



Iranildo Barbosa da Silva Júnior

**Propriedades mecânicas e fluência de compósitos
cimentícios têxteis reforçados com fibras de sisal**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Flávio de Andrade Silva
Coorientadora: Dr^a. Lourdes Maria Silva de Souza



Iranildo Barbosa da Silva Júnior

**Propriedades mecânicas e fluência de compósitos
cimentícios têxteis reforçados com fibras de sisal**

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

Prof. Flávio de Andrade Silva

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

Dr^a. Lourdes Maria Silva de Souza

Coorientadora

Instituto Tecgraf – PUC-Rio

Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Jose Roberto Moraes d'Almeida

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 28 de julho de 2020

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

Iranildo Barbosa da Silva Júnior

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual do Maranhão – UEMA – em 2017. Principais áreas de interesse: Materiais compósitos, propriedades mecânicas, fibras naturais, Fluência, Retração.

Ficha Catalográfica

Silva Júnior, Iranildo Barbosa da

Propriedades mecânicas e fluência de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de sisal / Iranildo Barbosa da Silva Júnior ; orientador: Flávio de Andrade Silva ; coorientadora: Lourdes Maria Silva de Souza. – 2020.

148 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2020.
Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Compósitos cimentícios. 3. Propriedades mecânicas. 4. Fibras naturais. 5. Sisal. 6. Fluência. I. Silva, Flávio de Andrade. II. Souza, Lourdes Maria Silva de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

A Deus, agradeço por ser meu guia e por todas as bênçãos concedidas a mim.

Aos meus orientadores, Flávio de Andrade Silva e Lourdes Maria Silva de Souza, pelos quais tenho grande admiração e respeito. Sou muito grato pela oportunidade, aprendizado, pela paciência e por todo conhecimento compartilhado. Pelo incentivo à pesquisa. Por todas as sugestões e soluções. A eles, minha sincera gratidão.

A minha família por todo o suporte que recebi, nas tomadas de decisões, nos momentos difíceis. Durante todo o mestrado, obstáculos surgiram, dificuldades foram enfrentadas e trabalhos foram realizados através de toda a força que me deram. Também a minha noiva Juliana Fernanda Coelho Couto, agradeço o apoio na realização desse sonho e por estar ao meu lado em todos os momentos.

Agradeço todos funcionários do Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio, por todo auxílio prestado na realização dos meus ensaios. Meu profundo agradecimento ao técnico Euclides Domingues de Moura Neto, pela paciência e disponibilidade para operação e instrumentação dos ensaios realizados ao longo deste trabalho.

A todos os amigos que fiz na PUC-Rio que levarei para a vida, em especial meus amigos Alessandra, Douglas, Filipe, Guilherme, Júlio, Nayara, Matheus, Osmar, Patrícia, Rodrigo, Ronald, Verissa e William. Por fim, agradeço a todos os demais colegas da PUC-Rio e especialmente aos meus colegas de laboratório, professores, técnicos e funcionários que me deram suporte até conclusão deste trabalho.

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

Resumo

Silva Junior, Iranildo Barbosa da; Silva, Flávio de Andrade (Orientador); Souza, Lourdes Maria Silva de (Co-Orientador). **Propriedades mecânicas e fluência de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de sisal.** Rio de Janeiro, 2020. 148p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O desenvolvimento, caracterização mecânica e fluência de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibra de sisal foram realizados neste trabalho. Os compósitos foram fabricados utilizando uma matriz com baixo teor de hidróxido de cálcio, obtida pela substituição parcial do cimento por cinza volante e metacaulim. Foram desenvolvidos três tipos de compósitos, cada um com três ou cinco camadas de tecido unidirecional de sisal. Os compósitos com três camadas foram reforçados variando a condição das fibras em saturadas e com umidade natural. O comportamento mecânico foi avaliado por meio de ensaios de tração direta e flexão a quatro pontos. Estudaram-se os mecanismos de fissuração por meio de fotografias obtidas ao longo dos ensaios, além de análises por correlação digital de imagens – DIC. Todos os compósitos apresentaram comportamento *strain/deflection hardening* com formação de múltiplas fissuras. Ensaios de fluência à tração e à flexão foram realizados nos compósitos pré-fissurados a fim de estudar as respostas dependentes do tempo. As amostras reforçadas com fibras saturadas apresentaram deformações superiores na tração devido às propriedades da interface fibra-matriz e níveis de deflexão inferiores, além da diminuição da tensão máxima resistida e redução da capacidade de deflexão/deformação. A evolução das fissuras foi monitorada durante todo o ensaio de fluência com o auxílio de um microscópio estereoscópico. Para uma melhor compreensão do mecanismo de fluência dos compósitos, foram realizados ensaios de tração de uma única fibra sob carga sustentada. Além disso, ensaios de fluência à compressão e retração da matriz com diferentes níveis de substituição do cimento por metacaulim foram realizados para entender o seu efeito ao longo do tempo.

Palavras-chave

Compósitos cimentícios; Propriedades mecânicas; Fibras naturais; Sisal; Fluência.

Abstract

Silva Junior, Iranildo Barbosa da; Silva, Flávio de Andrade (Advisor); Souza, Lourdes Maria Silva de (Co-Advisor). **Mechanical properties and creep of textile cementitious composites reinforced with sisal fibers.** Rio de Janeiro, 2020. 148p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the present work, the development, mechanical characterization and creep of textile reinforced cementitious composites reinforced with sisal fiber were investigated. The composites were manufactured using a matrix with a low calcium hydroxide content, obtained by partially replacing the cement by fly ash and metakaolin. Three types of composites were developed, each with three or five layers of unidirectional sisal fabric. The composites with three layers were reinforced varying the condition of the fibers in saturated and with natural humidity. The mechanical behavior was evaluated through direct tension and four-point flexural tests. Cracking mechanisms were studied through photographs obtained during the tests, as well as analyzes by digital image correlation - DIC. All composites presented strain/deflection hardening behavior with formation of multiple cracks. Tensile and flexural creep tests were performed on pre-cracked composites in order to study time-dependent responses. The samples reinforced with saturated fibers showed higher strain in tension due to the properties of the fiber-matrix interface and lower deflection levels, in addition to the reduction of the ultimate stress and deflection/deformation capacity. The evolution of cracks was monitored throughout the creep test with a stereoscopic microscope. For a better understanding of creep mechanism of the composites, tensile tests of a single fiber were carried out under sustained load at different levels of loading. In addition, compression creep and shrinkage tests of the matrix with different levels of cement replacement with metakaolin were performed to understand its effect over time.

Keywords

Cementitious composites; mechanical properties; natural fibers; sisal; Creep.

Sumário

1	Introdução	18
1.1	Motivação	19
1.2	Objetivos	20
1.3	Organização da dissertação	20
2	Revisão Bibliográfica	22
2.1	Fibras naturais	22
2.1.1	Estrutura morfológica e composição química.	22
2.1.2	Propriedades físicas e mecânicas	26
2.1.3	Compósitos cimentícios reforçados com fibras de sisal	28
2.2	Comportamento dependente do tempo de materiais cimentícios	35
2.2.1	Retração	35
2.2.2	Fluência	36
2.2.3	Fatores que influenciam a fluência	39
2.3	Comportamento dependente do tempo de compósitos reforçados com fibras naturais	45
3	Desenvolvimento e Caracterização dos Materiais	47
3.1	Introdução	47
3.2	Programa experimental	47
3.2.1	Materiais e dosagem	47
3.2.2	Procedimento de mistura	51
3.2.3	Propriedades da matriz no estado fresco	52
3.2.4	Propriedades da matriz no estado endurecido	53
3.2.5	Fibra de sisal	54
3.3	Resultados e discussão	59
3.3.1	Resultados do ensaio de espalhamento	59
3.3.2	Resultados do ensaio de compressão uniaxial	60
3.3.3	Resultados do ensaio de tração na fibra	61
3.4	Conclusão	63
4	Desenvolvimento e caracterização mecânica dos compósitos	65

4.1	Introdução	65
4.2	Procedimento experimental	65
4.2.1	Fabricação dos compósitos	65
4.2.2	Comportamento mecânico	67
4.3	Resultados e discussões	70
4.4	Resultados dos ensaios de flexão	70
4.5	Resultados dos ensaios de tração	74
4.6	Conclusão	84
5	Comportamento dependente do tempo	86
5.1	Introdução	86
5.2	Programa experimental	86
5.2.1	Fluência da fibra	88
5.2.2	Retração por secagem	90
5.2.3	Absorção e índice de vazios	91
5.2.4	Fluência na compressão	91
5.2.5	Fluência à flexão	93
5.2.6	Fluência à tração	97
5.3	Resultados e discussões	101
5.3.1	Resultados dos ensaios de fluência da fibra	101
5.3.2	Resultados dos ensaios de retração por secagem	104
5.3.1	Resultados do ensaio de absorção e índice de vazios	109
5.3.2	Resultados dos ensaios de fluência à compressão	110
5.3.3	Resultados dos ensaios da fluência à flexão	115
5.3.4	Resultados dos ensaios da fluência à tração	124
5.4	Conclusão	132
6	Conclusões e trabalhos futuros	134
6.1	Conclusões	134
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	136
7	Referências	137

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Estudos abordados neste trabalho.....	21
Figura 2.1 - Exemplos de fibras vegetais usadas em compósitos na construção, adaptado de [29].....	23
Figura 2.2 - Seção transversal de um feixe de fibras, adaptado de [31]. .	25
Figura 2.3 - Camadas de uma fibra natural de sisal, adaptado de [30,33,34].	26
Figura 2.4 - Diferentes tipos de fibras de sisal: (a) fibra estrutural em formato de ferradura e (b) arco, adaptado de [33]......	26
Figura 2.5 - Distribuição da tensão de cisalhamento ao longo da interface imediatamente após a fissuração: (a) descolamento antes da fissura; (b) sem descolamento antes da fissura [14].	29
Figura 2.6 - Representação esquemática de compósito reforçado com fibras: (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínua e alinhada, e (c) descontínua e aleatoriamente orientadas, adaptado de [15].	30
Figura 2.7 - Tipos de reforços para compósitos conforme seu comprimento [14].....	31
Figura 2.8 - Comportamento mecânico típico de compósitos que apresentam <i>strain-hardening</i> , adaptado de [42]......	32
Figura 2.9 - Descrição esquemática do comportamento <i>Strain softening</i> , <i>strain hardening</i> (na tração) e <i>deflection hardening</i> (na flexão) de compósitos cimentícios reforçados com fibras, adaptado de [14]......	32
Figura 2.10 - Resposta (a) à tração de compósito reforçado com fibras de sisal com representação da resistência e espaçamento de fissuras <i>versus</i> deformação e (b) resposta à flexão [8].	34
Figura 2.11 - Retração autógena e retração por secagem dependentes do tempo para concreto de resistência normal e concreto de alto desempenho, adaptado de [48].	36
Figura 2.12 - Curva de fluência típica de tensão vs tempo sob tensão constante [39].	37
Figura 2.13 - Recuperação da deformação pela remoção da carga externa, adaptado de [51].	38

Figura 2.14 - Deformações no processo de fluência, baseado em [52]...	39
Figura 3.1 - Granulometria da areia fina utilizada.	50
Figura 3.2 - Etapas da mistura da argamassa: (a) areia com metade da água; (b) materiais cimentícios; (c) argamassa antes de adicionar o superplastificante e (d) após adicionar o superplastificante.....	52
Figura 3.3 - Etapas do espalhamento: (a) argamassa sendo colocada no tronco de cone; (b) argamassa após o espalhamento; (c) detalhe da borda, na qual é possível observar não haver segregação dos materiais e (d) medida do diâmetro.	53
Figura 3.4 - Arranjo experimental do ensaio de compressão uniaxial.....	54
Figura 3.5 - Processo de tratamento das fibras de sisal: (a) imersão em água com temperatura a $70\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$, (b) secagem em temperatura ambiente, (c) fibras após o processo de tratamento, (d) aparato utilizado para separar as fibras após secagem.	55
Figura 3.6 - Preparação das amostras para processo de microscopia: (a) preparo da resina, (b) amostras após receberem revestimento de prata, (c) politriz utilizada para polimento das amostras e (d) MEV utilizado na análise das fibras.	56
Figura 3.7 - Seção transversal das fibras de sisal obtidas por meio do processo de microscopia: (a) seção em formato de ferradura e (b) seção em formato de arco.	57
Figura 3.8 - Guias de papel cartão para ensaio de tração dos filamentos de fibra de sisal: (a) esquema de preparação, corte e dobra das guias; (b) amostras rompidas após o procedimento.....	58
Figura 3.9 - Arranjo experimental do ensaio de tração das fibras de sisal.	59
Figura 3.10 - Evolução da resistência à compressão das matrizes.	60
Figura 3.11 - Curva de resistência à tração versus deformação das fibras de sisal.....	62
Figura 4.1 – Etapas de fabricação (a) e amostras dos compósitos com camadas de fibras com umidade natural (região superior da foto) e saturadas (região inferior da foto) (b).	66

Figura 4.2 - Arranjo experimental (a) e esquema (b) utilizado para ensaios de flexão a quatro pontos com vão entre pontos de aplicação de carga com 7 cm.....	68
Figura 4.3 – Arranjo (a) e esquema experimental (b) usado para ensaios de tração direta.....	69
Figura 4.4 - Compósitos submetidos à flexão de quatro pontos.....	71
Figura 4.5 - Resposta à flexão de compósito reforçado com 3 camadas de fibras saturadas.....	72
Figura 4.6 - Resposta à flexão de compósito reforçado com 3 camadas de fibras com umidade natural.....	72
Figura 4.7 - Resposta à flexão de compósito reforçado com 5 camadas de fibras saturadas.....	73
Figura 4.8 - Curvas típicas dos ensaios à tração dos compósitos reforçados com 3 e 5 camadas de fibras de sisal.....	75
Figura 4.9 - Resposta à tração de compósito reforçado com 3 camadas de fibras saturadas.....	76
Figura 4.10 - Resposta à tração de compósito reforçado com 3 camadas de fibras com umidade natural.....	76
Figura 4.11 - Resposta à tração de compósito reforçado com 5 camadas de fibras saturadas.....	77
Figura 4.12 - Campos de deformação em diferentes momentos dos compósitos reforçados com (a) 3 camadas de fibras saturadas; (b) 3 camadas de fibras com umidade natural; e (c) 5 camadas com fibras saturadas.....	79
Figura 4.13 - Abertura e posição das fissuras para compósito de 3 camadas com reforço saturado no instante equivalente à tensão de 10,16 MPa. ..	80
Figura 4.14 - Abertura e posição das fissuras para compósito de 3 camadas com reforço com umidade natural no instante equivalente à tensão de 9,89 MPa.....	81
Figura 4.15 - Abertura e posição das fissuras para compósito de 5 camadas com reforço saturado no instante equivalente à tensão de 15,97 MPa. ..	81
Figura 4.16 - Correlação entre o deslocamento e nível de carregamento para compósito com 3 camadas com reforço saturado.....	82

Figura 4.17 - Abertura e posição das fissuras para compósito de 3 camadas com reforço com umidade natural.	82
Figura 4.18 - Abertura e posição das fissuras para compósito de 5 camadas com reforço saturado.	83
Figura 4.19 - Evolução da abertura média de fissuras para os três compósitos submetidos à tração direta.	84
Figura 5.1 - Ensaio realizado para a caracterização das propriedades de longa duração dos compósitos cimentícios reforçados com tecido de sisal.	87
Figura 5.2 - Temperatura e umidade relativa durante a realização dos ensaios de longa duração.	87
Figura 5.3 - Arranjo experimental utilizado nos ensaios de fluência na fibra (a) e esquema representativo de cada componente do arranjo (b).	88
Figura 5.4 - Hardware <i>Nacionais Instruments</i> utilizado para adquirir os dados (a) e interface gráfica do software LabView 2011 (b).	89
Figura 5.5 - Pórtico utilizado para a medição das amostras de retração por secagem.	90
Figura 5.6 - Pórtico utilizado para o ensaio de fluência a compressão em amostras cilíndricas.	92
Figura 5.7 - Metodologia utilizada para o ensaio de fluência a flexão de compósitos reforçados com 3 camadas de fibras de sisal.	94
Figura 5.8 - Arranjo experimental usado no ensaio de carregamento constante: (a) rolete para distribuição da carga nos mesmos pontos do carregamento de pré-fissuração; (b) suporte para apoio do LVDT e (c) amostras totalmente carregadas.	94
Figura 5.9 - Idealização do processo de ensaio da fluência a flexão.	95
Figura 5.10 - Hardware HBM 1615 utilizado para adquirir os dados (a) e interface gráfica do software CatmanEasy (b).	97
Figura 5.11 - Metodologia utilizada para o ensaio de fluência à tração de compósitos reforçados com 3 camadas de fibras de sisal.	98
Figura 5.12 - Arranjo experimental utilizado nos ensaios de fluência à tração do compósito (a) e esquema representativo do arranjo (b).	99
Figura 5.13 - Idealização do processo de ensaio da fluência à tração. .	100

Figura 5.14 - Curvas deformação versus tempo para fibras de sisal carregadas com 20%, 25%, 40% e 75% da sua resistência última.	101
Figura 5.15 - Seção transversal das fibras de sisal antes de passarem pelo processo de fluência. Fibras relativas aos níveis de (a) 20%, (b) 25%, (c) 40% e (d) 75% da sua resistência última.	103
Figura 5.16 – Curvas <i>compliance</i> (ϵ/σ) versus tempo para comparação entre a fluência das fibras de sisal e de polipropileno [68] sob carregamento contínuo, descontada a parcela da deformação elástica inicial.	104
Figura 5.17 - Influência da adição de metacaulim e superplastificante na reposta de retração por secagem. Gráficos retração por secagem versus tempo.	105
Figura 5.18 - Gráfico redução de massa versus tempo das amostras do ensaio de retração total.	107
Figura 5.19 - Influência da adição de metacaulim e superplastificante na reposta de retração por secagem nas amostras submetidas a cura saturada.	108
Figura 5.20 - Gráfico redução de massa versus tempo das amostras do ensaio de retração total das amostras submersas.	109
Figura 5.21 - Influência da adição de metacaulim no comportamento de fluência a compressão.	111
Figura 5.22 - Deformação por fluência para as matrizes analisadas.	111
Figura 5.23 - Curva deformação versus tempo da matriz de referência.	113
Figura 5.24 - Curva deformação versus tempo da matriz M2003.	113
Figura 5.25 - Curva deformação versus tempo da matriz M2003.	114
Figura 5.26 - Curvas deformação versus tempo da matriz M2003.	114
Figura 5.27 - Processo do ensaio de fluência a flexão das amostras reforçadas 3 camadas de fibras saturadas e com umidade natural com carga equivalente a 50%.	115
Figura 5.28 - Processo do ensaio de fluência a flexão das amostras reforçadas 3 camadas de fibras saturadas com níveis de carregamento de 50% e 70%.	116
Figura 5.29 - Comparação do compósito de 3 camadas com reforço saturado submetido à carga de 50% durante o ensaio de fluência a flexão	

e sua curva tensão versus deflexão obtida através do ensaio monotônico de flexão a quatro pontos.....	118
Figura 5.30 - Comparação do compósito de 3 camadas com reforço saturado submetido à carga de 70% durante o ensaio de fluência a flexão e sua curva tensão versus deflexão obtida através do ensaio monotônico de flexão a quatro pontos.....	118
Figura 5.31 Comparação do compósito de 3 camadas com reforço com umidade natural submetido à carga de 50% durante o ensaio de fluência a flexão e sua curva tensão versus deflexão obtida através do ensaio monotônico de flexão a quatro pontos.	119
Figura 5.32 - Curvas deflexão versus tempo para as amostras submetidas ao carregamento contínuo.	121
Figura 5.33 - Curvas da abertura média de fissuras versus tempo dos compósitos durante o processo de fluência.	123
Figura 5.34 - Exemplo da evolução das fissuras das amostras após a etapa de pré-fissuração e submetidas ao ensaio de fluência à flexão. Imagens correspondentes às amostras com reforço saturado com carga equivalente a 50% da resistência (a), com reforço saturado com carga equivalente a 70% da resistência (b) e com reforço com umidade natural com carga equivalente a 50% da resistência (c).....	124
Figura 5.35 - Processo do ensaio de fluência à tração englobando os estágios de pré-fissuração, fluência, recuperação e ruptura das amostras reforçadas 3 camadas de fibras saturadas e com umidade natural.....	125
Figura 5.36 - Influência do grau de saturação do reforço no comportamento de fluência à tração.....	126
Figura 5.37 – Comparação do compósito reforçado com fibras saturadas submetido ao ensaio de fluência à tração e ensaio monotônico de tração direta.....	127
Figura 5.38 - Comparação do compósito reforçado com fibras com umidade natural submetido ao ensaio de fluência à tração e ensaio monotônico de tração direta.....	128
Figura 5.39 - Pontos de monitoramento das fissuras durante o ensaio de fluência à tração: (a) compósito com reforço saturado e (b) compósito com reforço com umidade natural.....	129

Figura 5.40 - Imagens das novas fissuras que surgiram durante o ensaio de fluência à tração: (a) abertura de nova fissura e (b) ramificação da fissura existente.	130
Figura 5.41 - Curvas da abertura média de fissuras versus tempo dos compósitos durante o processo de fluência.	131
Figura 5.42 - Exemplo da evolução das fissuras das amostras após a etapa de pré-fissuração e submetidas ao ensaio de fluência à tração. Imagens correspondentes às (a) amostras com reforço com umidade natural e (b) amostras com reforço saturado.....	132

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Composição química de diferentes fibras celulósicas, adaptado de [30].	24
Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas de fibras naturais, adaptado de [16].	27
Tabela 2.3 - Variação das propriedades mecânicas da fibra de sisal variando o comprimento inicial de teste (diâmetro de 200 µm e velocidade de 10 mm/min), adaptado de [16]. Desvio padrão entre parênteses.	28
Tabela 2.4 - Fatores que influenciam a fluência de materiais cimentícios, adaptado de [49].	39
Tabela 3.1 - Composição química da cinza volante.	48
Tabela 3.2 - Composição química do metacaulim.	49
Tabela 3.3 – Distribuição granulométrica e área superficial específica do metacaulim.	49
Tabela 3.4 - Nomenclatura e constituintes de cada matriz utilizada.	51
Tabela 3.5 - Dosagem das matrizes utilizadas.	51
Tabela 3.6 - Consistência de cada matriz utilizada a partir do ensaio de espalhamento.	60
Tabela 3.7 - Módulo de elasticidade das argamassas aos 28 dias de idade, desvio padrão entre parênteses.	61
Tabela 3.8 - Propriedades mecânicas das fibras de sisal. Desvio padrão entre parênteses.	63
Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas para os três compósitos submetidos à flexão a quatro pontos. Desvio padrão entre parênteses.	74
Tabela 4.2 - Espaçamento e abertura média das fissuras dos compósitos submetidos à flexão. Desvio padrão entre parênteses.	74
Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas para os três compósitos submetidos à tração direta. Desvio padrão entre parênteses.	78
Tabela 4.4 - Espaçamento médio e abertura média das fissuras dos compósitos no instante equivalente à tensão máxima de tração. Desvio padrão entre parênteses.	84

Tabela 5.1 - Seção transversal e carregamento utilizado no ensaio de carregamento contínuo das fibras.....	89
Tabela 5.2 - Valor das cargas adicionadas para cada amostra para o ensaio de fluência à flexão.	95
Tabela 5.3 - Valor das cargas adicionadas para cada amostra para o ensaio de fluência à tração.....	100
Tabela 5.4 - Propriedades determinadas a partir do ensaio de fluência da fibra.....	102
Tabela 5.5 - Taxa média de retração das argamassas para os 10 primeiros dias, desvio entre parênteses.	106
Tabela 5.6 - Retração média das argamassas ao final de 60 dias, desvio padrão entre parênteses.	106
Tabela 5.7 - Resultados de absorção, densidade e volume de vazios para amostras submetidas a cura em temperatura e umidade controladas de $24 \pm 1^\circ\text{C}$ e $41 \pm 2\%$, respectivamente. Desvio padrão entre parênteses.....	110
Tabela 5.8 - Resultados de absorção, densidade e volume de vazios para amostras submetidas a cura saturada. Desvio padrão entre parênteses.	110
Tabela 5.9 - Propriedades obtidas a partir do ensaio de fluência à compressão.	112
Tabela 5.10 - Parâmetros calculados para representar os dados obtidos no ensaio de fluência.	116
Tabela 5.11 - Propriedades mecânicas para os três compósitos ao final do ensaio de fluência à flexão. Desvio padrão entre parênteses.....	120
Tabela 5.12 - Propriedades determinadas por meio do ensaio de fluência à flexão. Desvio padrão entre parênteses.	122
Tabela 5.13 - Parâmetros calculados para representar os dados obtidos no ensaio de fluência.	126
Tabela 5.14 - Propriedades mecânicas para os três compósitos ao final do ensaio de fluência à tração.	128
Tabela 5.15 - Propriedades determinadas por meio do ensaio de fluência à tração.....	129

1 Introdução

Nos últimos anos, materiais compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais têm se mostrados atrativos como alternativas de baixo custo e ecologicamente atraentes aos materiais convencionais utilizados na construção civil [1]. Em geral, as fibras encontradas no mercado são divididas em fibras de aço, de vidro, sintéticas e naturais. Além dos tipos de fibras, elas podem variar em comprimento, composição, diâmetro, geometria e podem ou não possuir algum tratamento específico [2]. As fibras naturais podem ser usadas de formas distintas, podendo ser utilizadas como polpa, fibras discretas ou em forma de tecido.

Alguns autores [3–13], motivados com a crescente busca por materiais que possam substituir as fibras sintéticas utilizadas como reforço em compósitos cimentícios, encontraram nas fibras naturais uma alternativa provável, por serem materiais biodegradáveis, econômicos, com alta disponibilidade e de baixa emissão de gases tóxicos na sua produção. Alguns estudos têm promovido o uso de fibras naturais em construções de baixo custo em países e regiões subdesenvolvidas como reforço, elementos não estruturais, elementos de paredes finas, placas cimentícias, telhas e elementos de cobertura [10].

A principal vantagem dos reforços com fibras naturais é o comportamento após as primeiras fissuras: as fibras formam pontes entre as fissuras que ocorrem na matriz e transferem as tensões entre elas [14]. Além disso, a alta ductilidade e tenacidade desses materiais podem permitir o seu uso na construção somando a uma maior durabilidade devido ao controle da abertura e propagação de fissuras [2].

Uma das desvantagens associada ao uso das fibras naturais como reforço em compósitos de matriz cimentícia é a sua durabilidade em meio alcalino. Uma alternativa utilizada para aumentar a sua durabilidade é o uso de adições pozolânicas, tais como a cinza volante e o metacaulim como substituições parciais do cimento. Além disso, o uso desses materiais pozolânicos é uma alternativa para diminuir o consumo de cimento e, a consequente redução de gás carbônico lançado na atmosfera proveniente de sua produção [15].

