [7] voltada à caracterização estrutural e do desenvolvimento de protótipos de materiais naturais como o bambu atuando como reforço tanto de matrizes de cimento como de solos. Seguindo essa linha de pesquisa, muitos outros trabalhos foram desenvolvidos [8,9] com o objetivo de determinar o comportamento mecânico destes compósitos e sua possível utilização na construção civil, tendo sido determinadas diversas propriedades como módulo de elasticidade, resistência à compressão, ao impacto, à flexão e à fadiga.

O principal objetivo do uso de fibras naturais em matrizes poliméricas é reduzir o custo do material e alcançar valores elevados de rigidez, reciclabilidade, biodegradabilidade, isolamento térmico e neutralidade de CO₂ em comparação com as fibras convencionais que incluem as de vidro e fibras de carbono. Isso despertou um interesse crescente em NFRC's (Natural Fiber Reinforced Composite) termoplásticos para aplicações de engenharia de alto desempenho [10].

Embora as fibras naturais tenham inúmeras vantagens, existem algumas desvantagens cruciais associadas a esse tipo de fibra, como falta de estabilidade em temperatura elevada e a alta absorção de umidade, que impede seu uso em ambientes úmidos e provoca alterações na geometria da fibra, influenciando diretamente a aderência entre matriz e fibra [11]. Além disso, o uso de fibras naturais como reforço de matrizes cimentícias apresenta a desvantagem das fibras sofrerem degradação devido à alcalinidade da matriz, o que reduz a sua durabilidade e conseqüentemente promove uma redução significativa de sua resistência

mecânica [5]. Dessa forma, as fibras metálicas e sintéticas surgem como alternativa para alcançar os mesmos objetivos das fibras vegetais.

O uso de fibras de aço para aplicações estruturais, como substituição parcial ou total de barras de reforço convencionais, tornou-se uma solução popular para a construção de infraestrutura de concreto, devido à sua boa durabilidade geral e desempenho mecânico em estruturas estaticamente indeterminadas [12]. Esta opção foi sugerida em 1874 em uma patente de A. Bernard para concreto reforçado com resíduos de aço e, a partir disso, várias outras patentes surgiram em países como Estados Unidos, Alemanha e França [13].

Após esses vários estudos, surgiram diversas normas que sugerem ensaios mecânicos para obter tais propriedades dessas fibras. No Código Modelo CEB-FIP 2010 [14], a resistência à tração em compósitos com fibras de aço é incluída no projeto de estruturas de concreto; a tensão de tração do compósito pode ser avaliada a partir dos resultados de ensaios de flexão de quatro pontos em vigas entalhadas de acordo com a BS EN 14561 [15]. A norma ACI 318M-11 já permite o uso de fibras de aço de 0,75% em volume como armadura de cisalhamento mínimo em vigas de concreto armado [16].

Mesmo com o avanço das pesquisas com fibras de aço até os dias atuais, a aplicação dessas fibras é geralmente limitada a pisos industriais e concreto projetado em paredes de túneis e minas subterrâneas. As aplicações dessas fibras podem promover um aumento da resistência em vigas de pontes de concreto protendido, uma maior durabilidade para lajes de tabuleiro de pontes e uma maior estabilidade para estruturas que podem sofrer carregamentos de impacto ou explosões, torres eólicas, dormentes e estruturas que podem sofrer reações expansivas [17]. Essa limitação pode ser justificada pelo comportamento controverso referente a durabilidade a longo prazo das fibras sob exposição severa a cloreto e carbonatação. Há um padrão geral para o uso desse tipo de material, principalmente no que se refere a classes de exposição a ambientes marítimos, úmidos, com presença de CO₂, saís de degelo, entre outros. Esse padrão indica um entendimento limitado sobre a probabilidade de corrosão da fibra exposta e seu impacto na integridade estrutural das estruturas construídas [18].

Outros tipos de fibras utilizadas são as sintéticas como as de carbono, vidro, aramida, basalto, entre outras. Uma das principais vantagens das fibras sintéticas é sua excelente resistência ambientes agressivos. Embora o concreto reforçado com

fibra de aço seja utilizado em elementos estruturais por conta de suas excelentes propriedades mecânicas, as fibras estão sujeitas a corrosão em um ambiente agressivo e isso pode afetar adversamente no o controle de fissuração [19].

O contrário ocorre com as fibras sintéticas já que são bem conhecidas por serem menos suscetíveis aos efeitos da corrosão, reações alcalinas, água ácida, sal, cloro, produtos químicos e micro-organismos. Além disso, quando as fibras são distribuídas de forma homogênea e utilizadas em quantidade adequada no interior do concreto contribuem para o aumento da resistência à tração, tenacidade, ductilidade e durabilidade, além de melhorar outras propriedades mecânicas [20]. As fibras com diferentes propriedades mecânicas e geométricas bloqueiam a propagação e posterior desenvolvimento de fissuras nas escalas micro e macro [6].

As fibras poliméricas, além de serem usadas como reforço em compósitos cimentícios em ambientes agressivos favorecendo melhorias nas propriedades mecânicas e durabilidade, também pode reduzir o peso estrutural e o custo de construção [21].

No entanto, fibras curtas convencionais com um diâmetro de cerca de 15 μm e um comprimento variando de 5 a 25 mm exibem uma orientação aleatória dentro de uma matriz de cimento, o que significa que apenas uma pequena fração é usada de forma eficiente. A eficiência e a utilização podem ser melhoradas com fibras ou filamentos contínuos, respectivamente, que são amarrados em fios que, ao serem conectados a estruturas bidimensionais com técnicas especiais de ligação, são chamados de tecidos técnicos [22]. O compósito formado de uma matriz cimentícia e um tecido técnico é chamado de concreto têxtil.

2.2. Concreto têxtil

O uso de reforço contínuo na forma de estruturas de reforço têxtil ganhou popularidade nas últimas décadas. As principais vantagens de sua utilização consistem na flexibilidade suficiente dos processos de fabricação têxtil e na possibilidade de utilização de uma ampla gama de matérias-primas. O reforço com têxteis oferece muitas oportunidades, incluindo a fabricação de peças de concreto e compósitos muito finos, sem risco de corrosão dos materiais de reforço e a capacidade de fabricar peças estruturais com formas complexas e propriedades pré-determinadas [23].

Embora os têxteis feitos de fibras de alta performance tais como carbono, Kevlar e Spectra estavam disponíveis para a indústria aeroespacial desde o começo dos anos 1960, eles só começaram a ser utilizados em compósitos de matriz cimentícia no final da década de 1980 e começo da década de 1990 [24]. O Instituto de Pesquisa Têxtil Saxão em Chemnitz e o WTZ Tecnologia Têxteis em Dresden, Alemanha, foram os primeiros desenvolvedores de patentes de concreto têxtil. Em 1990, a patente DD 275 008 descreve exemplos de reforços têxteis: "fios de reforço" com diâmetro de 8mm e um espaçamento de malha de 25mm, dando a primeira impressão do concreto têxtil [25].

O concreto têxtil ou *Textile Reinforced Concrete* (TRC) pode ser definido como uma matriz cimentícia e um reforço em forma de tecido multiaxial, com fibras dispostas umas sobre as outras, em diferentes direções [26]. Os compósitos reforçados com tecido têm sido predominantemente utilizados em aplicações não estruturais. Embora tenha havido um interesse contínuo em reforço têxtil desde o início dos anos 1970, houve um aumento recente na compreensão da mecânica e do uso de reforço têxtil [27].

No início dos anos 1990, na Alemanha, as pesquisas foram em torno do estudo do comportamento do tecido e a sua interação com a matriz, ou seja, aspectos como aderência, desempenho tanto das fibras da superfície quanto as do eixo do filamento e as propriedades álcali resistentes. Na segunda metade dos anos 1990, iniciaram-se pesquisas com reforços têxteis de aramida na Universidade de Stuttgart, Alemanha, pelo Prof. Reinhardt. Este também posteriormente conduziu pesquisas quanto à protensão do concreto têxtil. No mesmo período, Wörner, da TU Darmstadt, estudou o uso de malhas têxteis próximas à superfície de vigas para restringir a espessura das fissuras dos elementos de construção [25]. Após os estudos em protensão iniciarem, verificaram-se limitações quanto a ductilidade e resistência ao cisalhamento do compósito ao se utilizar reforços com tais fibras. A experiência adquirida serviu para transpor o foco do estudo da protensão para o seu uso em reparos e reforços estruturais [24].

Grupos de pesquisa na Universidade de Surrey, Reino Unido, e na Universidade de Bento Gurion do Negev, Israel, além de algumas pesquisas realizadas no Japão, indicam ser os três pontos focais de produção científica deste compósito fora da Alemanha. Apesar de serem profundamente relevantes e de contribuírem ao desenvolvimento do compósito, nenhuma atividade internacional

excede o profundo e extenso estudo conduzido por dois centros colaborativos da Fundação de Pesquisa Alemã.

Algumas obras foram executadas em concreto têxtil, principalmente na Alemanha, como por exemplo: 3500 m² de fachada de um edifício de escritórios revestidos com painéis de concreto têxtil em Dortmund; aproximadamente 18000m² de painéis de proteção contra ruído na rodovia Amsterdam - Paris construídos em 2003 [28]; lajes de varandas na empresa Metallbau Guke GmbH em Seerhausen, Alemanha. Atualmente, a principal utilização do concreto têxtil é o reforço e reparo de estruturas de concreto armado, como em colunas, telhados, lajes, silos e pontes. Um dos maiores projetos de reforço estrutural utilizando têxteis foi realizado na ponte West Gate Bridge, na Austrália, com têxteis de carbono [29].

O concreto têxtil ainda não possui regulamentações para seu uso aprovadas, mas alguns procedimentos pontuais foram necessários para o desenvolvimento de suas aplicações. Os primeiros procedimentos gerais foram estabelecidos para pequenos painéis de fachadas e, em 2014, para reforço de estruturas internas de concreto armado, especialmente submetidas a esforços de flexão na zona de tração sob carregamento predominantemente estático. Este último é um importante marco para o concreto têxtil e deixa precedentes para futuros [27].

Quanto à utilização do tecido como reforço, em contraste com as barras de aço, os tecidos podem ser posicionados em qualquer direção, ou seja, adaptado à orientação do esforço no qual o elemento está submetido, podendo assim se tornar um reforço extremamente eficaz. O fato de o aço sofrer corrosão após um certo tempo é uma desvantagem deste material, especialmente quando os elementos estruturais têm paredes finas e o cobrimento de concreto é pequeno. Nessas circunstâncias, materiais não corrosivos empregados como reforço têm vantagens [30].

Dessa forma, o TRC se destaca também devido à resistência à corrosão dos materiais de fibra sintética e natural, possibilitando um cobrimento de concreto menor, pois não é mais necessária a proteção química. Com isso, a espessura dos membros estruturais diminui e depende principalmente do valor necessário para garantir uma ancoragem adequada da armadura e evitar uma ruptura repentina [28].

Como o concreto têxtil possui geometria e técnicas de fabricação específicas, os modelos de dimensionamento estrutural estabelecidos para concreto armado não podem ser aplicados de forma direta [31]. Para entender o comportamento do

compósito como um todo, é necessário compreender os componentes que formam o concreto têxtil, ou seja, a matriz e o tecido.

2.2.1. Matriz

Geralmente, as matrizes cimentícias utilizadas para concretos têxteis tem certas especificações no processo de produção para que tenham um comportamento mecânico satisfatório e auxiliem na durabilidade do reforço têxtil. A matriz se assemelha mais com uma argamassa, pois o tamanho máximo de agregado recomendado é de 1mm, podendo ser chamado de concreto fino [26].

Outro aspecto importante para o concreto nesse tipo de compósito é a fluidez. A matriz deve ser capaz de penetrar em todos os filamentos do tecido para garantir a aderência entre a matriz e o reforço e, conseqüentemente, auxiliar nas propriedades mecânicas. Dessa forma, a consistência da matriz deve ser ajustada às propriedades do tecido, como tamanho da abertura de malha, à geometria da peça confeccionada e o processo de produção. Portanto, a matriz do concreto têxtil deve ser projetada para determinadas propriedades mecânicas, de fluidez e durabilidade [32].

Para atender a todos esses requisitos, é necessário a adição de alguns materiais na matriz como sílica ativa, cinza volante ou plastificantes que aumentem a fluidez e não interfiram nas propriedades mecânicas. Vale ressaltar que essas adições, quando utilizadas como substituto parcial do cimento Portland, resultam em uma diminuição da concentração dos íons álcali e da quantidade de hidróxido de cálcio, reduzindo a alcalinidade da matriz [27].

A Tabela 2.1 traz algumas matrizes utilizadas em pesquisas e as adições que receberam para atingir todas as características necessárias.

Tabela 2.1 - Tipos de Matrizes Utilizadas em Concreto Têxtil.

| Estudo | Tecido | Adições | Referência |
|--|---------------|--|-------------------|
| Investigação experimental e analítica de danos causados por temperaturas elevadas em concreto têxtil (TRC) | Vidro | Sílica ativa e cinza volante | [33] |
| O desempenho de vigas de concreto à flexão reforçadas com tecidos de carbono | Carbono | Cinza volante, sílica ativa e superplastificante | [34] |

| | | | |
|--|------|---------------------------------|------|
| O efeito do envelhecimento acelerado na interface do concreto reforçado com tecido de juta | Juta | Metacaulim e superplastificante | [35] |
|--|------|---------------------------------|------|

2.2.2. Tecido

Um tecido é formado por uma coleção de cordões dispostos em um determinado padrão. Um cordão é um conjunto de fibras longas, contínuas e de mesmo formato, geralmente circular, em uma mesma direção como mostrado na Figura 2.1. A terminologia de tecidos técnicos define as direções do tecido como sendo trama (warp) e urdidura (weft). Em geral, a trama é a direção dos cordões principais, e a urdidura é a direção dos cordões secundários, que tem como objetivo manter a forma do tecido [20].

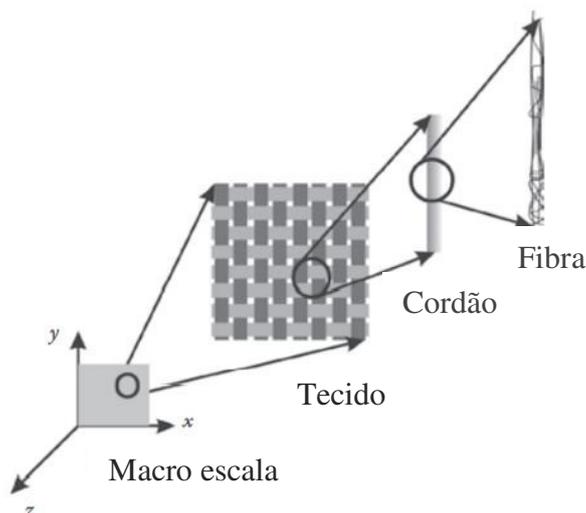


Figura 2.1- Tecido técnico em diversas escalas [36]

As fibras que compõem os filamentos são classificadas como de alto ou de baixo módulo relativamente ao módulo de elasticidade do concreto. As fibras de polipropileno (PP), polietileno (PE) e Nylon são ditas de baixo módulo, já as fibras de aramida, vidro álcali-resistente, fibras polietileno de alta densidade (HDPE) e de carbono são de alto módulo [24]. Estas fibras são adequadas para aplicação ao concreto por serem estáveis em ambientes carbonatados e em ambientes com a presença de cloretos [30]. Outra classificação refere à combinação de resistência e módulo de elasticidade. Fibras de alta resistência à tração e alto módulo de elasticidade são chamadas de high-end, fibras de menor resistência e baixo módulo

de elasticidade são chamadas de low-end. Fibras low-end são compatíveis com matrizes leves e fibras high-end com matrizes de peso normal ou compactadas [24].

Uma variedade de tecidos pode ser tecida a partir de fios e são classificados em *woven*, *knitted*, *braided* ou *nonwoven*. O entrelaçamento dos fios para formar um tecido afeta não somente a geometria do tecido, mas também a geometria dos fios individuais [37]. Nos tecidos *woven* (Figura 2.2a), os cordões assumem uma geometria ondulada, conforme um deles passa por cima do outro. Nos tecidos *knitted* (Figura 2.2b e 2.2c), os cordões de uma direção, geralmente a considerada como principal, permanecem retos, enquanto os cordões da outra direção são costurados em pontos que unem os filamentos nas diferentes direções. Dependendo do tipo de processo de produção do tecido, os cordões que são costurados podem assumir diversas geometrias. Os tecidos *nonwoven* são produzidos por processos mecânicos, químicos ou térmicos [27][38].

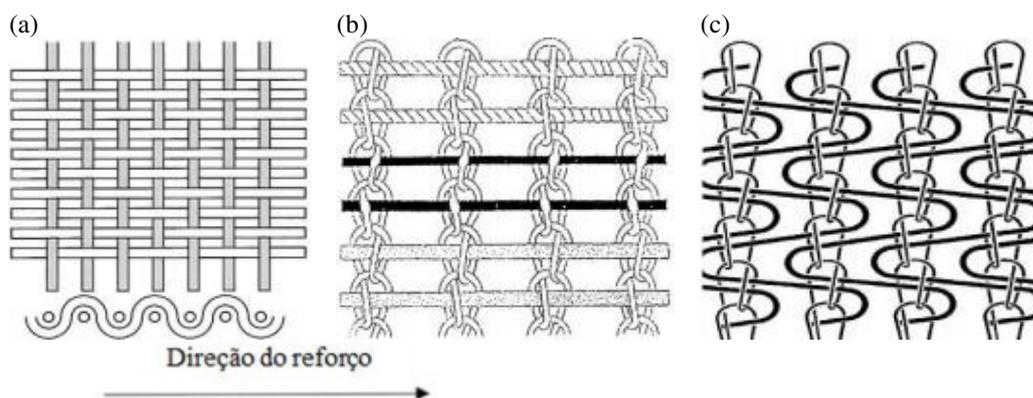


Figura 2.2 - Configurações diferentes para têxteis (a) woven (b) e (c) knitted.

Adaptado [40].

Além de tecidos bidimensionais, os tecidos de reforço tridimensionais podem ser utilizados para aplicações em compósitos de cimento e concreto finos. A tecnologia têxtil oferece a possibilidade de colocar quanto reforço for necessário pelo projeto e exatamente onde ele é necessário, ajustando as propriedades e geometrias do tecido para aplicações particulares. Eles também oferecem vantagens na simplificação do processo de construção e em economias de custo de mão de obra [27].

Tanto as fibras quanto a matriz são responsáveis por suportar as cargas mecânicas. O comportamento mecânico do TRC é afetado principalmente pelas características dos tecidos têxteis, em particular pelo material de fibra, área da seção transversal dos cordões, tipo de ligação dos tecidos de malha de urdidura (por

exemplo, tricô, ponto liso) e, eventualmente, pelo tipo de material de impregnação aplicado (por exemplo, resina epóxi ou estireno-butadieno).

A impregnação dos tecidos leva a uma homogeneização do perfil de tensão dentro da seção transversal do fio multifilamento, resultando em uma melhor ativação dos filamentos internos em comparação com os fios não impregnados e, assim, leva a uma maior resistência e redução do comprimento de ancoragem necessário. Além disso, a impregnação do fio pode ser usada para alcançar a estabilidade de forma necessária para componentes estruturais usando fundição como técnica de produção (Tabela 2.2). Ao mesmo tempo, uma impregnação dos tecidos têxteis reduz a flexibilidade de forma necessária para geometrias curvas [39].

Tabela 2.2 - Configurações diferentes para têxteis (a) woven (b) e (c) knitted.

Adaptado [40].

| | Impregnado com resina epóxi | Impregnado com estireno-butadieno | Não impregnado |
|---------------------------------|------------------------------------|--|-----------------------|
| Eficiência | Alta | Média | Média / Baixa |
| Comprimento de ancoragem | Pequena | Média | Pequena/ Longa |
| Estabilidade | Alta | Média | Baixa |

2.3. Comportamento mecânico do concreto têxtil

O concreto têxtil apresenta comportamento semelhante ao concreto reforçado com fibras curtas, ou seja, após a fissuração da matriz, toda a carga é transferida para o tecido, diferindo apenas no que se refere a ductilidade. Para o concreto reforçado com fibras curtas, a ductilidade é determinada pelo arrancamento das fibras, já em concretos têxteis, a ductilidade é obtida a partir da deformação do reforço [32].

A Figura 2.3 mostra uma resposta de tensão-deformação típica de um concreto têxtil. De uma perspectiva macro, a falha da matriz corresponde à formação de fissuras e sua propagação ao longo da largura da amostra. Quatro zonas distintas são identificadas usando algarismos romanos, com uma zona antes e três depois da ruptura da matriz [39].

A resposta inicial é linear elástica, pois a amostra exibe uma alta rigidez e capacidade de deformação até o aparecimento da primeira fissura, representando o

fim da Zona I [32]. Com o aumento da tensão, há a formação de novas fissuras que chega à Zona II é então caracterizado pela múltipla fissuração da matriz. Quando não há formação de novas fissuras, o acréscimo de tensão é absorvido pelo totalmente pelo reforço (Zona III). Quando a tensão aplicada atinge a resistência do tecido ocorre a ruptura do compósito (Zona IV) [27]. Na Zona III, onde o reforço é responsável por suportar as tensões, a curva tensão versus deformação do compósito deveria ser paralela à curva tensão versus deformação do tecido [28].

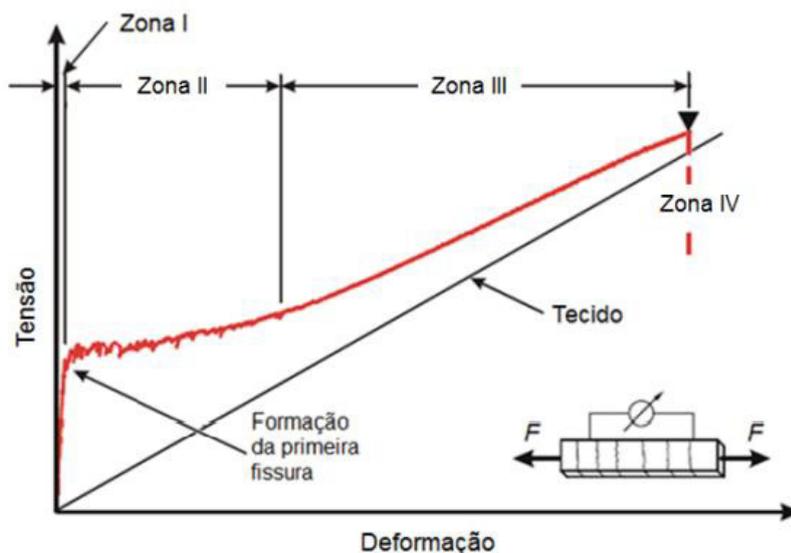


Figura 2.3 - Tensão versus deformação de um compósito TRC. Adaptado de [35][30]

Para determinar o comportamento mecânico das peças reforçadas com tecido, são utilizados ensaios como tração direta uniaxial e flexão de 3 e 4 pontos acompanhados de medições de deformação por meio de extensômetros, LVDTs e Correlação de Imagem Digital (CID)[39]. Além disso, técnicas de impregnação do tecido, matrizes de composições variadas, tecidos híbridos e outros métodos são utilizados para tentar melhorar o comportamento do compósito. Os estudos a seguir trazem alguns resultados sobre esse comportamento explorando essas variáveis de estudo.

Heravi et al. [40] analisaram o comportamento mecânico através de ensaios de tração direta uniaxial e de arrancamento de compósitos reforçados com tecido de fibra de carbono e a matriz de alta resistência com fibras de polietileno dispersas, o que resultou em um comportamento esperado com 4 estágios de comportamento típicos de compósitos têxteis. Além disso, o uso das fibras dispersas na matriz fez

com que a tensão de primeira fissura aumentasse, como o esperado, porém observou-se que a capacidade de deformação diminuiu, devido ao aumento da aderência entre a matriz e as fibras, já que estas foram um fator determinante para esse comportamento do compósito. Pelo ensaio de arrancamento, pode-se concluir que a adição de fibras na matriz influenciou tanto na redução do aparecimento de fissuras quanto na abertura delas, demonstrando que essa adição ajuda na aderência do tecido com a matriz.

No estudo de Li et al. [41], amostras de compósitos reforçados com tecidos de carbono com taxa de reforço variáveis foram submetidas a 3 tipos de ensaios: tração direta uniaxial com tecido sem impregnação, tração direta uniaxial cíclico com duas camadas de tecido impregnado com estireno-butadieno e testes de arrancamento com tecido com impregnação. Como esperado, houve um aumento na resistência a tração devido ao acréscimo da taxa de reforço. Quanto aos ensaios cíclicos, foi observado que as deformações plásticas se acumulam com o aumento do número de ciclos para todos os espécimes. Quanto ao ensaio de arrancamento, concluiu-se que, quanto maior o comprimento de arrancamento, maior será a tensão suportada.