Apesar de todo esforço para estudo do comportamento e caracterização de materiais compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais, a maioria das pesquisas realizadas abrange apenas as propriedades de curto prazo. No entanto, as propriedades dos materiais compósitos dependem de sua estrutura e constituintes, fazendo-se necessárias análises da resposta ao longo do tempo que permitam descrever o seu comportamento de longo prazo para que possam ser eficientemente aplicados como material de construção.

No presente trabalho será avaliado o comportamento de longa duração de compósitos reforçados com tecido unidirecional e alinhado de sisal, englobando uma análise no nível da matriz, das fibras de sisal e dos compósitos à tração e flexão, além do acompanhamento da abertura de fissuras durante os ensaios.

1.1 Motivação

Muitos trabalhos têm estudado as propriedades mecânicas de compósitos reforçados com fibras naturais. No entanto, uma abordagem mais atualizada e precisa deve ser colocada em prática tendo em vista que o processamento desses materiais na indústria da construção ainda é muitas vezes de forma manual, e alguns problemas relacionados precisam ser levados em consideração na tentativa de produção em massa de compósitos de fibras naturais de matriz de cimento.

A fibra de sisal é uma das fibras naturais mais utilizadas no mundo e tem grande representação na produção de fibras têxteis [16]. Dessa forma, a fibra de sisal possui vários e importantes estudos [6,7,10,13,17–19] acerca do seu uso como reforço de matriz cimentícia.

Sabe-se que a questão da habitação popular, em nosso país, possui condições críticas devido às populações de baixo poder aquisitivo e os materiais de construção tradicionais custosos e de difícil aquisição [20]. A utilização adequada de novos materiais e tecnologias eficientes apresenta-se como uma alternativa de redução dos custos na produção de habitações populares. De maneira geral, a motivação desta pesquisa relaciona-se ao futuro desafio de uso de compósitos de fibras de sisal como solução técnica e econômica para moradias populares. Assim, esta pesquisa se propõe em desenvolver informações necessárias para sua aplicação, aliando as boas propriedades mecânicas e físicas dos compósitos no curto e longo prazo aos benefícios ambientais e econômicos provenientes do uso desses materiais.

1.2 Objetivos

Os objetivos dessa pesquisa incluem:

- Avaliar e comparar as respostas mecânicas de compósitos reforçados com tecido alinhado de sisal submetidos a ensaios de tração direta e flexão a quatro pontos.

- Fazer um estudo acerca dos mecanismos de fissuração dos compósitos desenvolvidos a partir de análises de fotos tiradas ao longo dos ensaios e por campos de deformação gerados por DIC.

- Avaliar o comportamento de longa duração dos compósitos desenvolvidos submetidos a ensaios de fluência à tração e flexão. Além disso, um estudo acerca dos seus constituintes a nível da fibra e matriz foi desenvolvido a partir de ensaios tração da fibra sob carga sustentada e fluência à compressão e retração da matriz.

1.3 Organização da dissertação

O presente trabalho foi organizado da seguinte forma:

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

O Capítulo 2 traz a revisão bibliográfica, contendo informações gerais sobre fibras naturais, com ênfase na fibra de sisal e sua composição física e química. Além disso, cita trabalhos de compósitos cimentícios com tecidos de fibras naturais, descrevendo seu comportamento mecânico.

O Capítulo 3 apresenta a caracterização das matrizes utilizadas em estado fresco e endurecido, bem como a caracterização da fibra em termos de resistência a tração e sua microestrutura.

O Capítulo 4 descreve o desenvolvimento, a caracterização mecânica e os mecanismos de fissuração de compósitos cimentícios reforçados com tecido de sisal submetidos a ensaios de tração direta e flexão.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados experimentais e as discussões acerca dos ensaios de retração e de fluência em todas as escalas avaliadas.

O Capítulo 6 traz as conclusões do presente trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Os estudos e ensaios abordados neste trabalho são representados na Figura 1.1.

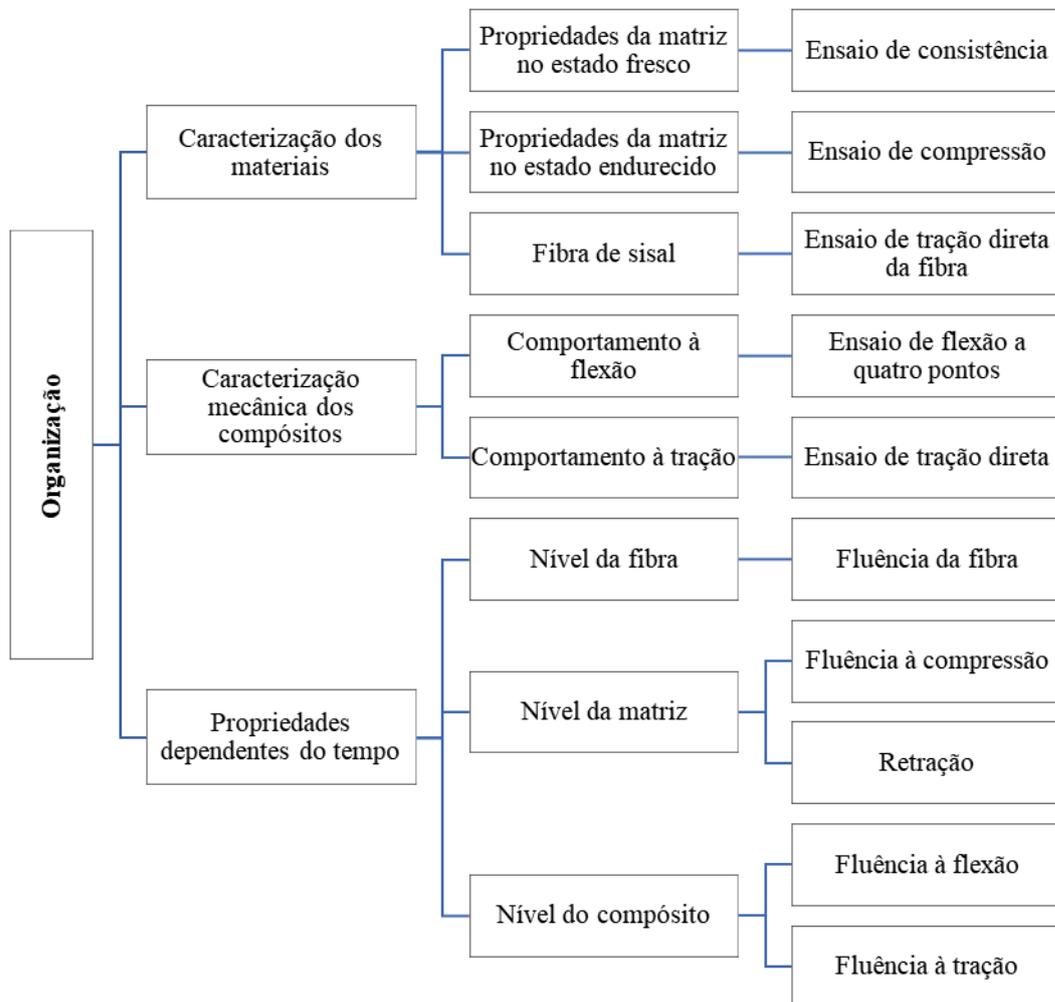


Figura 1.1 – Estudos abordados neste trabalho.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Fibras naturais

O uso de fibras naturais como reforço em materiais cimentícios teve início em 1940, quando começaram a ser estudadas para serem as possíveis substitutas das fibras de amianto [21]. Com a preocupação crescente com o meio ambiente, as fibras naturais vêm sendo cada vez mais procuradas pela indústria da construção civil. Esse fato está relacionado com algumas propriedades das fibras tais como: custo relativamente baixo, baixa densidade, biodegradabilidade, alta disponibilidade, natureza não perigosa e baixa quantidade de emissão de carbono na sua produção. Estudos mostram que as fibras vegetais podem ser utilizadas na construção civil como reforço, principalmente, em elementos não estruturais, elementos de paredes finas, placas cimentícias, telhas e componentes pré-fabricados [13].

Essas fibras podem ser obtidas a partir de vários tipos de plantas e possuem diversas formas, diâmetros, relação de aspecto, comprimento e rugosidade superficial. Porém, o uso de fibras naturais é limitado na indústria por sua baixa durabilidade em meios alcalinos quando comparados com outros tipos de reforços fibrosos. A durabilidade dessas fibras são fatores relevantes na escolha do reforço, e está associada com o aumento da fratura da fibra e a diminuição da capacidade de arrancamento das fibras enfraquecidas pelo ataque de álcalis presentes na matriz, densificação da interface fibra-matriz, migração dos produtos de hidratação para os lúmens e vazios e pela instabilidade volumétrica em razão da alta capacidade de absorção de água [14].

2.1.1 Estrutura morfológica e composição química.

As propriedades das fibras naturais usadas como reforço em compósitos de matriz cimentícia possuem diversas publicações [4,7,8,11–13,17,19,22–28]. A classificação mais comum encontrada é dividida em cinco classes, sendo elas: caule, folha, sementes, frutos e madeira [14].

As fibras do caule são obtidas por meio de um processo chamado *retting* que dissolve parte dos tecidos que envolvem as fibras e, consiste na ação combinada de microorganismos e umidade que são liberadas durante o processo de separação das fibras [14]. As fibras das folhas são obtidas das folhas das plantas por meio da trituração e raspagem para remover as fibras, seguida por secagem. Estas são geralmente mais duras, mais rígidas e de textura mais grossa do que as derivadas do caule [14].

As fibras de superfície são encontradas como fibras de célula única na superfície de caules, frutos e sementes de plantas. Algodão e fibra de coco estão incluídos neste grupo. As fibras de madeira (celulose) são relativamente curtas e inflexíveis, mas geralmente são bem resistentes e apresentam melhor desempenho ao longo do tempo em ambiente cimentício. Ghavami [29] classifica as fibras vegetais de acordo com a Figura 2.1.

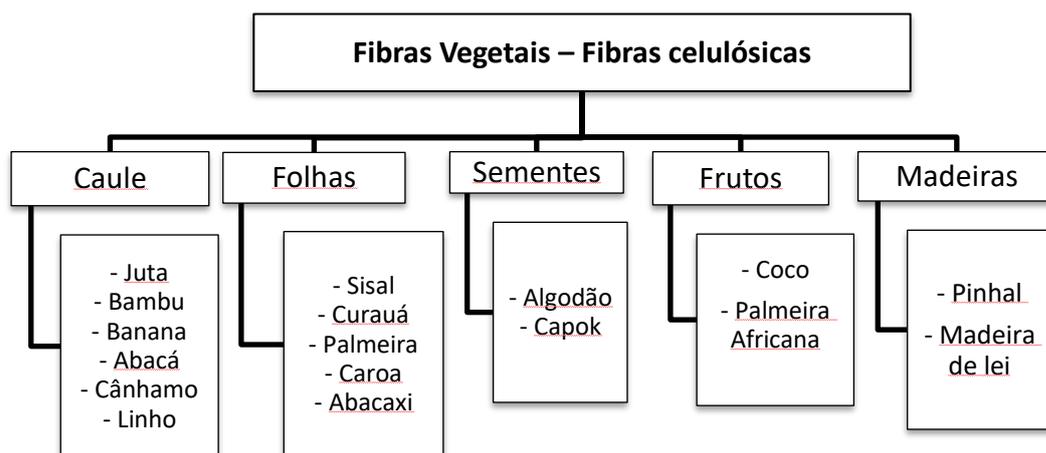


Figura 2.1 - Exemplos de fibras vegetais usadas em compósitos na construção, adaptado de [29].

Como pode ser observado na Tabela 2.1, a composição química da fibra vegetal varia de fibra para fibra e os seus principais constituintes são a celulose, hemicelulose, pectina, lignina e materiais graxos. Algumas fibras como o linho, algodão, cânhamo, rami e do sisal são ricas em celulose, podendo representar mais de 70% da sua composição química total [30]. A celulose é um polímero natural responsável por dar resistência, rigidez e estabilidade à fibra, e incluem unidades de glicose ligadas juntas em cadeias longas, alinhadas em feixes chamados de microfibrilas [16]. No entanto, a celulose é também um polissacarídeo semi-cristalino com uma grande quantidade de grupo hidroxila. E, essa característica

define sua natureza hidrofílica, o que causa uma baixa resistência da fibra celulósica à absorção de umidade e uma fraca ligação interfacial quando essas fibras são utilizadas como reforço de matriz hidrofóbica [30].

Tabela 2.1 - Composição química de diferentes fibras celulósicas, adaptado de [30].

Fibras celulósicas	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Pectina (%)	Lignina (%)	Cera (%)
Bambu	34,5	50,5	-	26	-
Coco	46	0,3	4	45	-
Curauá	73,6	5	-	7,5	-
Cânhamo	81	20	0,9	4	0,8
Linho	72,5	14,5	0,9	2,5	-
Algodão	89	4	6	0,75	-
Juta	67	16	0,2	9	0,5
Sisal	60	11,5	1,2	8	-

A fibra de sisal é obtida das folhas da *Agave sisalana*, uma das quatro fibras naturais mais utilizadas e representa metade da produção total de fibras têxteis [30]. A razão para isto é a facilidade de cultivo de plantas de sisal, que têm tempos de renovação curtos e crescem rapidamente. Uma boa planta de sisal contém 200 a 250 folhas e cada folha contém 1000 a 1200 feixes de fibras, compostos por 4% de fibra, 0,75% de cutícula, 8% de matéria seca e 87,25% de água [16].

A folha de sisal inclui três tipos de fibras: a mecânica, localizada na superfície, as fibras em faixas, localizadas na parte central da folha, e xilema [30]. A Figura 2.2 mostra a seção transversal de um feixe de fibra em faixas de sisal. As fibras mecânicas são extraídas da periferia da folha e são as mais úteis comercialmente das fibras de sisal. A fibra de sisal é um feixe de pequenas fibras ocas nas quais as paredes celulares são reforçadas com celulose orientada em espiral em uma matriz de hemicelulose e lignina. A composição da superfície externa da parede celular é uma camada de material lígneo e substâncias cerosas que ligam a célula às substâncias adjacentes. O ângulo microfibrilar da fibra de sisal foi relatado entre 16° e 25° [31].

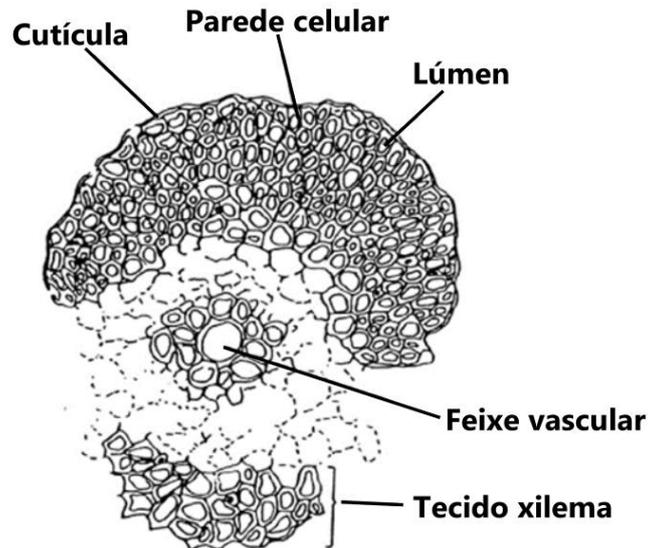


Figura 2.2 - Seção transversal de um feixe de fibras, adaptado de [31].

Ao considerar as diferentes fibras encontradas na literatura, deve-se notar que a microestrutura da fibra de sisal é bastante complexa e cada fibra é composta por várias células de fibras individuais alongadas com cerca de 6 a 30 μm de diâmetro [31]. Cada célula da fibra é composta por uma parede primária, uma parede secundária mais espessa, uma parede terciária e o lúmen (Figura 2.3). O material ligante entre as células de fibras é composto basicamente por hemicelulose e lignina e são chamadas de lamelas médias (ML) [32].

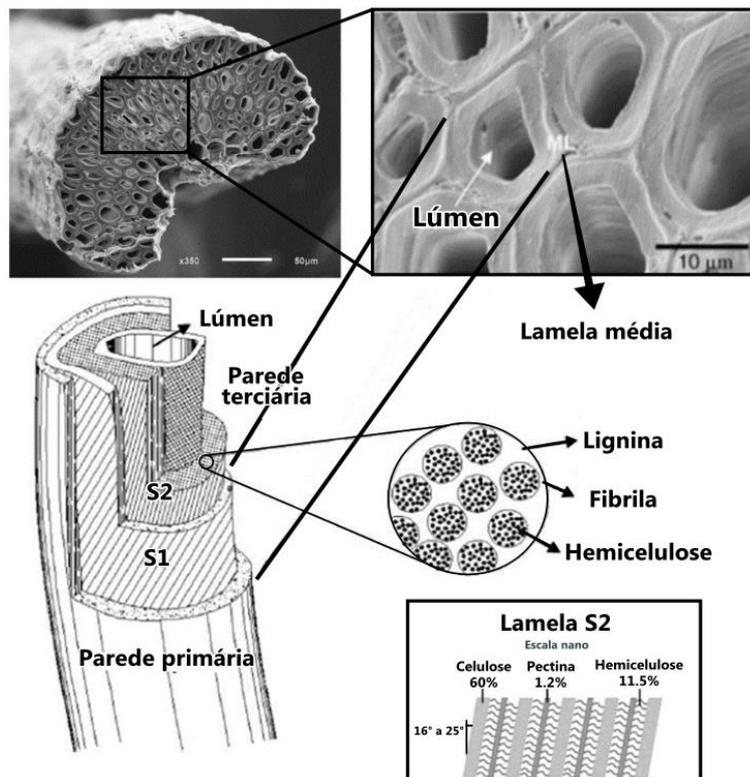


Figura 2.3 - Camadas de uma fibra natural de sisal, adaptado de [30,33,34].

Além disso, as fibras de sisal possuem duas geometrias típicas, como pode ser visto na Figura 2.4, no formato de ferradura e em arco [33].

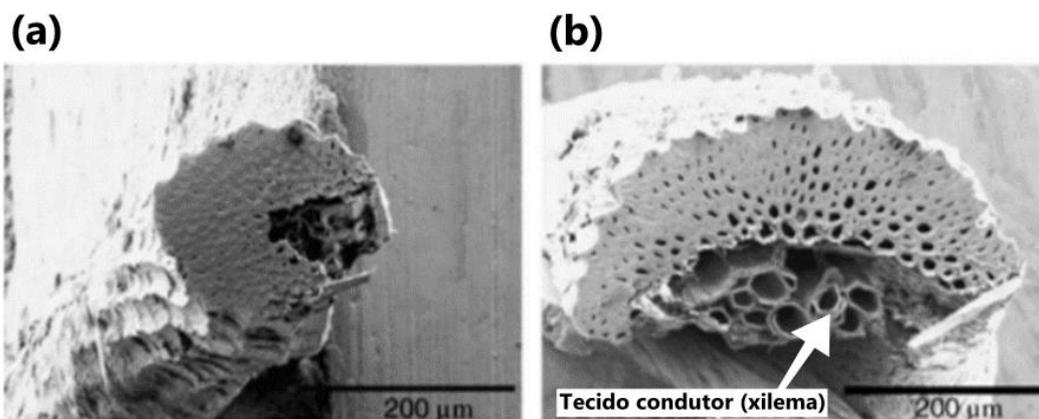


Figura 2.4 - Diferentes tipos de fibras de sisal: (a) fibra estrutural em formato de ferradura e (b) arco, adaptado de [33].

2.1.2 Propriedades físicas e mecânicas

As propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais possuem uma grande variabilidade por conta de diversas condições internas e externas às mesmas [31]. Essas condições podem ser desde o tipo ou época de cultivo da espécie, origem e

localização da fibra, processo de extração até as condições de ensaios que podem variar entre a velocidade do ensaio, comprimento da amostra, umidade e temperatura local [31].

Outro fator relevante para as propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais é a sua morfologia e possui grande variabilidade entre as espécies [31]. O lúmen, por exemplo, possui diferentes formatos (circular, poligonal ou elíptico) e, em conjunto com os poros criam uma estrutura porosa das fibras. Quanto maior o grau de porosidade, maior será a sua absorção de umidade, o que pode aumentar o seu risco de degradação [35]. Além disso, as condições de intemperismo que as fibras podem ficar expostas resultam em mudanças contínuas no volume das paredes celulares da fibra. Isso pode levar à degradação da fibra celulósica e da interface da matriz [2].

As características físicas das fibras naturais, como a estrutura e suas imperfeições, o ângulo microfibrilar (ângulo entre o eixo da fibra e as microfibrilas) e as dimensões, dependem basicamente dos formatos, dos tamanhos, orientações e espessuras das paredes da estrutura interna [36].

A resistência à tração das fibras de sisal dependem de suas características físicas, como o comprimento avaliado e o seu diâmetro [16]. Geralmente a resistência à tração da fibra natural diminui se o seu comprimento aumentar. Isso se dá porque, quanto mais longa a fibra, maior a probabilidade de haver imperfeições na sua estrutura, diminuindo a sua resistência [16]. Já o diâmetro das fibras depende do tamanho do lúmen e da espécie (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas de fibras naturais, adaptado de [16].

Propriedades	Juta	Sisal	Coco	Curauá
Resistência à tração (MPa)	250 -350	280 - 750	120 - 200	250 - 800
Módulo de elasticidade (GPa)	26 - 32	13 – 26	19 – 26	9.4 – 97
Deformação até a ruptura (%)	1.5 – 1.5	3 – 5	10 – 25	0.8 – 6
Diâmetro da fibra (mm)	0.1 – 0.2	0,05 – 0,2	0.1 – 0.4	0,007 – 0,01
Comprimento da fibra (mm)	1800 - 3000	80 - 120	50 – 350	100 - 150
Absorção de água (%)	-	60 - 70	130 - 180	92 - 360

As propriedades mecânicas das fibras de sisal podem sofrer variação com diferentes comprimentos, como observado por Satyanarayana [16]. A Tabela 2.3

apresenta a variação observada dos parâmetros mecânicos com os comprimentos de teste.

Tabela 2.3 - Variação das propriedades mecânicas da fibra de sisal variando o comprimento inicial de teste (diâmetro de 200 μm e velocidade de 10 mm/min), adaptado de [16]. Desvio padrão entre parênteses.

Comprimento (mm)	Módulo de elasticidade inicial (GPa)	Resistência última (MPa)	Alongamento até a falha (%)
15	14,15 (1,50)	793,80 (59,70)	8,18 (1,07)
25	17,26 (1,62)	757,10 (72,25)	5,70 (1,44)
35	19,71 (1,53)	728,10 (87,70)	4,65 (1,30)
50	22,52 (2,53)	630,10 (90,00)	3,98 (0,62)
65	25,36 (2,20)	620,81 (98,70)	3,50 (0,35)

Um mecanismo de falha pode ocorrer na região de interface entre a pectina e as fibrilas, onde a região é relativamente fraca e uma possível falha pode ocorrer de forma brusca e instantânea, em fibras de comprimento maior [36]. Se o comprimento da fibra for menor do que as fibrilas, a falha não acontece mais na interface, e sim através das células de celulose, que são bem mais resistentes do que as de pectina [36].

2.1.3 Compósitos cimentícios reforçados com fibras de sisal

O concreto é o material de construção mais importante do mundo e seu consumo cresce a cada ano, resultando em um consumo de cimento de 55 milhões de toneladas no ano de 2019 no Brasil, segundo a *Statista Inc* [37]. As vantagens desse material podem ser relacionadas à fácil obtenção dos insumos, além de um baixo custo, produção simples e flexibilidade de aplicações. Sua desvantagem está ligada a sua fragilidade, ou seja, baixa resistência à tração e baixa resistência à abertura e propagação de fissuras [38]. A indústria da construção passou a desenvolver materiais de alta performance para melhorar essa propriedade e, a partir de inovações nas últimas três décadas, compósitos inovadores, inteligentes e multifuncionais foram criados [32].

As propriedades dos compósitos reforçados com fibras são dependentes dos seus materiais constituintes e sua estrutura. Logo, para analisar e prever o seu desempenho em várias condições de carregamento, a sua estrutura interna deve ser caracterizada. Os três principais componentes são a matriz, as fibras e a interface fibra-matriz. A interface possui propriedades mecânicas e microestrutura diferentes da matriz e fibra e é fortemente dependente do tipo de fibra e a sua tecnologia de produção e a natureza da matriz [14].

A adesão entre a fibra e a matriz cimentícia é relativamente fraca, podendo em alguns casos ser melhorada por meio de processos químicos e mudança de geometria [19]. Essa ligação faz parte do mecanismo de transferência de tensões, capaz de impedir a propagação e controlar a abertura de fissuras [34]. Essa transferência de tensões é realizada através da tensão cisalhante da adesão fibra-matriz (Figura 2.5), sendo assim, quanto maior a relação do comprimento pelo diâmetro da fibra (razão de aspecto), maior a área de adesão entre a fibra e a matriz dada uma mesma porcentagem de reforço [14].

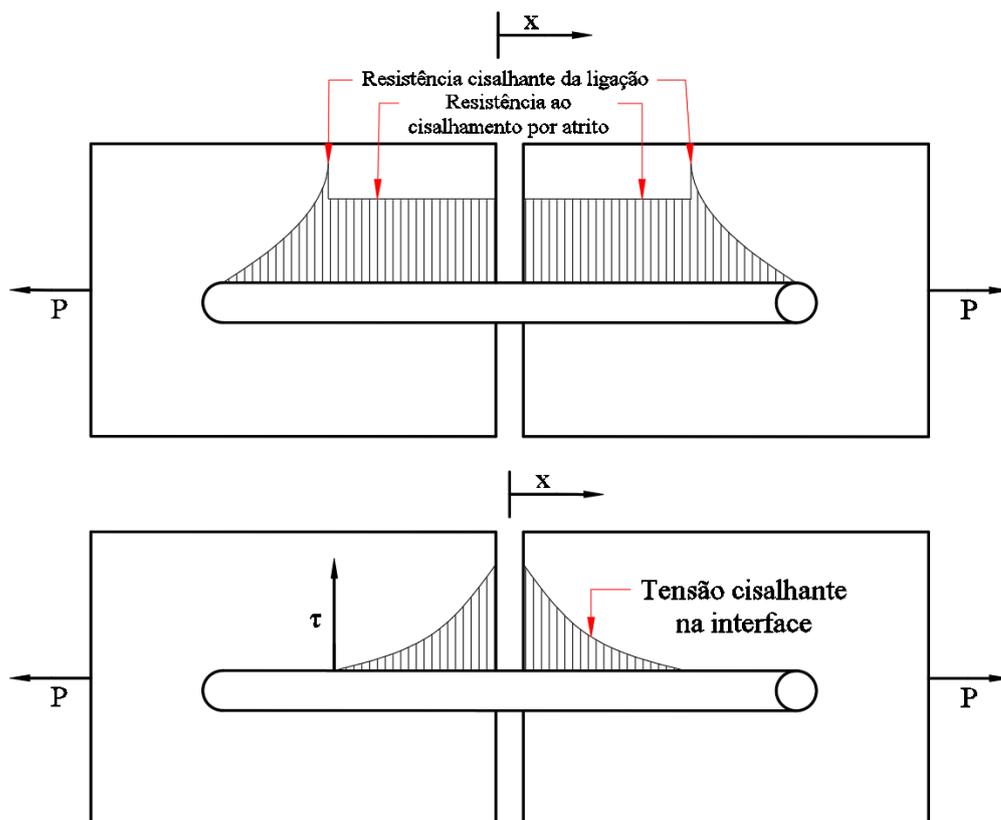


Figura 2.5 - Distribuição da tensão de cisalhamento ao longo da interface imediatamente após a fissuração: (a) descolamento antes da fissura; (b) sem descolamento antes da fissura [14].