A impregnação do tecido é essencial para o aumento da aderência entre o tecido e a matriz e para evitar a degradabilidade do tecido. O estudo proposto por Dvorkin & Peled [42] traz a avaliação do comportamento mecânico de compósitos reforçados com tecido de carbono impregnados com diversos tipos de materiais minerais como nano argila, micro sílica e fillers poliméricos como epóxi éster e látex acrílico a base de água. Além disso, foi proposto um envelhecimento acelerado por meio da cura a fim de avaliar a efetividade da impregnação com a análise dos resultados de testes de tração. Para as amostras não submetidas ao envelhecimento, os melhores resultados mecânicos foram dos compósitos com tecido impregnado com epóxi, látex, micro sílica e nano argila, respectivamente. Já para as amostras submetidas ao envelhecimento acelerado, os resultados dos compósitos impregnados com micro sílica foram melhores, com aumentos de cerca de 54%, 31% e 51% na resistência final, deformação final e rigidez, respectivamente. Além disso, os padrões de fissuração para esses compósitos foram melhores, apresentando mais fissuras com menor abertura, com espaçamentos menores e mais uniformes ao longo da peça, indicando que o envelhecimento acelerado aumenta a resistência da aderência entre o tecido e a matriz. Utilizou-se de microscopia para

analisar a penetração de matriz no fio e, para os compostos minerais, as taxas de penetração foram boas, embora alguns espaços vazios tenham sido observados. Isso leva a concluir que o processo acelerado de cura leva a uma maior penetração da matriz nos fios, o que não ocorreu para os fillers poliméricos, onde a penetração dos produtos de hidratação foi relativamente baixa.

Um problema recorrente para ensaios de tração direta uniaxial em compósitos têxteis é a zona de contato entre o compósito e o equipamento que realizará o ensaio. Por conta da concentração de tensões nessas regiões, a amostra tende a romper próximo às garras do equipamento, gerando resultados não esperados. No estudo de Kim et al. [43], para avaliar a influência dos métodos de ancoragem nesses tipos de ensaio, foram propostas cinco maneiras diferentes de ancorar a amostra no equipamento em compósitos de cimento aluminoso reforçados com uma camada de tecido de carbono. Desse estudo, pode-se concluir que o reforço das zonas de contato da máquina com o corpo de prova com fibras de carbono dispersas ou com placas de fibra de vidro levou a um aumento de até 86% na resistência final e de até 16% na resistência de fissuração inicial, além de ter ficado dentro das especificações da norma utilizada, atestando esses tipos de ancoragens como boas. Os outros tipos de reforço como barras de aço, folhas de tecido de carbono e tecido impregnado com polímero acarretaram o escorregamento do tecido e da amostra.

Por sua vez, Arboleda et al. [44] avaliaram dois tipos de ensaios diferentes nos quais o tipo de ancoragem da máquina com a peça era a principal variável: um ensaio apresentava as garras da máquina coladas na peça e o outro trazia as peças fixadas por compressão. O resultado mostrou que a forma de ancoragem da peça na máquina alterou o comportamento do compósito, já que, para as peças coladas, houve deslizamento do tecido e foi identificado um comportamento apenas com dois estágios, sem a fase de múltipla fissuração da matriz. Já para as amostras fixadas por compressão, o modo de falha foi através da ruptura das fibras próxima ao local da fissura principal. Em todos os compósitos, o comportamento mecânico apresentou os três estágios esperados para um compósito têxtil.

A fim de aumentar os resultados da performance de compósitos reforçados com tecido, Kamani et al. [45] reforçaram os fios do têxtil de carbono com mais fios na direção da trama e impregnou os novos tecidos com resina epóxi. As amostras variaram de acordo com o número de fios incrementados, o número de camadas de tecido no compósito e quanto à presença de impregnação no tecido. Os

corpos de prova foram ensaiados a flexão em 4 pontos e os parâmetros mecânicos avaliados foram rigidez inicial e final, deformação máxima e resistência. Todas as propriedades mecânicas das peças foram beneficiadas com o aumento do número de fios no tecido, o que levou os autores a concluir que aumentar o número de fios na direção do carregamento é mais efetivo que aumentar o número de camadas. Como esperado, as amostras que tiveram seus reforços impregnados alcançaram maiores valores propriedades mecânicas se comparadas com as não impregnadas. Vale ressaltar também que o aumento do número de fios aumenta a rigidez da peça, diminuindo sua ductilidade e capacidade de deformação.

Com a intenção de simular um cenário onde os fios do tecido se rompem numa situação de serviço, o estudo proposto por Lior et al. [46] teve como objetivo principal ensaiar compósitos reforçados com tecido de carbono com um número diferentes de fios no sentido da trama. Para isso, tecidos com 1, 3 e 5 fios no sentido do carregamento foram ensaiados por tração direta uniaxial. Além disso, os tecidos foram impregnados com polímeros diferentes para testar a aderência. Como esperado, quanto menor o número de fios, mais íngreme a curva tensão-deformação e uma menor deformação era alcançada. Esse comportamento pode ser explicado pela transferência de carga entre a matriz e os fios adjacentes nos compósitos com mais de um fio transversal, já que o compósito com apenas um fio não tinha nenhum elemento para transferir. Além disso, os resultados do comportamento a tração dos compósitos foram expressivamente maiores para compósitos com impregnação, o que pode ser explicado analisando as imagens microscópicas: nos compósitos não impregnados foi vista a presença de espaços vazios enquanto nos compósitos impregnados a resina penetrou os vazios entre os filamentos do tecido.

Para avaliar o comportamento a flexão de compósitos têxteis, Du et al. [47] testaram TRC de basalto variando o número de camadas de tecido na amostra, a porcentagem de fibras dispersas na matriz e o nível de pré-carregamento no tecido, que variou de acordo com o número de camada. As amostras sem pré-tensão e sem fibras apresentaram múltipla fissuração no estágio pós aparecimento da primeira fissura, que se apresentaram em maioria na zona de flexão pura, com exceção das amostras com nenhuma ou uma camada, que romperam bruscamente. Foi observado também que o número de fissuras aumentou e as aberturas diminuíram com o aumento de camadas de tecido. Quanto às amostras pré-tensionadas e com adição de fibras, foi observado que, quanto maior a taxa de pré-tensão, maior o

incremento de resistência ao aparecimento de primeira fissura, porém a resistência final de flexão foi prejudicada. A pré-tensão diminuiu o número de fissuras e o espaçamento entre elas. Os autores explicaram esse fato com a redução da capacidade de deformação do compósito pré-tensionado, diminuindo sua deflexão final.

A ausência de um modelo de cálculo para dimensionar peças de TRC motivou Yin et al. [48] a criarem um modelo de dimensionamento baseado em ensaios de flexão de 4 pontos de vigas reforçadas com tecido híbrido de vidro e carbono e impregnados com resina epóxi e areia. As variáveis avaliadas foram: a granulometria da areia usada na impregnação do tecido, o número de camadas de tecido e a presença de aço na região tracionada da viga. Foi observado que houve um bom padrão de fissuração, com fissuras finas e pouco espaço entre fissuras para todas as peças, porém houve ruptura abrupta do tecido e o elemento se dividiu em 2, mesmo com uma alta taxa de tecido, como no caso de 3 camadas. O estudo concluiu que os tecidos impregnados com areia, com destaque para areia de maior granulometria, tiveram uma resistência a flexão maior se comparado com as demais peças, embora resultassem em flechas menores. O controle de fissuração para o TRC é melhor do que para o concreto armado e a performance a flexão melhora com a combinação de aço e tecido.

Ensaio de estruturas em escala real são escassos na literatura, porém o estudo feito por Zani et al. [49] propuseram a confecção e ensaio de uma laje de 5m² em concreto têxtil reforçado com tecido de fibra de vidro álcali-resistente impregnado com estireno-butadieno. As lajes seguem a tecnologia de estruturas sanduíche e contém um centro de poliestireno envolto por 20mm de concreto de alta performance reforçado com fibra e 10mm de concreto têxtil de cada lado. Os elementos estruturais foram ensaiados quanto à resistência a flexão longitudinal e transversal, ao cisalhamento, a condições de incêndio e avaliadas em condições reais a fim de investigar condições de instalação, eficiência e durabilidade. Observou-se que os compósitos têxteis tiveram um fator de eficiência bom, já que não houve escorregamento e concluiu-se que o TRC pode ser empregado com eficácia em painéis de várias camadas, graças a seus excelentes comportamentos de tração, proporcionados por microfibras de aço e tecidos de vidro AR. Os comportamentos à flexão exibidos pelos protótipos em escala real foram

caracterizados por uma resposta estrutural satisfatória em termos de resistência, ductilidade e tenacidade.

Para avaliar o comportamento mecânico de vigas encamisadas com concreto têxtil, Sen & Jagannatha [50] utilizaram de 3 compósitos reforçados com tecidos de vidro, carbono e juta em matriz de resina epóxi para analisar o comportamento tanto dos compósitos quanto das vigas reforçadas. Vale ressaltar que o tecido de juta utilizado para esse estudo passou por um tratamento térmico a 50°C para retirar a umidade presente no tecido. As amostras de TRC foram ensaiadas a tração direta e a flexão. Foi observado que os compósitos de juta, para ambos os ensaios, resultaram em valores menores de resistência, alcançando valores até 30% menores para essas características mecânicas. As vigas reforçadas com tecido de juta proporcionaram um aumento na capacidade de carga em até 62,5%, apresentaram ruptura dúctil, sem qualquer esmagamento do concreto, sem ruptura no tecido ou qualquer descolamento, mesmo sob cargas elevadas. Pode-se concluir que os elementos estruturais reforçados com tecido de juta foram dúcteis, mesmo que a capacidade de carga e a carga de ruptura nos ensaios de tração dos compósitos fossem maiores naqueles reforçados com tecido de vidro e carbono em comparação com aqueles reforçados com tecido de juta.

Botelho Goliath [51] estudou o comportamento a flexão em vigas perfil I de concreto armado reforçado com tecido de carbono. Para isso, o estudo teve como variáveis o tipo de matriz e o tipo de *coating* adotado para o tecido de carbono a fim de avaliar a influência desses parâmetros em aspectos como propriedades da interface e da matriz, padrão de fissuração, modo de falha e ductilidade. Com isso, concluiu-se que as vigas que tinham como matriz um compósito conhecido por *Strain Hardening Cementitious Composites* (SHCC) e vigas armadas com tecido de carbono após o tratamento superficial com areia mostraram resultados melhores quando ensaiadas a flexão de 4 pontos em comparação com as vigas referência, com matriz cimentícia lisa e armadura sem *coating*. Esse comportamento se deu devido tanto a interface fortalecida com a presença do revestimento de areia no tecido quanto pelo mecanismo de ponte provocado pela presença de fibras nas vigas com SHCC que aumentou sua carga de ruptura e sua ductilidade.

A fim de melhorar as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com tecido de juta produzidos por processo chamado de pultrusão, El Messiry et al. [52] e Tarfawy [53] adicionaram fios de fibra do mesmo material tanto no sentido da

trama quanto no sentido da urdidura e os ensaiou tanto a flexão quanto a tração. Os tecidos e os fios estudados passaram por um processo de impregnação por submersão em uma mistura de resinas objetivando melhorar a interface do compósito. Como esperado, o processo de impregnação melhorou significativamente as propriedades mecânicas do compósito, podendo ser uma técnica para tornar o tecido de juta aceitável considerando as propriedades mecânicas do material. Os resultados diretos mostraram que os compósitos alcançaram uma alta resistência à tração e melhor desempenho de flexão em todas as amostras, sendo essas propriedades altamente correlacionadas à proporção do tecido de juta pultrudado. Com isso, foi possível concluir que a pultrusão foi capaz de produzir compósitos têxteis de juta com propriedades de tração aprimoradas, bem como rigidez à flexão. O projeto de tecido com mais fios é recomendado com proporção de mistura de endurecedor de polímero 1: 0,8 para que o elemento apresente alta deflexão dependendo da proporção do tecido de juta pultrudado.

El Messiry & Fadel [54] ainda sugeriram em outro estudo um tratamento químico baseado na submersão do tecido de juta em uma solução aquosa de NaOH em diferentes concentrações para analisar seu comportamento mecânico em matrizes cimentícias. Com os resultados, pode-se observar que o uso de tecido de juta tratado para compósitos de cimento melhora suas propriedades de tração e flexão em comparação com o tecido não tratado, bem como seus valores no aparecimento da primeira fissura. O tempo de imersão do tecido de juta e a concentração de NaOH influenciaram todas as propriedades mecânicas, especificações do tecido e sua molhabilidade.

Ainda testando a influência de tratamentos de tecido de juta quanto ao comportamento mecânico de tração de compósitos têxteis com matrizes cimentícias, Fidelis et al. [55] por sua vez propuseram um tratamento polimérico das fibras do tecido e analisou o comportamento à tração de compósitos variando a quantidade de camadas do tecido. Com base nos resultados do ensaio, o compósito com um maior número de camadas apresentou o maior número de fissuras com menor espaçamento tanto para o tecido tratado quanto para o tecido não tratado. Os tecidos tratados apresentaram valores de resistência à tração e deformação maiores em relação aos não tratados, pois o tratamento aumentou a resistência à tração, a capacidade de deformação dos compósitos e a tenacidade do compósito, além de melhorar os mecanismos de transferência de tensão entre a matriz e a fibra.

Teixeira [56] investigou a durabilidade de fibras naturais para confecção de compósitos cimentícios que serviram de reforço externo para vigas de concreto armado. Para isso, uma série de fibras foram analisadas, optando-se pelo uso da fibra de curauá por ter apresentado o melhor desempenho. Após isso, foram confeccionadas placas que foram submetidas ao ensaio de tração direta, que alto desempenho com um comportamento de *strain-hardening* para todas as amostras. Por fim, essas placas foram utilizadas para reforçar vigas de concreto armado que resultou em um aumento na resistência e ductilidade dos elementos estruturais, bem com um atraso no escoamento das barras de aço.

2.4. Interface tecido-matriz em concreto têxtil

A resistência e a microestrutura ao longo da interface de um compósito têxtil são dois fatores cruciais ao estudar o desempenho de arrancamento de TRCs e também afetam significativamente o desempenho mecânico dos TRCs, incluindo força de descolamento inicial, carga de pico de arrancamento, deslizamento de arrancamento, rigidez de arrancamento e energia absorvida [57].

Por vezes, esses fios têm características bastante insatisfatórias ao interagir com a matriz no compósito. Como consequência, eles precisam ser processados para obtenção das características desejadas. Este comportamento de ligação pode ser alterado usando diferentes estruturas de fio especialmente fabricadas para uso em concreto. A modificação da textura da superfície do fio, por exemplo, pode melhorar sua ligação externa à matriz [23].

Para analisar a aderência entre o tecido e a matriz, Jiang et al. [58] propuseram um estudo usando ensaio de arrancamento para testar o comportamento da interface de uma matriz com adição de fibras reforçado com tecido de basalto impregnados com resina epóxi. Comprimento de ancoragem e tamanho de malha foram as variáveis estudadas. O comportamento das amostras foi dividido em 4 estágios bem delimitados: em um primeiro momento, os fios tracionaram juntamente com a matriz, seguido do rompimento da matriz e atuação das fibras dispersas até o rompimento e arrancamento das fibras da matriz resultando em três modos de falha diferentes: tração, ruptura têxtil e modos compostos. A resistência da ligação mostra uma tendência decrescente contínua com o aumento do comprimento de ancoragem. O espaçamento da malha tem um efeito diferente dependendo das dimensões das fibras curtas e da restrição dos fios de trama, pois quando o

espaçamento da malha é grande o suficiente para que as fibras curtas passem pelas aberturas da malha, a restrição dos fios de trama terá efeito, já em malhas menores a diminuição no espaçamento entre os fios de trama aumentará a resistência de ligação dos fios de urdidura na matriz.

A relação entre as tensões de cisalhamento na interface e ensaios de arrancamento foram estudados por Saidi & Gabor [59]. Para isso, foram ensaiados elementos de TRC reforçados com tecido de fibra de vidro álcali-resistente com dois tipos de matriz e 2 taxas de reforço diferentes. Além disso, ensaios de arrancamento foram feitos de duas maneiras distintas. Os tecidos ensaiados variavam quanto ao comprimento de ancoragem e o número de fios longitudinais a fim de avaliar se essas características influíam diretamente no comportamento mecânico da peça. Com os ensaios, foi observado um primeiro pico representando a tensão máxima da aderência da matriz seguida por uma queda e um segundo pico representado pela resistência do fio e a distribuição da tensão no tecido seguido de uma queda de resistência. Vale ressaltar que, nas amostras onde apenas um fio longitudinal é ensaiado, a tensão local de cisalhamento entre o fio e a matriz não é suficiente para fazer com que a matriz falhe por cisalhamento, por isso o comportamento apresentado inclui o deslizamento do tecido e não a falha por cisalhamento no compósito. Como conclusão, os autores dizem que, para o ensaio de arrancamento, o número de fios longitudinais e o comprimento de ancoragem interferem nos resultados, sendo o número de fios a causa do deslizamento do tecido na matriz, ou seja, quanto menor o número de fios, mais fácil fica o deslizamento.

A aderência em fios e tecidos de vidro álcali resistente e de basalto impregnados com resina epóxi foram estudados por Liu et al. [57] em matrizes cimentícias através de ensaio de arrancamento. Além disso, os autores consideraram uma variação de temperatura entre 25 e 600°C e de taxa de carregamento e analisou o padrão e morfologia de fissuração a partir de imagens de microscopia de varredura. A quantidade de fios na direção do carregamento e o tipo de ancoragem do tecido na matriz também era variáveis nesse estudo. Com os resultados, concluiu-se que tanto o número de pontos de ancoragem quanto o número de fios de trama influenciam significativamente os resultados do ensaio de arrancamento. Quanto ao efeito da variação da taxa de carregamento, o acréscimo de deslocamento com tempo variou principalmente a primeira etapa do comportamento ao arrancamento caracterizada pela transferência de carga do tecido

para a matriz. Com esses resultados, observou-se que a capacidade de carga, a capacidade de absorção de energia e a rigidez de arrancamento são maiores para os tecidos e a capacidade de absorção de energia aumenta com o aumento da taxa de carregamento. Quanto à variação de temperatura, observou-se que o aumento da temperatura fez com que a capacidade de carga e a capacidade de absorção de energia diminuíssem em todas as amostras com a rigidez ao arrancamento crescendo na seguinte ordem: fio de vidro, fio de basalto, tecido de vidro e tecido de basalto. Além disso, foi observado através das imagens microscópicas que o revestimento do tecido por resina epóxi sofre degradação em temperaturas elevadas, alterando significativamente o modo de falha das peças.

Dalalbashi et al. [60] buscaram compreender experimental e analiticamente testes de arrancamento de tecidos de aço e de vidro em matrizes a base de cal variando a taxa de carregamento, comprimento de ancoragem, tipos de fibra e matriz, idade da matriz e configuração do tecido. Os autores observaram que a aderência foi prejudicada para qualquer comprimento de ancoragem estudado para o tecido de fibra de aço utilizado, levando a uma falha no compósito por deslizamento do tecido. Já quanto a variável de taxa de carregamento, um comportamento semelhante foi encontrado para os compósitos reforçados com os dois tecidos, já que quanto maior a taxa de carregamento aplicada, maior a resistência atingida pelo compósito. Quanto a idade de ensaio, para as fibras de aço, aos 30 dias alcançou seu valor máximo que decresceu até os 90 dias, sendo as demais idades sem mudanças significantes. Nas fibras de vidro, um ganho contínuo de resistência foi observado até os 180 dias. A rigidez inicial e o deslizamento pós-pico aumentaram de acordo com o aumento do comprimento de ancoragem em ambos os tecidos.

Caggegi et al. [61] usaram ensaios de arrancamento e correlação de imagem digital para propor um comprimento de ancoragem efetivo para compósitos têxteis reforçados com tecido de basalto e foi visto que o incremento no comprimento da aderência evitou o modo de ruptura caracterizado por escorregamento e promoveu a ruptura por tração do tecido basáltico. O uso de CID permitiu uma descrição detalhada da evolução dos danos e informações adicionais sobre a localização da zona de transferência de tensão durante o teste. Nesse contexto, o estudo dos campos de deformação transversal demonstra a deformação da matriz da argamassa próxima ao fio antes de atingir o pico de carga. O comprimento efetivo da ligação

foi obtido através da análise dos picos de força máxima atingidos em oito séries de corpos de prova caracterizados por diferentes comprimentos de ligação e o comprimento encontrado a partir dos ensaios foi de 125mm, já que com comprimentos menores o tecido tende a sofrer deslizamento.

O estudo proposto por Fidelis et al. [62] teve como objetivo o estudo do efeito de escala de fibras, fios e tecidos de juta na tração uniaxial assim com a interface reforço-matriz para compósitos de fibra de juta impregnados com estireno-butadieno com uma matriz de baixo teor de hidróxido de cálcio, em que parte do cimento foi substituído por cinza volante e metacaulim. Para isso, foram utilizados os ensaios de arrancamento e tração direta a fim de medir a capacidade de deformação, resistência e rigidez. Para o ensaio de arrancamento da fibra e do fio, a variável analisada foi o comprimento de ancoragem, que para o tecido era um valor fixo. Com os resultados dos ensaios, observou-se que o aumento da ligação dos filamentos foi melhorado com tratamento de fibra com polímero, que resultou em uma forte adesão química à matriz. Para os espécimes de fio, além da afinidade química houve uma ativação dos filamentos internos. A influência substancial do polímero nos mecanismos de ligação mostra a interface aprimorada, visto que a transferência da tensão de cisalhamento na interface das amostras de filamento aumentou 90%, e a tensão nominal da fibra na ruptura aumentou entre 90% e 153%. Para o fio, o aumento da tensão de cisalhamento causado pelo tratamento foi de 100% e 85% para os comprimentos de ancoragem de 5 mm e 10 mm, respectivamente, e a tensão nominal da fibra na ruptura aumentou para 67,5%.

2.5. Durabilidade do concreto têxtil em ambientes agressivos

Há um interesse crescente na caracterização mecânica do concreto têxtil, mas ainda há muitas lacunas pouco exploradas acerca do seu comportamento em diferentes ambientes. Assim, a durabilidade ou desempenho de longo prazo ainda é uma grande preocupação e há necessidade de avaliação de seu comportamento a longo prazo [63].

Para observar o comportamento de compósitos têxteis em ambientes com a presença de cloreto, Yin et al. [64] analisaram a capacidade de carga a flexão de TRC reforçados com fibras de vidro e carbono impregnadas com resina epóxi. Para avaliar a durabilidade, os compósitos foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem, além de ciclos de gelo-degelo com soluções aquosas com a presença de

5% de NaCl. Os fatores analisados foram o número de ciclos, o efeito de aderência dos ambientes de corrosão e carga sustentada de flexão, além da adição de fibras curtas de PVA e vidro na matriz. Como conclusões para o ciclo úmido-seco com a presença de cloreto, os autores observaram que a aderência entre o tecido e o concreto diminuiu com o aumento de ciclos. Isso influenciou no comportamento a flexão dos compósitos, que teve sua performance comprometida após o 150º ciclo de gelo-degelo na presença de NaCl, embora tenha apresentado uma melhora no desempenho até o 120º ciclo. Como esperado, a incorporação de fibras curtas na matriz aumentou a resistência de aderência e as propriedades de flexão. O efeito da carga sustentada acelerou também a deterioração dos elementos, principalmente das propriedades de flexão das placas finas de TRC, ou seja, o grau de deterioração aumentou à medida que a carga sustentada aumentou. Para o ciclo de gelo-degelo com a presença de cloreto, o aumento de ciclos gerou uma tendência de queda para a resistência de aderência dos compósitos, que reduziu significativamente após 90 ciclos. A adição de fibras curtas de PVA e de vidro teve um efeito benéfico na resistência de ligação interfacial entre o tecido e a matriz, o que foi observado também para o ensaio de flexão.

A fim de analisar também a influência de ambientes salinos e alcalinos em compósitos reforçados com tecido de fibra de vidro, Nobili [65] avaliou o comportamento à tração e flexão tanto de tecidos impregnados com 4 tipos de resinas diferentes quanto de compósitos com matrizes a base de cal reforçados com esses mesmos tecidos. Para simular ambientes agressivos, as amostras foram submersas em soluções alcalinas, com pH 10, e salinas, com concentração de NaCl de 3,5%, por 1000h. Além disso, a deformação e o padrão de fissuração foram analisados a partir de correlação de imagem digital. O resultado mostrou que tanto os compósitos quanto os materiais individuais sofreram decréscimos em suas propriedades mecânicas por conta dos ambientes agressivos, o que é particularmente claro para os testes de flexão de argamassa. Por outro lado, pouca deterioração de desempenho foi encontrada para o tecido de vidro resistente a álcalis. Vale ressaltar que a degradação do desempenho afeta fortemente o mecanismo de falha. Na verdade, a falha é sempre atribuída à ruptura do tecido no grupo de controle, ao passo que leva ao deslizamento do tecido e delaminação do compósito nas amostras a ambientes adversos.