O arranjo ou orientação, a concentração e a distribuição das fibras têm uma influência significativa na resistência e em outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras. Com relação à orientação, são possíveis dois extremos: (1) um alinhamento das fibras na mesma direção e (2) uma distribuição aleatória. As fibras contínuas são normalmente alinhadas (Figura 2.6a), enquanto as fibras descontínuas podem ser alinhadas (Figura 2.6b), orientadas aleatoriamente (Figura 2.6c) ou parcialmente orientadas. As melhores propriedades gerais de compósito são obtidas quando a distribuição da fibra é uniforme [39].

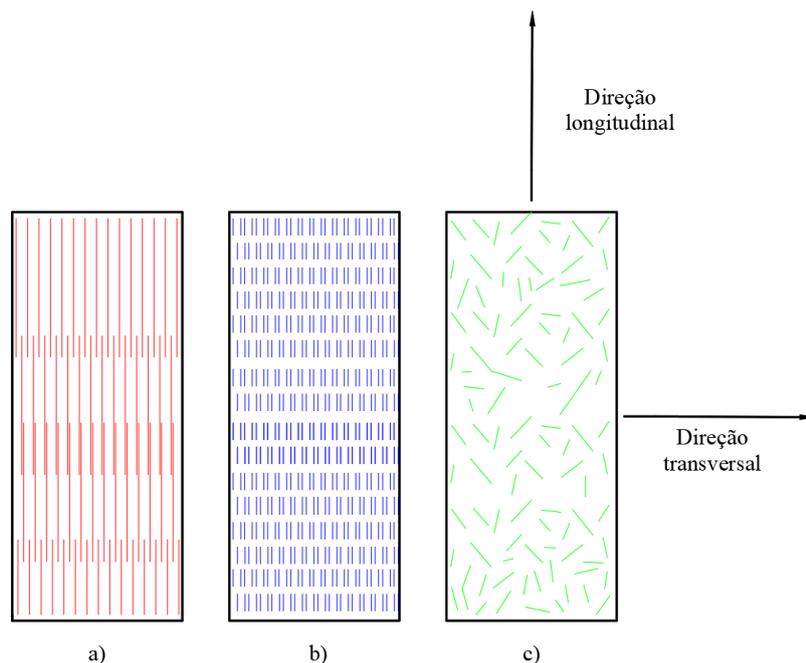


Figura 2.6 - Representação esquemática de compósito reforçado com fibras: (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínua e alinhada, e (c) descontínua e aleatoriamente orientadas, adaptado de [15].

As fibras naturais não são utilizadas para concreto estrutural de alto desempenho, mas alguns estudos buscam desenvolver compósitos de matriz cimentícia que possam ser aplicados em residências de baixo custo, como telhas corrugadas e placas de coberturas, além de aplicações em painéis estruturais, reforços e reparações de elementos estruturais [8, 30, 31, 32]. Estes materiais têm sido estudados desde o início de 1960 [32] e seus resultados mostram melhorias na ductilidade, dureza, resistência a flexão em seu estado pós fissuração quando comparados com materiais cimentícios sem reforço [2].

Os compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais podem ser divididos de acordo com o comprimento das fibras, como mostra a Figura 2.7.

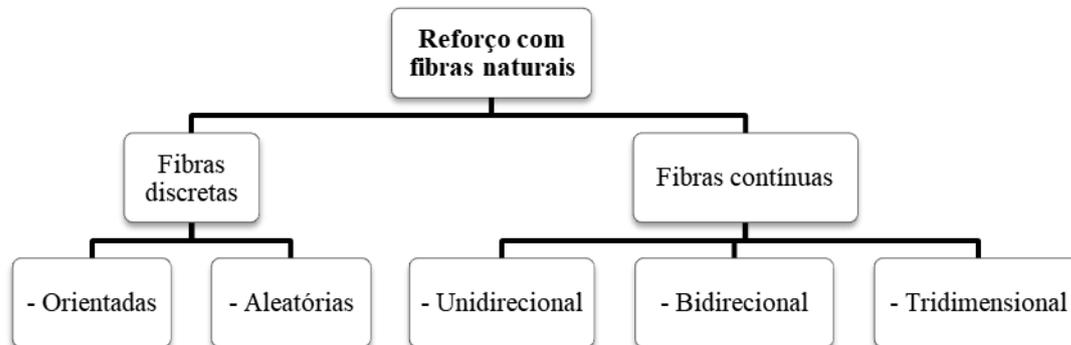


Figura 2.7 - Tipos de reforços para compósitos conforme seu comprimento [14].

Um comportamento de *strain-hardening* pode ser definido como um modo de ruptura não brusco com conservação da capacidade de carga após a primeira fissura. Acontece quando uma matriz frágil é adequadamente reforçada com fibras contínuas ou discretas, possivelmente ultrapassando um percentual de 2% de reforço. Os compósitos têxteis possuem um comportamento de *strain-hardening* com suas especificidades, como pode ser visto na Figura 2.8. A região elástica (estágio 1) é evidente até o primeiro ponto de fissura e é usada para estimar o módulo de elasticidade do material. O ponto de curvatura ou *bend over point* (BOP) corresponde à formação de fissuras da matriz. O início da primeira fissura é considerado BOP-, e quando esta fissura alcança as duas bordas da amostra, é chamado de BOP+ e são identificados como estágio 2. Depois que a primeira fissura ocorre, e na segunda zona (estágio 3), o comportamento de *strain-hardening* é dominante, à medida que múltiplas fissuras aparecem. O espaçamento e largura dessas fissuras nesse estágio dependem principalmente do tipo de fibra e a fração volumétrica. A terceira zona (estágio 4) é caracterizada pela resistência à tração máxima e falha da amostra [41].

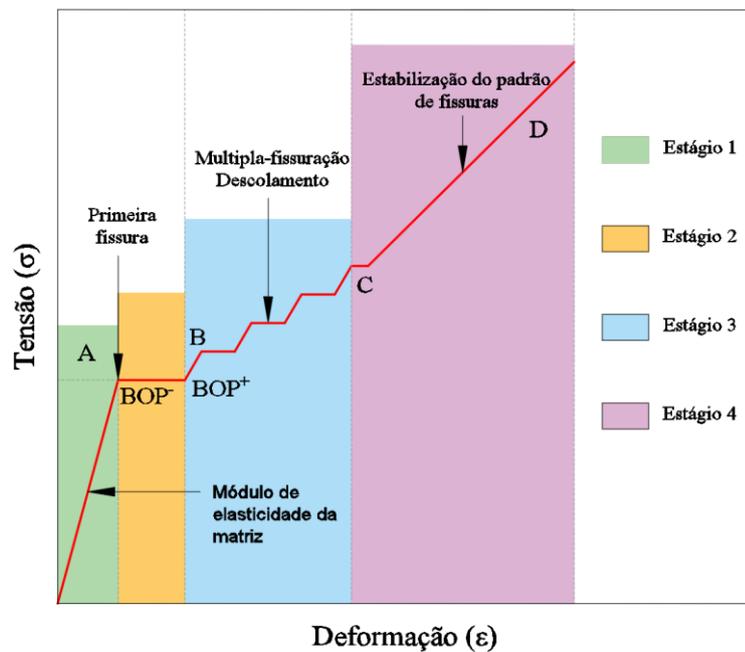


Figura 2.8 - Comportamento mecânico típico de compósitos que apresentam *strain-hardening*, adaptado de [42].

Além dos compósitos que apresentam comportamento *strain-hardening*, o reforço com fibras pode levar a outro tipo de comportamento chamado de *strain-softening*, caracterizado pela queda de resistência mecânica até a ruptura (Figura 2.9). Em geral, esse tipo de material é composto por fibras com comprimento menor que 50 mm e que, por não possuírem comprimento suficiente para transmitir as tensões maiores que provocam a ruptura da matriz, a resistência do compósito sofre uma queda gradual [14].

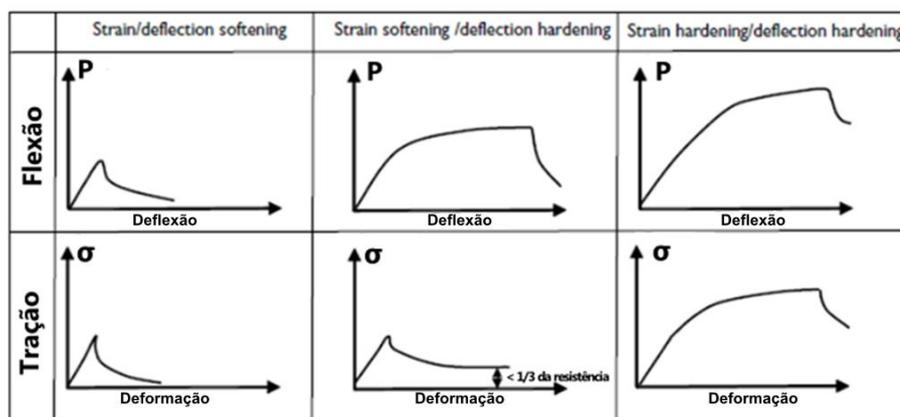


Figura 2.9 - Descrição esquemática do comportamento *Strain softening*, *strain hardening* (na tração) e *deflection hardening* (na flexão) de compósitos cimentícios reforçados com fibras, adaptado de [14].

Como visto anteriormente, a eficiência do mecanismo de fissuração de compósitos reforçados com fibras é dada pela adesão fibra-matriz e das características da interface em promover a transferência de tensões entre as fibras e a matriz. Quando a resistência ao arrancamento das fibras for maior do que a resistência da matriz, o compósito consegue suportar cargas crescentes após a primeira fissura e, em seguida, assume-se que a matriz não contribui significativamente para a resistência do compósito e sim como meio para transferir as tensões para as fibras. Com o incremento de carga, as fibras irão transferir a tensão adicional para a matriz através da interface. Contudo se essas tensões na interface não excederem a resistência aderente das fibras, a matriz irá apresentar novas fissuras. Esse processo de múltipla fissuração pode continuar até o espaçamento entre as fissuras se tornar saturado e, a partir desse estágio, a abertura irá aumentar até a ruptura das fibras ou descolamento das mesmas [7,43].

As pastas e argamassas de cimento podem ser reforçadas com fibras vegetais para fabricar componentes de construção de seção fina com formas variáveis. No entanto, as fibras celulósicas são de natureza hidrofílica, uma vez que a lignocelulose dentro de sua estrutura contém grupos hidroxila fortemente polarizados, sendo inerentemente incompatíveis com as matrizes cimentícias [36]. Dessa forma, o compósito sofre um processo de envelhecimento em ambientes úmidos, levando a uma redução da resistência e tenacidade pós-fissuração. Esse problema de durabilidade está associado a um decréscimo do tamanho de arrancamento da fibra em razão de uma ação combinada do ataque dos álcalis à lignina e hemicelulose, e da mineralização das fibras resultante da migração do hidróxido de cálcio (CH) da matriz para o lúmen e paredes das fibro-células [15].

Para melhorar a durabilidade de compósitos à base de cimento reforçado com fibra vegetal, outras abordagens foram estudadas, incluindo uma impregnação de fibra com agentes bloqueadores e repelentes de água, uma vedação do sistema de poros da matriz, uma redução da alcalinidade da matriz e combinações de fibras e modificação de matriz [19]. Portanto, de maneira geral, o tratamento dessas fibras tanto por tratamentos físicos quanto químicos visa melhorar a adesão interfacial fibra-matriz e aumentar a durabilidade do compósito.

Alguns estudos têm analisado a substituição do cimento Portland comum por aditivos minerais, como a microssílica, a cinza volante, a metacaulinita e resíduos cerâmicos na fabricação de concretos [44]. Esses materiais possuem elevada

reatividade pozolânica, reagindo com o hidróxido de cálcio (CH) e formando produtos de hidratação, principalmente silicato de cálcio hidratado (C-S-H) [15]. Atuam como *filler*, aumentando a densificação da matriz.

Silva et al. [40] desenvolveram compósitos laminados cimentícios reforçados com longas fibras de sisal apresentando uma abordagem econômica e sustentável. Esses compósitos estruturais apresentaram uma redução da produção de hidróxido de cálcio, com substituição parcial do cimento por metacaulim e pó de argila calcinada. Além disso, para verificar a durabilidade dos compósitos ciclos de molhagem e secagem foram realizados simulando o processo de envelhecimento das amostras, resultando em um aumento da resistência à flexão e tenacidade quando comparados com compósitos de cimento Portland comum.

Silva e Toledo Filho [7] realizaram testes de tração e flexão em compósitos reforçados com fibras longas e alinhadas de sisal para estudar os mecanismos de fissuração desses compósitos (Figura 2.10), monitorando e analisando a formação e distribuição do espaçamento das fissuras. Uma matriz com baixo teor de cimento Portland e hidróxido de cálcio foi utilizada para reduzir o potencial envelhecimento das fibras de sisal. Os compósitos apresentaram alto módulo nas faixas de zonas elástico-lineares com módulos de elasticidade na faixa de 30 e 34 GPa sob tração direta e flexão, respectivamente. A resistência média máxima observada para os compósitos foi de 12 e 25,07 MPa e tenacidade aproximada de 45 e 22 kJ/m² nos testes de tração e flexão, respectivamente.

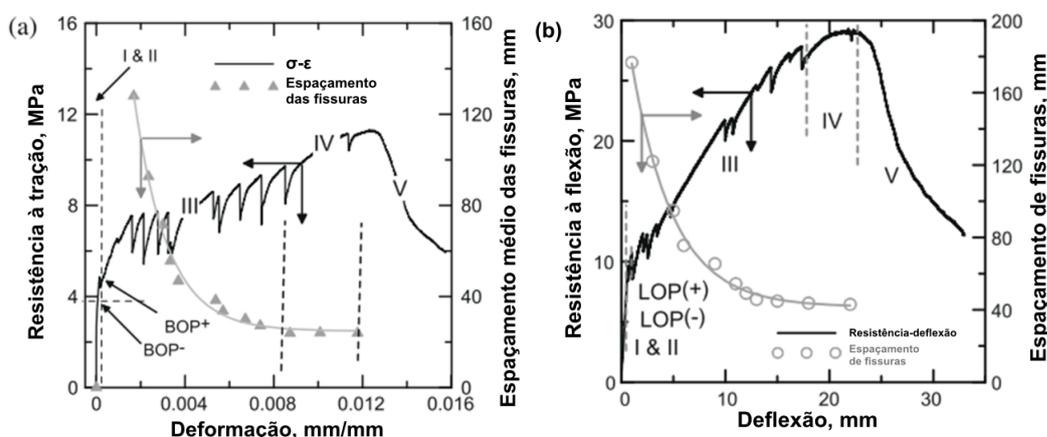


Figura 2.10 - Resposta (a) à tração de compósito reforçado com fibras de sisal com representação da resistência e espaçamento de fissuras *versus* deformação e (b) resposta à flexão [7].

2.2 Comportamento dependente do tempo de materiais cimentícios

A capacidade do compósito cimentício reforçado com fibras de suportar os efeitos dependentes do tempo dependem de dois aspectos: o primeiro diz respeito a durabilidade e resistência do material de manter suas propriedades ao longo do tempo sob diversos ambientes e exposições e o segundo se refere a capacidade do material de suportar as deformações decorridas do tempo [45]. O comportamento reológico do concreto, ou seja, a sua deformabilidade dependente do tempo, é dividida em fluência e retração. A retração é a redução do volume do material na ausência de uma carga externa, enquanto a fluência é o acréscimo contínuo das deformações a uma tensão constante [46].

2.2.1 Retração

A retração é a redução do volume do material com o tempo quando nenhuma tensão é aplicada, devido à movimentação da umidade de/para o concreto. Ela, pode ser dividida em retração plástica, autógena e a retração por secagem [47].

A retração plástica ocorre no concreto pela evaporação da água da superfície enquanto este está em sua fase plástica, ou seja, antes do endurecimento. Este tipo de retração é afetado pela quantidade de água perdida na superfície do concreto, que por sua vez é afetada pela umidade relativa do ambiente e a velocidade do vento. A retração plástica é maior quanto maior a quantidade de cimento, quanto menor a granulometria do cimento e menor a relação água-cimento (a/c) [47].

A retração autógena ocorre sem que haja nenhum movimento de umidade para o exterior ou para o interior do concreto, em condições seladas [47]. O processo de retração autógena é consequência da perda de água dos poros capilares pela hidratação do cimento não hidratado, ou seja, tem como resultado uma pasta de cimento endurecida com volume menor que a soma do volume de água e cimento antes da reação química [43,46]. Como pode ser observado na Figura 2.11, a retração autógena de concreto de resistência normal é relativamente pequena, enquanto relativamente alta para concreto de alto desempenho (CAD), o qual apresenta baixa relação a/c [47].

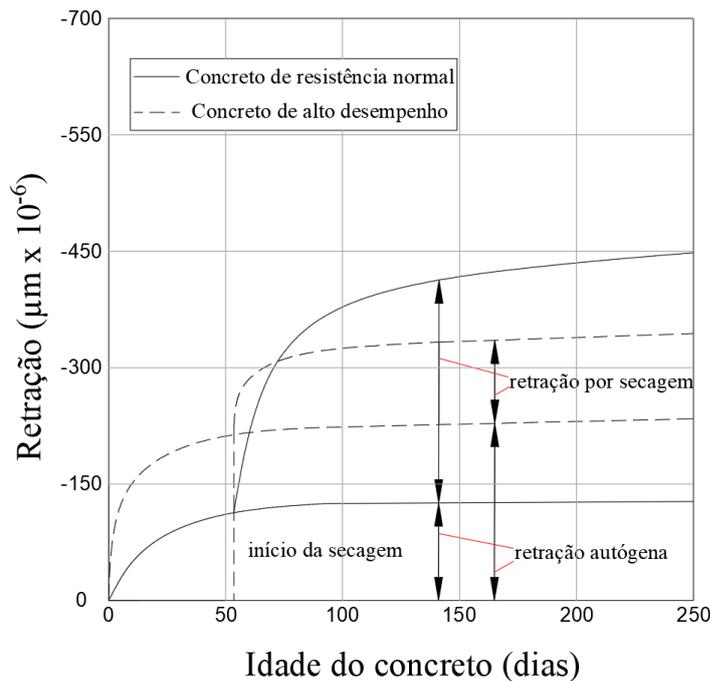


Figura 2.11 - Retração autóloga e retração por secagem dependentes do tempo para concreto de resistência normal e concreto de alto desempenho, adaptado de [48].

A retração por secagem se dá a partir da evaporação da água do concreto endurecido armazenado em ar não saturado. Quando o concreto é exposto à secagem, este pode apresentar uma retração que pode variar até 1‰ [47]. A retração por secagem é influenciada pelas condições ambientais, como umidade relativa, temperatura, vento, entre outras [46]. Segundo Neville [49] uma cura prolongada retarda o início da retração, o que permite que o concreto alcance uma resistência satisfatória. Quando o concreto é imerso em água, ocorre um aumento de volume pela absorção de água, porém o valor absoluto da expansão dentro d'água é cerca de seis vezes menor do que a retração ao ar para umidade relativa do ar igual a 70%.

2.2.2 Fluência

A fluência é uma deformação lenta e contínua do material sob uma tensão constante [50]. Ela pode ser dividida em três estágios: o primeiro é caracterizado por uma taxa decrescente e é chamado de fluência primária; o segundo é chamado de fluência secundária e acontece a uma taxa quase constante; o terceiro ou estágio

terciário acontece a uma taxa crescente até a fratura do material, como mostra a Figura 2.12.

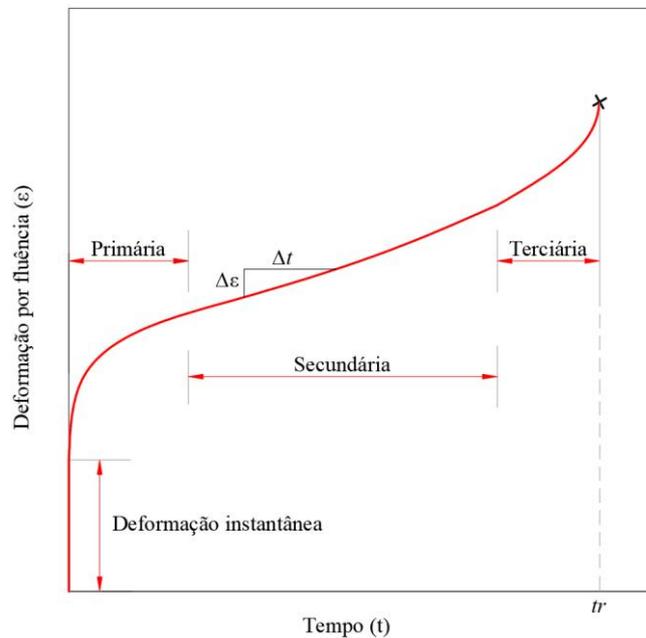


Figura 2.12 - Curva de fluência típica de tensão vs tempo sob tensão constante [39].

Se o carregamento sustentado é completamente removido, a deformação diminui a um valor definido como recuperação instantânea (Figura 2.13). Após a recuperação instantânea ocorre a recuperação por fluência. Esta se dá de forma gradual ao longo do tempo e inicialmente exibe um rápido aumento com o tempo até atingir um valor residual. A deformação por fluência desenvolvida durante o período de carregamento sustentado não pode ser recuperada inteiramente (fluência permanente), ou seja, apenas uma quantidade relativamente pequena de deformação é recuperável [51]. Para materiais viscoelásticos sujeitos a uma deformação constante há uma relaxação e um decréscimo gradual da tensão [39].

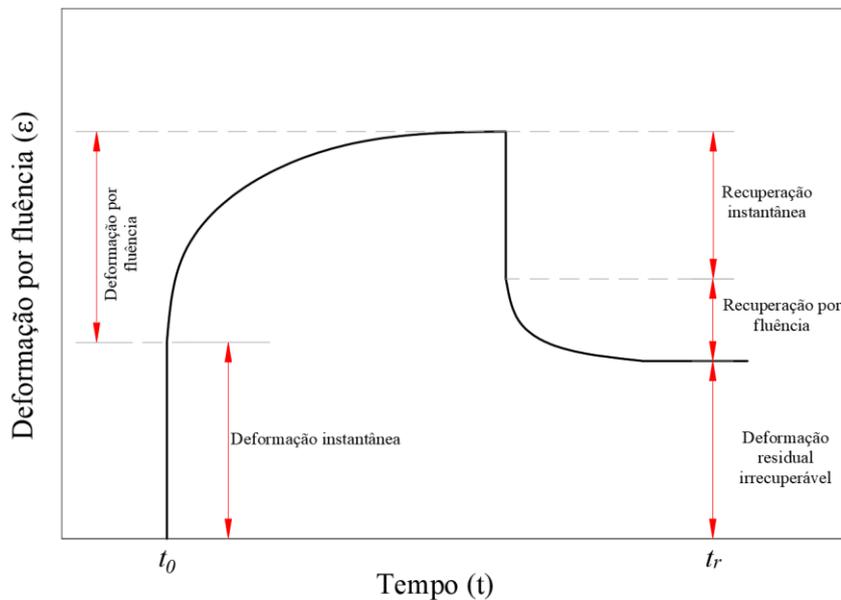


Figura 2.13 - Recuperação da deformação pela remoção da carga externa, adaptado de [51].

Segundo Atrushi [47], a deformação que ocorre no momento de aplicação da carga é definida como deformação elástica ou instantânea e é seguida por uma deformação por fluência. A deformação por fluência é frequentemente considerada como o aumento da deformação acima da deformação elástica e a deformação total é a soma da deformação instantânea e deformação por fluência.

A fluência em materiais cimentícios pode ser dividida em duas: a fluência básica (ϵ_{bc}) e a fluência por secagem (ϵ_{dc}) [47]. A primeira se refere à deformação que ocorre quando não há troca de umidade entre o concreto e o meio ambiente, e o transporte de água ocorre dentro do concreto. Já a deformação adicional causada pela perda de água para o ambiente é chamada de fluência por secagem.

Assim, a deformação total de uma amostra, sob as mesmas condições de umidade e temperatura, submetida a uma carga constante, se dá pela soma da fluência básica medida (ϵ_{bc}), a retração por secagem (ϵ_{fs}) e a fluência por secagem (ϵ_{dc}) [47]. Um diagrama do processo de deformação para tração e compressão está ilustrado na Figura 2.14.

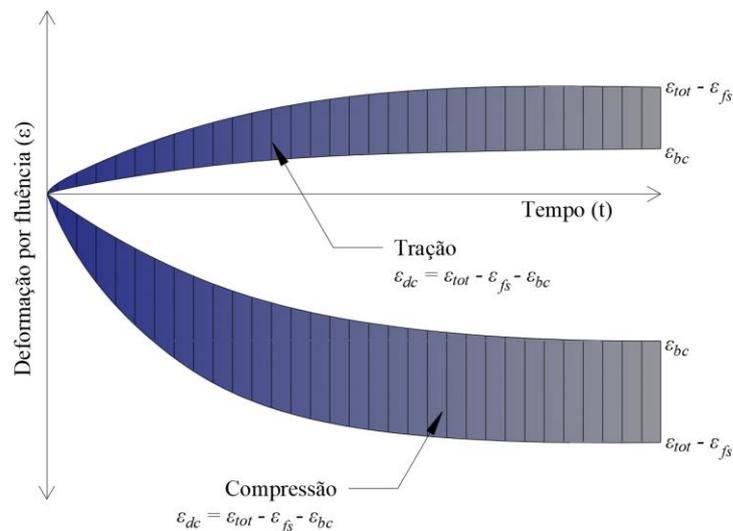


Figura 2.14 - Deformações no processo de fluência, baseado em [52].

2.2.3 Fatores que influenciam a fluência

A fluência de materiais cimentícios pode ser afetada e influenciada por diversos fatores. Bazant e Wittmann [49] dividem esses fatores em intrínsecos e extrínsecos. Os fatores intrínsecos são relativos às características do material. Já os fatores extrínsecos são fatores externos. A Tabela 2.4 mostra alguns fatores que podem afetar a deformação por fluência.

Tabela 2.4 - Fatores que influenciam a fluência de materiais cimentícios, adaptado de [49].

Fatores intrínsecos	Fatores extrínsecos
Consistência	Umidade relativa
Resistência à compressão	Temperatura
Módulo de elasticidade	Regime de cura
Módulo de elasticidade	Idade após cura
Fator água/cimento	Idade da amostra no carregamento
Tipo de cimento	Escala e geometria da amostra
Agregados	Tensão aplicada

2.2.3.1 Influência da idade de aplicação da carga

Alexander e Beushausen [50] avaliaram a deformação por fluência em pastas de cimento e concretos com diferentes idades de aplicação de carga e observaram

que a fluência é maior quando a carga é aplicada nas primeiras idades e menor quando aplicada em idades mais avançadas. Além disso, foi observado que a fluência nas primeiras idades não foi linearmente proporcional à razão tensão/resistência quando comparada com carregamento em idades mais avançadas. Em outro estudo, Niyogi [53] observou que a idade de aplicação da carga tem um grande efeito tanto na fluência básica quanto na fluência por secagem. A fluência básica inicialmente aumentou com a idade no momento de aplicação da carga e depois diminuiu. Já a fluência por secagem diminuiu uniformemente com a idade.

2.2.3.2 Influência do grau de hidratação da pasta de cimento

É conhecido que a relação água/cimento afeta a resistência, a rigidez e a permeabilidade do concreto. Sendo assim, com uma menor relação a/c obtemos uma maior resistência e maior rigidez e, conseqüentemente, uma diminuição da deformação por fluência [47].

Zhang et al. [54] estudaram a fluência em pastas de cimento com o objetivo de determinar o papel do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e observaram que a fluência de pastas é determinado pelas propriedades de fluência do C-S-H. Geralmente, a fluência de pastas são divididas em curto e longo prazo. Para a deformação de curto prazo, a deformação por fluência está associada a difusão da água do gel de C-S-H nos poros e fissuras da pasta e é caracterizada por uma deformação volumétrica, reversível e limitada. Já nas idades mais avançadas, essa deformação pode ser associada ao deslizamento das camadas de C-S-H e é caracterizada por uma deformação de forma, irreversível e ilimitada [55].

Parrott [56] investigou o efeito da fluência em amostras secas e úmidas com diferentes fatores a/c. A fluência diminuiu para ambas as amostras e todos os fatores a/c com o aumento da idade de aplicação da carga de até 60% da resistência máxima. Segundo o autor, um rearranjo da estrutura da pasta envolvendo uma pequena parte do volume total poderia ser responsável por esta redução da fluência. Além disso, foi observado que o grau de hidratação das amostras secas não se alterou depois de seladas, enquanto as amostras úmidas continuaram hidratando.

2.2.3.3 Influência da umidade relativa (UR)

Wyrzykowski e Lura (60) estudaram o efeito da umidade relativa (UR) de argamassas sob fluência. Segundo os autores, a redistribuição de água na aplicação da carga e a variação da umidade relativa poderia explicar apenas a deformação de idades iniciais do concreto. Dois mecanismos foram propostos: o primeiro seria que a água adicional fornecida durante a redistribuição seria consumida na hidratação e o segundo mecanismo seria uma redistribuição adicional da água em escala macroscópica.

Bazant et al. (61) avaliaram a influência da variação da umidade na taxa da fluência e concluíram que essa variação, positiva ou negativa, acelerou significativamente a fluência. Bennett e Loat (62) avaliaram o efeito do fator água/cimento (a/c) variando entre 0,3 e 0,525 na fluência para ambientes com umidades de 55 e 100%. Foi observado que a fluência aumentou com o aumento do fator a/c , e que para umidade de 100%, o impacto do fator a/c foi menor.

2.2.3.4 Influência da temperatura

Segundo Metha e Monteiro [43], a temperatura à qual o concreto é exposto pode ter dois efeitos opostos sobre a fluência. Se o concreto é exposto a uma temperatura acima de 21°C como parte do processo de cura antes de sofrer carregamento, a resistência aumentará e a deformação por fluência será menor do que de um concreto correspondente armazenado a uma temperatura de 21°C. Entretanto, a exposição à uma temperatura de 71°C durante o carregamento pode aumentar a fluência em aproximadamente 3,5 vezes.

Vidal et al. (63) estudaram o comportamento de fluência básica de concretos de alto desempenho (CAD) sujeitos a diferentes temperaturas. As amostras passaram por processo de cura saturada a 20°C por pelo menos 300 dias, para assegurar que a hidratação estivesse estabilizada antes do carregamento. Os autores observaram que aos 300 dias após o carregamento, as amostras submetidas a temperatura de 50°C apresentaram deformações aproximadamente 2 a 3,7 vezes maiores do que as amostras submetidas a 20°C. Já para o caso de amostras a 80°C, a deformação por fluência obteve uma maior variação. Aos 20 dias de ensaio, a deformação foi entre 5,7 e 9,2 vezes maior. Segundo os autores, este aumento pode

ter sido causado por algum dano pela alta temperatura, devido a diminuição do módulo de elasticidade.

Briffaut et al. [57] estudaram a influência da temperatura na deformação por fluência básica e observaram o comportamento da fluência em temperaturas de 20 e 60 °C. Foi constatado que a deformação do concreto a 60 °C foi quase 2 vezes maior que a medida a 20 °C. A variação de temperatura teve um maior impacto na fluência quando comparado a temperatura constante de 20 °C ou 60 °C. Essa variação poderia ter sido causada pelo aumento da movimentação da umidade no concreto devido a taxa de deformação por fluência pela mudança de temperatura.

2.2.3.5 Influência das fibras na fluência

Muitos estudos têm sido elaborados para analisar a influência das fibras na fluência à compressão de concretos. A maioria desses estudos foram feitos com fibras de aço e de polipropileno e alguns poucos utilizando fibras naturais.

O comportamento do concreto reforçado com fibras de aço sob fluência à compressão já foi estudado por diversos autores [42,56,66,58–65]. Muitos desses autores demonstraram que o uso de fibras de aço contribui significativamente na redução da fluência à compressão do concreto e que isso ocorre tanto para fluência básica quanto por secagem. Também foi observado que essa redução se intensifica com o aumento do teor de fibras de aço.

Spura et al. [66] realizaram testes para a criação de modelos de previsão de retração e fluência de compósitos reforçados com diversos tipos de fibras. Eles observaram a influência das fibras na redução da deformação por fluência de concretos reforçados com fibras de aço, quando estes são fabricados adequadamente, e de concretos reforçados com fibras sintéticas à medida em que o volume de fibras aumenta. Já Magant e Azari [65] conduziram testes em compósitos reforçados com fibras de aço, variando a matriz e observaram que a redução da fluência com a adição de fibras de aço é semelhante quando o reforço é feito em concreto e argamassas, sendo maior em pastas de cimento. Além disso, o reforço com fibras de aço não tem efeito significativo na recuperação elástica instantânea e na fluência de matrizes de cimento no descarregamento, demonstrando apenas uma restrição da deformação residual irreversível, a qual é mais dominante em idades mais avançadas.

Aslani e Nejadi [67] observaram que a adição de 5kg/m^3 de fibra de polipropileno de 65mm de comprimento em concretos reduziu cerca de 16% a fluência à compressão aos 7 dias, mas aumentou cerca de 12% no 364º dia, quando comparado ao concreto sem fibras. Para a adição de 30kg/m^3 de fibras de aço, houve uma redução de 22% aos 7 dias, e 4% aos 364 dias. Os autores relacionam esse comportamento com a diminuição do número de defeitos da matriz no concreto e na limitação do desenvolvimento de fissuras proporcionadas pela adição de fibras.

Lima [68] estudou o efeito da adição de fibras de aço e fibras de polipropileno em concretos submetidos a ensaios de fluência à flexão e à compressão. Nos ensaios de fluência à compressão, a resposta global das deformações das amostras reforçadas com os dois tipos de fibras se mostrou semelhante, com exceção dos compósitos com maiores adições de fibras de aço (30 kg/m^3). Para este tipo de compósito a deformação total foi cerca de 8% menor que para as demais amostras. Entretanto, quando analisado a deformação instantânea separadamente, percebeu-se uma tendência linear de aumento de deformações proporcionalmente ligado ao aumento de concentração volumétrica das fibras e, quando analisado a deformação por fluência, o aumento da fração volumétrica de fibras melhoraram a resposta do compósito submetido ao carregamento sustentado, reduzindo as deformações por fluência. No caso do ensaio de fluência à flexão de prismas entalhados e pré-fissurados, notou-se que para o caso das amostras reforçadas com fibras de polipropileno a resposta resultou em deformações maiores, tanto na zona comprimida quando na abertura de fissura. As fibras de aço foram favorecidas pela ancoragem mecânica, que tratou de transferir as tensões para a massa de concreto.

O efeito combinado de fibras de polipropileno (PP) e aço em concreto foi estudado por Błyszko [69] com o objetivo de que as fibras de PP tivessem efeito na fluência do concreto nas primeiras idades e as fibras de aço em idades mais avançadas. Eles observaram que a deformação por fluência à compressão com carregamento aplicado nas primeiras 24h aumentou com o uso combinado dessas fibras, mas com o carregamento aplicado ao concreto endurecido, a fluência com e sem fibras se tornaram aproximadas. Eles relacionaram esse comportamento ao baixo módulo de elasticidade das fibras de polipropileno que interagem com a matriz de cimento criando superfícies deslizantes adicionais, o que resulta em uma maior deformação do concreto nas primeiras idades. Já nas idades mais avançadas,

onde o módulo de elasticidade do concreto e das fibras é muito diferente, a influência do reforço combinado se tornou positivo.

2.2.3.6 Influência da interface fibra-matriz

De acordo com Metha e Monteiro [43], as condições de cura do concreto, a temperatura de exposição e a magnitude da tensão aplicada afetam mais a fluência por secagem do que a retração por secagem devido a uma maior influência desses fatores nas características da interface, ou seja, a porosidade, microfissuração e a resistência. As deformações por fluência podem ser diferentes dependendo das condições ambientais que podem acentuar a microfissuração da interface como ciclos de secagem e variação na umidade local, aumentando a fluência.

Outros estudos foram realizados a fim de entender o comportamento da fluência no arrancamento da fibra sob carregamento constante para verificar a deformação e arrancamento das fibras da matriz. Babafemi e Boshoff [62] realizaram ensaios de arrancamento sob carregamento constante em uma única fibra, usando fibras de polipropileno e PVA para reforço de matriz de concreto. Os resultados mostraram que quanto maior a carga, mais rápido o arrancamento. Os autores realizaram um ensaio de fluência na fibra, submetendo a 30% da resistência à tração média ao longo de 4 dias e alcançaram numa única fibra de polipropileno uma deformação de 40% do seu comprimento inicial. Após a análise dos resultados, foi concluído que a abertura de fissura dependente de tempo é razão de dois mecanismos, o arrancamento da fibra dependente do tempo e fluência da fibra.

Nieuwoudt e Boshoff [70] usaram a fibra de aço para o ensaio de arrancamento e foi observado que o arrancamento por carga constante possui uma resposta linear pelos mesmos mecanismos de fluência de um concreto comum, porém em casos em que a carga ultrapasse 50%, ocorrem zonas de microfissuração e o deslocamento repentino do concreto. Assim, quanto menor o módulo de elasticidade da fibra, menor será o resultado no enrijecimento da matriz restringindo a fluência na direção principal do compósito. No entanto, alguma restrição pode ocorrer através da aderência na zona interfacial fibra-matriz.

2.3 Comportamento dependente do tempo de compósitos reforçados com fibras naturais

Como visto anteriormente, a adição de fibras em concretos é eficiente em diminuir a deformação por fluência [28,45,52,60,61,71–74]. Porém, a maioria dos testes realizados são com compósitos cimentícios reforçados com fibras de aço e polipropileno (PP). Entretanto, Ramaswamy et al. [28] estudaram a influência de fibras naturais na fluência à compressão e retração e analisaram a adição de 1% fibras de 15 mm de juta, de coco e de bambu no concreto o que aumentou a deformação por fluência em 25%, 25% e 12%, respectivamente. Na retração, os concretos com fibras tiveram uma retração substancialmente menor quando comparadas com o concreto comum, de cerca de 50% para a fibra de juta, 70% para a de coco. O autor atribui essa redução da retração à capacidade de retenção de umidade das fibras vegetais, além disso, a presença de fibras orientadas aleatoriamente ao redor do C-S-H criaria uma condição de confinamento, inibindo o desenvolvimento da retração do concreto.

Com o objetivo de estudar o comportamento de longa duração de argamassas reforçadas com fibras de coco e sisal, Toledo Filho [42] analisou o comportamento à fluência e retração desses compósitos variando o volume de reforço, comprimento das fibras e condição de cura. Foi observado que o reforço com fibras reduz a fluência básica das matrizes de argamassa em cerca de 9% a 25%. Uma redução superior foi observada quando fibras de coco estavam presentes na mistura. Esse comportamento pode ser atribuído à aderência interfacial fibra-matriz, que pode ter restringido a fluência. Além disso, as fibras de coco foram responsáveis por reduzir a fluência total em até 8%, enquanto as fibras de sisal aumentaram em até 16%. A menor capacidade das fibras de reduzir a fluência total pode estar relacionada com o movimento de umidade dentro das amostras em razão do inchamento e retração das fibras. É possível que durante a secagem, esse fenômeno afete a componente de fluência por secagem mais que a componente de fluência básica. Um melhor comportamento das fibras naturais na restrição da fluência básica e total pode estar relacionado à capacidade de absorção das fibras durante o processo de misturas, ou seja, a água absorvida pode ser transferida para a pasta ao seu redor. Esse movimento de umidade pode afetar a intensidade da retração e da fluência, e a umidade relativa interna da argamassa [42].

Souza [75] estudou o comportamento de compósitos cimentícios reforçados com 3 camadas de fibras longas e alinhadas de curauá sob carregamento contínuo na flexão e a abertura de fissuras. Após 28 dias submetidas à um carregamento contínuo, as amostras não perderam capacidade de resistência da tensão, porém apresentaram uma perda de capacidade de deflexão e rigidez inicial, o que resultou em uma perda da tenacidade dos compósitos de 25%. Já a abertura de fissuras apresentou um aumento de 10% e 35%.

Sales [76] estudou o comportamento de compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu na fluência à compressão. As amostras, sob carregamento constante por 120 dias, apresentaram um aumento na capacidade dos compósitos de sofrer fluência, com a inserção do reforço fibroso na matriz. As amostras com 8% e 14% de polpa atingiram valores de fluência básica 6,78 e 11,63 vezes maiores que os matriz, respectivamente, após 120 dias de carregamento contínuo. Já para a fluência total, sob secagem, esses índices foram 5,7 e 6,2 vezes, respectivamente.

Em relação à retração, Toledo Filho [42] observou um aumento da retração por secagem em até 27% após 320 dias, com o reforço de fibras de coco e sisal. O autor relacionou esse comportamento com a capacidade das fibras naturais de criarem caminhos dentro da argamassa, os quais aumentam a rota de perda de umidade e ajudam a desenvolver deformações de retração mais altas.

Kawashima e Shah [77] estudaram o efeito da adição de fibras celulósicas saturadas como agente interno da retração autógena e por secagem de concretos. Os autores verificaram que a adição de 1% de fibras, dispersas adequadamente, foi capaz de controlar a abertura e propagação de fissuras induzidas pela retração livre devido ao mecanismo de cura interna. Porém, devido a sua baixa capacidade de absorção, são necessárias grandes quantidades de fibras para que haja um fornecimento de água adequado para cura interna. Os autores chegaram a um valor teórico de 4,5% de fibras necessárias para um fator água/cimento de 0,28 para que houvesse uma redução substancial da retração autógena. A retração por secagem de misturas contendo fibras saturadas se mostrou maior do que misturas com fibras secas. Isso se dá pelo fato das misturas com fibras saturadas tem um maior teor de água disponível para evaporar durante a secagem [77].

3 Desenvolvimento e Caracterização dos Materiais

3.1 Introdução

O presente capítulo apresenta as propriedades mecânicas dos materiais e seus constituintes. Os parâmetros para controle de qualidade mais frequentes da matriz dos compósitos no estado fresco é a trabalhabilidade e a resistência à compressão no estado endurecido. Os compósitos desenvolvidos devem possuir um comportamento de múltipla-fissuração sob tensões de tração e flexão e, para isso o reforço de tecido de sisal deve possuir resistência satisfatória além de uma adesão fibra-matriz suficiente [11].

Outro critério de qualidade para compósitos reforçados com fibras naturais se dá pela durabilidade. As fibras naturais possuem baixa durabilidade em ambiente alcalino, como a matriz de cimento, devido a um processo de degradação e envelhecimento levando a uma redução da resistência e tenacidade pós-fissuração [15]. Com isso, neste trabalho foi utilizada uma matriz cimentícia desenvolvida por Diaz [22] com substituição parcial de 50% do cimento por metacaulim e cinza volante para garantir a durabilidade dos compósitos.

Sabendo-se da grande variabilidade das resistências mecânicas das fibras naturais, ensaios de tração direta de filamentos de fibras de sisal foram conduzidos para obter a média das resistências das fibras utilizadas. Além disso, foram medidas as áreas das seções transversais das fibras para a obtenção de resultados mais precisos da tensão resistente dos filamentos.

3.2 Programa experimental

3.2.1 Materiais e dosagem

Os materiais utilizados para a confecção da matriz são: cimento Portland do tipo CP II F-32 da empresa LafargeHolcim; metacaulim fabricado pela Metacaulim do Brasil Indústria e Comercio Ltda.; cinza volante fabricada pela Pozo Fly; e areia de rio com diâmetro máximo de 1,18mm e mínimo de 150 μm .

O cimento Portland CII F-32 é, segundo a NBR 11578:1991 [78], uma composição de clínquer e sulfatos de cálcio e materiais carbonáticos.

A cinza volante e o metacaulim são materiais pozolânicos, ou seja, de acordo com a NBR 12653:2015 [79] são materiais que, quando moídos finamente e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades cimentícias. A composição química da cinza volante se encontra na Tabela 3.1. Os dados foram fornecidos pelo fabricante para o lote usado.

Tabela 3.1 - Composição química da cinza volante.

Propriedades	Especificações da NBR 12653	Especificação da cinza volante
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	> 70,0%	> 70,0%
SO_3	< 5,0%	< 5,0%
Teor de umidade	< 3,0%	< 2,0%
Perda ao fogo	< 6,0%	< 2,0%
Álcalis disponíveis em Na_2O	< 1,5%	< 1,5%
Índice de atividade pozolânica com cimento aos 20 dias	> 75,0%	> 75,0%
Índice de atividade pozolânica com a cal aos 7 dias	> 6,0 MPa	> 6,0 MPa
Água requerida	< 110,0%	< 110,0%

O metacaulim é constituído principalmente por compostos à base de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) na fase amorfa (vítrea), responsáveis por proporcionar alta reatividade com o hidróxido de cálcio (CH) presente no concreto. A composição do metacaulim se encontra na Tabela 3.2 fornecida pelo fabricante.

Tabela 3.2 - Composição química do metacaulim.

Composição química do metacaulim	
SiO ₂	59,0%
Al ₂ O ₃	32,9%
Fe ₂ O ₃	1,9%
TiO ₂	0,9%
CaO	0,3%
MgO	0,3%
K ₂ O	1,9%
Na ₂ O	0,1%
SO ₃	0,1%
Massa específica	2,56 g/cm ³

A granulometria do metacaulim foi determinada por meio de difração de raio laser, assim como a densidade, e a área de superfície específica determinada pelo método BET. Esses ensaios foram realizados pelo fabricante e os resultados fornecidos se encontram na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Distribuição granulométrica e área superficial específica do metacaulim.

Propriedades do metacaulim	
Diâmetro médio	12,4 µm
Densidade	2.650 kg/m ³
Área de superfície específica	327,0 cm ² /g

A areia de rio lavada foi utilizada como agregado miúdo com granulometria máxima de 1,18mm e mínima de 150 µm. Essa granulometria foi obtida em um agitador mecânico, da marca Mesh, e a partir de uma amostra de 1000 g adicionadas ao agitador, utilizando as peneiras de aberturas de 0,15, 0,30, 0,60 e 1,18 mm obteve-se a curva granulométrica da Figura 3.1.

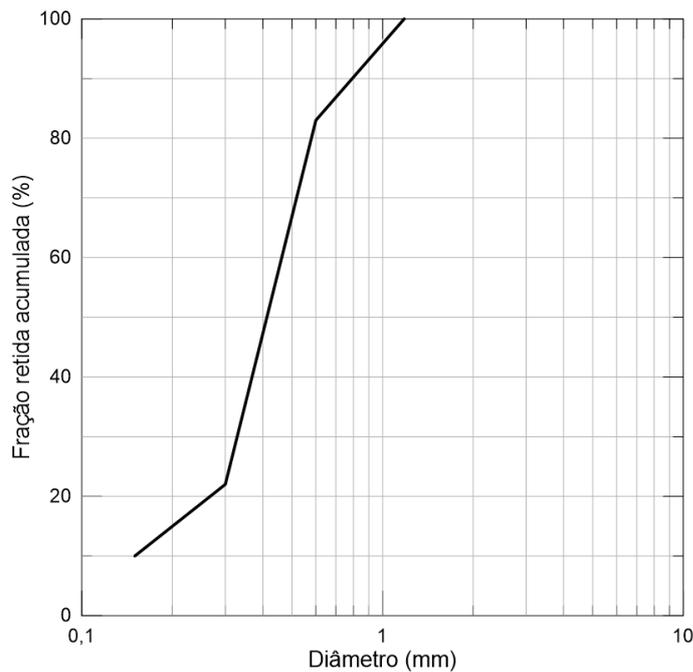


Figura 3.1 - Granulometria da areia fina utilizada.

Além do aglomerante, das adições minerais e agregado miúdo, utilizou-se um aditivo químico com a finalidade de conferir trabalhabilidade à matriz após adição das fibras. Foi utilizado o superplastificante Glenium 51 líquido, fabricado pela empresa BASF, com teor de sólidos de 32%. O teor de superplastificante foi ajustado a partir de ensaios de abatimento do tronco de cone, *flow table test*, de acordo com a ASTM C230/C230M:2014 [80], para cada matriz utilizada.

O traço adotado para os compósitos foi de 1:1:0,4 (areia:materiais cimentícios:água), sendo os materiais cimentícios compostos por 50% de cimento Portland, 10% de cinza volante e 40% de metacaulim, em massa, usando como base o trabalho de Diaz [22]. A quantidade adotada de superplastificante foi de 0,8% da massa dos materiais cimentícios, com o objetivo de aumentar a fluidez da matriz e assim ter uma maior distribuição e penetrar entre as fibras.

Além da matriz utilizada para fabricação dos compósitos, outras matrizes foram usadas para os estudos de longa duração, alterando a quantidade de metacaulim e superplastificante para os ensaios de retração por secagem e fluência à compressão. O fator água/cimento de 0,4 foi mantido para todas as matrizes analisadas. A Tabela 3.4 apresenta a nomenclatura e constituintes de cada matriz e as dosagens são apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.4 - Nomenclatura e constituintes de cada matriz utilizada.

Matriz	Dosagem
M4008	40% metacaulim e 0,8% superplastificante
M0000	Referência com 0% metacaulim e 0% superplastificante
M2003	20% metacaulim e 0,3% superplastificante
M4004	40% metacaulim e 0,4% superplastificante

Tabela 3.5 - Dosagem das matrizes utilizadas.

Dosagem das matrizes	Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Metacaulim (kg/m ³)	Cinza Volante (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Superplastificante (kg/m ³)
M4004	442,8	885,6	354,2	88,6	339,2	22,1
M0000	812,3	902,5	-	90,2	361,0	-
M2003	626,0	894,3	178,8	89,4	352,0	8,4
M4004	442,8	885,6	354,2	88,6	346,7	11,1

3.2.2 Procedimento de mistura

Todas as matrizes utilizadas neste trabalho passaram pelo mesmo processo de mistura, fazendo-se as devidas alterações no traço (ver Tabela 3.5). As argamassas foram misturadas em um misturador planetário com capacidade de 5 litros, nos seguintes passos:

- a) A areia foi misturada com metade da água por 1 minuto em velocidade de 136 rpm;
- b) Adição dos materiais cimentícios e da água restante, misturando por 30 segundos a 136 rpm;
- c) O superplastificante foi adicionado lentamente, distribuindo por todo o recipiente, e homogeneizado com os outros materiais por 4 minutos a 281 rpm.

A Figura 3.2 mostra as etapas de mistura dos materiais no misturador de 5 litros.



Figura 3.2 - Etapas da mistura da argamassa: (a) areia com metade da água; (b) materiais cimentícios; (c) argamassa antes de adicionar o superplastificante e (d) após adicionar o superplastificante.

3.2.3 Propriedades da matriz no estado fresco

Para as moldagens dos compósitos, a trabalhabilidade é um fator importante para que a argamassa tenha a capacidade de penetrar entre as fibras, de tal forma que o tecido de sisal possa estar totalmente protegido pela matriz. Para isso, testes de consistência foram realizados conforme a ASTM C230/C230M (2014), modificado para as dimensões do molde disponível. O ensaio de espalhamento foi realizado em uma mesa plana e lisa, com desmoldante aplicado previamente sobre a mesa, e um molde em formato de tronco de cone com dimensões de 12,5 mm x 8,0 mm x 5,5 mm (base maior x base menor x altura). As misturas foram adicionadas no molde até a borda em três camadas de mesma altura, sendo a cada camada abatidas com 15, 10 e 5 golpes, respectivamente. Depois de cheio, o molde foi retirado da mesa em um movimento totalmente vertical para que a mistura se espalhasse sobre a mesa até que não houvesse uma diferença de mais de 5 mm entre as medidas consecutivas do diâmetro e não houvesse nenhum tipo de segregação dos agregados. A Figura 3.3 apresenta o processo da determinação da trabalhabilidade das matrizes.



Figura 3.3 - Etapas do espalhamento: (a) argamassa sendo colocada no tronco de cone; (b) argamassa após o espalhamento; (c) detalhe da borda, na qual é possível observar não haver segregação dos materiais e (d) medida do diâmetro.