Nobili & Signorini [66], de acordo com a resina de melhor desempenho encontrada em estudo anterior [65], realizaram um estudo com o objetivo de analisar o comportamento de compósitos têxteis com matriz a base de cal reforçados com tecido de carbono impregnado com resina epóxi a partir de ensaio de tração direta, considerando o efeito do tempo de cura e a exposição a ambientes agressivos. Para isso, os ensaios foram feitos em duas idades e as amostras foram submetidas aos mesmos ambientes anteriormente estudados [65]. Como conclusões, tem-se que os ambientes agressivos foram prejudiciais para todos os parâmetros de projeto e sua influência tem que ser cuidadosamente considerada, com destaque para os ambientes salinos e alcalinos, que afetaram mais profundamente os compósitos. A água destilada e o ambiente ácido não tiveram resultados muito significantes e o ciclo de gelo-degelo teve um pequeno efeito positivo. Em comparação com as amostras com idade de 28 dias, a idade de 60 dias produziu pouco efeito nas propriedades da amostra não exposta, mas é capaz de mitigar bastante o impacto dos ambientes agressivos. O padrão de fissuração obtido para amostras não expostas é caracterizado fissuras finas uniformemente espaçadas. Nas amostras submetidas a ambientes agressivos, o arranjo de fissuras não seguiu um padrão de espaçamento e as fissuras foram mais grossas.

Com o objetivo de estudar o efeito de diferentes ambientes agressivos tanto em tecido quanto na matriz e o seu comportamento de ligação quando aplicado em um substrato, Donnini [67] realizou testes de tração direta, compressão e flexão em compósitos reforçados com tecidos de fibra de vidro impregnados com polímero, e testes de arrancamento de tecidos aplicados em um bloco de alvenaria. Além disso, análises de imagens microscópicas foram realizadas para entender melhor tanto os mecanismos de falha quanto a penetração de sais no compósito. Para simular ambientes agressivos, os elementos foram expostos de 3 maneiras diferentes: submersas em solução salina com concentração de 3,5% por 1000h, expostas a ciclos de molhagem e secagem utilizando a mesma solução salina e expostas a ambientes com umidade relativa alta. Como conclusões, todas as exposições a ambientes agressivos tiveram pouca influência nas propriedades mecânicas da matriz, enquanto os ambientes salinos reduziram fortemente a resistência à tração dos fios de vidro. A impregnação com PVA não teve funcionalidade para o tecido de vidro, visto que em ambientes salinos, a sua capacidade de tração foi reduzida em 40% e em ciclos de molhagem e secagem em solução salina reduziu em 36%.

Ainda em ambientes salinos, ao ser testada a ligação entre o compósito e o tijolo, este apresentou uma redução de 29% para a submersão em ambiente salino e 20% em ciclos de molhagem e secagem para a mesma solução. As imagens microscópicas mostraram que a submersão das fibras em água causou inchaço e formação de vazios na seção da fibra, independentemente da presença de sais na solução.

Donnini et al. [68] submeteram compósitos de tecido de vidro a ambientes alcalinos e salinos, além de ciclos de gelo-degelo alterando a forma de impregnação que não teve eficácia no estudo anterior [67]. Para isso, as amostras foram submersas em soluções com pH igual a 13 e com concentração de NaCl de 2,45%. Após isso, compósitos foram submetidos a ensaios de tração direta e análises cromatográficas para analisar a penetração de íons alcalinos e salinos na matriz, além de análises microscópicas a fim de analisar a seção transversal da fibra. O comportamento da matriz foi semelhante ao estudo anterior [67]. A impregnação com estireno-butadieno se mostrou bastante sensível aos ambientes já que a resistência a tração do tecido caiu 25% em ambiente alcalino e 8% em ambiente salino e ciclos de gelo-degelo, porém obtiveram resultados melhores que o estudo anterior [67]. Análises microscópicas mostraram que as fibras imersas em soluções, sejam elas salinas ou alcalinas, provocam o aparecimento de vazios nas fibras e inchaço no centro do fio, o que é provavelmente responsável pela diminuição das propriedades mecânicas. Os compósitos mostraram uma boa resistência aos ambientes agressivos comparados com o comportamento dos fios, graças a presença da matriz inorgânica, que, apesar da sua espessura pequena, garantiu a proteção do reforço.

Com o objetivo de analisar o efeito do tempo de cura e a exposição em ambientes agressivos na performance mecânica de tecidos de fibra de carbono, Signorini et al. [69] realizaram de testes de tração direta e a qualidade da aderência foi avaliada a partir do padrão de fissura através de correlação de imagem digital em tecidos impregnados com um polímero híbrido e submetidos a ambientes salinos com concentração de 3,5% de NaCl e alcalinos com pH 10. Como conclusões, observou-se que os ambientes agressivos afetam consideravelmente o desempenho mecânico das peças já que tanto o ambiente salino quanto o ambiente alcalino reduzem cerca de 60% das propriedades mecânicas dos compósitos se comparados com as amostras de controle aos 28 dias de cura, afetando mais diretamente a matriz

e a interface entre matriz e o tecido. Quando a cura é de 60 dias, uma pequena melhora nas propriedades mecânicas do compósito é observada se comparado com o tempo de cura de 28 dias, porém ainda há uma redução significativa de 40% se comparado com as amostras de referência.

O estudo proposto por Belinni et al. [70] avaliou a durabilidade de compósitos reforçados com tecidos de vidro impregnados com estireno-butadieno, basalto com duas densidades diferentes e aço galvanizado expostos a ambientes salinos, com concentração de 3,5% de NaCl, alcalinos, com pH 9,5, e de umidade alta, além de ciclos de gelo-degelo. Nos ensaios das fibras, poucos efeitos foram percebidos nas amostras de vidro impregnado, porém efeitos significativos foram encontrados nos ensaios das demais fibras quando submetidas a ambientes alcalinos e salinos. Os resultados dos testes nos compósitos mostraram um comportamento diferente para as amostras submetidas a ambientes salinos e alcalinos, mostrando uma maior degradação na interface fibra/matriz. Vale ressaltar que o processo de cura úmida auxiliou no aumento de resistência da matriz percebido pelo aumento de resistência de primeira fissura, porém devido ao enfraquecimento da interface, o padrão de fissuras foi menos distribuído. No caso das fibras de aço, foi encontrado um processo de corrosão o que acarretou a diminuição da resistência a tração.

Para fibras naturais, o problema de durabilidade está associado a um aumento na fratura da fibra e diminuição no *pull-out* da fibra devido a uma combinação de enfraquecimento das fibras por ataque alcalino, mineralização da fibra, devido à migração de produtos de hidratação para lúmens e para a lamela média, e volume variação nestas fibras devido à sua alta absorção de água. Para aumentar o desempenho de durabilidade de compósitos à base de cimento reforçado com fibra natural, várias abordagens foram estudadas, incluindo impregnação de fibra com agentes bloqueadores e agentes repelentes de água, vedação do sistema de poros da matriz, redução da alcalinidade da matriz e combinações de impregnação de fibra e modificação da matriz. [71]

A fim de compreender o comportamento na interface de compósitos cimentícios têxteis após um envelhecimento acelerado das peças, Fidelis et al. [35] propuseram confeccionar amostras de TRC de matriz com baixo teor de hidróxido de cálcio reforçada com tecido de juta impregnado com estireno-butadieno. Para simular o envelhecimento, as amostras foram submetidas a uma temperatura de 40°C e 99% de umidade relativa por períodos de até um ano. As amostras foram

submetidas a um teste de arrancamento e com os resultados pode-se concluir que após envelhecimento acelerado, as amostras com matriz de cimento Portland apresentaram resultados melhores para corpos de prova com tecido revestido até os 180 dias. Após isso, os compósitos apresentaram perda completa de ductilidade e grandes sinais de degradação, chegando aos 365 dias com perda total das propriedades mecânicas. O processo de envelhecimento foi mais severo para o tecido, uma vez que pode ter ocorrido uma reação entre o revestimento do tecido e o hidróxido de cálcio. A observação microestrutural sugeriu que as fibras de juta passam por um processo de mineralização quando usadas como reforço na matriz de cimento Portland convencional, pois foi possível observar cristais de portlandita entre as fibras e a interface.

Na matriz com metacaulim, as reações pozolânicas consumiram o hidróxido de cálcio, levando a um aumento da densidade da matriz e reduzindo a alcalinidade da solução dos poros, o que evitou a degradação da fibra. Isso pode ser comprovado com o desempenho mecânico que mesmo após 365 dias de envelhecimento, os compósitos produziram altos valores de força máxima e trabalho de arrancamento. O processo de impregnação foi eficaz, proporcionando melhor desempenho na matriz com metacaulim que também foi benéfico na proteção do polímero, pois nenhum sinal de degradação da fibra foi observado no tecido de juta exposto ao processo de envelhecimento. Nenhuma portlandita foi observada nas micrografias da matriz com metacaulim e as fibras revestidas com polímero apresentaram boas condições.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os materiais utilizados para a fabricação dos compósitos bem como suas propriedades. Além disso, os procedimentos de fabricação e os ensaios para averiguar o comportamento mecânico dos compósitos são descritos.

3.2. Materiais utilizados

3.2.1. Matriz cimentícia

Matrizes cimentícias utilizadas em compósitos reforçados com tecido com uma abertura de malha pequena, em sua grande maioria, têm uma restrição quanto ao diâmetro máximo do agregado miúdo, pois é necessário garantir que a matriz penetre totalmente em todas as camadas de tecido, assegurando uma boa aderência entre matriz e tecido [26]. Devido a esse fato, para a confecção das matrizes, utilizou-se areia com diâmetro máximo de 1,18mm.

Outro aspecto importante para matrizes de compósitos reforçados com tecido é a fluidez, que, aliada com a limitação de diâmetro máximo do agregado miúdo, promove a penetração total da matriz nos filamentos que compõem o tecido. Dessa forma, a consistência da matriz deve ser ajustada às propriedades do tecido, como tamanho da abertura de malha, à geometria da peça confeccionada e ao processo de produção. Além disso, a matriz deve promover uma certa estabilidade química para o reforço para que situações ambientais adversas não danifiquem o tecido técnico. Portanto, a matriz do concreto têxtil deve ser projetada para determinadas propriedades mecânicas, fluidez e durabilidade [32].

3.2.1.1. Dosagem e processo

Para a execução deste estudo, optou-se em utilizar dois tipos de matriz que se diferenciam quanto à presença de materiais pozolânicos, ou seja, em uma das matrizes contém apenas cimento Portland CP-V e areia enquanto na outra há, além de cimento Portland CP-V e areia, Metacaulim e cinza volante.

A escolha da execução de duas matrizes diferentes se deu pela utilização de dois tipos de fibras, uma sintética e outra natural. É sabido que, quanto menor o teor de cimento em uma matriz cimentícia, menor a produção de hidróxido de cálcio no processo de hidratação e, portanto, menor a degradação da fibra utilizada como reforço [27]. Como a fibra natural utilizada não possui nenhum tipo de proteção química ou *coating* que evitasse a degradação acelerada causada pelo Ca(OH)_2 , decidiu-se por uma matriz que melhor se adequasse às propriedades das fibras dos tecidos utilizados. As matrizes foram confeccionadas com o mesmo traço de 1:1:0,4 (materiais cimentícios : areia : água) conforme apresentado na Tabela 3.1 (adaptado de Teixeira [72]):

Tabela 3.1– Traço correspondente a 1 m³ de matriz.

| Material | Matriz A (Kg/m³) | Matriz B (Kg/m³) |
|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| <i>Cimento Portland CP-V</i> | 642 | 321 |
| <i>Areia (1,18 mm)</i> | 642 | 642 |
| <i>Metacaulim do Brasil</i> | - | 256,8 |
| <i>Cinza Volante</i> | - | 64,2 |
| <i>Água</i> | 255 | 246 |
| <i>Superplastificante</i> | 2,57 | 12,84 |

Como pode ser visto na Tabela 3.1, a Matriz A (MA) contém em sua mistura apenas areia e cimento Portland e a Matriz B (MB) contém 50% de cimento CPV, 40% de Metacaulim do Brasil e 10% de cinza volante.

Areia de rio lavada foi usada como agregado miúdo. Para a fabricação da matriz, a areia foi refinada em um conjunto de peneiras elétricas de forma a se obter granulometria passante na peneira 1,18 mm e retida na de abertura 0,15 mm.

O cimento Portland HOLCIM CP V ARI PLUS foi utilizado neste estudo. Esse aglomerante atende às exigências de alta resistência inicial, obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio

hidráulicos, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

Cinza volante POZOFLY® e METACAULIM HP ULTRA® foram usados como adições minerais, substituindo parcialmente o cimento na Argamassa B, como visto na Tabela 3.1. A cinza volante é um subproduto proveniente da combustão do carvão e o metacaulim é constituído basicamente de sílica e alumina. Ambos os materiais são pozolânicos. Na presença de água e em temperatura ambiente eles reagem com o hidróxido de cálcio formando o C-S-H, composto responsável pela resistência do concreto.

O superplastificante usado, o Glenium 51 (MS), possui teor de sólidos igual a 30%. As proporções utilizadas foram de 0,4% e 2% em relação ao peso dos materiais cimentícios para as misturas sem e com adições minerais, respectivamente. A argamassa B necessitou de uma quantidade maior de superplastificante para chegar na mesma consistência da argamassa A, pois a presença de materiais pozolânicos alterou diretamente os resultados dos ensaios de espalhamento realizados para as misturas. Como este superplastificante é comercializado como uma solução aquosa, a quantidade de água contida nele foi descontada da quantidade total da mistura.

A mistura foi feita em um misturador planetário *Amadio model 20LA* que comporta até 20 litros, com as seguintes etapas:

- I. Todos os componentes secos foram misturados por 1 minuto com uma velocidade baixa (125 rpm);
- II. 90% da água foi adicionada e misturada por 4 minutos em uma velocidade média (220 rpm);
- III. Por fim, o superplastificante foi diluído nos 10% de água restante e adicionado a mistura por mais 5 minutos com velocidade média (220 rpm).

3.2.1.2. Propriedades no estado fresco

Como dito no capítulo 2 deste estudo, a trabalhabilidade é um dos fatores mais importantes para a confecção de compósitos têxteis, pois é necessário que todos os filamentos do tecido sejam envoltos pela matriz e, por sua vez, penetrem

nas fibras que formam o têxtil. Segundo a ASTM C125:2016 [73], trabalhabilidade é a propriedade do concreto recém-misturado que afeta a facilidade com que o material possa ser misturado, lançado, adensado e acabado. Fatores como a consistência, que é a propriedade intrínseca da mistura fresca relacionada com a sua mobilidade e capacidade de fluir, e a coesão, que é a estabilidade da massa, influenciam na trabalhabilidade do concreto.

Para atingir a consistência adequada para a moldagem dos corpos de prova, 3 testes foram realizados variando as proporções de superplastificante para ambas as matrizes utilizadas no estudo: para a matriz A, utilizou-se as proporções de 0,35%, 0,40% e 0,45% e para a matriz B as proporções foram 1,8%, 2,0% e 2,2%.

O ensaio de espalhamento foi realizado de acordo com as especificações da ASTM C230/C230M:2014 [74], modificando as dimensões do molde. Para o ensaio, foi utilizado uma placa metálica lisa e plana e um tronco de cone plástico com as dimensões especificadas na Figura 3.1. A mistura foi feita de acordo com o passo a passo apresentado em 3.2.1.1, com as devidas variações de água e superplastificante. Após a confecção, a mistura foi rapidamente despejada no molde, previamente umedecido, até o limite superior e retirado o mais verticalmente possível para que a mistura pudesse espalhar livremente na placa. O espalhamento foi medido com uma régua (1:100) nos dois diâmetros ortogonais após a estabilização da argamassa e foi considerado como valor final a média aritmética dos dois valores obtidos. A Figuras 3.2 ilustra os passos para obtenção do espalhamento das matrizes.

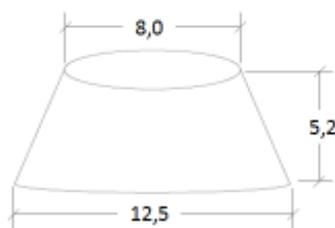


Figura 3.1 – Molde de tronco de cone, dimensões em cm.



Figura 3.2– Passos para obtenção do espalhamento das matrizes.

Os valores obtidos para cada variação de superplastificante estão dispostos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2– Valores de espalhamento obtidos com a variação de superplastificante e água.

| % superplastificante | MA (mm) | % superplastificante | MB (mm) |
|-----------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|
| 0,35 | - | 1,8 | 125 |
| 0,40 | 174 | 2,0 | 184 |
| 0,45 | 201 | 2,2 | 223 |

Ao ver a Tabela 3.2, percebe-se que, para a matriz A, a proporção de 0,35% resultou em uma argamassa rígida, não sendo possível realizar o ensaio de espalhamento, já que a matriz apresentava consistência seca. Com a proporção de 0,45%, a matriz se tornou altamente fluida, o que impossibilitaria a confecção dos corpos de prova para caracterização dos compósitos, como visto mais adiante, composto de placas e vigas. Logo a proporção de 0,40% de superplastificante foi escolhida para o estudo. Para a matriz B, a proporção de 1,8% resultou em uma matriz fluida resultando em um espalhamento nulo de 125 mm já que esse valor corresponde ao diâmetro do molde. Para a porcentagem de 2,2%, a matriz se apresentou fluida, porém, no ato da mistura e da moldagem, foi detectado uma exsudação, impossibilitando o uso da argamassa. Já a proporção de 2,0% de

superplastificante resultou em um espalhamento 10 mm maior que o obtido na matriz A, sendo o escolhido para o estudo.

3.2.1.3. Propriedades no estado endurecido

A resistência à compressão é uma das propriedades mais importantes de materiais cimentícios no estado endurecido. A resistência à compressão foi avaliada e medida em duas idades: 7 dias, pois para o cimento Portland CP V já confere cerca de 70% da resistência final, e 28 dias, idade na qual os compósitos foram caracterizados. Aos 28 dias, além da resistência à compressão, também foi obtida a curva tensão x deformação e o módulo de elasticidade da matriz.

Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina de ensaios mecânicos universal, a MTS modelo 810/500, com capacidade de 500 kN, controlados por deslocamento a uma taxa de 0,2 mm/min. Para os ensaios de 28 dias, além do maquinário já especificado, foram utilizados dois *linear variable differential transformers* (LVDTs) com capacidade de leitura de 50 mm que auxiliaram na obtenção da curva tensão versus deformação e o módulo de elasticidade da matriz. Foram ensaiadas de três a cinco amostras para cada idade.

Para esse ensaio, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 50 x 100 mm (diâmetro x altura) com as matrizes, misturadas como descrito no item 3.2.1.1. Após 24 horas da moldagem, as amostras foram desmoldadas e colocadas em cura úmida até o dia do ensaio. Momentos antes do ensaio, as amostras eram retiradas da cura úmida e faceadas, para que houvesse a regularização da superfície de aplicação de carga, evitando pontos de concentração de tensões que possam alterar os resultados. Por fim, a amostra foi posicionada e centralizada na máquina de ensaio, como mostra a Figura 3.3. Aos 28 dias, o *setup* de ensaio era modificado. O corpo de prova era munido de um aparato que consistia em dois anéis de acrílico presos por três parafusos a fim de dar suporte aos LVDTs utilizados para a obtenção do módulo de elasticidade das matrizes. Finalmente, a amostra era centralizada tanto nos anéis de acrílico quanto na máquina de ensaio para aplicação de carga.



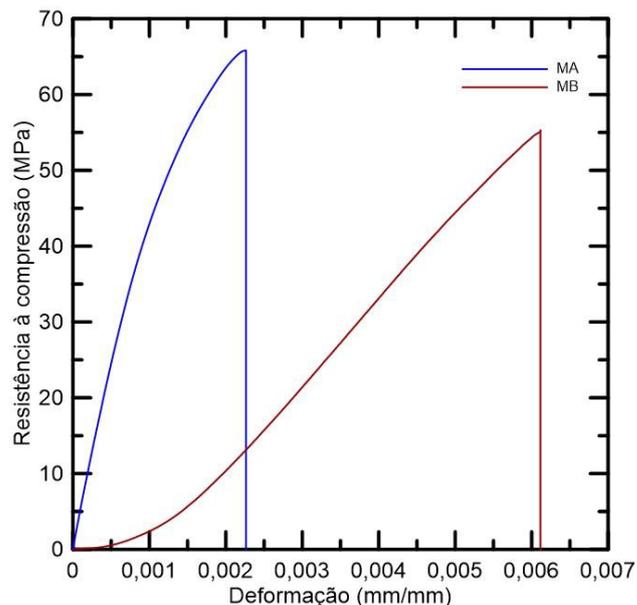
Figura 3.3– Ensaio de resistência à compressão.

Como visto na Figura 3.3, a máquina de ensaio é equipada com uma rótula a fim de garantir a condição de força concêntrica ao longo do ensaio.

O cálculo da resistência à compressão foi feito pelo valor da carga dado pela máquina dividido pela área de aplicação de força que corresponde à área da seção do corpo de prova cilíndrico. O valor da deformação foi dado a partir da divisão do deslocamento do corpo de prova obtido pela leitura dos LVDTs pelo comprimento que essa instrumentação cobria. Vale ressaltar que foram utilizados dois LVDTs, portanto o deslocamento foi dado pela média dos valores obtidos. O valor final, tanto da resistência quanto da deformação, foi dado pela média dos valores obtidos por cada corpo de prova ensaiado.

A Figura 3.4a traz as curvas tensão x deformação para as matrizes estudadas seguida de uma análise do desenvolvimento da resistência das matrizes ao longo das idades de ensaio como pode ser vista na Figura 3.4b. Os valores desses resultados estão dispostos nas Tabelas 3.3 e 3.4.

(a)



(b)

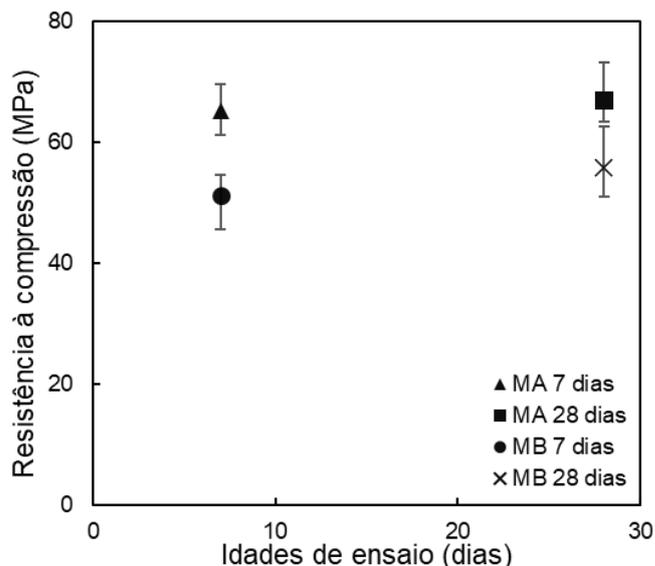


Figura 3.4– (a) Curva tensão x deformação das matrizes aos 28 dias e (b) análise das resistências das matrizes ao longo das idades de ensaio.

Tabela 3.3– Resistências à compressão das matrizes

| Dias | MA (MPa) | MB (MPa) |
|------|--------------|--------------|
| 7 | 65,34 ± 4,25 | 51,30 ± 5,28 |
| 28 | 67,03 ± 3,66 | 55,81 ± 4,75 |

Com a Figura 3.4b e a Tabela 3.3, pode-se perceber que, mesmo nas idades iniciais, as matrizes já apresentavam uma resistência alta, como previsto, visto o tipo de cimento utilizado. Para a matriz A, a resistência à compressão aos 7 dias de ensaio já representava cerca de 97,5% da resistência característica final do concreto.

Já para a matriz B, esse valor corresponde 91,9% do valor final. Vale ressaltar que, como as duas matrizes atingiram valores de resistência superiores a 50 MPa, esse concreto pode ser considerado concreto de alto desempenho.

Na Tabela 3.4 estão dispostos os valores de deformação e módulo de elasticidade médios das matrizes estudadas.

Tabela 3.4– Deformação e módulo de elasticidade das matrizes

| Matriz | $\epsilon_{máx}$ (mm/mm) | E (GPa) |
|---------------|--|----------------|
| <i>MA</i> | <i>0,00239</i> | <i>29,06</i> |
| <i>MB</i> | <i>0,00615</i> | <i>26,82</i> |

ϵ_{max} – deformação máxima correspondente a resistência à compressão; E - Módulo de elasticidade

3.2.2. Reforços têxteis

3.2.2.1. Tecido de fibra de vidro

O tecido de fibra de vidro utilizado foi do tipo Vertex R131 A101 flexível fornecido pela empresa Adfors Saint Gobain sob a forma de rolo com 1 metro de largura e 50 metros de extensão como mostra a Figura 3.5. As especificações técnicas do tecido segundo o fabricante estão dispostas na Tabela 3.5.