3.2.4 Propriedades da matriz no estado endurecido

As matrizes utilizadas foram testadas à compressão uniaxial para determinar suas resistências. Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados em três idades diferentes em um equipamento universal de ensaios mecânicos MTS, modelo 810/500, com capacidade de carga de 500 kN, aos 7, 14 e 28 dias. Para cada uma das idades, foram realizados testes em três corpos cilíndricos com dimensões de 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro. Os corpos de prova foram moldados em cilindros metálicos, desmoldados após 24h e deixados em cura úmida, com temperatura e umidade relativa controlada de 26 ± 1 °C e 100%, respectivamente, até um dia antes do ensaio. Então, foram faceados para obtenção de uma face para aplicação da carga uniforme e sem excentricidades. A taxa de carregamento utilizada foi de 0,1 mm/min e o deslocamento vertical foi medido por meio de dois transdutores de deslocamento (LVDT's) de 5 cm de comprimento acoplados em anéis de acrílico ao redor dos corpos de prova. O deslocamento considerado foi medido por meio da média dos dois transdutores. A Figura 3.4 apresenta o arranjo utilizado.

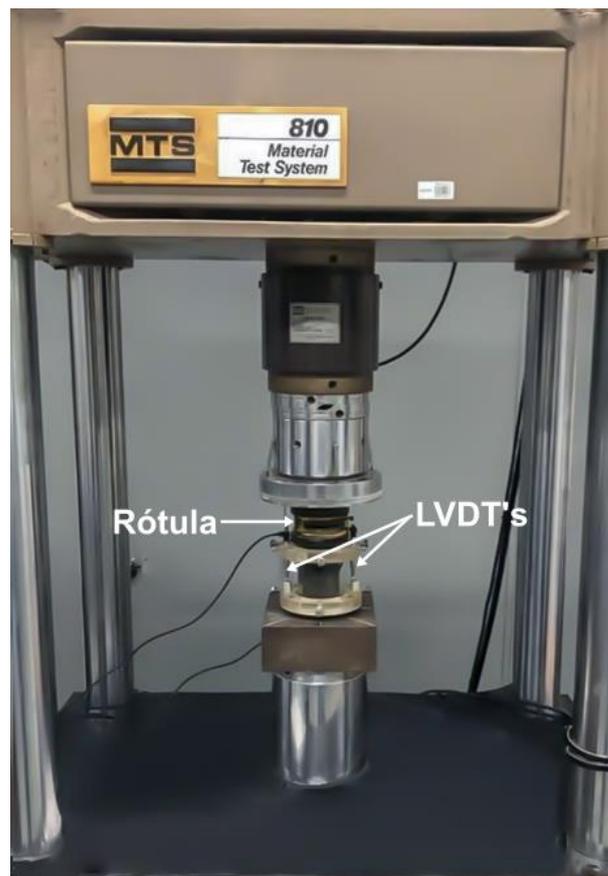


Figura 3.4 - Arranjo experimental do ensaio de compressão uniaxial.

A resistência à compressão dos corpos de prova foi calculada dividindo-se a força aplicada pela área transversal. Já o valor da deformação foi calculado a partir da razão entre a média dos deslocamentos dos LVDT's e a distância entre os anéis de acrílico, os quais servem de apoio para os LVDT's.

3.2.5 Fibra de sisal

As fibras de sisal utilizadas neste trabalho são provenientes da cidade de Valente no Estado da Bahia. Essas fibras foram extraídas das folhas da planta *Agave sisalana* por meio de um processo chamado de decorticação [34]. As fibras foram recebidas em feixes de longas fibras com comprimento de aproximadamente 1 metro e, antes de serem utilizadas nos ensaios, passaram por um processo para retirada das impurezas, de forma a melhorar o desempenho dos compósitos fabricados. Esse processo de retirada das impurezas consiste na imersão das fibras

em água aquecida a uma temperatura de aproximadamente $70\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$ por volta de uma hora e, posterior secagem ao ar por 48 horas. Então, as fibras são penteadas para separação das mesmas, como mostra a Figura 3.5.

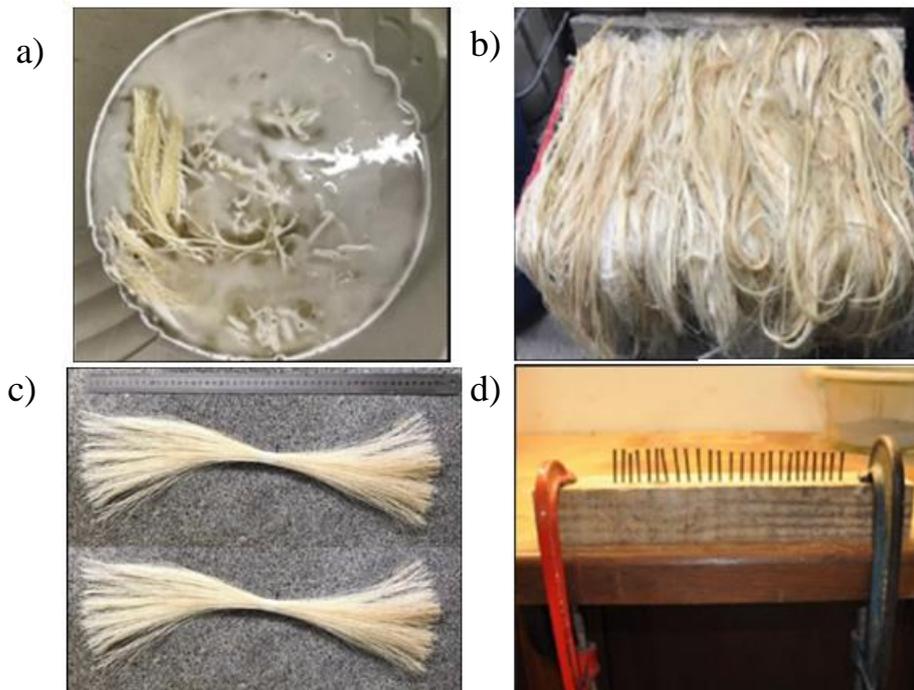


Figura 3.5 - Processo de tratamento das fibras de sisal: (a) imersão em água com temperatura a $70\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$, (b) secagem em temperatura ambiente, (c) fibras após o processo de tratamento, (d) aparato utilizado para separar as fibras após secagem.

3.2.5.1 Microestrutura

Como as fibras de sisal são filamentos extremamente finos, determinar a sua área transversal é uma tarefa difícil, sendo necessário o uso de técnicas de micrografias avançadas. Neste trabalho foram analisadas 10 amostras em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo QUANTA FEG 400, do laboratório de microscopia do CETEM – MCTI. As fibras foram imersas em água por 24h e depois secas em temperatura ambiente por 48h e então cortadas em segmentos de aproximadamente 10 mm e inseridas em moldes de 30 mm de diâmetro e 12 mm de altura, fabricados com resina (Struers Epofix). Os moldes passaram por ciclos de vácuo para remoção de ar e deixados em cura por 48 h. Foram feitos furos de 1,5 mm de diâmetro nos moldes, para adição das fibras e para permitir um melhor alinhamento destas, e então os furos foram preenchidos

novamente com resina, sendo necessário novamente um processo de cura. Após a cura das amostras, elas passaram por um processo de polimento. O polimento foi realizado em água resfriada com a utilização de discos de metal impregnados com diamante com partículas de 125, 40, 9 e 6 μm , durante 3, 4, 4 e 10 min, respectivamente. E, por fim, receberam um revestimento de prata antes da análise no MEV. O processo foi desenvolvido e descrito por Gomes [78] e é representado na Figura 3.6.

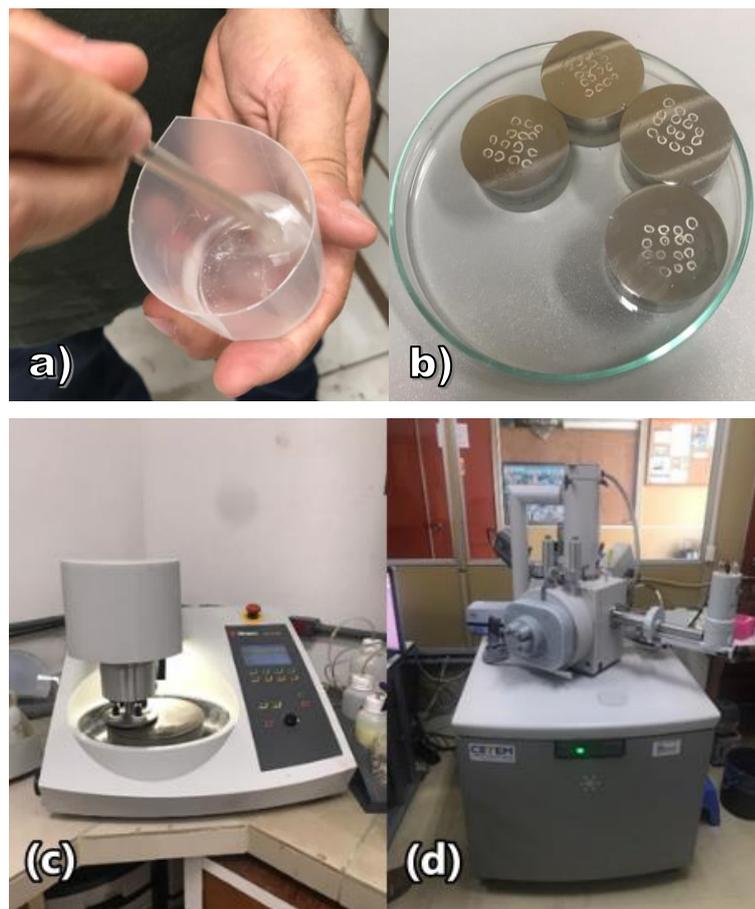


Figura 3.6 - Preparação das amostras para processo de microscopia: (a) preparo da resina, (b) amostras após receberem revestimento de prata, (c) polidora utilizada para polimento das amostras e (d) MEV utilizado na análise das fibras.

A partir das micrografias, foi possível medir as áreas da seção transversal de cada fibra no software ImageJ com uma ferramenta de contorno do próprio software, como ilustrado na Figura 3.7.

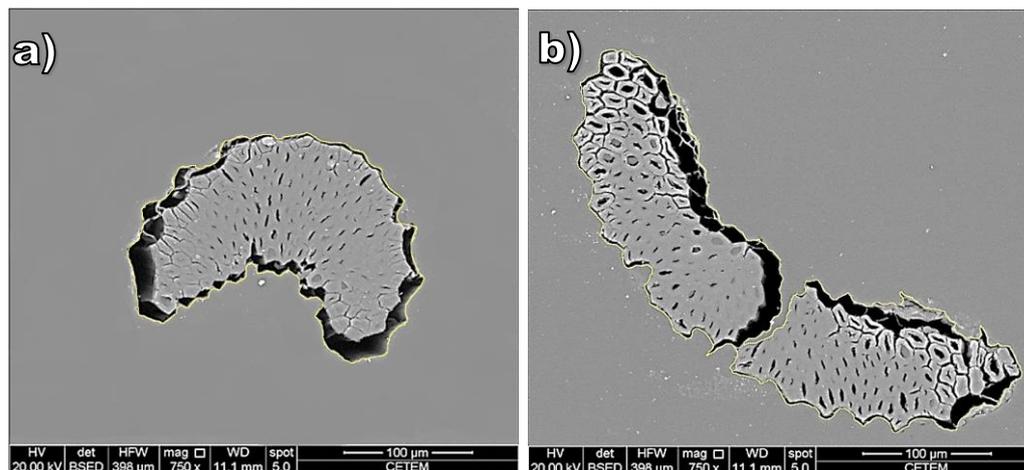


Figura 3.7 - Seção transversal das fibras de sisal obtidas por meio do processo de microscopia: (a) seção em formato de ferradura e (b) seção em formato de arco.

3.2.5.2 Tração

A caracterização mecânica da fibra de sisal foi realizada a partir de ensaios de tração, segundo a norma ASTM C1557:2014 [81], com algumas modificações. Foram testadas 10 fibras com comprimento inicial livre de 250 mm após passarem pela etapa inicial de tratamento em imersão em água em temperatura a 70 °C, como visto anteriormente no item 3.2.5. O comprimento livre (l_0) foi escolhido por ser o comprimento utilizado na fabricação dos compósitos usados nos ensaios de flexão a quatro pontos. Para facilitar a montagem das fibras no equipamento universal de ensaios mecânicos MTS 810 com capacidade de 250 KN, foram necessárias guias feitas de papel cartão de dupla camada, como mostra a Figura 3.8 (a). Como as fibras utilizadas são muito finas e com um comprimento inicial alto, as fibras foram coladas nas guias para evitar o seu deslizamento e ajudar na fixação no arranjo experimental. Como pode ser visto na Figura 3.8 (b), as fibras romperam ao longo do seu comprimento, sem danos próximos às garras, validando o ensaio de tração.

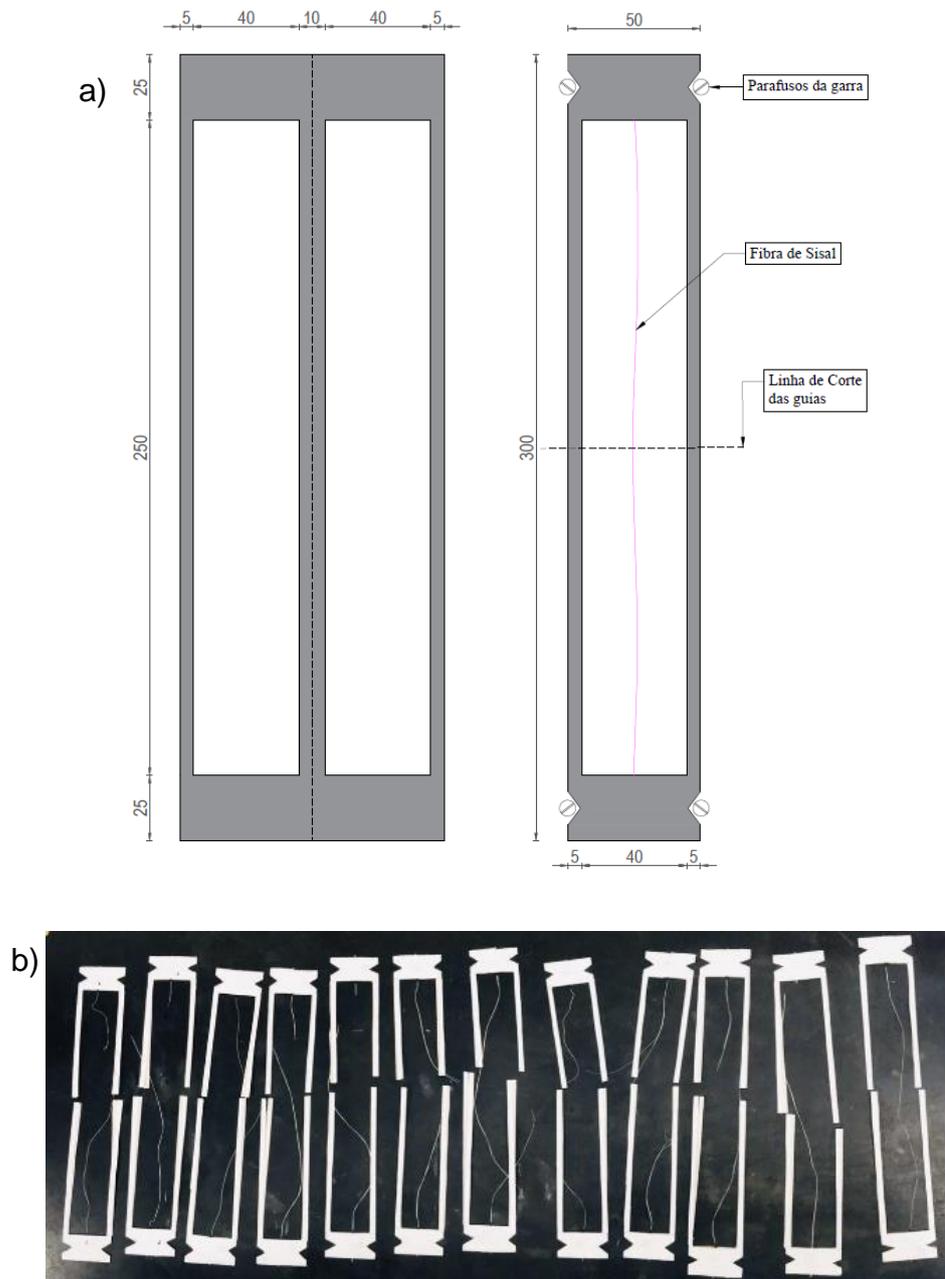


Figura 3.8 - Guias de papel cartão para ensaio de tração dos filamentos de fibra de sisal: (a) esquema de preparação, corte e dobra das guias; (b) amostras rompidas após o procedimento.

Para a realização dos ensaios foi necessária a utilização de uma célula de carga de 100 N para aumentar a precisão na aquisição dos dados. Os ensaios foram realizados a taxa de deslocamento do atuador hidráulico de 0,1 mm/min. O deslocamento foi medido por meio do equipamento universal de ensaios mecânicos MTS 810. O arranjo experimental completo do ensaio encontra-se na Figura 3.9.

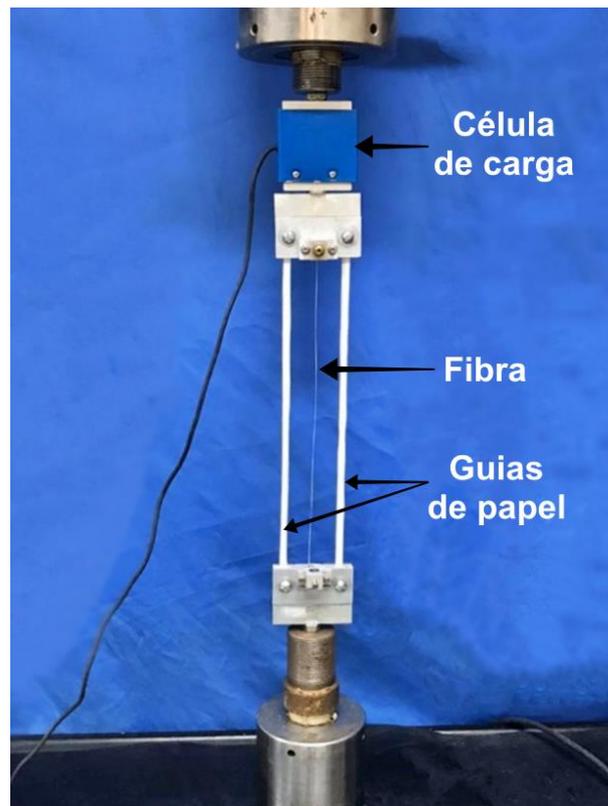


Figura 3.9 - Arranjo experimental do ensaio de tração das fibras de sisal.

Posteriormente foram realizados os cálculos para deformação e tensão das fibras. A resistência foi calculada dividindo-se a força pela área transversal de cada fibra, a partir da Tabela 3.8. A deformação foi obtida dividindo o deslocamento pelo comprimento inicial de 250 mm das fibras utilizadas no ensaio.

3.3 Resultados e discussões

3.3.1 Resultados do ensaio de espalhamento

Testes foram realizados com cada matriz para se obter a quantidade necessária de superplastificante até que fossem encontrados valores aproximados de consistência. Além disso, com o objetivo de verificar o efeito da trabalhabilidade em argamassas, a matriz M4004 foi analisada. Os resultados de consistência obtidos são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Consistência de cada matriz utilizada a partir do ensaio de espalhamento.

Matriz	Consistência
M4008	350 mm
M0000	300 mm
M2003	360 mm
M4004	250 mm

3.3.2 Resultados do ensaio de compressão uniaxial

Os resultados das resistências das matrizes em diferentes idades são apresentados na Figura 3.10.

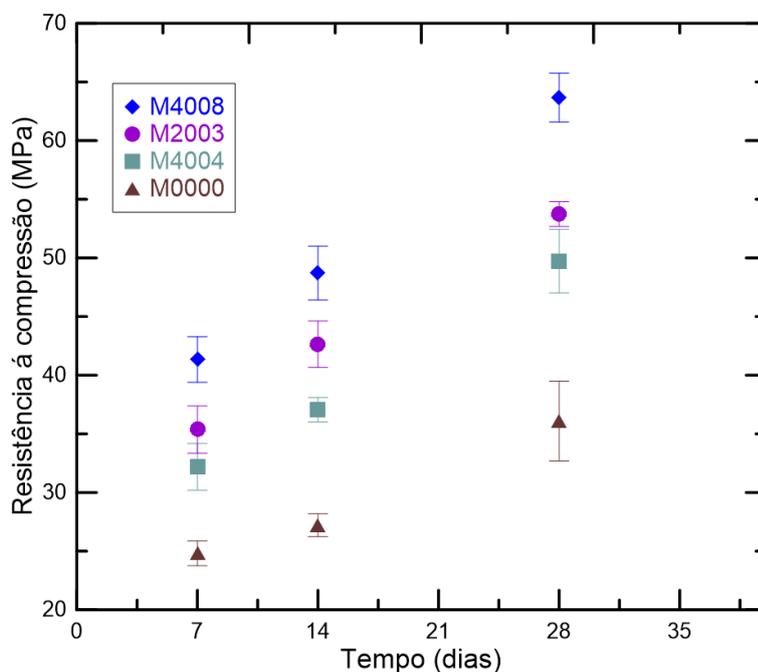


Figura 3.10 - Evolução da resistência à compressão das matrizes.

Como pode ser visto na Figura 3.10, a evolução da resistência de todas as matrizes se dá de forma crescente com o tempo, sendo maior nos 28 dias, como esperado. Outra observação a ser feita é que quanto maior a quantidade metacaulim utilizado na dosagem, têm-se um ganho de resistência quando comparamos as matrizes M4008, M2003 e M0000, as quais possuem uma consistência similar. Quando são comparadas as amostras M4008 e M4004 verifica-se uma maior

resistência para a argamassa com maior quantidade de superplastificante e com uma maior fluidez.

Existem três fatores que podem contribuir para o aumento da resistência da argamassa com a substituição do cimento Portland pelo metacaulim. O primeiro se dá pela aceleração da hidratação do cimento, o segundo se dá pela reação pozolânica do metacaulim com o hidróxido de cálcio e o terceiro fator é o efeito físico de *filler*, que ocorre devido à diminuição da porosidade total do sistema promovida pelo preenchimento dos vazios de empacotamento, de poros capilares e do gel do C-S-H [82].

No caso das amostras M4004 com alto teor de metacaulim e baixo teor de aditivo superplastificante, a trabalhabilidade obtida foi menor do que a mistura M4008, afetando a consistência e adensamento, o que prejudicou a resistência à compressão [83].

Segundo Metha e Monteiro [43], o módulo de elasticidade pode ser definido como a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea dentro de um limite proporcional adotado, e é dado pelo coeficiente angular da região inicial da curva tensão versus deformação sob carregamento uniaxial. Dessa forma, os módulos de elasticidade foram calculados utilizando aproximadamente 30% da deformação máxima das argamassas, equivalente a região linear inicial (Tabela 3.7) e foi observado um aumento no módulo à medida que a resistência à compressão das misturas aumentou.

Tabela 3.7 - Módulo de elasticidade das argamassas aos 28 dias de idade, desvio padrão entre parênteses.

Amostra	Módulo de elasticidade aos 28 dias (GPa)
M0000	25,15 (0,88)
M2003	29,79 (0,92)
M4008	32,28 (0,73)
M4004	27,25 (0,67)

3.3.3 Resultados do ensaio de tração na fibra

Foi possível notar, por meio do processo de microscopia, que as fibras apresentam dois formatos típicos da seção transversal, um primeiro mais arredondado e outro formato mais curvo e longo. A partir da determinação das áreas

de cada fibra (Tabela 3.9), é possível notar a grande variabilidade entre as seções transversais, resultando em um alto desvio padrão.

A partir dos gráficos tensão x deformação das fibras (Figura 3.11), foram determinados os módulos de elasticidade, resistência à tração e a deformação máxima. O módulo de elasticidade foi obtido a partir do coeficiente angular inicial da curva tensão x deformação.

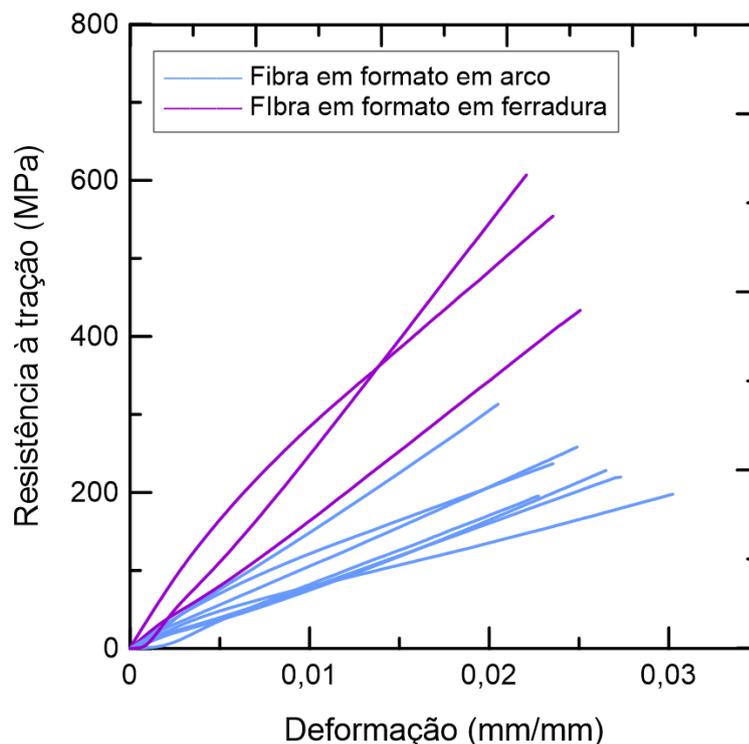


Figura 3.11 - Curva de resistência à tração versus deformação das fibras de sisal.

Como pode ser observado na curva tensão x deformação, as fibras tiveram respostas diferentes de acordo com o formato da seção transversal, possuindo resistências maiores para as fibras em formato de ferradura e um alongamento superior para as que tinham um formato em arco. Os valores encontrados (Tabela 3.8) condizem com os valores encontrados na literatura [16,25,33]. Pode-se observar que a resistência da fibra de sisal possui um valor elevado, o que, alinhado ao fato da sua alta disponibilidade, explica o seu uso em pesquisas.

Tabela 3.8 - Propriedades mecânicas das fibras de sisal. Desvio padrão entre parênteses.