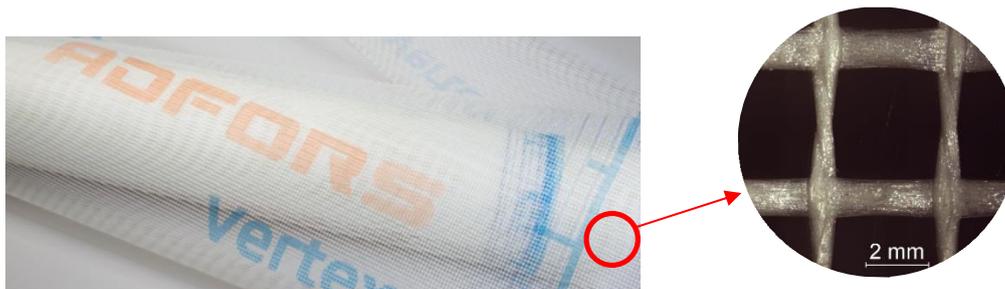
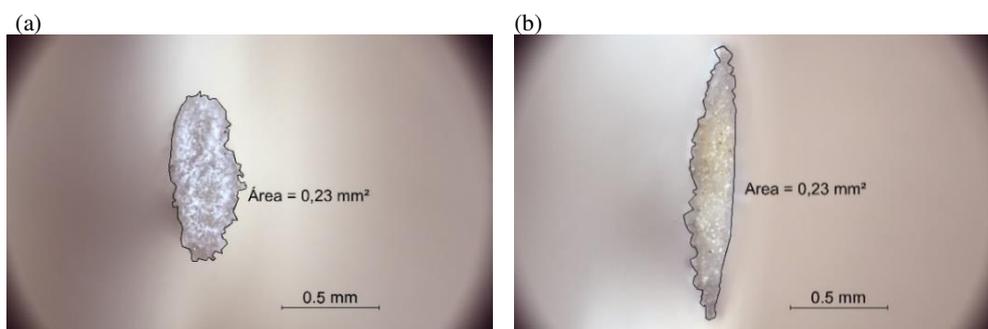


Figura 3.5– Tecido de fibra de vidro

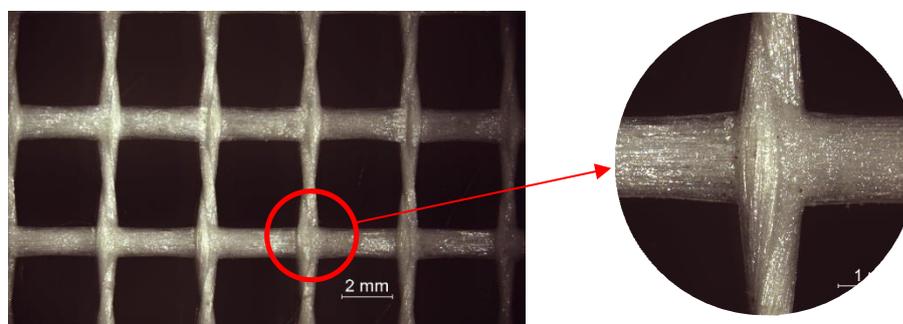
Tabela 3.5– Especificações técnicas do tecido. (Fonte: Adfors Saint Gobain)

| Características | Unidades | Tecido | |
|---------------------------------|------------------|-------------------|-------|
| | | Urdidura | Trama |
| Resistência à tração | N/50mm | 2000 | 2000 |
| Alongamento máximo | % | 3,8 | 3,8 |
| Abertura da malha | mm | 3,5 | 3,8 |
| Espessura da tela | mm | 0,52 | |
| Peso da tela (sem revestimento) | g/m ² | 131 | |
| Peso da tela (com revestimento) | g/m ² | 160 | |
| Tipo de revestimento | | Álcali resistente | |

A área da seção transversal das fibras que compunham o tecido foi analisada através de um microscópio estereoscópio Nikon, modelo SMZ800N, como mostra a Figura 3.6, a partir de 3 amostras tanto para a trama (Figura 3.6a) quanto para a urdume (Figura 3.6b) e medidas com o auxílio do software de análise digital de imagens, ImageJ.

**Figura 3.6**– Área da seção transversal da (a) trama e (b) urdume

Para observar detalhes dos cordões que formam os tecidos e como é feita a ligação entre cordões da trama com os cordões do urdume, uma amostra de tecido também foi analisada em um microscópio estereoscópio Nikon, modelo SMZ800N, como pode-se ver na Figura 3.7.

**Figura 3.7**– Detalhes do tecido e da ligação entre trama e urdidura.

Observa-se que não há fibras de outra composição no tecido para realizar a ligação entre trama e urdidura, sendo essa feita apenas pelos próprios filamentos da fibra de vidro, onde as fibras da trama permanecem retas no sentido do comprimento do rolo de tecido enquanto as fibras da urdidura se entrelaçam e formam a conexão entre as fibras no sentido da largura do rolo.

3.2.2.2. Tecido de fibra de sisal

As fibras de sisal utilizadas nesse estudo são provenientes do município de Valente, na Bahia, e foram extraídas das folhas da planta *Agave sisalana* através de um processo conhecido como decorticação [75]. Essas fibras foram transportadas e recebidas em fardos de fibras longas, o que facilitou o emaranhamento e acúmulo de sujeira nas fibras. Visto isso, foi necessário um tratamento prévio das fibras antes de utilizá-las. As fibras foram lavadas em água corrente a uma temperatura ambiente e postas para secar em uma estufa por 48 horas. Após isso, o material foi separado, alinhado e cortado no comprimento previamente estabelecido de 500 mm devido ao formato do compósito que foi confeccionado, como pode ser visto na Figura 3.8. Por se tratar de uma fibra de origem natural, suas propriedades físicas e mecânicas são variáveis por diferentes fatores que influenciam nas suas características, como por exemplo as propriedades do solo, condições climáticas e geográficas, além das variações nos procedimentos de ensaio [76].



Figura 3.8 - Fibras de Sisal (a) emaranhadas; (b) alinhadas e (c) cortadas e medidas.

No estudo feito por Castoldi [77], que utilizou as mesmas fibras de sisal que foram utilizadas nesse estudo, as características físicas e mecânicas do material foram detalhadas. A área da seção transversal foi medida a partir da média dos valores obtidos por 12 amostras analisadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo Jeol JSM 6510LV, operando de 10 a 20 kV, do Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Engenharia de Materiais da PUC-Rio juntamente com o software ImageJ (ver Figura 3.9). Dessa forma, obteve-se os valores de $0,030 \pm 0,01 \text{ mm}^2$ para a área da seção transversal e de $0,19 \pm 0,03 \text{ mm}$ para o diâmetro equivalente da fibra.



Figura 3.9 – Imagens obtidas do (a) comprimento longitudinal e da (b) seção transversal da fibra por um microscópio estereoscópio Nikon, modelo SMZ800N; (c) Imagem da seção transversal obtida pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo Jeol JSM 6510LV. (Adaptado de [75])

Além disso, Castoldi [77] também analisou a resistência a tração da fibra de sisal por meio de um experimento que seguiu as recomendações da norma ASTM C1557 [78] com adaptações. Por intermédio desse ensaio, o autor obteve valores para tensão de 384 MPa e um módulo de elasticidade de 8,77 GPa, o que condiz com os resultados reportados na literatura [77-81].

3.3. Fabricação dos compósitos

Com o objetivo de caracterizar o comportamento mecânico dos compósitos confeccionados, foram realizados ensaios de tração direta. Para isso, foram fabricadas placas retangulares de dimensões 500 x 60 x 10mm (comprimento x largura x espessura) que variaram quanto ao tipo de matriz (MA e MB), de reforço têxtil utilizado como reforço (V - vidro e S - sisal), quanto à taxa de reforço utilizada em relação ao volume do compósito (2,17% - 2 - e 6,27% - 6 - para o tecido de vidro e 6% - 6 - para o tecido de sisal) e ainda quanto à condição de ensaio (amostras

ensaiadas em condições normais de cura – CN - ou amostras que passaram por envelhecimento em câmara de névoa salina - NS). O sistema alfanumérico adotado para identificação das amostras está apresentado na Figura 3.10.

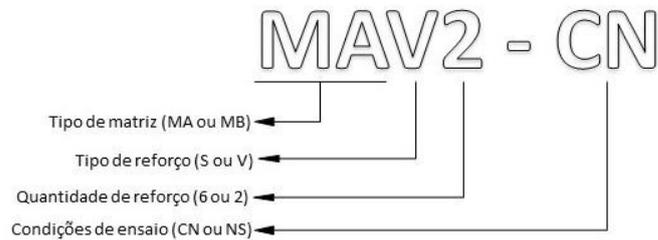


Figura 3.10 – Nomenclatura dada às amostras.

Para a moldagem das placas foram utilizados moldes metálicos com as mesmas dimensões das amostras. O compósito foi feito intercalando camadas de matriz e reforço até atingir a quantidade de reforço para cada amostra. Os tecidos foram cortados na medida exata das amostras para que houvesse um encaixe adequado nos moldes. Para manter um padrão para as espessuras, foram feitas marcas nos moldes correspondentes à altura de cada camada. Vale ressaltar que a matriz foi misturada de acordo com o processo especificado em 3.2.1.1. O processo de moldagem ocorreu de acordo com a Figura 3.11.



Figura 3.11- Processo de moldagem das amostras com reforço têxtil de (a) vidro e (b) sisal.

Os compósitos foram desmoldados depois de aproximadamente 24 horas das moldagem e armazenados em câmara úmida com temperatura e umidade controladas com valores de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e $55\% \pm 5\%$, respectivamente, até o dia do ensaio de tração ou do início do envelhecimento em câmara de névoa salina. Foram confeccionadas 5 amostras para cada um dos 6 tipos de compósitos (MAV6, MBV6, MAS6, MBS6, MAV2 e MBV2) que passaram por um ensaio de tração direta aos 28 dias de cura para as amostras com condições normais de ensaio, exceto para as amostras que foram armazenadas em câmara de névoa salina cuja as condições estão no item 3.5.

3.4. Fabricação dos elementos estruturais

Foram analisadas 6 vigas:

- i. Duas vigas fabricadas com a matriz A, reforçadas com tecido de fibra de vidro, 2,17% de taxa de reforço em volume (MAV2);
- ii. Duas vigas fabricadas com a matriz A, reforçadas com tecido de fibra de vidro, 5,93% de taxa de reforço em volume (MAV6);
- iii. Duas vigas fabricadas com a matriz B, reforçadas com tecido de fibra de sisal, 6% de taxa de reforço em volume (MBS6);

Para a fabricação dos reforços das vigas foi necessário realizar cortes e costuras no tecido para que pudesse encaixá-lo no interior da fôrma. Desta forma, o tecido de fibra de vidro, que foi fornecido em um rolo de 50 metros, foi cortado em duas folhas de 22,5 centímetros de largura por 2 metros de comprimento. O planejamento consistia em fazer duas estruturas em formato de C, costurá-las e por fim obter um reforço em formato de I, como mostra a Figura 3.12. A costura foi realizada manualmente com linha nylon de 0,30mm de espessura. A costura em formato triangular tem 2 centímetros em cada base da estrutura de tecido e foi feita pelos dois lados da peça, como mostra o detalhe da Figura 3.12. Dessa forma, tanto a alma quanto as mesas da vigas ficaram reforçadas.

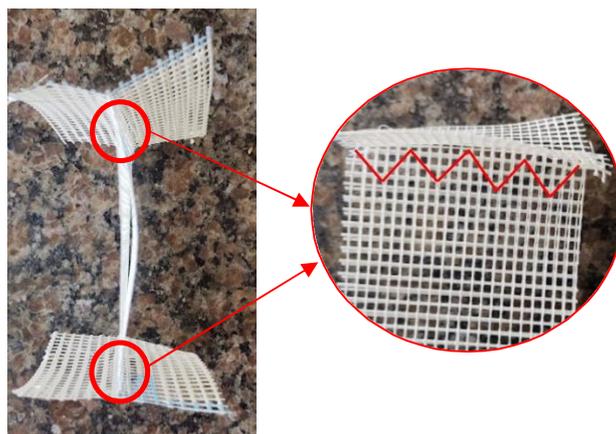


Figura 3.12 – Reforço de tecido de fibra de vidro em formato de I.

O processo de fabricação do reforço de sisal foi mais complexo. As fibras foram disponibilizadas de fardos de fibras longas que após lavagem e secagem, foram cortadas no comprimento de 50 centímetros. A partir disso, as fibras foram pesadas e separadas para iniciar a costura. Primeiramente, as fibras foram costuradas com a própria fibra de sisal de forma manual em placas de 50x8 centímetros (comprimento x largura) com costuras longitudinais com espaçamento de 10 centímetros entre elas, como pode ser visto na Figura 3.13a. Após essa fabricação, 5 placas foram unidas, também por costura, dessa vez dupla, ver Figura 3.13b, até se obter uma placa maior de 2 metros de comprimento por 8 centímetros de largura, o que corresponde às mesas da viga. Para a alma, o processo foi similar ao das mesas, modificando apenas a largura das placas, de 8 para 16 centímetros. Por fim, o reforço das mesas foi costurado ao reforço da alma também com a própria fibra de sisal, como pode ser visto na Figura 3.13c.

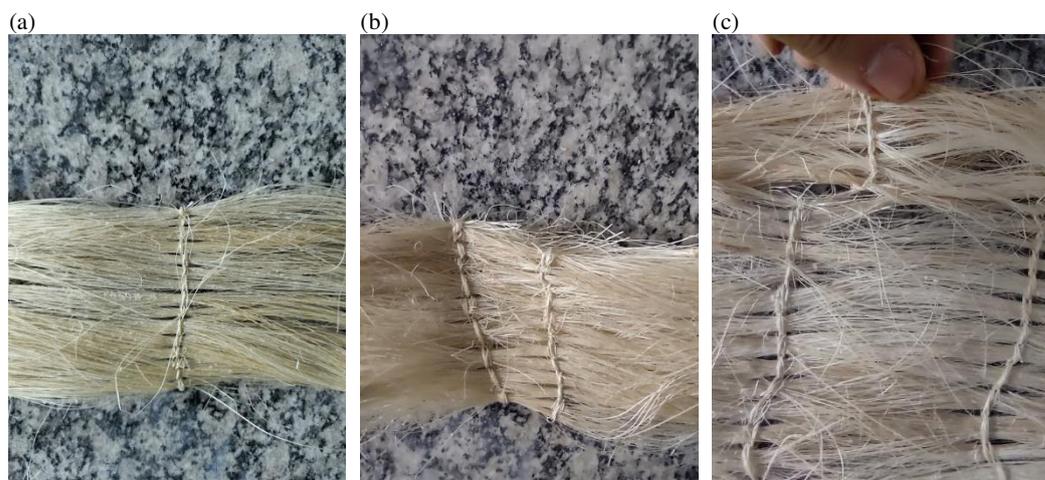


Figura 3.13 – Reforço de fibra de sisal em formato de I.

As vigas foram fabricadas em dobro para que uma amostra fosse ensaiada em condições normais e a outra passasse por envelhecimento acelerado na câmara de névoa salina. Diante do fato de que as fibras naturais são degradadas em matrizes cimentícias convencionais, optou-se em fabricar as vigas reforçadas com tecido de fibra de vidro com a matriz A e as vigas reforçadas com tecido de sisal com a matriz B.

A nomenclatura aplicada as vigas seguiu a utilizada para os compósitos, explicado na Figura 3.10, sendo que a variável desses elementos foi o ensaio em condições normais (CN) e o ensaio em condições envelhecida (NS).

As vigas foram moldadas de forma invertida, ou seja, no fundo da forma ficou a mesa superior da viga e no topo da forma, a mesa inferior. Isso aconteceu para que a taxa de reforço na zona que iria resistir a flexão fosse incrementada com mais camadas de tecido, além daquelas já fixadas na estrutura em I do reforço: 2 camadas de tecido de fibra de vidro para a viga MAV2, 4 camadas de tecido de fibra de vidro para viga MAV6 e 2 camadas de tecido de fibra de sisal para a viga MBS6, como mostra a Figura 3.14.

A porcentagem de reforço da alma e das mesas das vigas reforçadas com fibra de vidro foi calculada a partir do volume de cada fio e a quantidade de fios por seção da viga. Dessa forma, obteve-se o valor de 1,25% e 2,01% de taxa de reforço para a mesa superior e a alma da viga, respectivamente, e 2,17% e 5,93% de taxa de reforço da mesa inferior para MAV2 e MAV6, respectivamente.

Para a viga reforçada com fibra de sisal, utilizou-se do valor da massa específica da fibra natural para calcular os volumes pré-determinados para cada área da seção da viga. Tendo o valor do volume fixado e a massa específica da fibra, obteve-se, em peso, a quantidade de fibra para cada taxa de reforço.

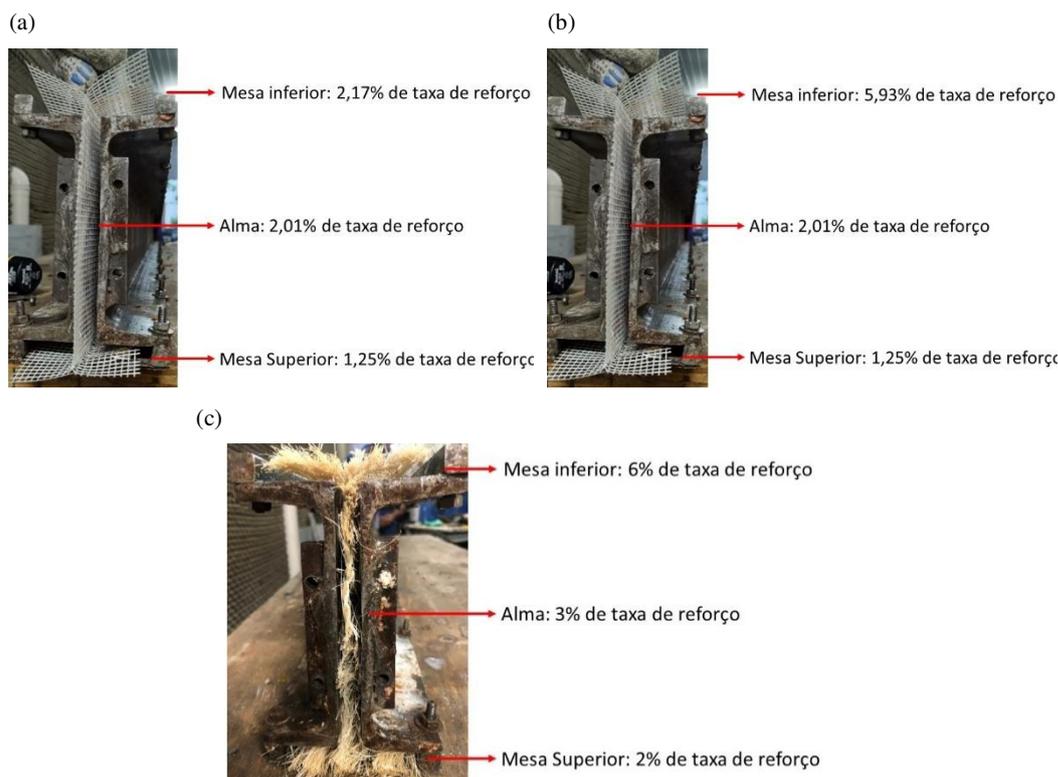


Figura 3.14 – Taxa de reforço para as vigas (a) MAV2, (b) MAV6 e (c) MBS6.

A fôrma utilizada para fabricação das vigas consiste em dois perfis metálicos em formato de C, interligados à base por duas barras também de aço fixas por 16 parafusos ao longo dos 2 metros de fôrma. O aparato também contém duas chapas de aço que funcionam como “tampas” nas duas extremidades fixas por 4 parafusos. Para que não ocorresse vazamento nos espaços que poderiam surgir entre as chapas, a fôrma foi inteiramente vedada externamente com massa para calafetar.

O concreto foi produzido em uma betoneira planetária com capacidade de 200 litros. O processo de mistura foi feito da seguinte forma:

- I. Todos os materiais secos foram colocados na betoneira e misturados por 2 minutos;
- II. Após isso, 80% da água foi adicionada e misturada por mais 2 minutos;
- III. Com auxílio de uma colher de pedreiro, a mistura foi revolvida manualmente e novamente misturada por mais 2 minutos;
- IV. Por fim, o superplastificante foi diluído com os 20% restantes da água e adicionado à matriz, que foi misturada por mais 4 minutos.

A fabricação dos elementos estruturais seguiu o mesmo padrão para todas as vigas. A fôrma, ainda desmontada, foi lubrificada com desmoldante para facilitar a

retirada da viga após endurecimento. Logo depois, a fôrma foi montada e o reforço com perfil I foi encaixado e ajustado para receber a matriz, como mostra a Figura 3.15. Após isso, as extremidades foram fechadas e vedadas. Um terço da matriz foi colocado aos poucos para que pudesse ocupar todos os espaços vazios do perfil e golpes com uma marreta de borracha foram dados na lateral da forma para que não houvesse vazios. Além disso, a viga foi posta em uma mesa vibratória por um minuto para que a matriz assentasse de forma uniforme no fundo da fôrma. O mesmo processo se repetiu para os outros dois terços da matriz. Vale ressaltar que no último 1/3 de concretagem, para atingir a taxa de reforço desejada, mais camadas foram adicionadas da mesma forma que foram fabricadas as placas, ou seja, uma camada de argamassa seguida de uma camada de tecido e assim sucessivamente.

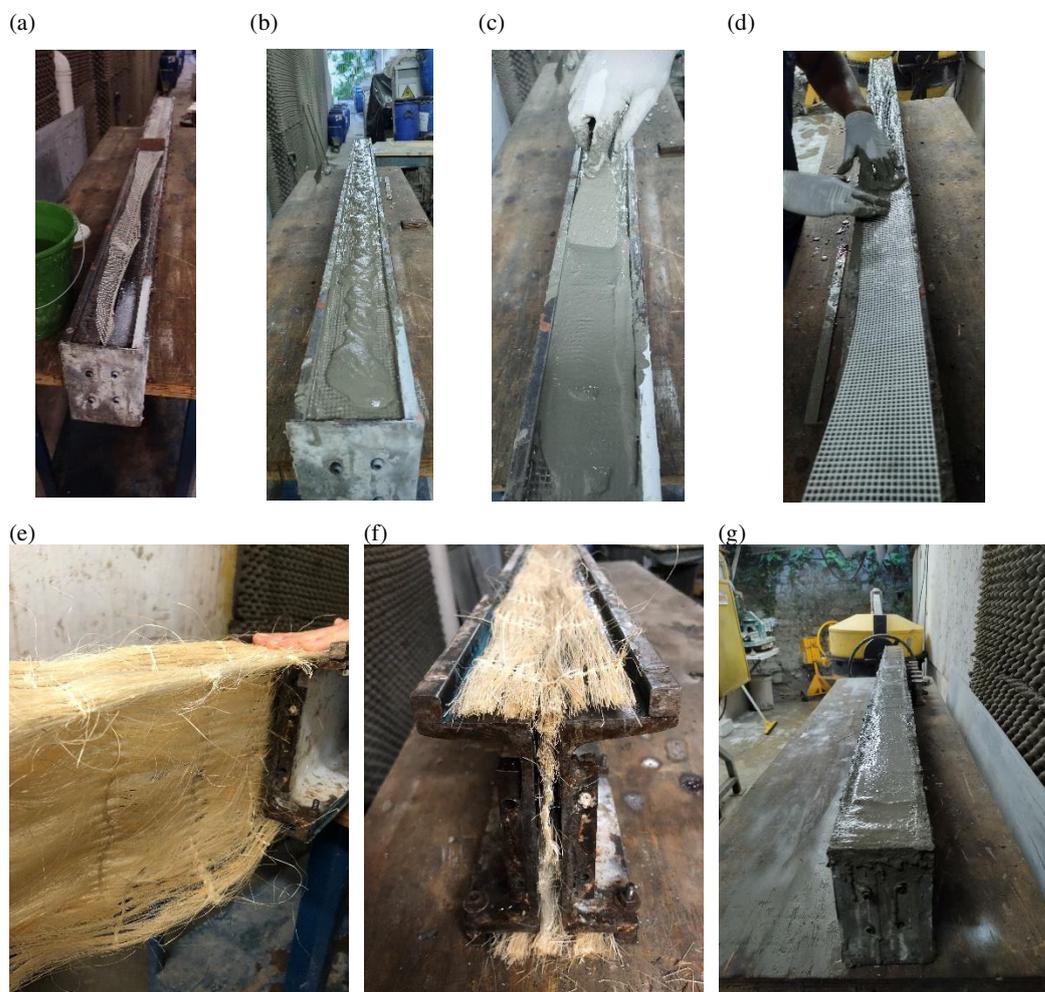


Figura 3.15 – Processo de fabricação das vigas reforçadas com (a), (b), (c), (d) tecido de fibra de vidro e (e)(f)(g) tecido de fibra de sisal.

As vigas foram desmoldadas 48 horas após a fabricação e colocadas em câmara úmida com temperatura e umidade controladas com valores de $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$

e $55\% \pm 5\%$, respectivamente, até o dia do ensaio ou início do processo de envelhecimento.

3.5. Estudo da degradação em Câmara de névoa salina

Como dito anteriormente, além do tempo de 28 dias de cura em câmara úmida, algumas amostras foram envelhecidas em câmara de névoa salina a fim de analisar a degradação das fibras nos compósitos e o quão a argamassa poderia ajudar no retardo dessa degradação.

As três câmaras walk-in de névoa salina estão no Laboratório de Estruturas e Materiais do Departamento de Engenharia Civil (LEM - DEC) da PUC-Rio e possuem dimensões de 2,0 x 2,0 x 2,6 m e podem chegar a temperaturas de até 70°C , com diferentes modos de envelhecimento, como mostra a Figura 3.16. O método de envelhecimento escolhido para esse estudo foi o mais extremo, pois o objetivo é observar a degradação dos compósitos no pior cenário possível, portanto os compósitos foram armazenados na câmara com temperatura de 70°C por 1000 ± 36 horas.



Figura 3.16 – Câmaras de Névoa Salina

Estudos como o de Donnini [67,68], Signorini [66] e Belinni [70] relatam que esses parâmetros causam uma degradação acentuada em fibras de vidro e na matriz, bem como na interface do compósito. Os autores relatam que a umidade acrescida de NaCl e uma temperatura elevada provocam inchaço na fibra e aparecimento de vazios no centro do fio, sendo esses os principais responsáveis pela diminuição em até 40% das propriedades mecânicas dos compósitos. Além disso,

esses estudos aconselham um teor de 3,5% de NaCl para o armazenamento das amostras, já que essa é a média da concentração encontrada na água do mar.

Para que as amostras recebam igualmente a mesma quantidade de névoa salina, buscando uma uniformidade no processo de envelhecimento, as placas foram armazenadas separadamente, como mostra a Figura 3.17, em grupos de 4 amostras, 1 para cada tipo, ou seja, MAV6, MBV6, MAS6 e MBS6. Os grupos MAV2 e MBV2 foram armazenados em 2 grupos de 5, mesclando os tipos de amostras entre si.



Figura 3.17 – Armazenamento das placas no interior da câmara de névoa salina.

Já as vigas foram armazenadas sob suportes de perfil fenólico para que não houvesse contato direto das vigas com as paredes da câmara, como pode ser visto na Figura 3.18.



Figura 3.18 – Armazenamento das vigas em câmara de névoa salina

3.6. Ensaio de tração direta

Para caracterização do compósito, foram realizados ensaios de tração direta adaptados do estudo de Teixeira [56]. Esse ensaio foi realizado em um sistema universal de testes MTS 811 com capacidade de carga de 1000 kN. Os ensaios

ocorreram com 28 dias para as amostras em condições normais de cura e 28 dias \pm 1000 horas para os corpos de prova colocados em câmara de névoa salina, conforme descrito no item 3.3.1.

A Figura 3.19 mostra o arranjo experimental usado para o ensaio detalhado em milímetros. As placas foram previamente lixadas para evitar algum ponto de concentração de tensões e presas pelas extremidades em duas garras metálicas por meio de parafusos com o torque de 8,5 N.m controlado por um torquímetro de estalo, mostrado da Figura 3.20. Cada garra continha 8 parafusos e eram revestidas internamente, ou seja, na área de contato com a placa, por lixas, evitando assim um possível deslizamento das placas. Para medir a deformação das placas durante o ensaio, foram utilizados dois LVDTs nas laterais das placas que ficavam encaixados em um aparato metálico, que por sua vez era preso ao corpo de prova por meio de parafusos. Foram ensaiadas 5 placas para cada tipo de amostra. A velocidade de ensaio utilizada foi de 0,1mm/min já que os compósitos eram frágeis e de fácil fissuração. As condições de ensaio como velocidade, número de parafusos, torque dado aos parafusos e área de corpo livre (l_0) foram idênticas para todos os corpos de prova.

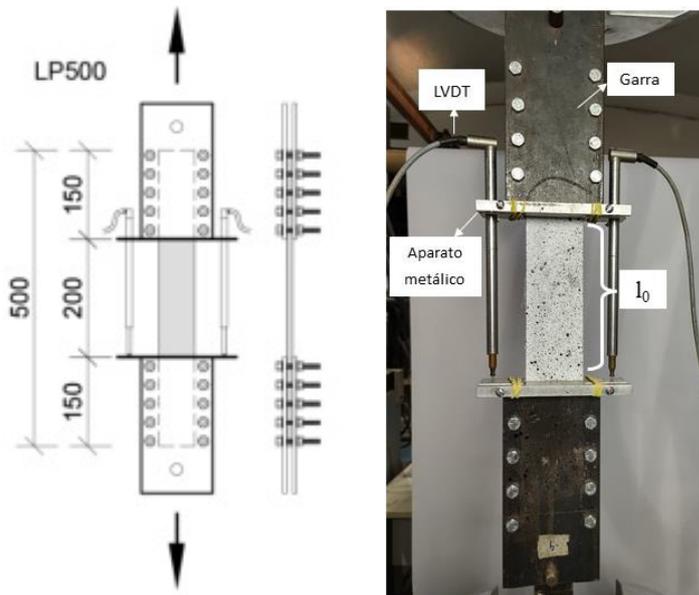


Figura 3.19 – Modelo esquemático para o ensaio de tração direta. (Adaptado de [56])



Figura 3.20 – Torquímetro de estalo.

Além disso, para visualizar e mensurar mais acuradamente as fissuras e o modo de ruptura das placas, foi utilizada a técnica de Correlação de Imagem Digital (CID). O CID, um método sem contato capaz de medir deformações de campo total [81], tem sido muito útil para analisar o processo de fissuração. O princípio básico do CID consiste em uma área de interesse (AOI - *Area of Interest*) que é manualmente especificada e posteriormente dividida em uma grade virtual uniformemente espaçada. Os deslocamentos são calculados em cada ponto da grade virtual para obter a deformação de campo completo, onde subconjuntos (conjunto de pixels) e etapas (distância entre subconjuntos) são determinados e, então, o movimento de seu ponto central a partir da imagem de referência (antes do deformação) é correlacionado em imagens subsequentes, rastreando os deslocamentos [82].

Para realizar a técnica, foi necessário criar um padrão de manchas na superfície dos corpos de prova, que consiste na aplicação de um padrão de pontos pretos (feitos por spray) aleatoriamente distribuídos sobre um fundo branco fosco, na área de corpo livre (l_0). Um exemplo de amostra padronizada conforme as determinações seguidas é mostrada na Figura 3.21a. Foi utilizada uma câmera de gravação digital modelo Nikon D90, controlada pelo software Camera Control Pro 2, garantindo a aquisição de imagens com resolução de 4200 x 2690 pixels a cada 10 segundos de ensaio. A análise das imagens foi realizada no software GOM Correlate, adotando subconjuntos de 25 pixels [87,88]. A Figura 3.21b ilustra a posição da câmera em relação ao ensaio.

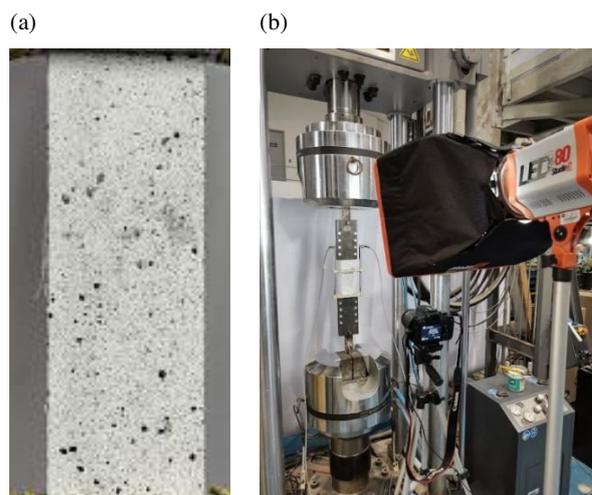


Figura 3.21 – (a) Área de corpo livre padronizada e (b) setup do ensaio de tração direta.

3.7. Ensaio de flexão a quatro pontos

Para avaliar o comportamento mecânico das vigas de concreto reforçadas tanto com tecido de fibra de vidro quanto com tecido de fibra de sisal foram realizados ensaios de flexão a quatro pontos adaptados do estudo de Botelho Goliath [51]. Esse ensaio foi realizado com auxílio de atuador hidráulico com capacidade de 500kN controlado por uma estação central MTS. Os ensaios ocorreram com 28 dias para as amostras em condições normais de cura e 28 dias \pm 1000 horas para os corpos de prova colocados em câmara de névoa salina, conforme descrito no item 3.3.1. O controle do ensaio foi realizado através do deslocamento a uma taxa de 1,0 mm/min.

A Figura 3.22 ilustra o *setup* de ensaio utilizado. A viga foi centralizada no atuador e apoiada em roletes que simularam apoios fixos. Cada rolete ficava a 10 cm das extremidades da viga, ou seja, o vão avaliado foi de 1,8 m. Acima da viga, na região onde a carga foi aplicada, também foram posicionados dois roletes nos 30 centímetros centrais da viga, sobre os quais foi disposto um perfil metálico de seção I acoplado a uma rótula para distribuição uniforme da carga para os roletes. Para aquisição correta da flecha da viga ao longo do ensaio, foram locados 3 transdutores com capacidade de aquisição de 100 mm de deslocamento espaçados igualmente nos 30 cm centrais da viga, onde se encontra o padrão de pintura feito para correlação de imagem digital. Para isso, foi utilizada uma câmera de gravação digital modelo Nikon D90, controlada pelo software Camera Control Pro 2,

garantindo a aquisição de imagens com resolução de 4200 x 2690 pixels a cada 10 segundos de ensaio. A análise das imagens foi realizada no software GOM Correlate, adotando subconjuntos de 25 pixels [87,88].

(a)



(b)

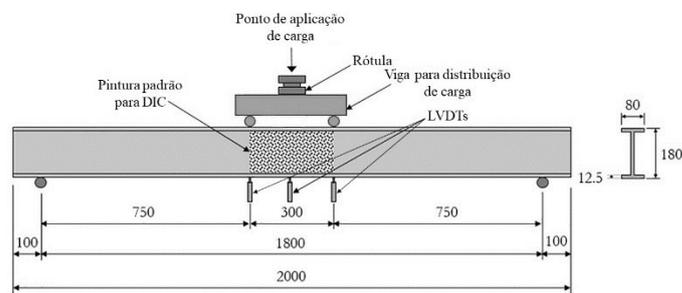


Figura 3.22 – (a) *Setup* de ensaio e (b) detalhamento da viga (Adaptado de [51]).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados, analisados e discutidos os resultados do comportamento mecânico tanto dos compósitos, através dos ensaios de tração direta, quanto dos elementos estruturais, através do ensaio de flexão a quatro pontos.

4.2. Comportamento mecânico dos materiais compósitos na condição não-envelhecida

A Figura 4.1 e a Tabela 4.1 mostram os resultados obtidos pelo ensaio de tração direta das amostras das séries MAV2–CN e MBV2-CN. Foram realizados de três a cinco ensaios para cada série e as curvas e resultados apresentados correspondem à média desses ensaios. O desvio padrão foi calculado e está entre parênteses na Tabela 4.1.

De acordo com a Figura 4.1 é possível observar que a mudança de matriz pouco alterou o resultado dos ensaios, mas vale ressaltar o comportamento peculiar dessas amostras. Como visto, são notórios os momentos em que o tecido resiste até uma certa tensão, representado pela curva ascendente, e escorrega dentro da matriz, causando deslizamento correspondente a queda brusca na curva seguida novamente de uma ascendência até ocorrer a ruptura da peça.

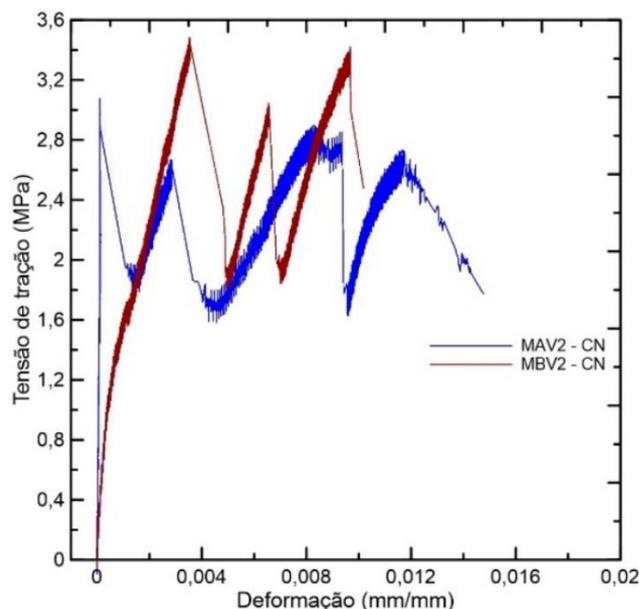


Figura 4.1 - Curvas tensão de tração *versus* deformação características dos compósitos das séries MAV2-CN e MBV2-CN.

A Tabela 4.1, além dos resultados dos ensaios mecânicos, também mostra os resultados obtidos a partir da análise feita por meio de CID, como o número de fissuras e o espaçamento médio entre elas imediatamente antes da ruptura que pode ser visualizado também na Figura 4.2. Observa-se o aparecimento de poucas fissuras e um grande espaçamento entre elas, o que pode ser justificado pela baixa taxa de reforço utilizado nesse compósito e a consequente falta de aderência entre a fibra e a matriz utilizada. Comparando as duas séries entre si, a MBV2 teve um desempenho 13% melhor em relação à carga de ruptura da peça, porém em relação ao padrão de fissuração não houve diferenças significativas.

Tabela 4.1 - Resultados obtidos nos ensaios de tração direta para as séries MAV2-CN e MBV2-CN.

| Amostra | Propriedades Mecânicas | | | CID | |
|---------|-------------------------|------------------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| | σ_{max} (MPa) | $\epsilon_{\sigma,max}$ (mm/mm) | σ_{BOP} (MPa) | Número de fissuras | Espaçamento médio entre fissuras (mm) |
| MAV2 | 3,08 (0,089) | 0,015 (0,006) | 2,57 (0,423) | 3 ± 1 | 72,05 ± 14,81 |
| MBV2 | 3,54 (0,074) | 0,010 (0,005) | 1,96 (0,352) | 5 ± 1 | 40,06 ± 3,96 |

σ_{max} – tensão de tração máxima; $\epsilon_{\sigma,max}$ – deformação máxima correspondente a resistência à compressão; σ_{BOP} – tensão correspondente ao aparecimento da primeira fissura; Valores de desvio padrão entre parênteses.

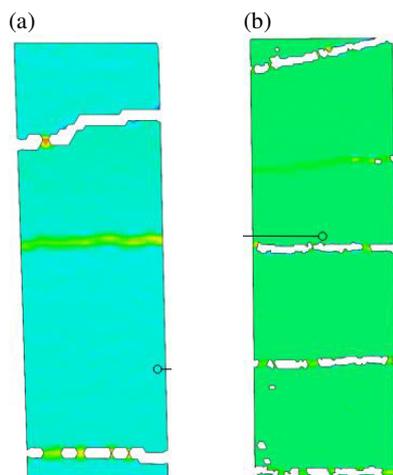


Figura 4.2 – O padrão de fissuração dos compósitos por meio de CID: (a) MAV2 - CN e (b) MBV2 – CN.

A Figura 4.3 traz os resultados obtidos nos ensaios de tração das séries de amostras MAV6-CN e MBV6-CN. Por sua vez, foram ensaiadas de três a cinco amostras por série e as curvas apresentadas foram obtidas a partir das médias desses ensaios. Nota-se que mesmo com as condições de ensaio e as condições de contorno das séries MAV2, MBV2, MAV6 e MBV6 sendo idênticas, obteve-se comportamentos diferentes para as duas séries distintas. Pode-se notar uma interface mais forte entre o tecido e a matriz para as séries MAV6 e MBV6, que tiveram um comportamento característico para concreto têxtil, com as 4 zonas bem definidas, como visto na Figura 4.3. A mudança de matriz alterou significativamente o valor da resistência final do compósito, o que era esperado, pois mesmo com a presença de revestimento resistente a álcalis no tecido de vidro utilizado, a matriz com baixo teor de hidróxido de cálcio conservou a capacidade resistente da fibra.

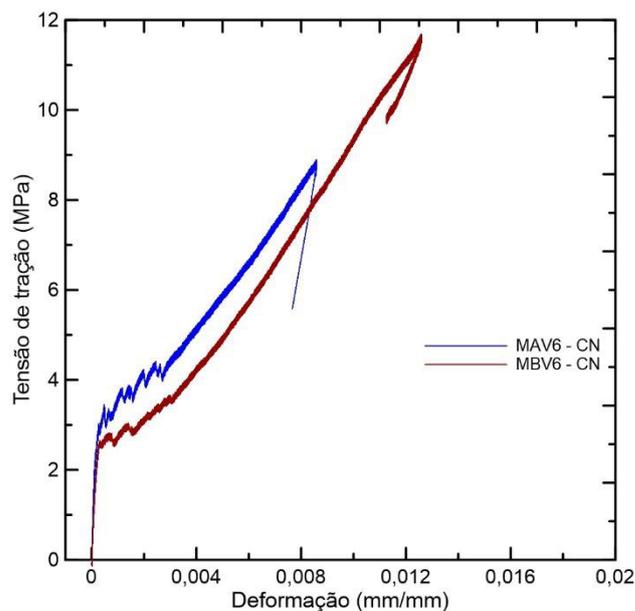


Figura 4.3 - Curvas tensão de tração *versus* deformação características dos compósitos das séries MAV6-CN e MBV6-CN.

A Tabela 4.2 também traz resultados obtidos por meio da correlação de imagem digital do ensaio que pode ser visualizada na Figura 4.4. Nota-se que a série MBV6 obteve uma carga de ruptura 24% maior que a série MAV6, o que pode indicar um menor desgaste da fibra de vidro devido ao menor teor de hidróxido de cálcio presente na matriz. O padrão de fissuração se manteve próximo tanto em número de fissuras quanto em espaçamento entre elas imediatamente antes da ruptura do compósito.

Vale salientar que, como esperado, a carga de ruptura da série MAV6 foi cerca de 65% maior do que a da série MAV2. Quando a comparação é feita entre as séries MBV2 e MBV6, esse valor chega a 70%, evidenciando que a capacidade de carga do compósito é diretamente proporcional a quantidade de reforço. Além disso, o número de fissuras aparente aumentou cerca de cinco vezes para os compósitos com maior taxa de reforço e o espaçamento entre fissuras foi reduzido significativamente, cerca de 90%, o que decorre da maior taxa de reforço adotada.

Tabela 4.2 - Resultados obtidos nos ensaios de tração direta para as séries MAV6 - CN e MBV6 - CN.

| Amostra | Propriedades Mecânicas | | | CID | |
|---------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| | σ_{max} (MPa) | $\varepsilon_{\sigma,max}$ (mm/mm) | σ_{BOP} (MPa) | Número de fissuras | Espaçamento médio entre fissuras (mm) |
| MAV6 | 8,84 (1,252) | 0,0086 (0,0008) | 3,36 (0,135) | 17 ± 4 | 7,16 ± 2,73 |
| MBV6 | 11,69 (0,721) | 0,013 (0,003) | 2,67 (0,331) | 22 ± 3 | 4,69 ± 2,48 |

σ_{max} – tensão de tração máxima; $\varepsilon_{\sigma,max}$ – deformação máxima correspondente a resistência à compressão; σ_{BOP} – tensão correspondente ao aparecimento da primeira fissura; Valores de desvio padrão entre parênteses.

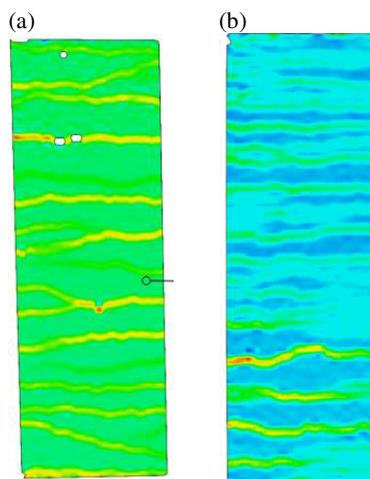


Figura 4.4 - O padrão de fissuração dos compósitos por meio de CID: (a) MAV6 - CN e (b) MBV6 – CN.

Já na Figura 4.5 estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de tração para as séries MAS6-CN e MBS6-CN. Os valores apresentados são a média de três a cinco amostras ensaiadas. Os desvios padrão estão apresentados entre parênteses na Tabela 4.3. Como pode ser visto, as séries MAS6 e MBS6 também se comportaram como esperado, com as 4 zonas características do comportamento mecânico do concreto têxtil bem definidas. A matriz com baixo índice de hidróxido de cálcio, assim como na série MBV6, auxiliou na capacidade resistente do compósito, o que era esperado, pois um alto teor de Ca(OH)_2 na matriz ocasiona uma maior degradação da fibra, principalmente fibras naturais [76,80,83].

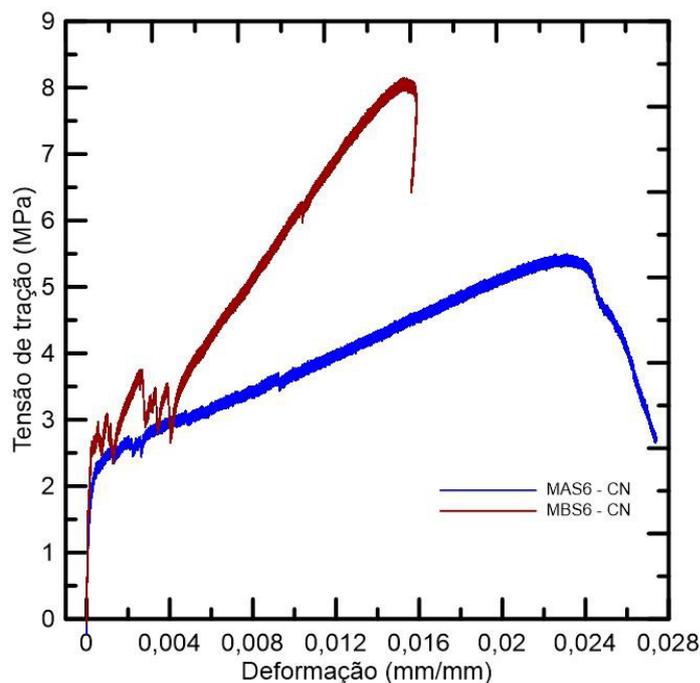


Figura 4.5 - Curvas tensão de tração *versus* deformação características dos compósitos das séries MAS6 - CN e MBS6 - CN.

Como pode ser visto na Tabela 4.3, a série MBS6, seguindo o padrão de todas as séries analisadas, teve uma resistência de cerca de 32,5% maior se comparada com a série MAS6. Além disso, pode-se observar o aparecimento de múltiplas fissuras de espessura fina, salientando uma boa aderência entre fibra e matriz, como pode ser visto na Figura 4.6.

Tabela 4.3 - Resultados obtidos nos ensaios de tração direta para as séries MAS6 - CN e MBS6 - CN.

| Amostra | Propriedades Mecânicas | | | CID | |
|---------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------|-----------------------|--|
| | σ_{max} (MPa) | $\varepsilon_{\sigma,max}$ (mm/mm) | σ_{BOP} (MPa) | Número de fissuras | Espaçamento médio entre fissuras (mm) |
| MAS6 | 5,50 (1,089) | 0,027 (0,005) | 2,31 (0,644) | 23 ± 5 | 6,88 ± 3,102 |
| MBS6 | 8,15 (1,164) | 0,016 (0,004) | 2,68 (0,796) | 13 ± 4 | 11,19 ± 3,231 |

σ_{max} – tensão de tração máxima; $\varepsilon_{\sigma,max}$ – deformação máxima correspondente a resistência à compressão;
 σ_{BOP} – tensão correspondente ao aparecimento da primeira fissura; Valores de desvio padrão entre parênteses.

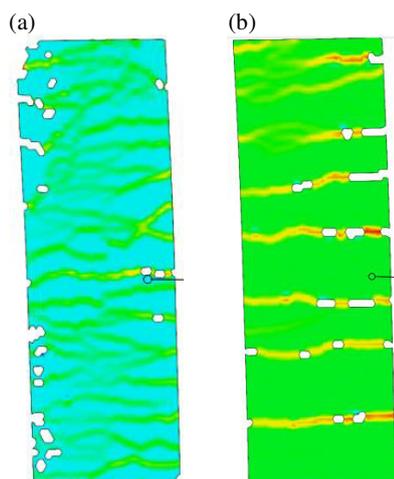


Figura 4.6 – O padrão de fissuração dos compósitos por meio de CID: (a) MAS6 - CN e (b) MBS6 – CN.