Fibra	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento máxima (%)	Módulo de elasticidade (GPa)	Força (N)	Área (μm^2)	Tipo de fibra
1	236,8	2,36%	15,2	9,4	39792	Arco
2	657,9	2,76%	36,1	11,2	17003	Ferradura
3	195,4	2,59%	11,0	9,7	48919	Arco
4	197,8	3,02%	10,9	13,7	43839	Arco
5	313,1	2,05%	21,2	18,0	41463	Arco
6	433,5	2,51%	17,8	8,5	32951	Ferradura
7	258,2	2,49%	19,2	14,0	61200	Arco
8	228,2	2,65%	13,2	9,0	40893	Arco
9	219,8	2,73%	9,9	14,5	23823	Arco
10	606,9	2,21%	29,7	8,1	39246	Ferradura
Média	566,1 ($\pm 88,4$) MPa	2,49% ($\pm 0,19$) %	27,9 (6,7) GPa	9,3 (3,2) N	29733 (8487) μm^2	Ferradura
Média	235,6 ($\pm 28,9,21$) MPa	2,56 ($\pm 0,2$) %	14,4 (3,5) GPa	12,6 (2,78) N	42847 (7262) μm^2	Arco

3.4 Conclusão

Neste capítulo, a matriz e a fibra de sisal usadas para fabricação dos compósitos foram caracterizadas, além das matrizes com diferentes teores de metacaulim e superplastificante. Para garantir a durabilidade do compósito, metade da massa do cimento Portland foi substituída por materiais pozolânicos, metacaulim e cinza volante, conforme estudos anteriores [10,15,22,40]. Para garantir a trabalhabilidade, a matriz foi caracterizada segundo esta propriedade, por meio do ensaio de espalhamento, resultando em 300 mm, 360 mm e 350 mm para as adições de 0%, 20% e 40% de metacaulim, respectivamente, e 250 mm para a matriz com 40% de adição de metacaulim e 0,4% de superplastificante. A resistência à compressão e o módulo de elasticidade foram medidos para as matrizes estudadas, observando um aumento do módulo de elasticidade à medida que a adição de metacaulim aumentou. Aos 28 dias, a resistência à compressão da matriz utilizada para fabricação dos compósitos (M4008) foi de 63,65 ($\pm 2,84$) MPa, 18% superior à matriz com 20% de metacaulim e 75% superior à matriz de referência, sem metacaulim.

A fibra de sisal também foi caracterizada. Um comprimento de 250 mm foi escolhido para os ensaios de tração da fibra e, para ter uma medida precisa da área, técnicas de análise de imagem foram usadas em imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura dos filamentos usados no ensaio de tração da fibra. A média da área foi de $38913 (\pm 8592) \mu\text{m}^2$. A resistência à tração foi de $334,8 (\pm 172,2)$ MPa, o módulo de elasticidade obtido foi de $18,43 (\pm 8,63)$ GPa e o alongamento máximo do filamento da fibra foi de $2,54 (\pm 0,28)$ %. Além disso, as fibras foram agrupadas de acordo com geometria da sua seção transversal, em formato de arco e de ferradura. Altos valores de desvio padrão foram obtidos na caracterização da fibra, como esperado, por se tratar de um material heterogêneo.

4 Desenvolvimento e caracterização mecânica dos compósitos

4.1 Introdução

O concreto reforçado com tecido de sisal é classificado como um compósito de alto desempenho que utiliza fibras alinhadas retas e paralelas de sisal como reforço contínuo. Esse tipo de compósito é geralmente usado para elementos finos de concreto ou camadas de reforço para estruturas de concreto quando fabricados de forma correta e utilizados materiais adequados [84].

No presente estudo, foram feitas análises do comportamento mecânico dos compósitos e sua formação de fissuras, capacidade no suporte de carga e a eficiência do reforço com variações no número de camadas e as condições de saturação das fibras. Para isso, dois ensaios foram realizados: ensaio de tração direta e flexão a quatro pontos.

4.2 Procedimento experimental

4.2.1 Fabricação dos compósitos

Os materiais utilizados na fabricação dos compósitos foram descritos no item 3.2.1. Cada camada de fibras utilizada possuía 490 mm de comprimento, aproximadamente, e 6,5 g. As fibras foram posicionadas alinhadas longitudinalmente em formas de metal forradas com plástico autoadesivo. De forma intercalada, após cada camada de matriz, foi adicionado o reforço até o número desejado de camadas.

Os compósitos possuíam dimensões de 500 mm de comprimento por 60 mm de largura e a espessura variando com a quantidade de camadas, sendo 10 mm para os compósitos de três camadas e 12 mm para os compósitos com cinco camadas. Além disso, os compósitos de três camadas tiveram duas variações para o reforço, sendo compósitos reforçados com camadas de fibras saturadas e fibras com umidade natural (após processo de secagem em temperatura ambiente por 48h). A

variação do número de camadas levou a compósitos com diferentes frações volumétricas de fibras, sendo 6% para os compósitos com três camadas e 10% para compósitos com cinco camadas.

O processo de tratamento das fibras para utilização nos compósitos seguiu o mesmo descrito no item 3.2.5, sendo cortadas em filamentos de 490 mm após a separação delas. Porém, para o reforço saturado, as fibras passaram por um período de imersão em água por pelo menos 1h para que pudessem ficar totalmente saturadas e posteriormente uma nova separação para alinhá-las para a moldagem. A Figura 4.1 mostra o processo de moldagem para os dois tipos de compósitos.

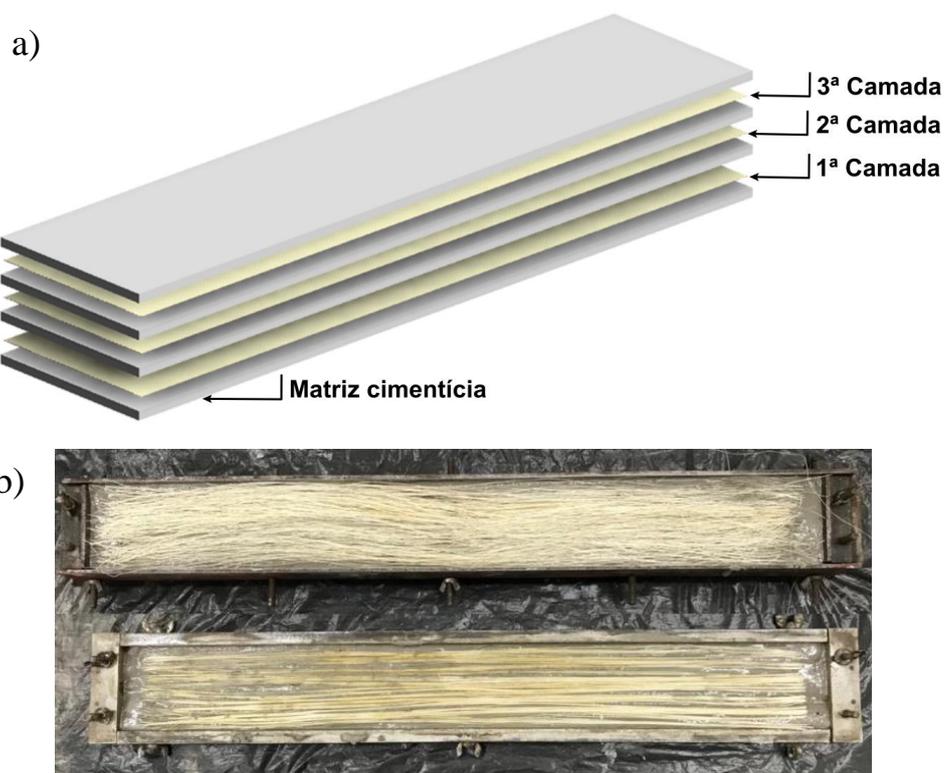


Figura 4.1 – Etapas de fabricação (a) e amostras dos compósitos com camadas de fibras com umidade natural (região superior da foto) e saturadas (região inferior da foto) (b).

O processo de moldagem dos compósitos com reforço saturado é facilitado com o alinhamento das fibras, enquanto o reforço com umidade natural forma uma camada de fibras desordenadas, dificultando a fabricação dos compósitos. Além disso, as fibras saturadas não absorvem a água da matriz, o que permite um maior controle do fator a/c e uma maior trabalhabilidade da mistura.

Após a moldagem, as amostras foram cobertas por plástico filme por um período de 48h, para que pudessem ter resistência suficiente para não quebrarem. Posteriormente foram levadas para cura úmida até a idade de 28 dias, quando foram ensaiadas.

4.2.2 Comportamento mecânico

A fim de estudar o comportamento mecânico e analisar os mecanismos de formação de fissuras dos três tipos de compósitos desenvolvidos, dois ensaios foram realizados: tração direta e flexão a quatro pontos. Foram usados três corpos de prova para cada tipo de compósito, resultando em um total de nove amostras.

4.2.2.1 Ensaio de flexão a quatro pontos

Foram realizados ensaios de flexão a quatro pontos em uma máquina universal de ensaios mecânicos MTS, modelo 810 com capacidade de 500 kN, utilizando uma célula de carga com capacidade de 2,5 kN para uma aquisição dos dados do carregamento mais precisa.

As amostras foram fabricadas de acordo como mostrado no item 3.2.1. As dimensões das amostras foram de 250 mm x 60 mm x (10 e 12) mm para os compósitos com três camadas (com fibras com umidade natural e saturadas) e cinco camadas, respectivamente. Os ensaios foram realizados com controle de deslocamento a uma taxa de 2,0 mm/min aos 28 dias de idade das amostras. O deslocamento vertical foi medido por meio de dois LVDT's posicionados na parte central da amostra, um de cada lado, como mostra a Figura 4.2.

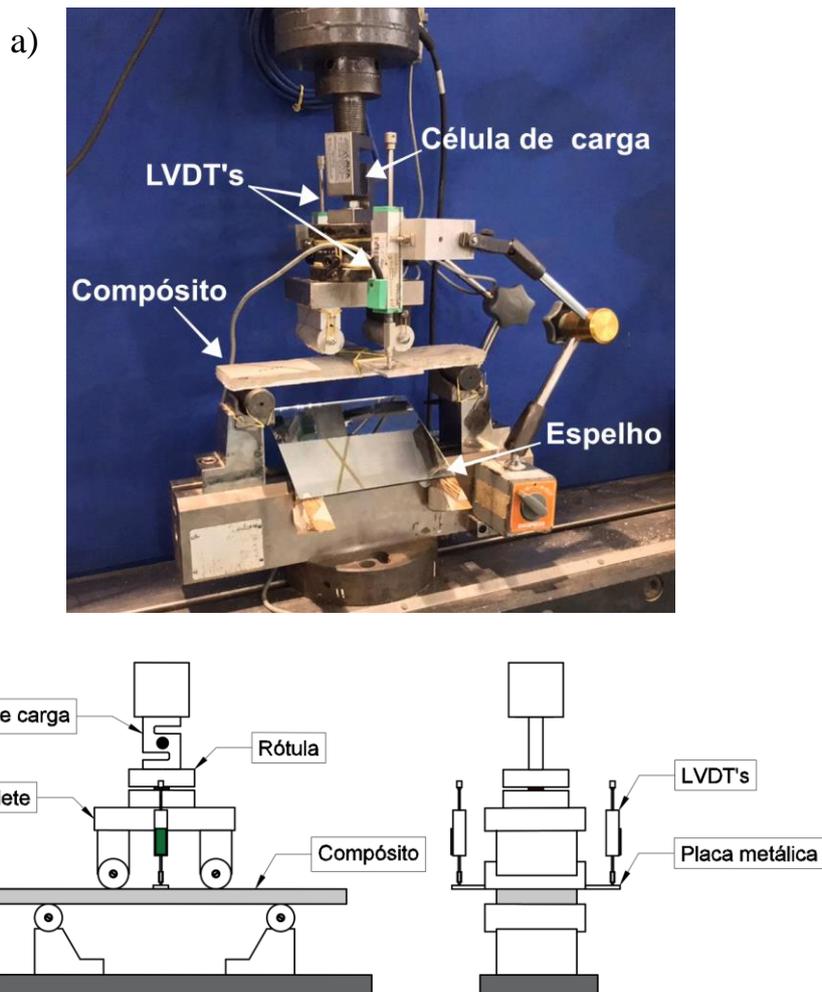


Figura 4.2 - Arranjo experimental (a) e esquema (b) utilizado para ensaios de flexão a quatro pontos com vão entre pontos de aplicação de carga com 7 cm.

Um espelho foi utilizado abaixo da amostra para ter visão do aparecimento e progressão das fissuras do compósito. Uma câmera digital, modelo Nikon D90, a qual foi posicionada para a amostra completamente fixa. O software Câmera ControlPro2 foi utilizado para tirar fotos a cada 15 s com uma resolução de 4200 x 2690 pixels. O software ImageJ foi usado para medir o espaçamento entre as fissuras, usando o número de pixels como referência.

4.2.2.2 Tração

Ensaio de tração direta foram realizados em uma máquina MTS, modelo 311 com capacidade de 1000 kN, com garras hidráulicas em forma de cunhas, a uma taxa de deslocamento do atuador de 0,2 mm/min. As amostras tinham dimensões de 500 mm x 60 mm x (10 mm e 12 mm) como especificado anteriormente e foram

ensaiadas aos 28 dias de idade. As amostras foram retiradas da câmara de cura um dia antes dos ensaios. Placas de aço foram presas nas extremidades das amostras com parafusos, e o conjunto foi preso na máquina, resultando em condição bi-engastada do ensaio. Para cada amostra foi utilizado um torque diferente, com o auxílio de um torquímetro, sendo de 8 N*mm para os compósitos de três camadas e 15 N*mm para os com cinco camadas.

Dois LVDT's foram posicionados na lateral das amostras, para aquisição do deslocamento com comprimento livre de 190 mm para o cálculo da deformação. O arranjo experimental utilizado é mostrado na Figura 4.3.

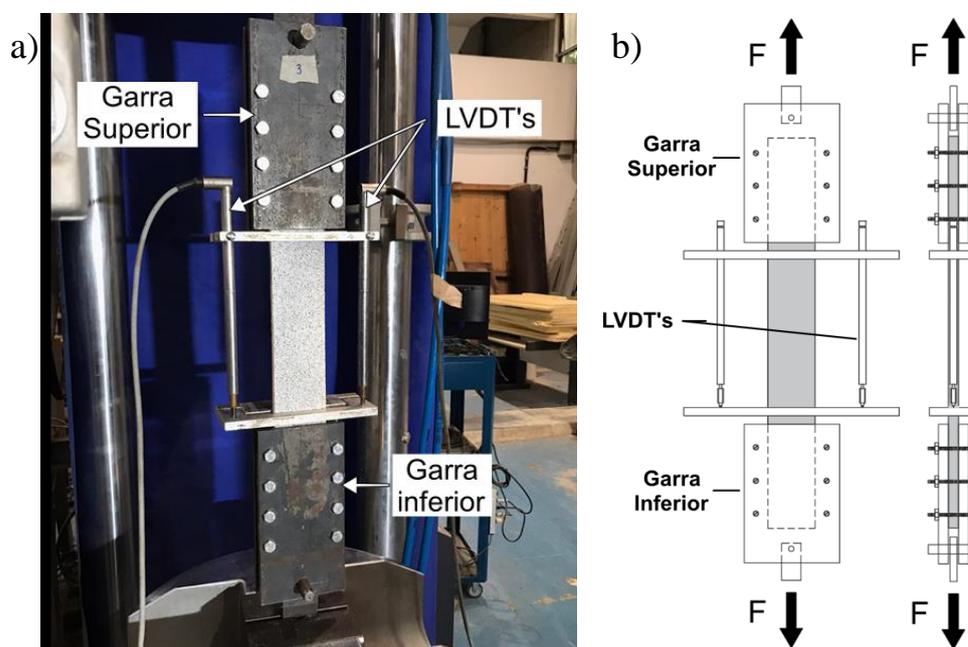


Figura 4.3 – Arranjo (a) e esquema experimental (b) usado para ensaios de tração direta.

Para acompanhar o aparecimento e a abertura das fissuras ao longo do ensaio, foi utilizada uma câmera digital, modelo Nikon D90, a qual foi posicionada para a amostra completamente fixa. O software Câmera ControlPro2 foi utilizado para tirar fotos a cada 10 s com uma resolução de 4200 x 2690 pixels. Cada imagem representa um momento do ensaio. Assim, podemos correlacionar o momento da abertura e espaçamento das fissuras com a curva tensão x deformação, como feito no ensaio de flexão a quatro pontos. Esse procedimento auxiliou na identificação das zonas que representam os estágios de carregamento do ensaio.

O método utilizado para acompanhar a formação e desenvolvimento de fissuras foi a correlação digital de imagens (DIC), desenvolvido e aprimorado por Sutton *et al.* [85]. Essa técnica possui alta sensibilidade para deformações que mede campos completos de deslocamento. O processo realizado é descrito a seguir:

- a) Seleciona-se uma área de análise que será dividida em grids virtuais igualmente espaçados;
- b) Definem-se os *subsets* (subconjunto de pixels) e os *steps* (distância em pixels que um *subset* se encontra do outro);
- c) Rastreia-se o movimento do ponto central do *subset* da imagem de referência para as imagens deformadas;
- d) Utiliza-se um algoritmo para fazer a correspondência entre os deslocamentos do centro de cada *subset* com todos os pontos discretizados.

O método de correlação digital de imagens (DIC) faz a análise de imagens consecutivas. Os subsets são rastreados dentro da região de interesse das imagens para obter os deslocamentos. Para que o algoritmo consiga fazer a correspondência dos movimentos dos *subsets*, e garantir que não haja mais do que uma correspondência para um *subset*, as superfícies das amostras foram preparadas aplicando-se tinta branca fosca com respingos de tinta preta para criação de um padrão aleatório (*speckle*). O software utilizado para a análise das imagens foi o GOM Correlate.

4.3 Resultados e discussões

4.4 Resultados dos ensaios de flexão

A Figura 4.4 mostra a curva tensão *versus* deflexão para os três tipos de compósitos diferentes. Todos os compósitos apresentaram um comportamento de *deflection hardening* com um aumento de resistência após o aparecimento de fissuras. Quando comparamos os compósitos de três camadas e cinco camadas com reforço saturado podemos observar um aumento de rigidez com o aumento da fração volumétrica de fibras e o número de camadas. Quando comparamos os compósitos de três camadas entre si, com reforço saturado e reforço com umidade natural, podemos observar um aumento de rigidez inicial para o compósito com reforço com umidade natural. Além disso, a região correspondente ao estágio I do compósito com umidade natural possui uma resistência de primeira fissura superior.

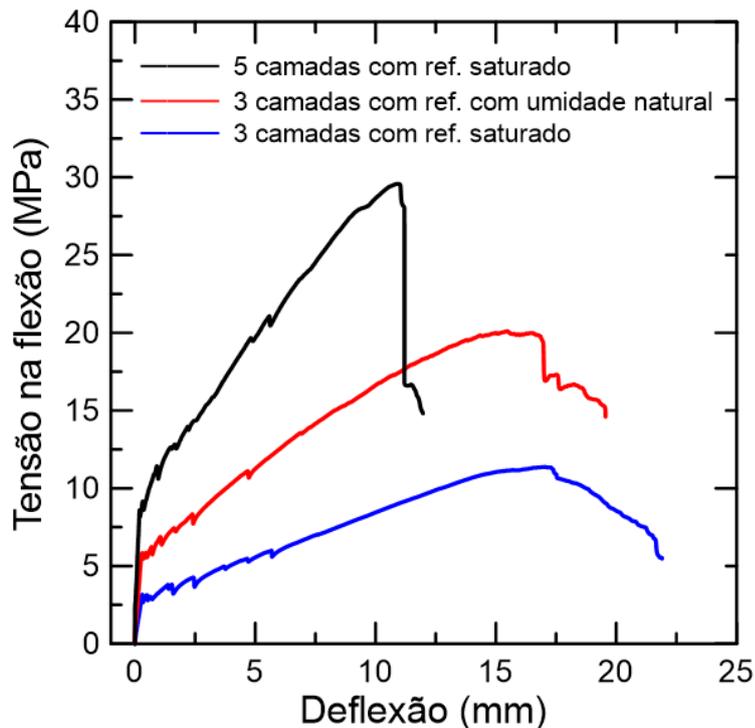


Figura 4.4 - Compósitos submetidos à flexão de quatro pontos.

Com a utilização de fibras saturadas podemos ter um maior controle no fator água/cimento e trabalhabilidade da matriz. Dito isso, quando utilizamos fibras que possuem uma natureza hidrofílica como as fibras de sisal, estas possuem a capacidade de absorver a água da matriz de cimento, diminuindo o fator água/cimento e aumentando a resistência à primeira fissura dos compósitos quando reforçados com fibras com umidade natural. Além disso, uma desvantagem das fibras naturais é devido à alta absorção de umidade que podem causar inchamento e aumentar a porosidade da interface fibra-matriz, podendo dificultar a adesão interfacial da fibra com a matriz [86]. Fica claro que as fibras de sisal saturadas diminuem a resistência última dos compósitos, mas leva um aumento da deflexão [87]. Assim, com uma maior umidade das fibras, estas perdem rigidez e se tornam mais dúcteis [88].

As Figuras 4.5-7 apresentam a curva tensão deformação dos compósitos e as suas respectivas aberturas de fissuras para o ensaio de flexão a quatro pontos. Os mecanismos de fissuração observados nas amostras submetidas à flexão foram caracterizados com uma zona linear elástica inicial (I), uma posterior propagação de fissuras até que o espaçamento entre elas se tornasse constante (II), o desenvolvimento da abertura das fissuras já formadas (III) e o aumento de uma só

fissura levando o compósito à ruptura (IV). O processo de formação e propagação de fissuras nos três tipos de compósitos foi semelhante na face inferior tracionada. Enquanto a ruptura dos compósitos com três camadas aconteceu com a progressão da abertura de fissuras, o compósito com cinco camadas rompeu com o esmagamento da matriz por compressão na parte superior da amostra.

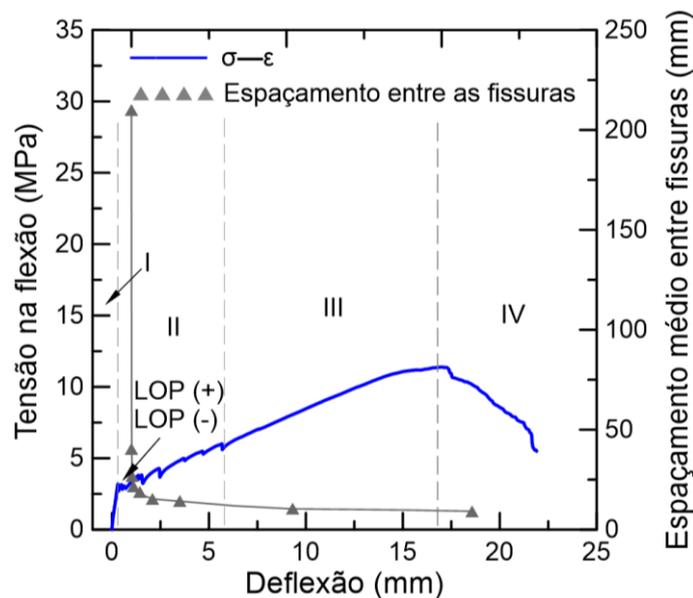


Figura 4.5 - Resposta à flexão de compósito reforçado com 3 camadas de fibras saturadas.

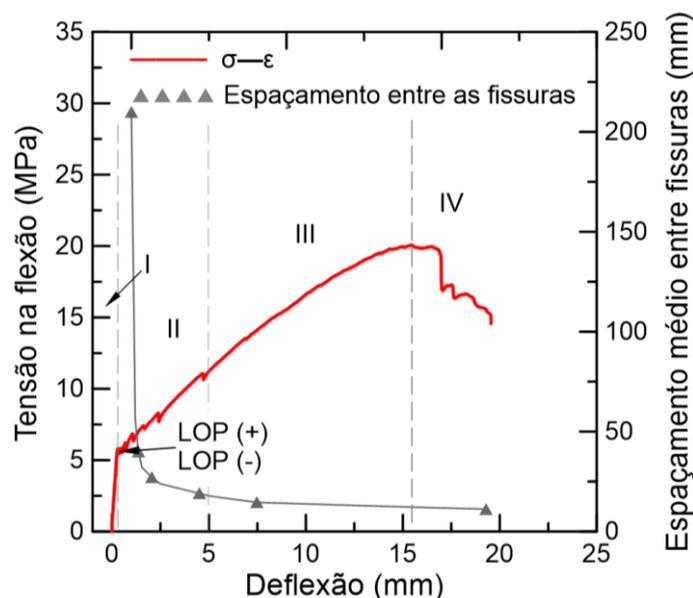


Figura 4.6 - Resposta à flexão de compósito reforçado com 3 camadas de fibras com umidade natural.

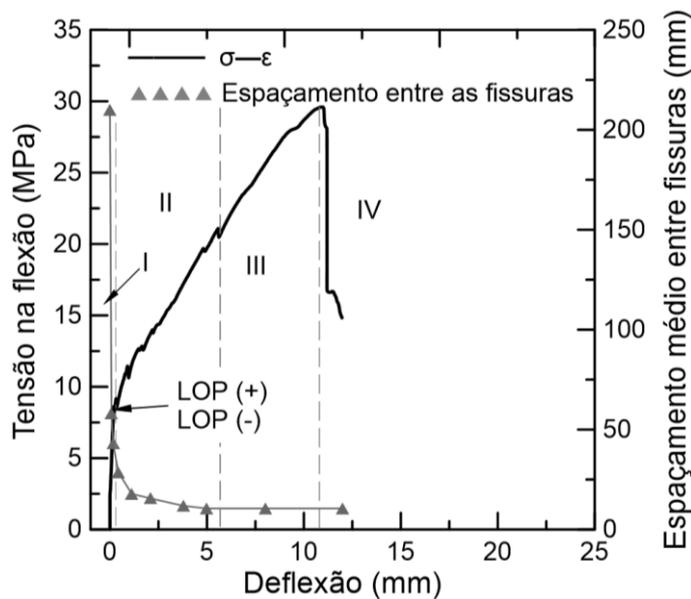


Figura 4.7 - Resposta à flexão de compósito reforçado com 5 camadas de fibras saturadas.

A Tabela 4.1 mostra as propriedades mecânicas obtidas por meio dos ensaios de flexão. A tenacidade representa a capacidade da amostra de absorver energia e deformar plasticamente até a ruptura [43]. A tenacidade dos compósitos foi obtida por meio da área abaixo da curva força *versus* deslocamento, usando os limites de fratura da amostra e a deflexão máxima relativa a esta força. A unidade de tenacidade foi dada em kJ/m^2 para melhor comparação entre os compósitos de 3 camadas e 5 camadas, que possuem áreas da seção transversal diferentes. Como pode ser observado, o compósito com 5 camadas de reforço apresentou resistência aproximadamente 2,5 e 1,5 vezes superior quando comparados com os compósitos de 3 camadas com reforço saturado e com reforço com umidade natural, respectivamente. Esse aumento de tensão resistida pelos compósitos com 5 camadas de fibras pode ser atribuído à uma maior taxa de reforço adicionada, com fração volumétrica de 10% de fibras contra 6% de volume de fibras dos compósitos com 3 camadas. Além disso, a deflexão alcançada pelos compósitos com 3 camadas foi maior e com uma maior tenacidade para o compósito com reforço com umidade natural.