A Figura 4.7a ilustra os modos de ruptura padrões para as séries MAV2 e MBV2, que romperam em sua maioria na região perto das garras usadas para aplicação de carga e o padrão de múltipla fissuração que foi comum para o restante das séries como visto na Figura 4.7b.

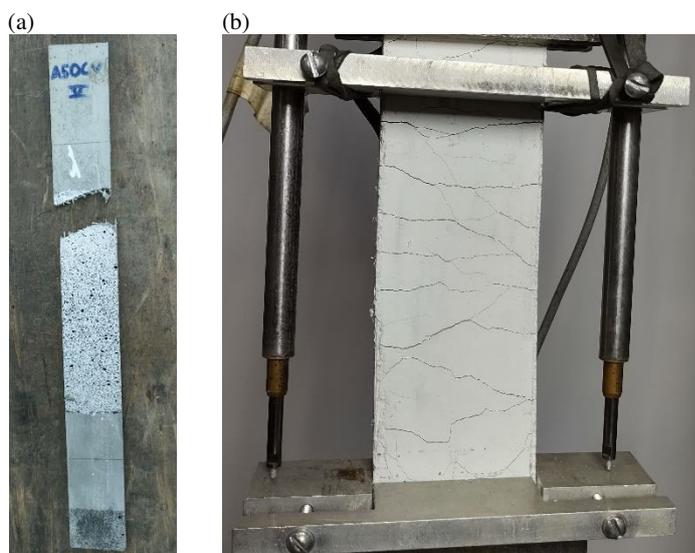


Figura 4.7 – Padrão de fissuração e ruptura para as séries (a) MAV2 e MBV2 e (b) MAV6, MBV6, MAS6 e MBS6.

A Figura 4.8 traz um comparativo entre os compósitos fabricados com a mesma taxa de reforço tanto para fibra de vidro quanto para a fibra de sisal. Observa-se que, para os dois tipos de reforços, a matriz MB auxiliou diretamente na capacidade resistente dos compósitos, fazendo-os alcançar resistências de ruptura maiores que as amostras confeccionadas com a matriz MA. Vale ressaltar a semelhança das curvas para os compósitos reforçados com fibra de sisal fabricados

com a matriz MB e as amostras contendo fibra de vidro e a matriz MA, ambos tiveram uma capacidade resistente muito próxima, sendo que a capacidade de deformação, assim como grande parte das amostras, foi maior para os compósitos reforçados com fibra de sisal.

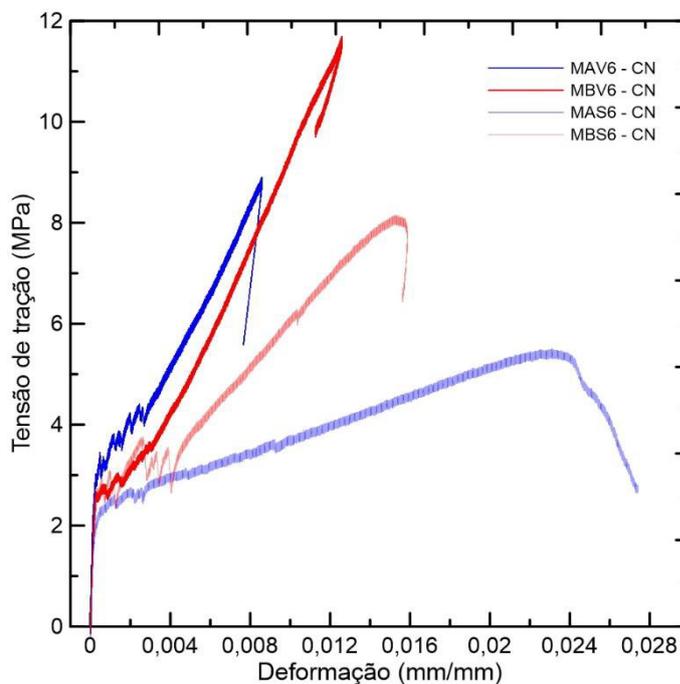


Figura 4.8 – Comparativo entre os compósitos reforçados com fibra de vidro e de sisal.

4.3. Comportamento Mecânico dos Perfis Estruturais na condição não-envelhecida

A Figura 4.9 e a Tabela 4.4 trazem os resultados obtidos a partir do ensaio de flexão de 4 pontos para a viga MAV2 CN, com 2 camadas de tecido de fibra de vidro. Como visto na curva força – deflexão, a estrutura se comportou de maneira similar ao comportamento da placa com as mesmas características. A viga não apresentou o comportamento característico do concreto têxtil, com as 4 zonas bem delimitadas na curva. A resposta é caracterizada por trechos ascendentes até um certo ponto, seguidos por quedas bruscas seguidas vezes. Isso demonstra, assim como ocorreu nas placas, uma fraca força de aderência entre o tecido e a matriz devido a quantidade reduzida de reforço. Além disso, a viga apresentou baixa carga de ruptura do elemento, que por sua vez se deu de forma repentina e por flexão.

Vale ressaltar que a viga MAV2 CN teve um comportamento de *deflection-hardening*, ou seja, ruptura do tecido juntamente com a matriz.

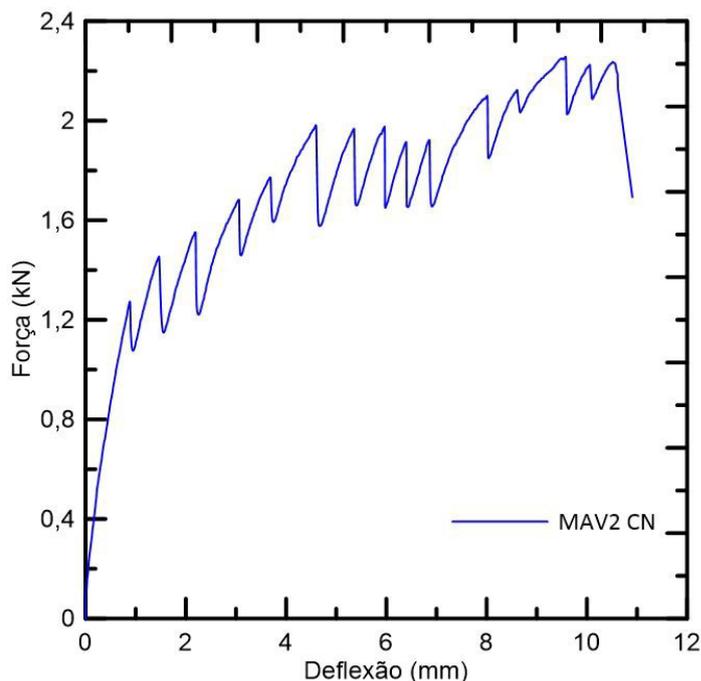


Figura 4.9 - Curva força *versus* deflexão da viga MAV2 CN.

Tabela 4.4 - Resultados para Viga MAV2 CN.

| Ensaio de Flexão | | | |
|----------------------------------|--|--|-------------------------------|
| Carga de Ruptura (kN) | Momento Máximo (kNm) | Primeira Fissura (kN) | Flecha Máxima (mm) |
| 2,26 | 0,85 | 1,27 | 10,91 |
| CID | | | |
| Número de fissuras | Abertura média de fissuras (mm) | Espaçamento médio entre fissuras (mm) | |
| 11 | 0,31 | 27,2 | |

A Figura 4.10 traz a imagem da viga MAV2 CN na iminência da ruptura a partir da análise feita por CID e a Tabela 4.4 mostra os resultados dessa análise. Pode-se observar a formação de múltiplas fissuras ao longo de toda parte central da peça composto por fissuras finas e regularmente espaçadas. A maior abertura de fissura registrada foi de 0,34 mm.

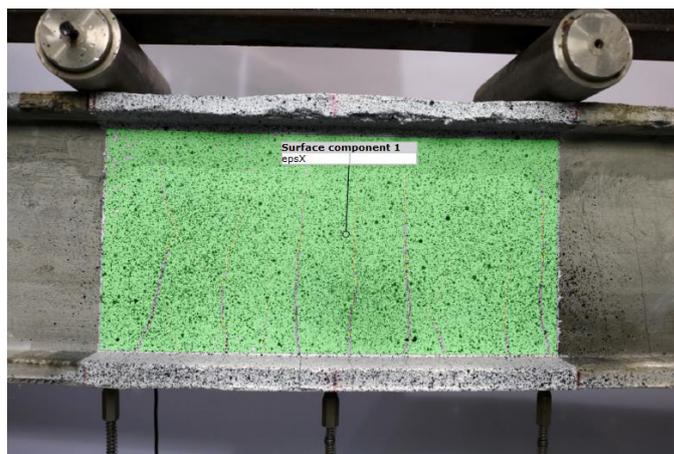


Figura 4.10 – Fissuras aparentes da Viga MAV2 CN.

Os resultados para a Viga MAV6 CN estão ilustrados na Figura 4.11 e mostrados na Tabela 4.5. Diferentemente da Viga MAV2 CN, esta viga apresentou um comportamento coincidente com o esperado pelo concreto têxtil. É possível distinguir na curva as 4 zonas bem definidas, confirmando que o aumento da quantidade de reforço fez com que a carga fosse mais bem distribuída ao longo do elemento estrutural, fazendo com que a viga alcançasse uma performance melhor. A ruptura ocorreu por flexão e de forma brusca, embora houvesse múltipla fissuração na parte central da viga, apresentando ductilidade. A carga de ruptura dessa amostra é 3 vezes maior que a carga atingida pela Viga MAV2 CN, curva em escala de cinza na Figura 4.11, assim como a flecha alcançada com essa carga.

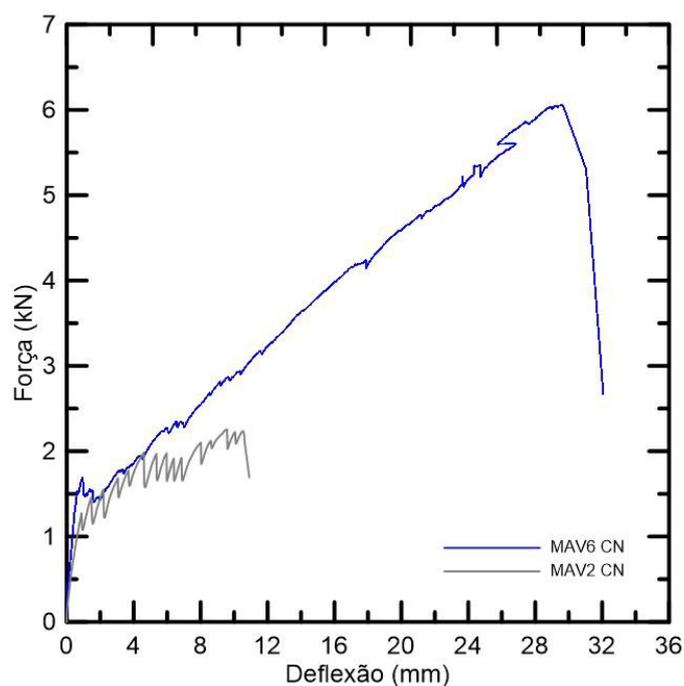
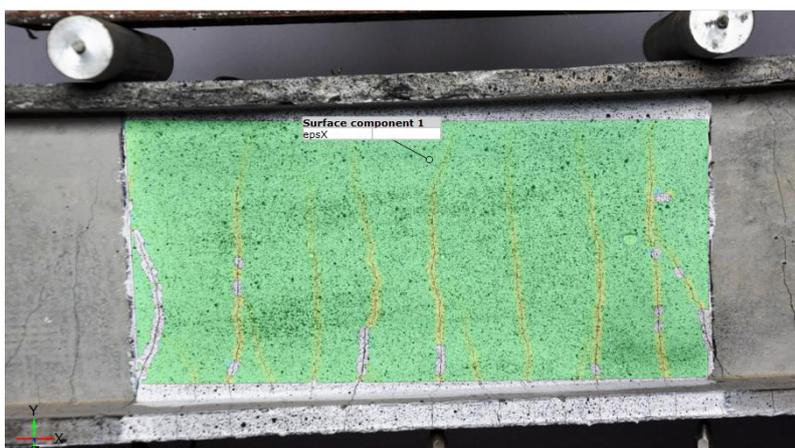


Figura 4.11 - Curva força *versus* deflexão das vigas MAV6 CN e MAV2 CN.

Tabela 4.5 - Resultados para Viga MAV6 CN.

| Ensaio de Flexão | | | |
|----------------------------------|--|--|-------------------------------|
| Carga de Ruptura (kN) | Momento Máximo (kNm) | Primeira Fissura (kN) | Flecha Máxima (mm) |
| 6,06 | 2,27 | 1,69 | 32,07 |
| CID | | | |
| Número de fissuras | Abertura média de fissuras (mm) | Espaçamento médio entre fissuras (mm) | |
| 20 | 0,26 | 22,23 | |

As análises realizadas através de CID para a Viga MAV6 CN estão dispostas na Figura 4.12 e na Tabela 4.5. Assim como a MAV2 CN, a viga também teve aparecimento de múltiplas fissuras de espessura fina e regularmente espaçada continuamente. No entanto, para a Viga MAV6 CN esse comportamento intensificou, como pode ser visto pelo aumento do número de fissuras aparente e pela redução tanto das espessuras quanto do espaçamento entre as fissuras.

**Figura 4.12** – Fissuras aparentes da Viga MAV6 CN.

A Figura 4.13 traz o padrão de ruptura tanto para a Viga MAV2 CN quanto para Viga MAV6 CN, que romperam de forma brusca, dividindo o elemento estrutural em duas partes.

(a)





Figura 4.13 – Padrão de ruptura para as vigas MAV2 CN e MAV6 CN.

A Figura 4.14 e a Tabela 4.6 trazem os resultados obtidos a partir do ensaio da Viga MBS6 CN, reforçada com tecido de fibra de sisal. Assim como a Viga MAV6 CN, a Viga MBS6 CN também apresentou comportamento típico de um compósito reforçado com tecido, com as quatro zonas definidas. Embora a carga de ruptura seja cerca de 3 vezes menor do que a alcançada pela Viga MAV6 CN e muito próxima da carga atingida pela Viga MAV2 CN, a Viga MAS6 CN foi a única que não teve ruptura repentina. Vale ressaltar que, mesmo com o valor final de carga se aproximando da Viga MAV2 CN, a flecha atingida pela Viga MBS6 CN foi cerca de 2,4 vezes maior, mostrando um comportamento dúctil melhor. A Viga MBS6 CN rompeu por flexo-cisalhamento, como pode-se notar na Figura 4.15.

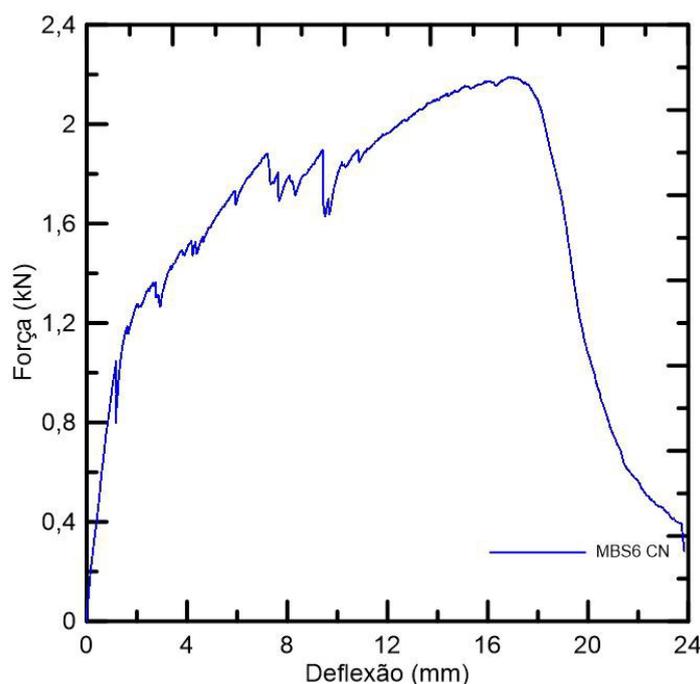


Figura 4.14 - Curva força *versus* deflexão da viga reforçada com tecido de vidro MBS6 CN.

Tabela 4.6- Resultados para Viga MBS6 CN

| Ensaio de Flexão | | | |
|----------------------------------|--|--|-------------------------------|
| Carga de Ruptura (kN) | Momento Máximo (kNm) | Primeira Fissura (kN) | Flecha Máxima (mm) |
| <i>2,19</i> | <i>0,82</i> | <i>1,05</i> | <i>23,84</i> |
| CID | | | |
| Número de fissuras | Abertura média de fissuras (mm) | Espaçamento médio entre fissuras (mm) | |
| <i>14</i> | <i>0,19</i> | <i>25,16</i> | |

**Figura 4.15 -** Modo de ruptura para Viga MBS6 CN.

A Figura 4.16 e a Tabela 4.6 trazem os resultados da análise feita por CID para a Viga MBS6 CN. O comportamento de múltipla fissuração continuou também para a viga que, dentre as vigas ensaiadas, apresentou menor abertura de fissuras dentro da zona de análise por CID. A abertura crítica fora dessa zona não pode ser medida pelo programa, no entanto, após a ruptura da peça, o ensaio foi parado e com o auxílio de uma régua de escala 1:100, foi possível medir a abertura média da fissura a partir da média de três pontos ao longo da fissura que levou a ruptura do elemento, que teve 11,24 mm de abertura média.

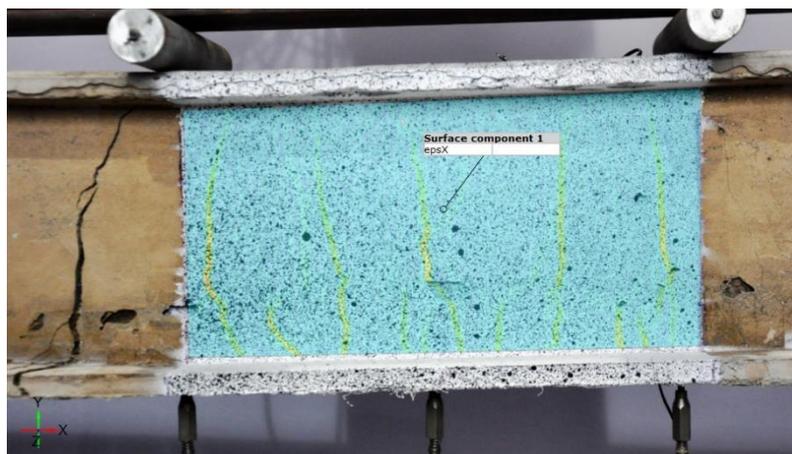


Figura 4.16 – Fissuras aparentes da Viga MBS6 CN.

4.4. Efeito do Envelhecimento Acelerado nos Materiais Compósitos e Perfis Estruturais

Como explicado na seção 3.5, as placas foram submetidas a um envelhecimento acelerado em câmara de névoa salina com concentração de 3,5% de NaCl a uma temperatura de 70°C. As amostras foram envelhecidas por um período de ± 1000 horas e submetidas ao ensaio de tração direta assim como as amostras da seção 3.6.

A Figura 4.17 e a Tabela 4.7 trazem a curva tensão *versus* deformação e os resultados das propriedades mecânicas obtidos através do ensaio de tração direta além das curvas das mesmas amostras ensaiadas em condições normais. Pode-se observar pela curva que as séries com apenas duas camadas de tecido de vidro (MAV2 e MBV2) tiveram apenas a contribuição da matriz para o esforço que a amostra foi submetida, pois logo após o surgimento da primeira fissura, a peça rompeu, o que leva a concluir que o tecido de fibra de vidro foi prejudicado pelas condições adversas bem como a interface entre a matriz e o tecido, como mencionado por Donnini [68]. Para essa série, a matriz MA se mostrou mais eficaz e resistente às intempéries em relação a matriz MB.

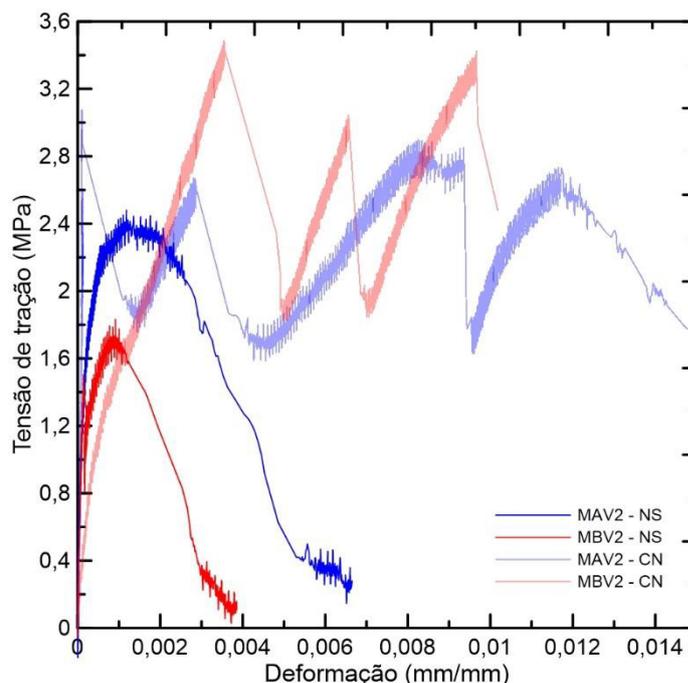


Figura 4.17 - Curvas tensão de tração *versus* deformação características dos compósitos das séries MAV2 - NS e MBV2 – NS

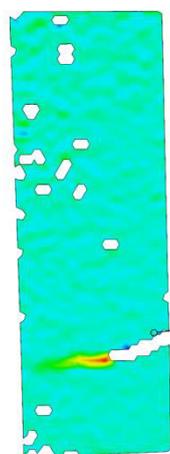
Nota-se que para as séries MAV2 e MBV2 pouco alteraram as resistências entre a tensão de primeira fissura e a tensão de ruptura, o que reforça o fato de que a fibra foi bastante degradada pela névoa salina. Realizando um comparativo entre as mesmas séries ensaiadas em condições normais, os valores da tensão de ruptura, deformação na ruptura e tensão de primeira fissura tiveram reduções de 20%, 54% e 28% para a série MAV2 e de 48%, 62% e 24% para a série MBV2, como pode ser notado através das curvas sombreadas. A Tabela 4.7 também mostra os valores obtidos com as análises feitas a partir da correlação de imagem digital, como também pode ser visto na Figura 4.18. Como dito anteriormente, as peças romperam a partir do surgimento da primeira fissura e pouco resistiram após o aparecimento desta.

Tabela 4.7 - Resultados obtidos nos ensaios de tração direta para as séries MAV2 - NS e MBV2 - NS.

| Amostra | Propriedades Mecânicas | | | CID | |
|---------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------------------------|
| | σ_{max} (MPa) | $\varepsilon_{\sigma,max}$ (mm/mm) | σ_{BOP} (MPa) | Número de fissuras | Espaçamento médio entre fissuras (mm) |
| MAV2 | 2,34 (0,138) | 0,0043 (0,002) | 1,64 (0,917) | 1 | 0 |
| MBV2 | 1,75 (0,156) | 0,0028 (0,003) | 1,60 (0,173) | 1 | 0 |

*σ_{max} – tensão de tração máxima; $\varepsilon_{\sigma,max}$ – deformação máxima correspondente a resistência à compressão;
 σ_{BOP} – tensão correspondente ao aparecimento da primeira fissura; Valores de desvio padrão entre parênteses.*

(a)



(b)



Figura 4.18 - O padrão de fissuração dos compósitos por meio de CID: (a) MAV2 - NS e (b) MBV2 – NS.

A Figura 4.19 mostra os resultados obtidos através dos ensaios de tração direta realizados nos compósitos reforçados com 6 camadas de tecido de fibra de vidro antes e após o envelhecimento. Como pode-se notar, o comportamento das curvas mostram falha nas condições de contorno dos ensaios ou um enfraquecimento da interface entre a matriz e o tecido, caracterizada pela ascensão da curva com queda repentina e nova ascensão com inclinação parecida com a curva anterior. Como as condições de contorno foram idênticas para todas as peças ensaiadas, é possível que o enfraquecimento da interface devido às condições adversas nas quais essas amostras foram submetidas tenha afetado diretamente na capacidade resistente das peças. Para a série MAV6 esse comportamento é mais nítido do que para a série MBV6. Comparando com a série anterior, é notório que, assim como nas condições normais de ensaio, a quantidade de reforço auxiliou na capacidade resistente das peças bem como na capacidade de deformação.

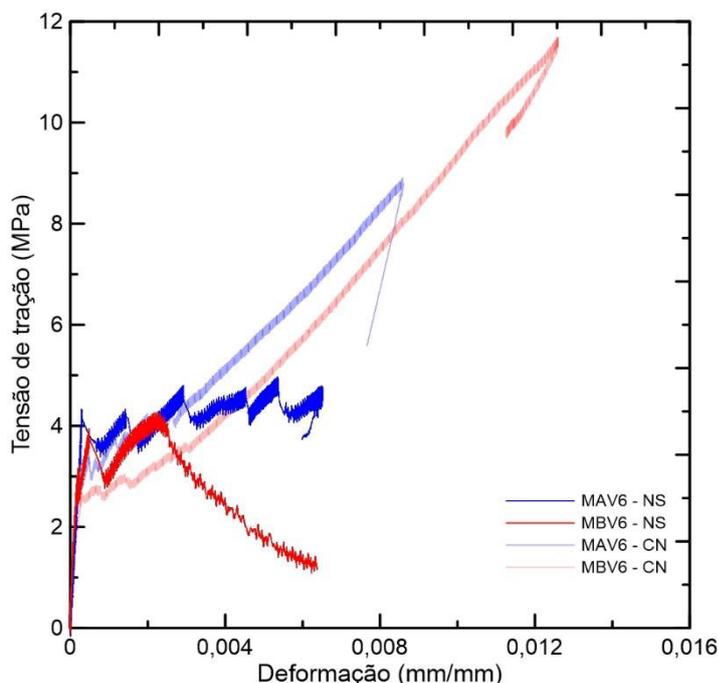


Figura 4.19 - Curvas tensão de tração *versus* deformação características dos compósitos das séries MAV6 - NS e MBV6 - NS.

É possível observar pela Tabela 4.8 que, diferentemente da série anterior, o tecido de fibra de vidro ainda conseguiu resistir após o aparecimento da primeira fissura devido à maior quantidade de reforço. No entanto, ainda é nítido o enfraquecimento da interface entre o tecido e matriz. A Tabela 4.8 também traz os valores obtidos a partir da correlação de imagem digital e vale salientar o número reduzido de fissuras para ambas as séries, que pode ser observado na Figura 4.20. Realizando um comparativo com as séries ensaiadas em condições normais, curvas sombreadas na Figura 4.19, é possível observar uma redução significativa em todos os parâmetros: para a série MAV6, as reduções foram de 44%, 24% e 37% para a tensão máxima, deformação na ruptura e tensão de primeira fissura. Para série MBV6, essas reduções foram de 63,5%, 49% e 3%, respectivamente. Vale ressaltar que as séries MAV2, MBV2, MAV6 e MBV6 não tiveram comportamento típico de um compósito têxtil, ou seja, com as 4 zonas bem definidas, levando a considerar que tanto a temperatura elevada quanto o contato com cloreto de sódio afetaram o comportamento mecânico das amostras.

Tabela 4.8 - Resultados obtidos nos ensaios de tração direta para as séries MAV6
- NS e MBV6 - NS

| Amostra | Propriedades Mecânicas | | | CID | |
|---------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------|-----------------------|--|
| | σ_{max} (MPa) | $\varepsilon_{\sigma,max}$ (mm/mm) | σ_{BOP} (MPa) | Número de fissuras | Espaçamento médio entre fissuras (mm) |
| MAV6 | 5,79 (0,727) | 0,017 (0,014) | 2,09 (0,771) | 3 ± 1 | 35,16 |
| MBV6 | 4,54 (0,484) | 0,006 (0,002) | 2,57 (0,498) | 2 ± 1 | 48,13 |

σ_{max} – tensão de tração máxima; $\varepsilon_{\sigma,max}$ – deformação máxima correspondente a resistência à compressão; σ_{BOP} – tensão correspondente ao aparecimento da primeira fissura; Valores de desvio padrão entre parênteses.

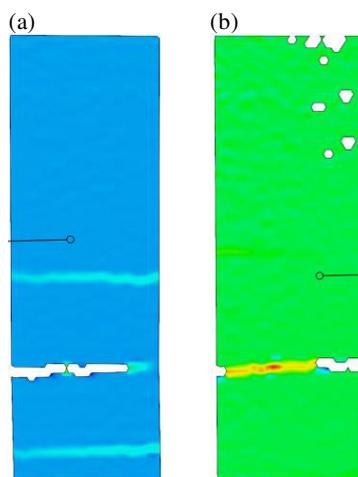


Figura 4.20 - O padrão de fissuração dos compósitos por meio de CID: (a) MAV6 – NS e (b) MBV6 – NS.

A Figura 4.21 traz os resultados dos ensaios de tração direta das séries MAS6 e MBS6, além das curvas das amostras ensaiadas em condições normais. Dentre as séries ensaiadas após o envelhecimento, as séries MAS6 e MBS6 são as que mais se assemelham com o comportamento comum para o concreto têxtil, apresentando parte linear, a zona de múltipla fissuração, a ação da fibra e por fim a ruptura da peça, não evidenciando um enfraquecimento da interface entre matriz e fibra, mas apenas uma diminuição na capacidade resistente do compósito em geral.

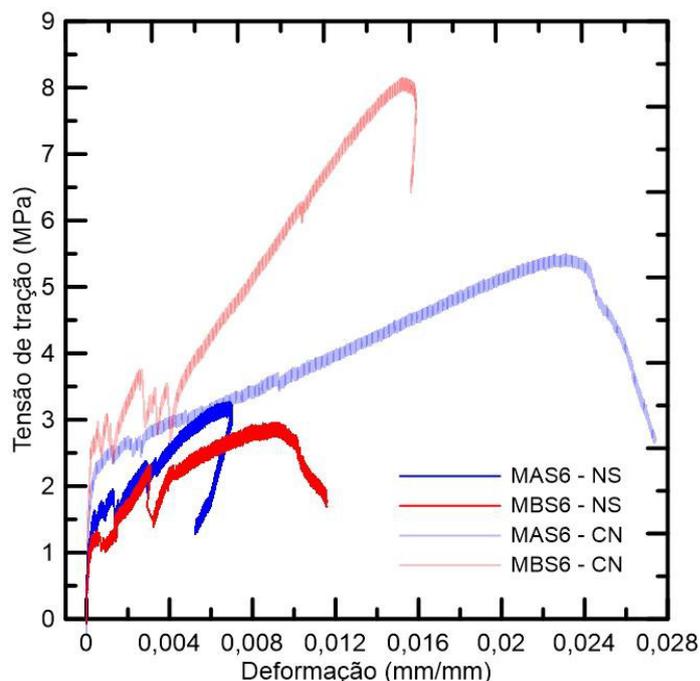


Figura 4.21 - Curvas tensão de tração *versus* deformação características dos compósitos das séries MAS6 – NS e MBS6 – NS.

A Tabela 4.9 mostra que as séries tiveram resultados parecidos entre si, ou seja, a matriz não influenciou diretamente nem na capacidade resistente do compósito nem na resistência da interface entre a fibra e a matriz. Comparando estas séries com as séries ensaiadas em condições normais, pode-se observar, como esperado, uma redução em todos os parâmetros mecânicos das amostras. A série MAS6 teve reduções de 40% na tensão de ruptura, 75% na capacidade de deformação e 37% na resistência de primeira fissura enquanto na série MBS6 esses valores chegaram a 64%, 27% e 52%. Essa redução pode ser justificada com o já relatado comportamento de inchamento de fibras naturais quando expostas a ambientes úmidos [51,79,75] atrelado com a temperatura elevada e a exposição ao cloreto de sódio. A Tabela 4.9 também mostra os resultados da correlação de imagem digital realizada durante o ensaio. Assim como as outras séries, observa-se um número reduzido de fissuras, como pode ser observado na Figura 4.22.

Tabela 4.9 - Resultados obtidos nos ensaios de tração direta para as séries MAV6
- NS e MBV6 - NS

| Amostra | Propriedades Mecânicas | | | CID | |
|---------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------|-----------------------|--|
| | σ_{max} (MPa) | $\varepsilon_{\sigma,max}$ (mm/mm) | σ_{BOP} (MPa) | Número de fissuras | Espaçamento médio entre fissuras (mm) |
| MAS6 | 3,14 (0,384) | 0,005 (0,003) | 1,76 (0,596) | 2 ± 1 | 52,09 |
| MBS6 | 2,91 (0,113) | 0,012 (0,005) | 1,29 (0,264) | 2 ± 1 | 74,02 |

σ_{max} – tensão de tração máxima; $\varepsilon_{\sigma,max}$ – deformação máxima correspondente a resistência à compressão; σ_{BOP} – tensão correspondente ao aparecimento da primeira fissura; Valores de desvio padrão entre parênteses.

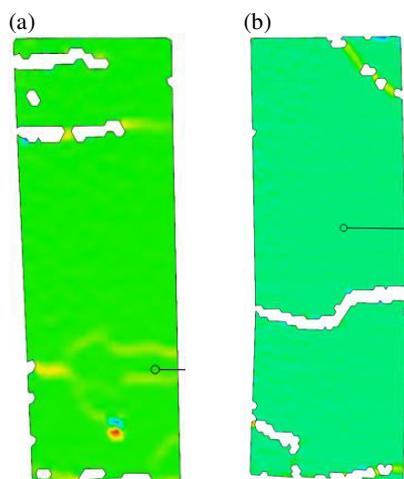


Figura 4.22 – O padrão de fissuração dos compósitos por meio de CID: (a) MAS6 – NS e (b) MBS6 – NS.

As vigas foram feitas em duas amostras para cada tipo para que uma peça de cada fosse submetida ao envelhecimento acelerado em câmara de névoa salina. Desta forma, a Figura 4.23 e a Tabela 4.10 trazem os resultados obtidos para a Viga MAV2 NS ensaiada após envelhecimento. Nota-se que, assim como as placas, o tecido de vidro que reforçava a Viga MAV2 NS foi danificado pelas condições adversas de armazenamento, tendo em vista os valores reduzidos de resistência e deflexão apresentados na curva força – deflexão. Mesmo com a proteção prévia apresentada pelo tecido não foi suficiente para manter suas propriedades mecânicas. A curva não se comportou como o esperado para um concreto têxtil. Observa-se um início de um comportamento de escorregamento entre o tecido e a matriz, que é interrompido pela ruptura brusca dos elementos estruturais. A viga rompeu por flexão. Todos os parâmetros mecânicos foram prejudicados e, se comparada com a

Viga MAV2 CN, curva pontilhada na Figura 4.23, essa viga teve redução de 42,5% na carga de ruptura da peça e 76% na flecha atingida.

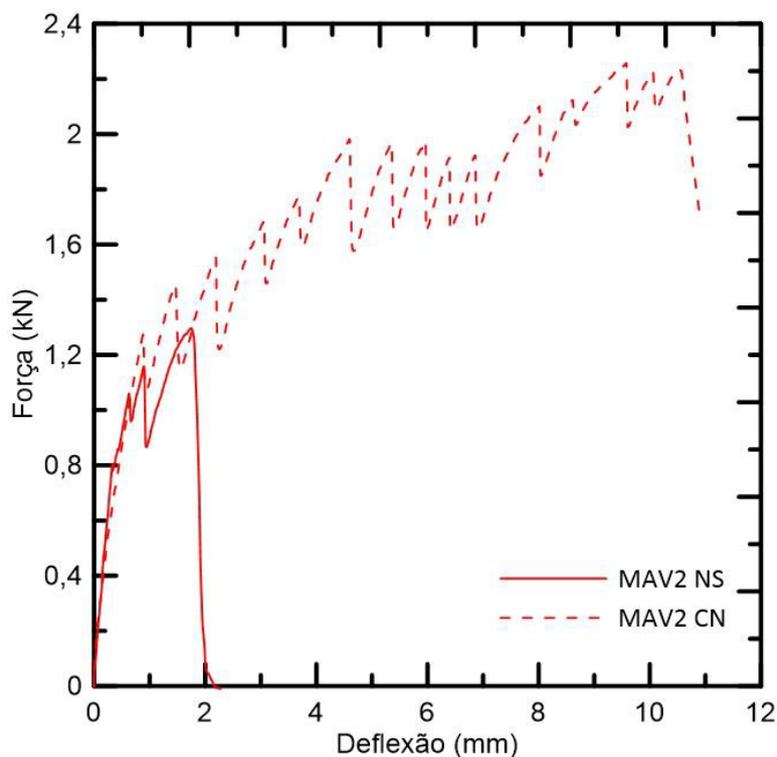


Figura 4.23 - Curva força *versus* deflexão da viga reforçada com tecido de vidro MAV2 NS submetida a câmara de nevoa salina.

Tabela 4.10- Resultados da Viga MAV2 NS.

| Ensaio de Flexão | | | |
|----------------------------------|--|--|-------------------------------|
| Carga de Ruptura (kN) | Momento Máximo (kNm) | Primeira Fissura (kN) | Flecha Máxima (mm) |
| <i>1,29</i> | <i>0,49</i> | <i>0,80</i> | <i>2,61</i> |
| CID | | | |
| Número de fissuras | Abertura média de fissuras (mm) | Espaçamento médio entre fissuras (mm) | |
| <i>1</i> | <i>0,85</i> | <i>-</i> | |

A Figura 4.24 e a Tabela 4.10 trazem por sua vez os resultados obtidos para Viga MAV2 NS a partir da análise feita através do CID. É possível notar o aparecimento de apenas uma fissura na peça, que levou a sua ruptura repentina, que indica uma má aderência entre a matriz e a fibra aliado com uma perda significativa da rigidez do reforço.

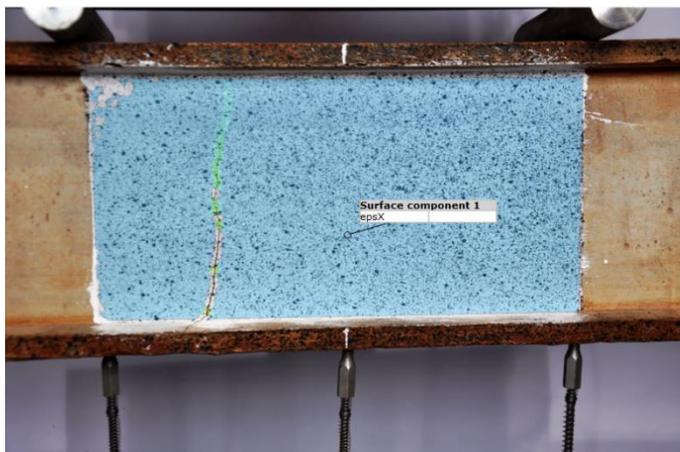


Figura 4.24 – Fissura única da Viga MAV2 NS.

Já a Figura 4.25 e Tabela 4.11 trazem os resultados obtidos a partir do ensaio de flexão realizado na Viga MAV6 NS. A curva mostra o mesmo comportamento da Viga MAV2 NS, mostrando uma perda de aderência do tecido com a matriz, que levaram a resultados similares ao exemplar anterior, mostrando que a taxa de reforço não foi determinante na resposta das vigas submetidas a envelhecimento em ambientes salino. Se comparada com a Viga MAV6 CN, curva pontilhada na Figura 4.25 , todos os parâmetros sofreram alterações negativas: houve uma redução de 65% na carga de ruptura da peça e de 93% na flecha atingida pela viga, mostrando que o reforço perdeu praticamente toda sua contribuição dentro do compósito. Tanto a viga MAV6 NS como a MAV2 NS romperam por flexão e de forma repentina, como visto na Figura 4.26, causada pela perda da capacidade resistente do reforço empregado.

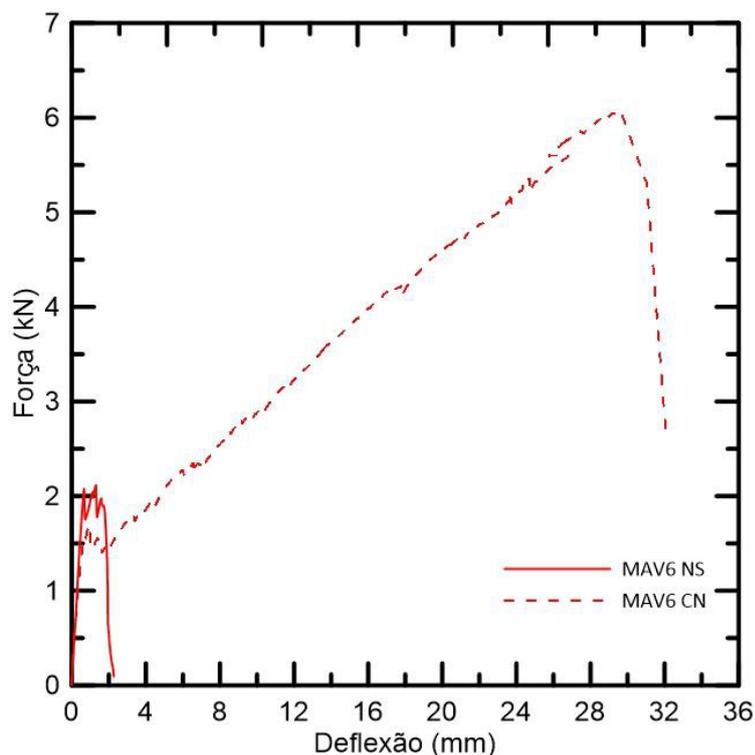


Figura 4.25 - Curva força *versus* deflexão da viga reforçada com tecido de vidro MAV6 NS submetida a câmara de nevoa salina.



Figura 4.26 – Modo de Ruptura das vigas MAV2 e MAV6.

Tabela 4.11 - Resultados da Viga MAV6 NS

| Ensaio de Flexão | | | |
|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| Carga de Ruptura (kN) | Momento Máximo (kNm) | Primeira Fissura (kN) | Flecha Máxima (mm) |
| 2,11 | 0,79 | 1,98 | 2,26 |
| CID | | | |
| Número de fissuras | Abertura média de fissuras (mm) | Espaçamento médio entre fissuras (mm) | |
| 1 | 0,49 | - | |

A Figura 4.27 e a Tabela 4.11 ilustram os resultados da análise feita por CID na Viga MAV6 NS . Assim como a Viga MAV2 NS , essa amostra apresentou apenas uma única fissura que levou a sua ruptura repentina, tal qual as amostras ensaiadas em condições normais. A ductilidade das peças foi diretamente

influenciada pelo condicionamento em ambiente salino, apresentando uma redução significativa também no número de fissuras aparentes.



Figura 4.27 – Fissura única da Viga MAV6 NS.

A Figura 4.28 traz uma imagem obtida através de microscópio de fibras de vidro retiradas das amostras ensaiadas: acima uma fibra pertencente a Viga MAV6 CN e abaixo uma fibra retirada da Viga MAV6 NS. É visível a degradação de todo o revestimento álcali resistente da fibra de vidro que passou por condições adversas, o que pode explicar tanto a sua fragilidade quanto o enfraquecimento da aderência entre fibra e matriz. A Figura 4.29 ilustra a interface entre fibra e matriz para a Viga MAV6 CN (a) e para Viga MAV6 NS (b). Também fica notória a degradação da fibra submetida ao ambiente salino bem como o desprendimento quase completo da matriz na fibra, diferentemente da viga ensaiada em condições normais, na qual percebe-se uma certa aderência da matriz na fibra.



Figura 4.28 – Fragmentos de fibras de vidro retiradas das vigas MAV6 CN (acima) e MAV6 NS (abaixo).

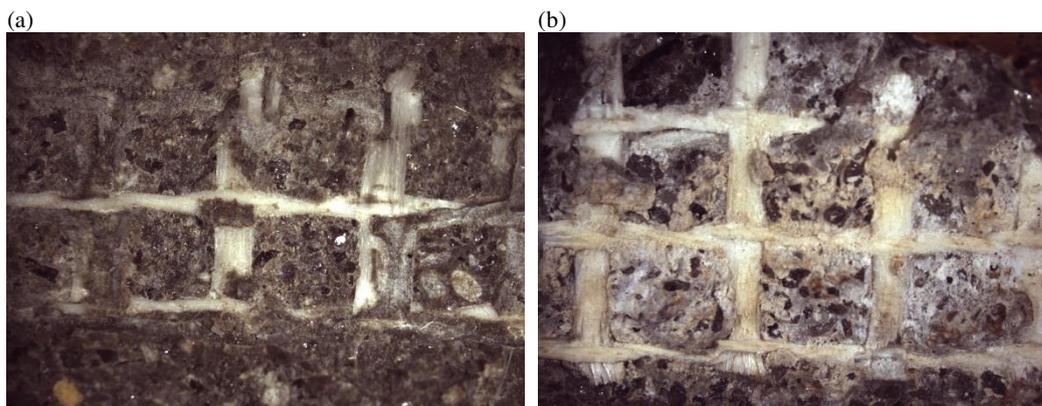


Figura 4.29 - Interface entre a matriz e o tecido de vidro da viga (a) MAV6 CN e (b) MAV6 NS.

A Figura 4.30 e a Tabela 4.12 trazem os resultados obtidos a partir dos ensaios realizadas na Viga MBS6 NS. Dentre as amostras ensaiadas, a Viga MBS6 NS foi a única que apresentou uma curva semelhante ao esperado para um concreto têxtil, ou seja, com as 4 zonas já conhecidas. Além disso, dentre as vigas que passaram por envelhecimento em ambiente salino, foi a que menos sofreu reduções se comparada com a mesma amostra ensaiada em condições normais, curva pontilhada na Figura 4.30: 20,5% na carga de ruptura e apenas 5,5% na flecha atingida. Vale ressaltar também que a viga foi a única entre as amostras envelhecidas que apresentou mais de uma fissura na zona de flexão pura e não apresentou ruptura repentina, sendo esta acontecendo através da abertura de uma fissura que surgiu na zona de flexão pura, como visto na Figura 4.31. Importante salientar que a fibra de sisal utilizada para o reforço dessa viga não passou por nenhum tipo de tratamento e que a matriz utilizada para a fabricação dessa viga tem baixo teor de hidróxido de cálcio que pode ter auxiliado na conservação das propriedades mecânicas na fibra mesmo após envelhecimento em ambiente salino.

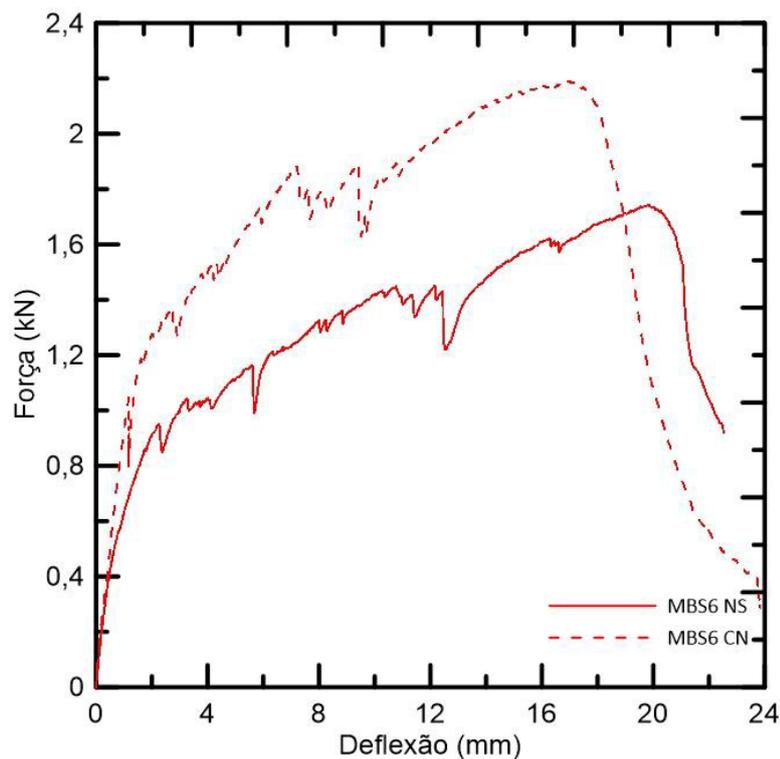


Figura 4.30 - Curva força *versus* deflexão da viga MBS6 NS.

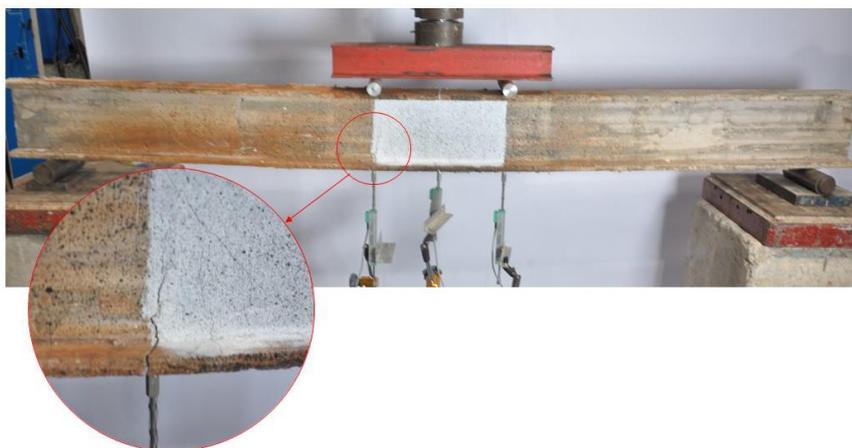


Figura 4.31 – Modo de ruptura da Viga MBS6 NS.