Tabela 4.1 - Propriedades mecânicas para os três compósitos submetidos à flexão a quatro pontos. Desvio padrão entre parênteses.

Compósito	Tensão de primeira fissura (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Deflexão máxima (mm)	Tenacidade (kJ/m ²)
3 Camadas de fibras saturadas	2,9 (1,1)	11,4 (2,7)	16,6 (1,2)	13,27 (1,6)
3 Camadas de fibras com umidade natural	5,63 (1,8)	19,9 (1,5)	15,1 (0,3)	20,05 (1,6)
5 Camadas de fibras saturadas	8,2 (2,2)	29,2 (1,2)	10,9 (0,5)	11,86 (0,9)

A Tabela 4.2 mostra o número de fissuras ao final do ensaio, assim como o espaçamento entre elas e o tamanho médio das fissuras. Como pode ser observado, os compósitos reforçados com três camadas de fibras saturadas tiveram um maior número de fissuras, com um menor espaçamento entre elas, o que pode ser explicado pela uniformidade das camadas de fibras e na obtenção de um padrão mais bem definido na fabricação das amostras.

Tabela 4.2 - Espaçamento e abertura média das fissuras dos compósitos submetidos à flexão. Desvio padrão entre parênteses.

Compósito	Nº de fissuras	Espaçamento (mm)	Tamanho médio (μm)
3 Camadas saturadas	22	9,80 (1,23)	68,5 ($\pm 16,2\%$)
3 Camadas com umidade natural	16	11,20 (2,65)	80,0 ($\pm 18,7\%$)
5 Camadas saturadas	18	10,56 (2,50)	51,5 ($\pm 15,0\%$)

4.5 Resultados dos ensaios de tração

A curva tensão *versus* deformação dos três tipos de compósitos é representada na Figura 4.8. A formação de fissuras na tração direta é dividida em zonas, como apresentado por Silva et al. [7] e Dey [41]. A zona I corresponde à fase elástica onde a fibra e matriz apresentam um comportamento linear. Após o aparecimento da primeira fissura, outras fissuras começam a surgir e propagar ao longo do corpo de prova. A zona II está associada a formação, propagação e distribuição das fissuras da matriz. A zona III é correspondente ao término do surgimento de fissuras e caracterizada pela tensão máxima resistida pelo corpo de prova. Nessa fase

ocorrem danos progressivos e o estágio de abertura de uma fissura, levando à ruptura por arrancamento da fibra. A fase IV é caracterizada pela fase pós pico.

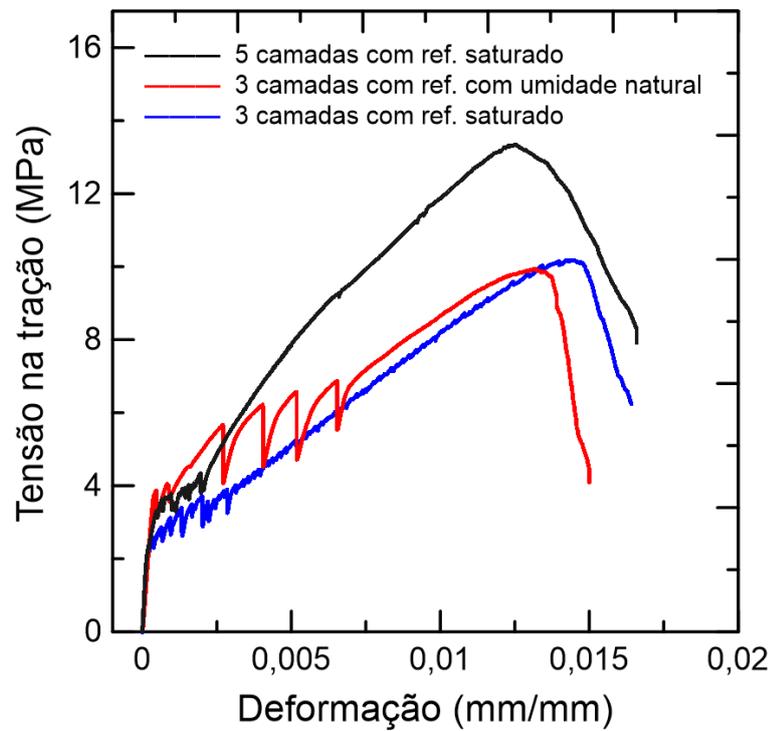


Figura 4.8 - Curvas típicas dos ensaios à tração dos compósitos reforçados com 3 e 5 camadas de fibras de sisal.

As Figuras 4.9-11 apresentam a curva tensão-deformação dos compósitos e espaçamento de fissuras para o ensaio de tração direta.

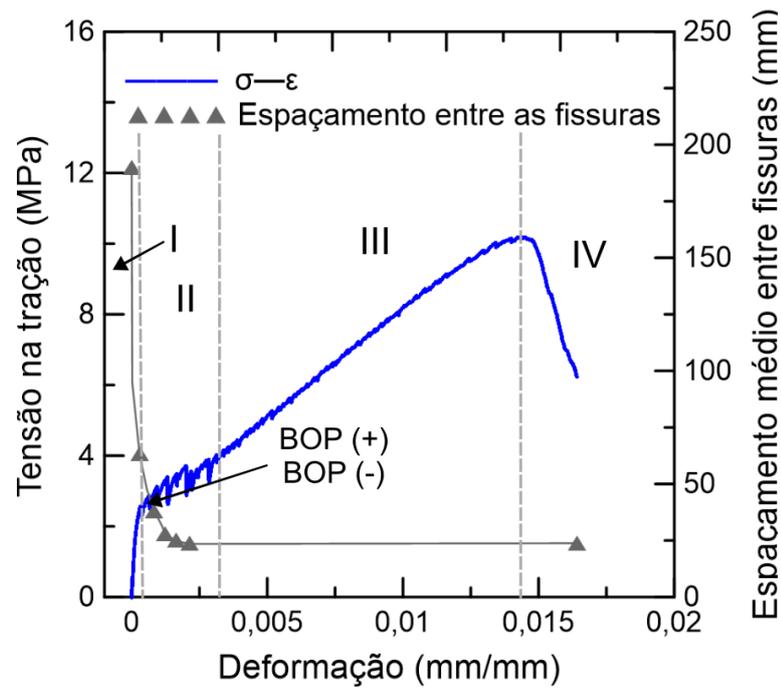


Figura 4.9 - Resposta à tração de compósito reforçado com 3 camadas de fibras saturadas.

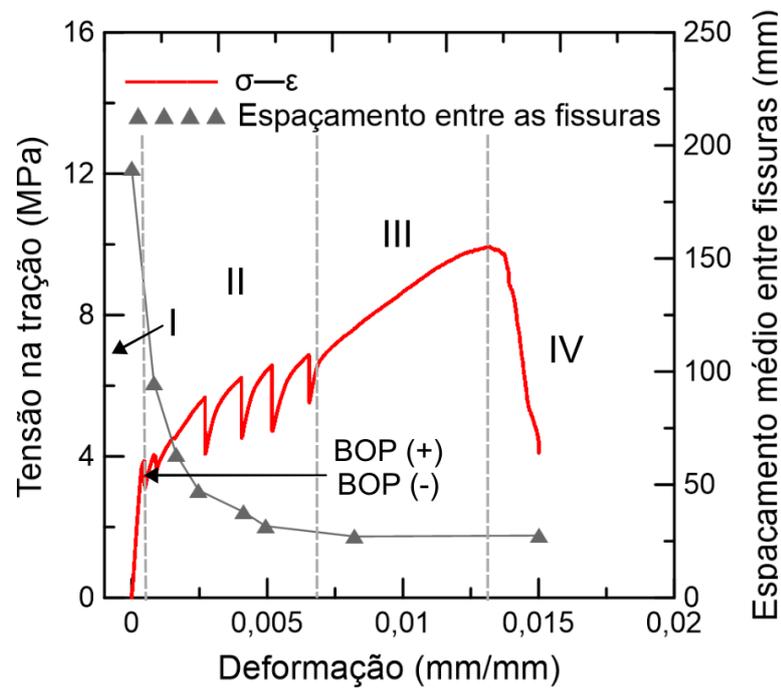


Figura 4.10 - Resposta à tração de compósito reforçado com 3 camadas de fibras com umidade natural.

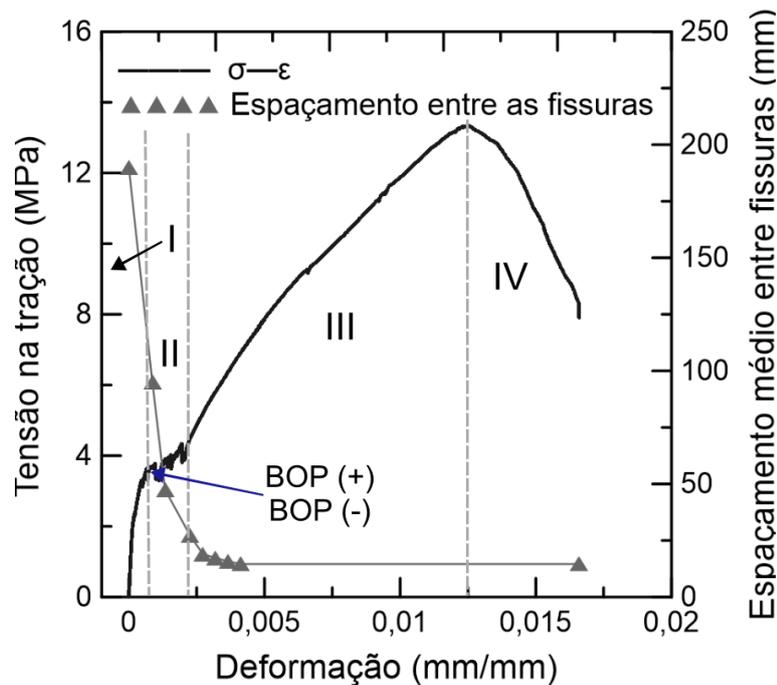


Figura 4.11 - Resposta à tração de compósito reforçado com 5 camadas de fibras saturadas.

A Tabela 4.3 mostra as propriedades mecânicas obtidas por meio dos ensaios de tração direta. Os compósitos com reforço saturado obtiveram uma maior resistência à tração, quando comparado ao reforço com fibras com umidade natural, porém este último alcançou um valor superior para a formação da primeira fissura. O compósito com 5 camadas apresentou uma maior resistência final e uma maior tenacidade, devido à uma maior fração volumétrica de fibras adicionadas como reforço. Como pode ser observado, os compósitos com três camadas reforçados com fibras saturadas apresentaram menores fissuras, porém com uma resistência inicial menor. Já os compósitos com reforço com umidade natural apresentaram uma resistência de abertura da primeira fissura maior, o que pode ser explicado por uma resistência superior da matriz devido a um menor fator água/cimento. Como foi visto no capítulo 2, as fibras naturais são hidrofílicas, o que resulta em uma alta capacidade de absorção de umidade. Quando camadas de fibras com umidade natural foram adicionadas ao compósito, parte da água contida na matriz pode ter sido absorvida pelas fibras, diminuindo o fator água/cimento da matriz. Já os compósitos reforçados com cinco camadas saturadas apresentaram um maior número de pequenas fissuras inicialmente, com uma resistência superior em todos os estágios do ensaio.

Tabela 4.3 - Propriedades mecânicas para os três compósitos submetidos à tração direta. Desvio padrão entre parênteses.

Compósito	Tensão de primeira fissura (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Deformação máxima (%)	Tenacidade (kJ/m ²)
3 Camadas de fibras saturadas	2,4 (1,5)	10,2 (2,1)	1,45 (1,22)	19,8 (1,6)
3 Camadas de fibras com umidade natural	3,8 (2,5)	9,9 (2,8)	1,30 (0,97)	18,5 (1,0)
5 Camadas de fibras saturadas	3,9 (2,4)	12,2 (1,4)	1,25 (0,55)	22,0 (1,9)

A zona de transição interfacial (ITZ), a vizinhança da fibra com a matriz, é uma zona na qual a fibra e a matriz se influenciam. Quando os compósitos são reforçados com fibras com umidade natural, parte da água da matriz pode ser absorvida aumentando o volume das fibras, e levando a um enfraquecimento da interface [89].

Os campos de deslocamento foram obtidos através da correlação digital de imagens (DIC) utilizando o software GOM *correlate*. Os campos de deformação (ϵ_y) foram gerados para os três tipos de compósitos e estão indicados na Figura 4.12. Na Figura 4.12, o número de fissuras (Nf) pode ser visualizado, além da tensão aplicada em cada instante quando relacionado com a curva tensão *versus* deformação obtida por meio do ensaio de tração.

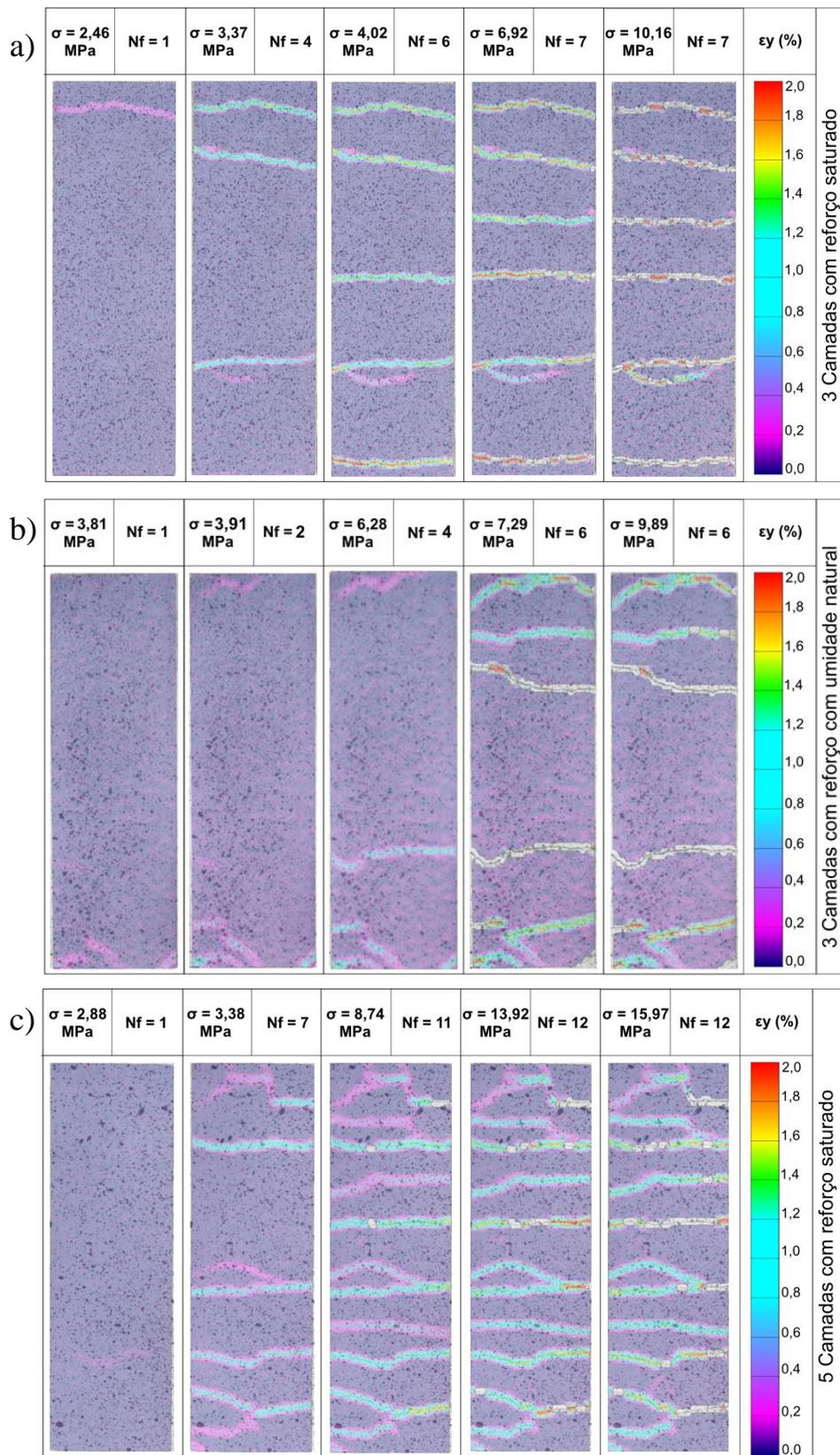


Figura 4.12 - Campos de deformação em diferentes momentos dos compósitos reforçados com (a) 3 camadas de fibras saturadas; (b) 3 camadas de fibras com umidade natural; e (c) 5 camadas com fibras saturadas.

Outro fato importante que fica evidente no ensaio de tração é que as fissuras dos compósitos com unidade natural possuem uma abertura maior quando comparados com os compósitos reforçados com fibras saturadas. Com o enfraquecimento da ITZ, a resistência ao arrancamento das fibras se torna inferior devido o descolamento das fibras na matriz e a abertura de fissuras se torna maior. Além disso, as fibras saturadas podem agir como um repositório de água liberando umidade para interface e levando a uma hidratação tardia dos grãos não hidratados de cimento e assim aumentando a resistência e densidade da interface. Com uma zona de transição interfacial mais densa, há uma maior possibilidade do comportamento de fratura do compósito seja dominado pela fratura da fibra ao invés do arrancamento da fibra [89].

A análise de abertura de fissuras foi realizada com o auxílio do medidor de distância entre dois pontos do software *GOM correlate*. Para comparação, os compósitos com 3 camadas apresentaram aberturas de fissuras diferentes ao longo do ensaio de tração. As Figuras 4.13-15 apresentam a abertura e posição das fissuras ao longo dos compósitos durante o ensaio de tração direta obtidas por meio do DIC.

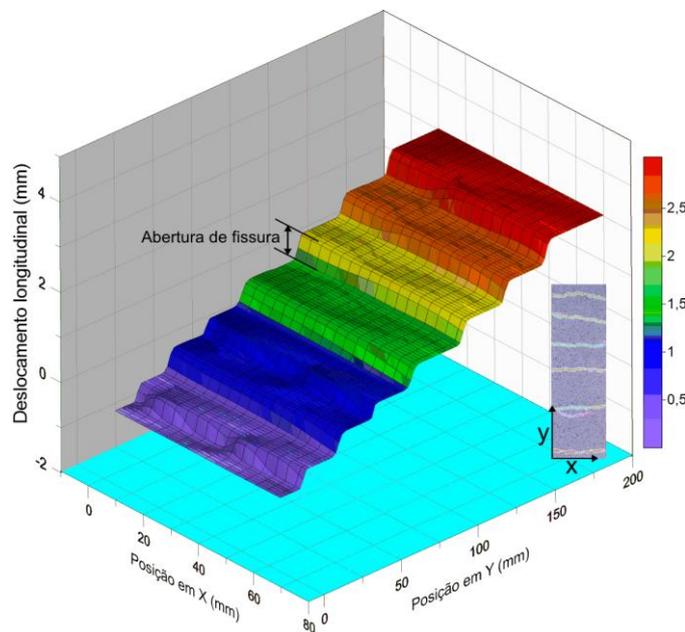


Figura 4.13 - Abertura e posição das fissuras para compósito de 3 camadas com reforço saturado no instante equivalente à tensão de 10,16 MPa.

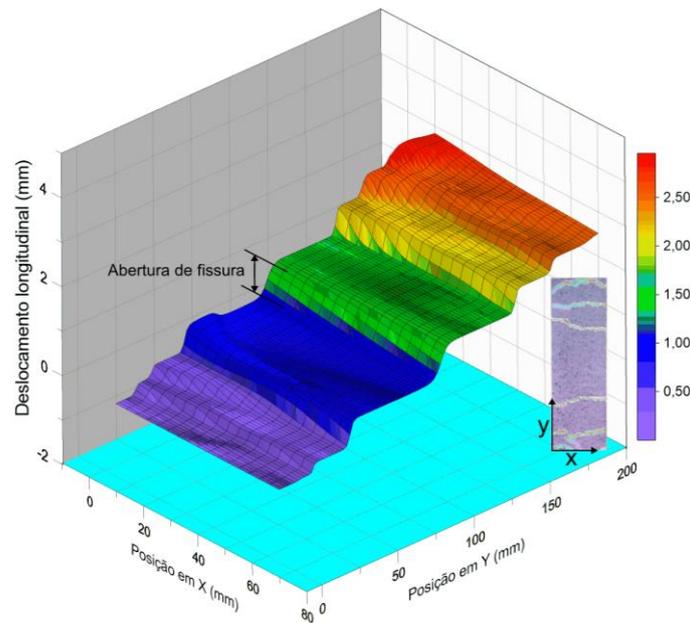


Figura 4.14 - Abertura e posição das fissuras para compósito de 3 camadas com reforço com umidade natural no instante equivalente à tensão de 9,89 MPa.

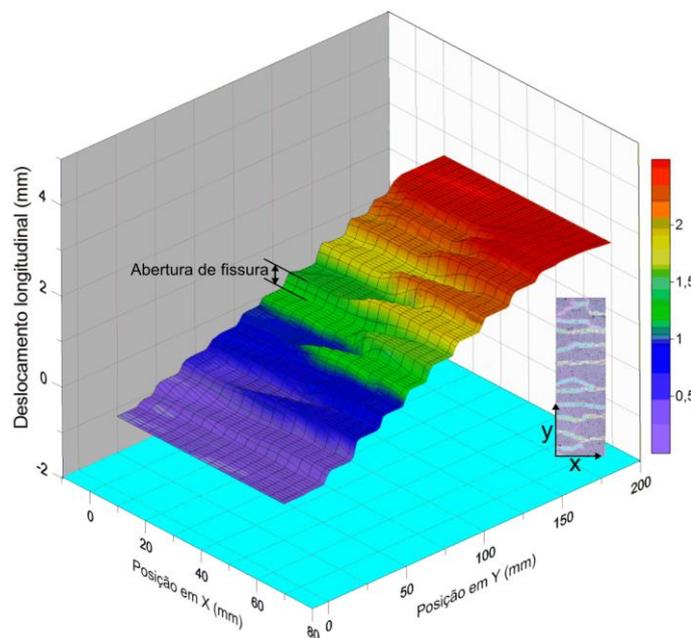


Figura 4.15 - Abertura e posição das fissuras para compósito de 5 camadas com reforço saturado no instante equivalente à tensão de 15,97 MPa.

Como mencionado anteriormente, as fibras atuam como pontes de transferências de tensões através das fissuras. Dessa forma, contribuem para aproximar as fissuras e reduzir as aberturas quando utilizadas adequadamente. Isso fica evidente quando analisamos os resultados obtidos pelo DIC. Como podem ser vistas nas Figuras 4.16-17, o compósito com fibras saturadas apresentou fissuras

mais bem espaçadas com aberturas menores. A Figura 4.18 apresenta a abertura de fissuras em razão do nível de carregamento para o compósito com 5 camadas.

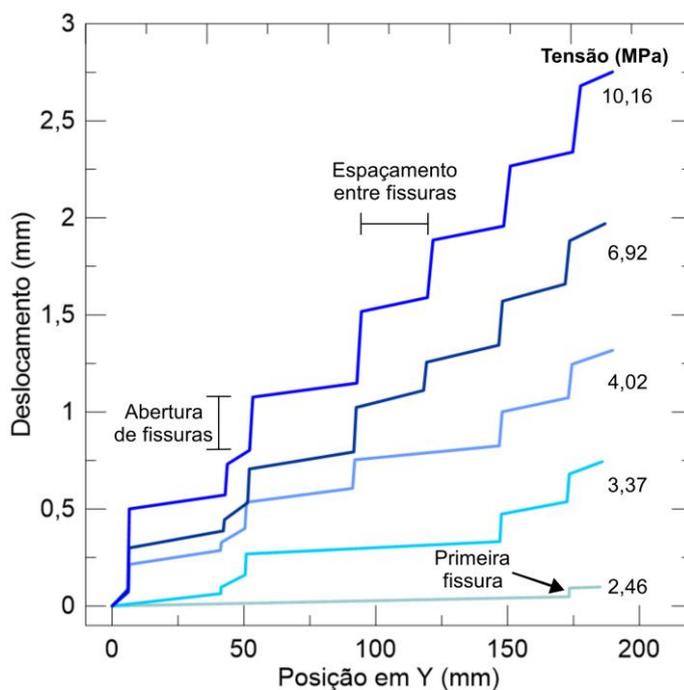


Figura 4.16 - Correlação entre o deslocamento e nível de carregamento para compósito com 3 camadas com reforço saturado.

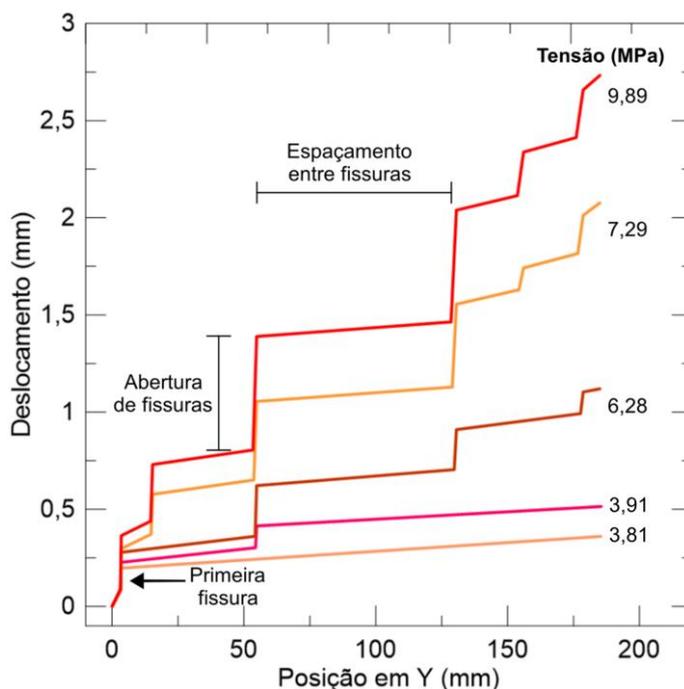


Figura 4.17 - Abertura e posição das fissuras para compósito de 3 camadas com reforço com umidade natural.