Tabela 4.12 - Propriedades mecânicas da Viga MBS6 NS

| Ensaio de Flexão | | | |
|----------------------------------|--|--|-------------------------------|
| Carga de Ruptura (kN) | Momento Máximo (kNm) | Primeira Fissura (kN) | Flecha Máxima (mm) |
| 1,74 | 0,65 | 0,94 | 22,52 |
| CID | | | |
| Número de fissuras | Abertura média de fissuras (mm) | Espaçamento médio entre fissuras (mm) | |
| 6 | 0,44 | 48,63 | |

A Figura 4.32 e a Tabela 4.12 trazem os resultados obtidos pela análise de CID da viga MBS6 NS. Como pode ser observado, o comportamento de múltipla fissuração, mesmo que em menor quantidade, está presente na viga mesmo após o armazenamento em ambiente salino.



Figura 4.32 – Fissuras aparentes da Viga MBS6 NS.

As Figuras 4.33 e 4.34 trazem, respectivamente, fibras retiradas das amostras e a interface entre a fibra e a matriz das Vigas MBS6. Do lado esquerdo das imagens é possível ver as amostras retiradas da Viga MBS6 em condições normais de ensaio e do lado direito da Viga MBS6 NS. Não é possível observar nenhuma alteração na fibra ou em sua interface. A escolha da matriz levou a uma proteção para as fibras de sisal, que não sofreram grandes alterações em sua estrutura.

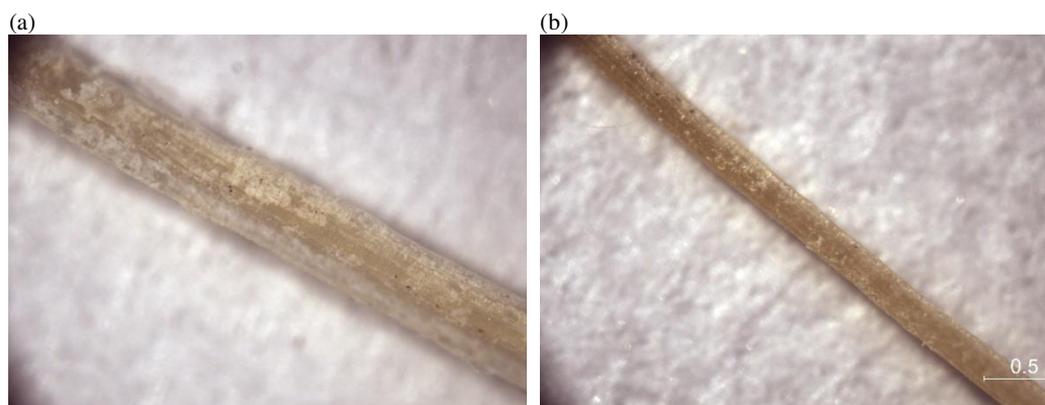


Figura 4.33 – Fibras retiradas das Vigas (a) MBS6 CN e (b) MBS6 NS

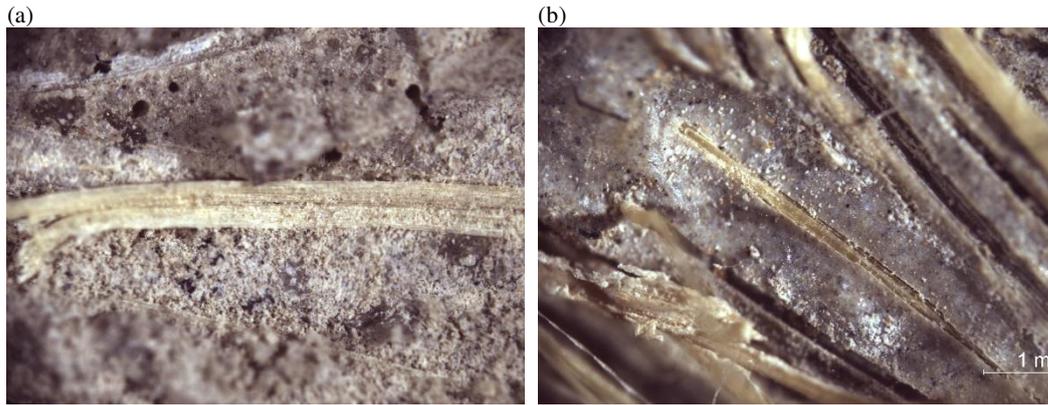


Figura 4.34 – Detalhe na interface das Vigas (a) MBS6 CN e (b) MBS6 NS

5. Conclusões e sugestões

5.1

Conclusões

Neste trabalho foi estudado o desempenho mecânico de concretos têxteis reforçados com tecido de fibra de vidro e tecido de fibra de sisal, tanto em compósitos em formato de placas quanto em vigas perfil I.

Ensaio de tração direta e flexão a 4 pontos foram realizados para a caracterização dos compósitos. As variáveis de estudo foram o tipo de matriz utilizada, o tipo de reforço e a taxa de reforço colocada em cada compósito.

Em condições normais de ensaio, tanto para as placas quanto para as vigas, os compósitos com 6 camadas de tecido de fibra de vidro fabricado com a matriz MB obtiveram o melhor desempenho dentre as amostras, com maior capacidade de carga e com a curva bem definida para os padrões do concreto têxtil, diferentemente dos compósitos reforçados com uma taxa menor de reforço de fibra de vidro que apresentaram um comportamento peculiar e um deslizamento entre o tecido e a matriz, o que leva a concluir que a quantidade de reforço influi diretamente na performance dos compósitos.

No entanto, tanto para as vigas quanto para as placas, quando submetidas ao envelhecimento acelerado em câmara de nevoa salina, o tecido de fibra de vidro, para todas as taxas de reforço estudadas, perdeu sua capacidade resistente e quase completamente sua aderência com a matriz, levando a ruptura abrupta das peças logo após o aparecimento da primeira fissura, chegando a reduções de carga de ruptura de cerca de 65%. Imagens de microscópio mostraram que, ao passar pelo envelhecimento acelerado, as fibras perderam completamente seu revestimento, o que afetou diretamente no seu desempenho dentro dos compósitos. Portanto, se não houver um tratamento prévio para esse tecido, não é possível utilizá-lo em meios agressivos.

Já os compósitos reforçados com fibra de sisal obtiveram comportamentos característicos para o concreto têxtil, com as 4 zonas bem definidas nas curvas obtidas pelos ensaios de tração direta e flexão a 4 pontos, embora a capacidade resistente dos compósitos seja pequena para uso estrutural. As amostras com tecido de fibra de sisal foram as únicas que, mesmo após o envelhecimento acelerado em câmara de névoa salina, mantiveram o comportamento semelhante àquelas não envelhecidas, mantendo também a ductilidade das vigas.

Vale ressaltar também que os elementos estruturais reforçados com tecido de fibra de sisal foram os que tiveram as menores reduções nos parâmetros mecânicos, obtendo uma redução de flecha de apenas 3% para os elementos estruturais.

Importante salientar o desempenho da matriz MB nos compósitos e vigas reforçados com tecido de fibra de vidro ensaiadas em condições normais e em vigas reforçadas com tecido de fibra de sisal nas duas condições de ensaio propostas que, por ter um baixo teor de hidróxido de cálcio, conseguiu conservar as fibras, mantendo a aderência e, por consequência, capacidade resistente e a ductilidade.

Por fim, com base nos resultados encontrados com esse estudo, avalia-se que não é possível utilizar os elementos fabricados para fins estruturais, visto que os valores de capacidade de carga e deformação foram baixos e sua performance foi prejudicada por ambientes de alta agressividade ambiental. Porém, para fins não estruturais, os compósitos, com destaque para os reforçados com fibra de sisal e fibra de vidro em condições normais, desempenham um papel satisfatório.

5.2 Sugestões para futuros trabalhos

A partir das conclusões obtidas nesta pesquisa, pode-se sugerir a realização de outras análises experimentais, para justificar e analisar efeitos não conclusivos neste trabalho, como por exemplo:

- Envelhecimento separado para as matrizes e para o tecido a fim de avaliar a degradação do material separado;
- Análise químicas aprofundadas para analisar os mecanismos de degradação dos elementos;
- Propor um revestimento para as fibras naturais com alguma resina que enrijeça o tecido e torne mais fácil a manipulação e moldagem dos elementos;

- Propor um tratamento para as fibras naturais, sendo esse químico ou físico, a fim de aumentar sua rigidez e, conseqüentemente, sua performance como reforço de compósitos;

- Propor um *coating* com materiais que confirmam rugosidade ao tecido de fibra de vidro e, conseqüentemente aderência entre o tecido e a matriz, como areia, e um tratamento com algum tipo de resina, como epóxi, para aumentar a rigidez e a performance do tecido.

Referências Bibliográficas

[1] DOLAN, C. W.; NANNI, A. **Status of fiber-reinforced plastic reinforcement development and cement based research needs** *Advanced Cement Based Materials*, May 1994. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/1065735594900108>>. Acesso em: 7 oct. 2020

[2] NANNI, A.; HENNEKE, M. J.; OKAMOTO, T. Tensile properties of hybrid rods for concrete reinforcement. *Construction and Building Materials*, v. 8, n. 1, p. 27–34, Jan. 1994.

[3] NASER, M. Z.; HAWILEH, R. A.; ABDALLA, J. A. **Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review** *Engineering Structures* Elsevier Ltd, , 1 Nov. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029618310113>>. Acesso em: 30 sep. 2020

[4] VISHWAKARMA, V.; UTHAMAN, S. Environmental impact of sustainable green concrete. In: **Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials**. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 241–255.

[5] CAMPELLO, E. D. F. **Comportamento em Fadiga de Compósitos Cimentícios Reforçados por Polpa de Bambu**. 2006. Pontifícia Universidade Católica do rio de Janeiro. 2006.

[6] PEREIRA, E. B.; FISCHER, G.; BARROS, J. A. O. Effect of hybrid fiber reinforcement on the cracking process in fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 10, p. 1114–1123, Nov. 2012.

[7] JANSSEN, J. J. A. et al. **Bamboo as an engineering material Citation for published version (APA)**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.tue.nl/taverne>. Acesso em: 7 oct. 2020.

[8] FUJIYAMA, R. T. **Argamassa de Cimento Reforçada por Fibras de Sisal: Caracterização Mecânica e Microestrutural**. 1997. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 1997.

[9] SALES, A. T. C. **Retração, Fluência e Fratura em compósitos Cimentícios reforçados com polpa de Bambu**. 2006. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2006.

[10] BALLA, V. K. et al. **Additive manufacturing of natural fiber reinforced polymer composites: Processing and prospects** *Composites Part B: Engineering* Elsevier Ltd, , 1 Oct. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836819310017>>. Acesso em: 8 oct. 2020

[11] SOOD, M.; DWIVEDI, G. **Effect of fiber treatment on flexural properties of natural fiber reinforced composites: A review** *Egyptian Journal of Petroleum* Egyptian Petroleum Research Institute, , 1 Dec. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1110062117301939>>. Acesso em: 8 oct. 2020

[12] MARCOS-MESON, V. et al. **Durability of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) exposed to acid attack – A literature review** *Construction and Building Materials* Elsevier Ltd, , 10 Mar. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061818330320>>. Acesso em: 9 oct. 2020

[13] KATZER, J. Steel Fibers and Steel Fiber Reinforced Concrete in Civil Engineering. **The Pacific Journal of Science and Technology**, v. 7, n. 1, p. 53–58, 2006.

[14] CEB-FIP. Model Code for Concrete Structures. **Document Competence Center Siegmars Kästle**, Germany, 2010.

[15] BS EN 14651. Test method for metallic fibred concrete — Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). **British Standards Institute**, 2005.

[16] ACI COMMITTEE 318. **Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-11)**. [s.l: s.n.].

[17] LEE, S. C.; CHO, J. Y.; VECCHIO, F. J. Analysis of steel fiber-reinforced concrete elements subjected to shear. **ACI Structural Journal**, v. 113, n. 2, p. 275–285, 2016.

[18] MARCOS-MESON, V. et al. **Corrosion resistance of steel fibre reinforced concrete - A literature review** *Cement and Concrete Research* Elsevier Ltd, , 1 Jan. 2018. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884616309449>>. Acesso em: 10 oct. 2020

[19] BALOUCH, S. U.; FORTH, J. P.; GRANJU, J. L. Surface corrosion of steel fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 3, p. 410–414, Mar. 2010.

[20] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Propriedades e materiais. **IBRACON**, 2014.

[21] BOLAT, H. et al. The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 61, p. 191–198, May 2014.

[22] HÄUSSLER-COMBE, U.; HARTIG, J. Bond and failure mechanisms of textile reinforced concrete (TRC) under uniaxial tensile loading. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 4, p. 279–289, Apr. 2007.

[23] GRIES, T. et al. Manufacturing of Textiles for Civil Engineering Applications. In: **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. [s.l.] Elsevier Inc., 2016. p. 3–24.

[24] NAAMAN, A. E. **TEXTILE REINFORCED CEMENT COMPOSITES: COMPETITIVE STATUS AND RESEARCH DIRECTIONS** International RILEM Conference on Material Science-MATSCI. [s.l.: s.n.].

[25] SCHEERER, S.; SCHLADITZ, F.; CURBACH, M. **TEXTILE REINFORCED CONCRETE-FROM THE IDEA TO A HIGH PERFORMANCE MATERIAL**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.schoeck.de/de/produktloesungen/typen-zubehoer-101>>. Acesso em: 9 nov. 2020.

[26] BRÜCKNER, A.; ORTLEPP, R.; CURBACH, M. Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 39, n. 8, p. 741–748, 2006.

[27] MOBASHER, B. **Mechanics of fiber and textile reinforced cement composites**. [s.l.: s.n.].

[28] HEGGER, J. et al. Load-bearing behaviour and simulation of textile reinforced concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 39, n. 8, p. 765–776, 19 Oct. 2006.

[29] WILLIAMS, G.; AL-MAHAIDI, R.; KALFAT, R. **The west gate**

bridge: Strengthening of a 20 TH century bridge for 21 ST century loading.

American Concrete Institute, ACI Special Publication. **Anais...**2011

[30] REINHARDT, H. W.; KRÜGER, M.; GROSSE, C. U. Concrete prestressed with textile fabric. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 3, p. 231–239, 1 Nov. 2003.

[31] HEGGER, J.; VOSS, S. Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. **Engineering Structures**, v. 30, n. 7, p. 2050–2056, Jul. 2008.

[32] BRAMESHUBER, W. (ED.). **Textile Reinforced Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 201-TRC**. [s.l: s.n.].

[33] ESMAEILI, J. et al. Experimental and analytical investigation on strengthening of heat damaged concrete by textile reinforced concrete (TRC). **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 19, n. 4, p. 1468–1483, 1 Aug. 2019.

[34] NAHUM, L.; PELED, A.; GAL, E. The flexural performance of structural concrete beams reinforced with carbon textile fabrics. **Composite Structures**, v. 239, p. 111917, 1 May 2020.

[35] FIDELIS, M. E. A. et al. The effect of accelerated aging on the interface of jute textile reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 74, p. 7–15, 1 Nov. 2016.

[36] HEGGER, J.; WILL, N. Textile-Reinforced Concrete: Design Models. In: **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. [s.l.] Elsevier Inc., 2016. p. 189–2047.

[37] PELED, A.; BENTUR, A. Geometrical characteristics and efficiency of textile fabrics for reinforcing cement composites. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 5, p. 781–790, May 2000.

[38] TRIANTAFILLOU, T. C. **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. [s.l.] Elsevier Inc., 2016.

[39] MOBASHER, B. Textile Fiber Composites: Testing and Mechanical Behavior. In: **Textile Fibre Composites in Civil Engineering**. [s.l.] Elsevier Inc., 2016. p. 101–150.

[40] HERAVI, A. A. et al. **Mechanical characterization of textile reinforced concrete (TRC) subject to dynamic tensile loading Textile Reinforced Concrete View project Enhancement of fatigue resistance of strain-**

hardening cement-based composites by means of experimental-virtual multiscale material design View project Mechanical characterization of textile reinforced concrete (TRC) subject to dynamic tensile loading. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/335978573>>. Acesso em: 9 nov. 2020.

[41] LI, Y. et al. Experimental and Numerical Methods for Characterization of The Tensile Behavior of Textile Reinforced Concrete. [s.d.].

[42] DVORKIN, D.; PELED, A. Effect of reinforcement with carbon fabrics impregnated with nanoparticles on the tensile behavior of cement-based composites. **Cement and Concrete Research**, v. 85, p. 28–38, 1 Jul. 2016.

[43] KIM, H.-S. et al. Tensile Properties of Carbon Fiber-Textile Reinforced Mortar (TRM) Characterized by Different Anchorage Methods. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 12, p. 73, 2018.

[44] ARBOLEDA, D. et al. Testing Procedures for the Uniaxial Tensile Characterization of Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composites. **Journal of Composites for Construction**, v. 20, n. 3, p. 04015063, Jun. 2016.

[45] KAMANI, R.; KAMALI DOLATABADI, M.; JEDDI, A. A. A. Flexural design of textile-reinforced concrete (TRC) using warp-knitted fabric with improving fiber performance index (FPI). **Journal of the Textile Institute**, v. 109, n. 4, p. 492–500, 3 Apr. 2018.

[46] LIOR, N.; EREZ, G.; ALVA, P. Tensile behavior of fabric-cement-based composites reinforced with non-continuous load bearing yarns. **Construction and Building Materials**, v. 236, p. 117432, 10 Mar. 2020.

[47] DU, Y. et al. Flexural behavior of basalt textile-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 183, p. 7–21, 20 Sep. 2018.

[48] YIN, S. P.; XU, S. L.; WANG, F. Investigation on the flexural behavior of concrete members reinforced with epoxy resin-impregnated textiles. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 48, n. 1–2, p. 153–166, 8 Jan. 2015.

[49] ZANI, G. et al. Bending behavior of cement-based multi-layered roof elements. **Engineering Structures**, v. 190, p. 101–115, 1 Jul. 2019.

[50] SEN, T.; JAGANNATHA REDDY, H. N. Strengthening of RC beams in flexure using natural jute fibre textile reinforced composite system and its comparative study with CFRP and GFRP strengthening systems. **International**

Journal of Sustainable Built Environment, v. 2, n. 1, p. 41–55, Jun. 2013.

[51] BOTELHO GOLIATH, K.; DANIEL, D. C.; A. SILVA, F. DE. Flexural behavior of carbon-textile-reinforced concrete I-section beams. **Composite Structures**, v. 260, p. 113540, 15 Mar. 2021.

[52] MESSIRY, M. EL; EL-TARFAWY, S.; DEEB, R. EL. Study pultruded Jute fabric effect on the cementitious thin composites mechanical properties with low fiber volume fraction. **Alexandria Engineering Journal**, v. 56, n. 4, p. 415–421, 1 Dec. 2017.

[53] TARFAWY SE, M. M. Mechanical Performance of Cementitious Composites Reinforced with Pultruded Jute/Polymeric Matrix Fabric. **Journal of Material Science & Engineering**, v. 04, n. 04, 2015.

[54] MESSIRY, M. EL; FADEL, N. Tailoring the Mechanical Properties of Jute Woven/Cement Composite for Innovation in the Architectural Constructions. **Journal of Natural Fibers**, p. 1–13, 5 Dec. 2019.

[55] FIDELIS, M. E. A.; ANDRADE SILVA, F. DE; FILHO, R. D. T. **The influence of fiber treatment on the mechanical behavior of jute textile reinforced concrete**. Key Engineering Materials. **Anais...** Trans Tech Publications Ltd, 2014

[56] TEIXEIRA, F. P. **Mechanical Behavior of Natural Fiber Cement Based Composites for Structural Applications Felipe Pinheiro Teixeira Mechanical Behavior of Natural Fiber Cement Based Composites for Structural Applications**. 2020. 118 f. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC- Rio. 2020.

[57] LIU, S. et al. Pullout behaviors of single yarn and textile in cement matrix at elevated temperatures with varying loading speeds. **Composites Part B: Engineering**, v. 199, p. 108251, 15 Oct. 2020.

[58] JIANG, J. et al. Bond behavior of basalt textile meshes in ultra-high ductility cementitious composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 174, p. 107022, 1 Oct. 2019.

[59] SAIDI, M.; GABOR, A. Experimental analysis and analytical modelling of the textile/matrix interface shear stress in textile reinforced cementitious matrix composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 135, p. 105961, 1 Aug. 2020.

[60] DALALBASHI, A.; GHIASSI, B.; OLIVEIRA, D. V. Textile-to-mortar

bond behaviour in lime-based textile reinforced mortars. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116682, 10 Dec. 2019.

[61] CAGGEGI, C.; SCIUTO, D.; CUOMO, M. Experimental study on effective bond length of basalt textile reinforced mortar strengthening system: Contributions of digital image correlation. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 129, p. 119–127, 1 Dec. 2018.

[62] FIDELIS, M. E. A. et al. Interface characteristics of jute fiber systems in a cementitious matrix. **Cement and Concrete Research**, v. 116, p. 252–265, 1 Feb. 2019.

[63] MUMENYA, S. W.; TAIT, R. B.; ALEXANDER, M. G. Mechanical behaviour of Textile Concrete under accelerated ageing conditions. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 580–588, Sep. 2010.

[64] YIN, S. et al. Mechanical properties of textile reinforced concrete under chloride wet-dry and freeze-thaw cycle environments. **Cement and Concrete Composites**, v. 96, p. 118–127, 1 Feb. 2019.

[65] NOBILI, A. Durability assessment of impregnated Glass Fabric Reinforced Cementitious Matrix (GFRCM) composites in the alkaline and saline environments. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 465–471, 15 Feb. 2016.

[66] NOBILI, A.; SIGNORINI, C. On the effect of curing time and environmental exposure on impregnated Carbon Fabric Reinforced Cementitious Matrix (CFRCM) composite with design considerations. **Composites Part B: Engineering**, v. 112, p. 300–313, 1 Mar. 2017.

[67] DONNINI, J. Durability of glass FRCM systems: Effects of different environments on mechanical properties. **Composites Part B: Engineering**, v. 174, p. 107047, 1 Oct. 2019.

[68] DONNINI, J.; BOMPADRE, F.; CORINALDESI, V. Tensile Behavior of a Glass FRCM System after Different Environmental Exposures. **Processes**, v. 8, n. 9, p. 1074, 1 Sep. 2020.

[69] SIGNORINI, C.; NOBILI, A.; FALOPE, F. O. Mechanical performance and crack pattern analysis of aged Carbon Fabric Cementitious Matrix (CFRCM) composites. **Composite Structures**, v. 202, p. 1114–1120, 15 Oct. 2018.

[70] BELLINI, A. et al. Environmental durability of FRCM strengthening systems and comparison with dry fabrics. In: **Brick and Block Masonry - From**

Historical to Sustainable Masonry. [s.l.] CRC Press, 2020. p. 370–378.

[71] TOLEDO FILHO, R. D. et al. Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 6, p. 2409–2420, Jun. 2009.

[72] TEIXEIRA, F. P.; ANDRADE SILVA, F. DE. On the use of natural curauá reinforced cement based composites for structural applications. **Cement and Concrete Composites**, v. 114, p. 103775, 1 Nov. 2020.

[73] CABINETS, M. et al. Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates 1. v. i, n. C, p. 1–7, 2010.

[74] ASTM C230. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement 1. **Annual Book of ASTM Standards**, p. 4–9, 2010.

[75] SILVA, F. DE A.; MOBASHER, B.; FILHO, R. D. T. Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 10, p. 721–730, Nov. 2009.

[76] DE, F. et al. Physical and mechanical properties of durable sisal fiber-cement composites. 2009.

[77] CASTOLDI, R. DE S.; SOUZA, L. M. S. DE; ANDRADE SILVA, F. DE. Comparative study on the mechanical behavior and durability of polypropylene and sisal fiber reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 617–628, 2019.

[78] **Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers.** Disponível em: <<https://www.astm.org/c1557-20.html>>. Acesso em: 8 dec. 2021.

[79] LI, Y.; MAI, Y.; YE, L. Sisal fibre and its composites : a review of recent developments IM PA US AS DO ME US EX ON AS. **Composites Science and Technology**, v. 60, n. 2000, p. 2037–2055, 2000.

[80] TOLÊDO FILHO, R. D. et al. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 2, p. 127–143, 1 Apr. 2000.

[81] BRUCK, H. A. et al. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction. **Experimental Mechanics**, v. 29, n. 3, p. 261–267, Sep. 1989.

[82] YAO, Y. et al. Tension stiffening in textile-reinforced concrete under high speed tensile loads. **Cement and Concrete Composites**, v. 64, p. 49–61, 1

Nov. 2015.

[83] TOLEDO FILHO, R. D. et al. Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 6, p. 2409–2420, Jun. 2009.

[84] PICKERING, K. L.; EFENDY, M. G. A.; LE, T. M. **A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance** *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Elsevier Ltd, , 1 Apr. 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X15003115>>. Acesso em: 30 sep. 2020