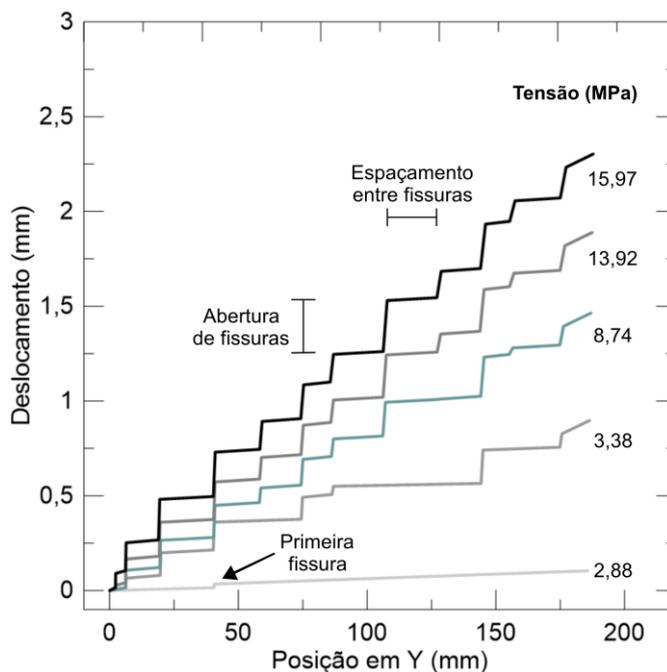


Figura 4.18 - Abertura e posição das fissuras para compósito de 5 camadas com reforço saturado.

A Figura 4.19 apresenta a evolução da abertura média das fissuras para os três compósitos durante o ensaio de tração. Abertura média final das amostras com reforço com umidade natural apresentaram fissuras 24% e 84% aproximadamente maiores que os compósitos com reforço saturado de 3 e 5 camadas, respectivamente. Além disso, o acréscimo de fibras proporcionou um aumento no número de fissuras para o compósito de 5 camadas, o qual apresentou o dobro comparado com o compósito com 3 camadas com reforço saturado.

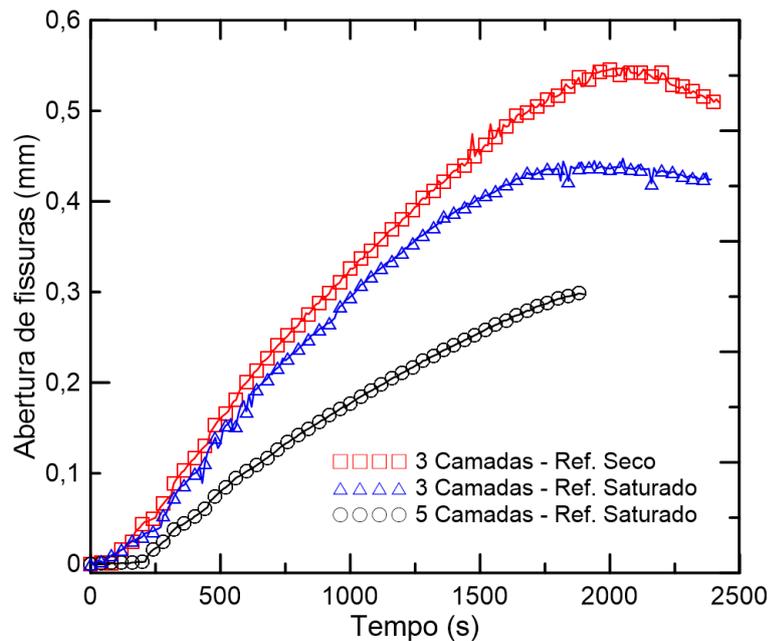


Figura 4.19 - Evolução da abertura média de fissuras para os três compósitos submetidos à tração direta.

A Tabela 4.4 mostra o número de fissuras ao final do ensaio de tração obtido por meio do DIC, assim como o espaçamento entre elas e o tamanho médio das fissuras ao final do ensaio de tração direta. Os compósitos com reforço com umidade natural apresentaram fissuras com aberturas maiores, enquanto as amostras com 5 camadas apresentaram um maior número de pequenas fissuras, com um padrão de espaçamento entre elas mais bem definido.

Tabela 4.4 - Espaçamento médio e abertura média das fissuras dos compósitos no instante equivalente à tensão máxima de tração. Desvio padrão entre parênteses.

Compósito	Nº de fissuras	Espaçamento (mm)	Tamanho médio (μm)
3 Camadas de fibras saturadas	7	23,8	440,4 ($\pm 13,7\%$)
3 Camadas de fibras com umidade natural	6	27,1	548,1 ($\pm 15,5\%$)
5 Camadas de fibras saturadas	12	14,6	297,4 ($\pm 15,7\%$)

4.6 Conclusão

Todos os compósitos reforçados com fibras de sisal apresentaram comportamento *strain hardening* e *deflection hardening*, com formação de múltiplas

fissuras. Nas curvas obtidas por meio dos ensaios de flexão a quatro pontos e tração direta, zonas de fissuração foram relacionadas com a tensão atuante e com a formação e distribuição das fissuras.

Os compósitos apresentaram altos valores de resistência à tração e à flexão, devido ao reforço com tecidos de sisal, sendo maiores valores alcançados para os compósitos com cinco camadas que apresentou valor de tensão máxima na tração e BOP+, 16,0 MPa e 4,25 MPa, respectivamente. Já no ensaio de flexão a quatro pontos, o compósito com cinco camadas apresentou valores de tensão máxima na flexão e LOP+ aproximadamente de 29 MPa e 9 MPa, respectivamente. Os compósitos apresentaram modos de ruptura diferentes entre si durante o ensaio de flexão, os compósitos com três camadas romperam por tração e os de cinco camadas por compressão na face superior da amostra.

Os compósitos com três camadas foram fabricados com fibras saturadas e com umidade natural e comportamentos distintos foram observados devido a capacidade de absorção das fibras naturais. Apesar dos compósitos com três camadas com reforço saturado ter apresentado uma deformação e tensão máxima na tração superior, os compósitos com reforço com umidade natural apresentaram uma tensão na primeira fissura de 3,9 MPa, equivalente a aproximadamente 26% superior quando comparadas com o reforço saturado. O que resultou em uma tenacidade de 16,48 kJ/m² contra 12,08 kJ/m².

Para o acompanhamento da formação de fissuras durante o ensaio de tração foi utilizado o método de correlação digital de imagens (DIC). Análises das deformações longitudinais dos compósitos foram realizadas. Foi possível observar a diferença na abertura de fissuras para os compósitos com três camadas de reforço com umidade natural, que apresentaram uma abertura média das fissuras aproximadamente 24% superior quando comparadas com os compósitos reforçados com fibras saturadas.

5 Comportamento dependente do tempo

5.1 Introdução

Compósitos reforçados com fibras devem ser projetados com precisão para que possam apresentar uma resposta adequada para as solicitações previstas. Para isso, deve-se entender bem a resposta dependente do tempo sob cargas sustentadas e no estado fissurado esses materiais. Poucos estudos têm tratado do comportamento sob carga contínua de compósitos reforçados com fibras [62,68, 69,70,71,82,83]. Sabe-se que as fibras sofrem arrancamento com o tempo sob cargas sustentadas. No entanto, a quantificação da fluência à tração e flexão ainda é pouco estudada.

Neste capítulo, as respostas dependentes do tempo sob cargas sustentadas de compósitos reforçados com tecido de sisal foram estudadas. Ensaios de fluência à tração e flexão foram realizados nos compósitos pré-fissurados a fim de quantificar a sua deformação e abertura de fissuras ao longo do tempo.

Para uma melhor compreensão do mecanismo que causa o aumento das deformações e fissuras ao longo do tempo dos compósitos, foram realizados ensaios para os diferentes constituintes do material. Assim, foram realizados ensaios de tração de uma única fibra sob carga sustentada em diferentes níveis de carregamento. Além disso, ensaios de fluência à compressão e retração da matriz com diferentes níveis de substituição do cimento por metacaulim foram realizados para entender o seu efeito ao longo do tempo.

5.2 Programa experimental

Os ensaios abordados nesta seção estão representados no fluxograma da Figura 5.1. Os ensaios abordaram desde o nível da fibra, da matriz e do compósito.

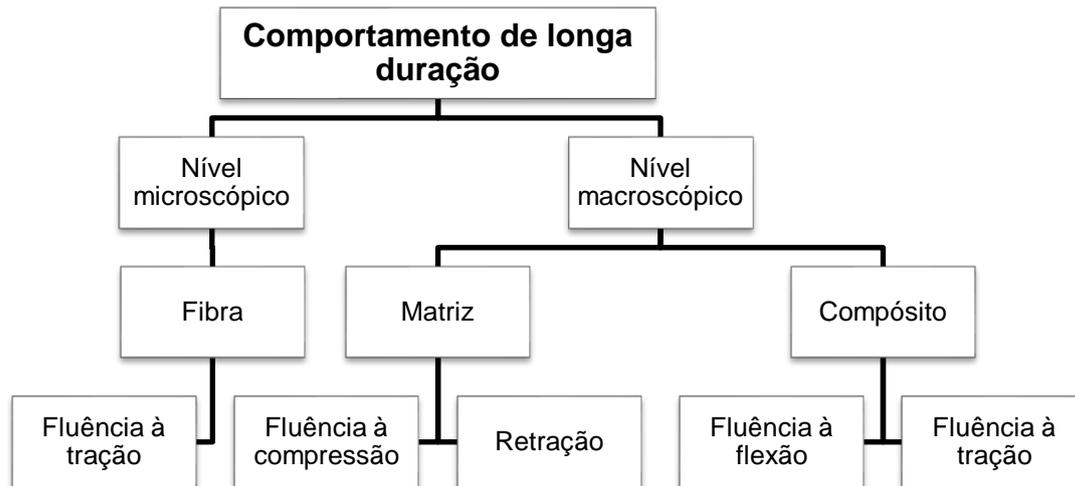


Figura 5.1 - Ensaio realizados para a caracterização das propriedades de longa duração dos compósitos cimentícios reforçados com tecido de sisal.

Os ensaios foram realizados em ambiente com temperatura e umidade relativa controlados de $24 \pm 1^\circ\text{C}$ e $41 \pm 2\%$, respectivamente, conforme a Figura 5.2. Os dados de temperatura e umidade relativa foram mensuradas digitalmente com a utilização de uma estação modular, com sensor DHT22, construído de acordo com o estudo de Alves [92].

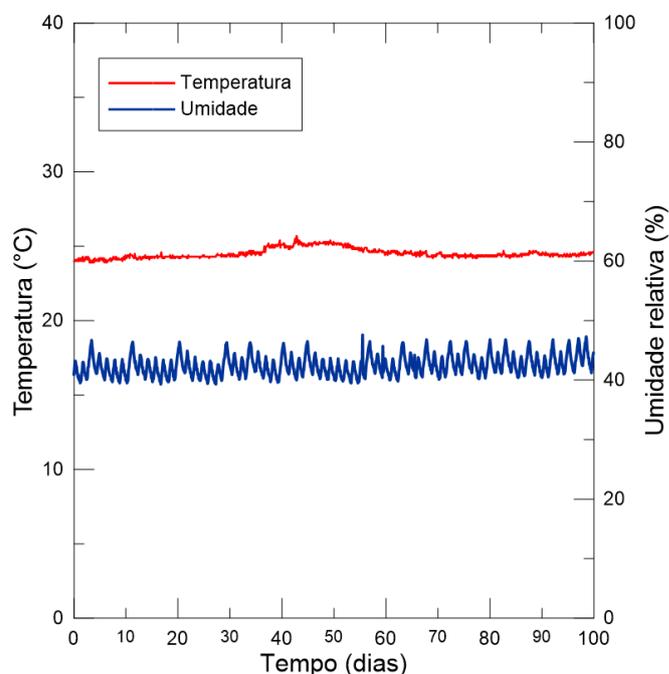


Figura 5.2 - Temperatura e umidade relativa durante a realização dos ensaios de longa duração.

5.2.1 Fluência da fibra

Uma importante característica das fibras de sisal é a sua natureza viscoelástica, como visto no item 3. Essa característica pode muitas vezes ocasionar em um efeito na fluência das amostras estudadas [62]. Por essa razão foi analisado o alongamento de uma única fibra à tração sob carga sustentada ao longo do tempo.

Foi desenvolvido um simples aparato para esse ensaio, adaptado de Lima [68], mostrado na Figura 5.3, com chapas coladas de alumínio que funcionavam como garras para prender a fibra de sisal nas duas extremidades com comprimento livre (l_0) de 250 mm. A chapa inferior recebeu pesos livres, que foram adicionados de acordo com a resistência da fibra.

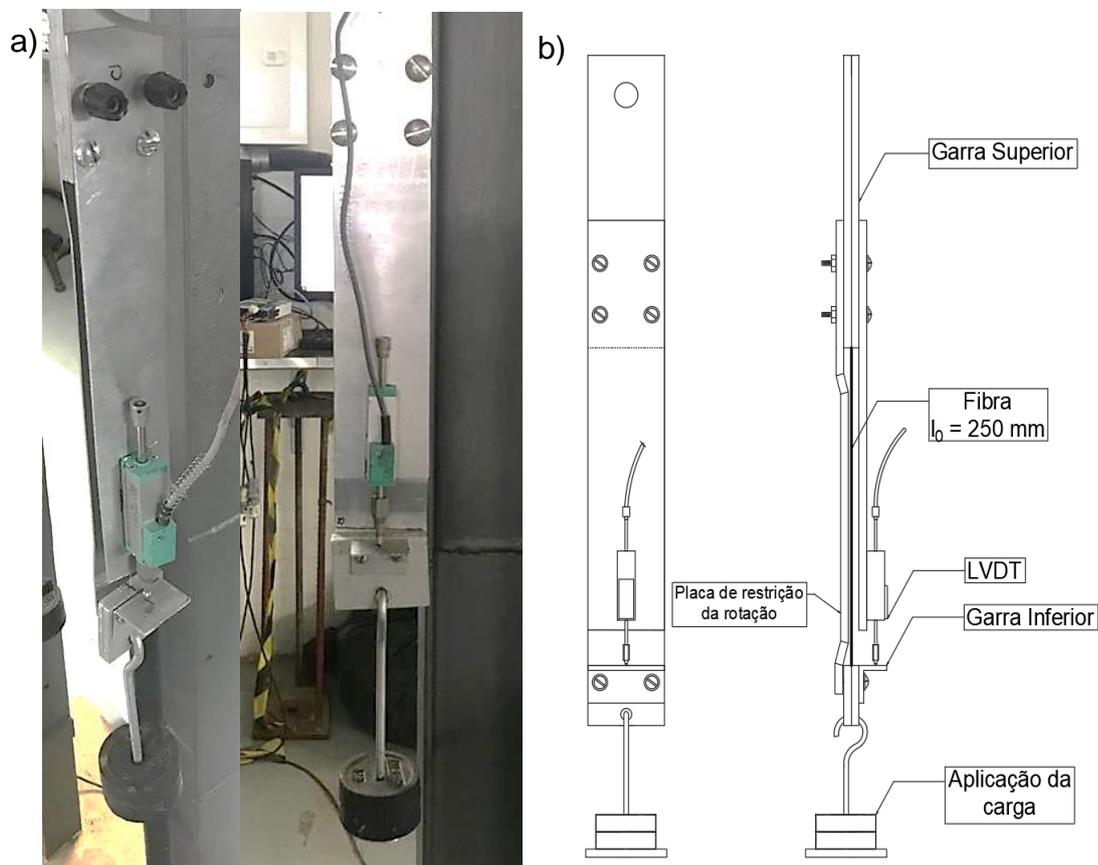


Figura 5.3 - Arranjo experimental utilizado nos ensaios de fluência na fibra (a) e esquema representativo de cada componente do arranjo (b).

Para a aquisição do deslocamento da fibra no arranjo utilizado foi inserido um LVDT colado na chapa superior apontado para um perfil cantoneira na chapa inferior. Para a aplicação do carregamento, pesos fixos foram adicionados de acordo

com a resistência da fibra. Sabendo da alta variabilidade dimensional das fibras naturais, pequenos filamentos das fibras testadas foram usados para obtenção da área da seção transversal de acordo como especificado no item 3.2.5.1 e correlacionadas com a tensão obtida no ensaio de tração da fibra. Assim, os níveis de carregamento utilizados variaram de 20%, 25%, 40% e 75% em relação à resistência média da fibra conforme a Tabela 3.8 da seção 3.3.3. Ao total, 4 filamentos foram ensaiados para a fluência à tração da fibra. Os dados de carregamento e seção transversal das fibras pode ser visto na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Seção transversal e carregamento utilizado no ensaio de carregamento contínuo das fibras.

Filamento de fibra	Área (μm^2)	Carga constante (N)	Nível de carregamento em relação a resistência da fibra
1	43120	2,5	20 %
2	29535	4,0	25 %
3	20914	5,0	40 %
4	35834	7,0	75 %

O sistema de aquisição de dados utilizado foi o *hardware Nationals Instruments* modelo NI cDAQ-9172 com auxílio do *software LabView 2011* (Figura 5.4), a uma frequência de aquisição de 1 dado a cada 60 segundos. Para o cálculo da deformação específica de cada amostra dividia-se o valor obtido no ensaio (ΔL) pelo valor inicial (L_0).

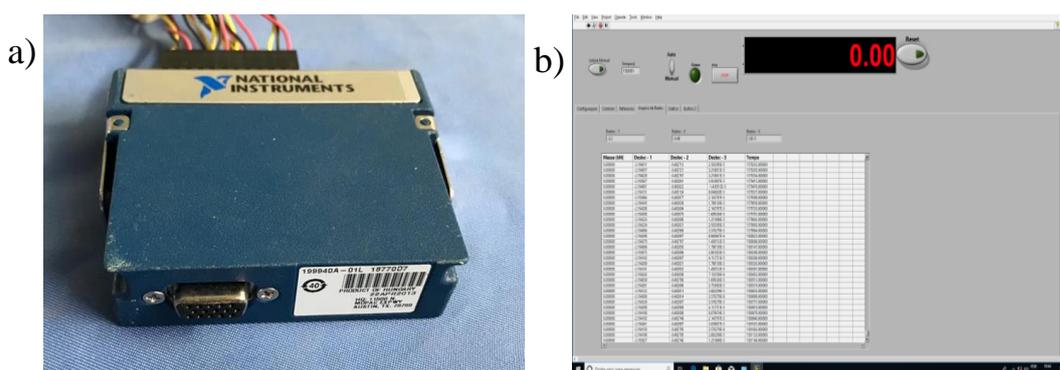


Figura 5.4 - Hardware *Nacionais Instruments* utilizado para aquisitar os dados (a) e interface gráfica do *software LabView 2011* (b).

5.2.2 Retração por secagem

Os ensaios para avaliar a deformação por retração por secagem foram realizados conforme a ASTM C490 [93]. Foram moldados no total 24 prismas de 285 mm x 30 mm x 30 mm (comprimento x largura x espessura), sendo 3 amostras para cada mistura e variação de exposição. Após a moldagem, as amostras foram levadas para cura por 24h na sala que foram feitas as medições com temperatura e umidade relativa controlada de $24 \pm 1^\circ\text{C}$ e $41 \pm 2\%$, respectivamente.

Para a realização das medições, foi utilizado um relógio comparador da Digimess, com precisão de 0,001 mm e cursor de 12 mm, acoplado na parte superior do aparato para a leitura do comprimento dos prismas, como mostra a Figura 5.5. As leituras foram realizadas uma vez por dia desde após as primeiras 24h, durante um período de 60 dias. Além disso, os prismas foram pesados para análise da perda de massa durante o período de retração. Duas condições de cura foram estudadas, sendo a primeira em temperatura e umidade relativa controladas e a segunda condição as amostras foram submetidas a cura saturada durante o mesmo período de 60 dias.



Figura 5.5 - Pórtico utilizado para a medição das amostras de retração por secagem.

O cálculo da variação do comprimento dos prismas foi calculado segundo a ASTM C490 [93], seguindo a equação a seguir:

$$L = \frac{L_j - L_i}{G} \times 100 \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Onde,

L = mudança no comprimento na idade j, em %,

L_j = leitura comparativa do corpo de prova na idade j menos leitura comparativa da barra de referência na idade j, em mm,

L_i = leitura inicial do corpo de prova menos leitura da barra de referência no mesmo instante, em mm, e

G = leitura nominal da barra de referência, estabelecida em 250mm.

5.2.3 Absorção e índice de vazios

O ensaio para obtenção da absorção, densidade e índice de vazios foi realizado conforme a ASTM C642 [94], com os corpos de prova prismáticos após o ensaio de retração. Sabendo-se que esta norma trata de amostras de concreto, algumas modificações foram necessárias. Todas as amostras passaram pelo processo descrito a seguir:

- a. Determinação da massa seca após passar 24h em estufa a 60° C;
- b. Determinação da massa saturada após imersão em água por 48h a temperatura controlada de 20 ±1° C;
- c. Massa saturada após imersão e aquecimento em água por 5h e posterior resfriamento natural por 14h até 20° C;
- d. Determinação da densidade aparente imersa das amostras.

5.2.4 Fluência na compressão

As amostras utilizadas para o ensaio de fluência à compressão foram moldadas de acordo com o especificado no item 3. Após a desforma, foi feito o faceamento das extremidades dos corpos de prova e deixados secar por 24 h até o início do ensaio. Os ensaios foram realizados em sala com temperatura e umidade relativa controladas de 24 ±1°C e 41±2%, respectivamente. Para a avaliação da

deformação devido à fluência foi utilizada a norma ASTM C512 [95]. Esta norma é definida para análise de deformação por fluência em corpos de prova de concreto. No entanto, devido à falta de normas estabelecidas para esse tipo de ensaio em argamassas e, considerando que o seu comportamento seja similar ao concreto sob as mesmas condições, optou-se por seguir as recomendações da norma fazendo as devidas adaptações para o ensaio.

O ensaio de fluência à compressão consistiu na aplicação de 30% da carga máxima à compressão resistida pelo corpo de prova aos 28 dias. O período de aplicação dessa carga foi de 40 dias e, após este intervalo de tempo as amostras ficaram em recuperação por 10 dias. No total, 3 amostras de cada matriz foram moldadas e ensaiadas.

Um pórtico foi utilizado para o ensaio, utilizando três corpos de prova alinhados um em cima do outro. Um disco de aço de 10 mm de espessura e 60 mm de diâmetro foi inserido entre as amostras para transferência de tensões. Uma rótula foi posicionada abaixo dos corpos de prova para a correção dos desníveis e imperfeições nas suas faces e melhor distribuir a carga aplicada. Uma célula de carga com capacidade de 5 toneladas foi posicionada abaixo da rótula, para leitura da carga aplicada. O arranjo utilizado é mostrado na Figura 5.6.

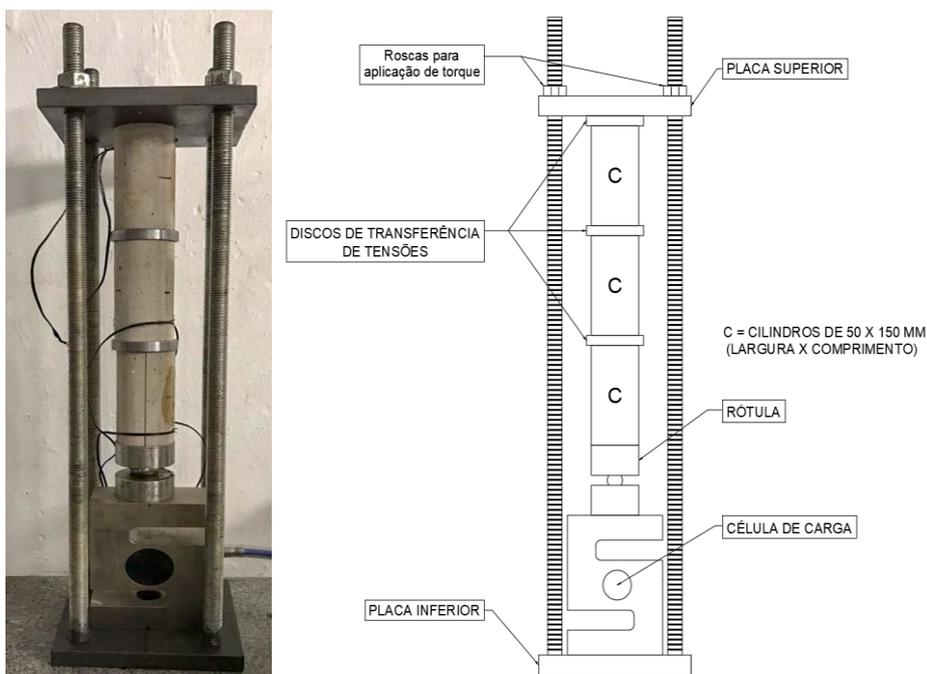


Figura 5.6 - Pórtico utilizado para o ensaio de fluência a compressão em amostras cilíndricas.

A aplicação de carga foi feita de forma manual por meio do torque aplicado nas roscas na parte superior do pórtico. Para a aplicação da carga foram necessários ajustes durante os 40 dias de ensaio e uma célula de carga com capacidade de 50 kN. As amostras foram instrumentadas com dois *strain gauges* do tipo PA-07-201BA-120L, que mediram a deformação em lados opostos. A carga e a deformação foram lidas por meio do programa de aquisição de dados, Labview 2011, e do hardware Nationals Instruments modelo NI cDAQ-9172. Foram plotados gráficos de força versus tempo e deformação versus tempo para posterior discussão.

5.2.5 Fluência à flexão

Amostras dos compósitos de 250 mm x 50 mm e 10 mm (comprimento x largura x espessura) foram produzidas para os ensaios de fluência à flexão. As amostras utilizadas nesta etapa do trabalho foram reforçadas com 3 camadas de tecido (saturado e com umidade natural) unidirecional de sisal e sua fabricação se deu da mesma forma descrita no item 4.2.1. Os ensaios foram realizados utilizando a máquina e o arranjo experimental do ensaio de flexão a quatro pontos, descrito no item 4.2.2.1 deste trabalho. O ensaio de fluência foi realizado em sala com temperatura e umidade controladas de $24 \pm 1^\circ\text{C}$ e $41 \pm 2\%$, respectivamente.

Os compósitos foram pré-fissurados, em seguida testados em carregamento constante durante 59 dias, com mais 7 dias em recuperação. A metodologia utilizada foi baseada no trabalho de Abrishambaf et al. [74] e é representada na Figura 5.7. Na primeira etapa do ensaio, as amostras foram pré-fissuradas após 28 dias de cura. Cada amostra pré-fissurada foi carregada até um deslocamento de 2,5 mm. Os compósitos com 3 camadas foram escolhidos por apresentarem uma maior deflexão e um padrão de fissuração mais bem definido para comparação entre o reforço com fibras saturadas e com fibras com umidade natural. Após os compósitos serem carregados até uma deflexão de 2,5 mm de acordo com o ensaio flexão a quatro pontos, as amostras foram totalmente descarregadas com aquisição dos dados. As amostras pré-fissuradas foram carregadas e submetidas a um carregamento constante de acordo com o arranjo mostrado na Figura 5.8.

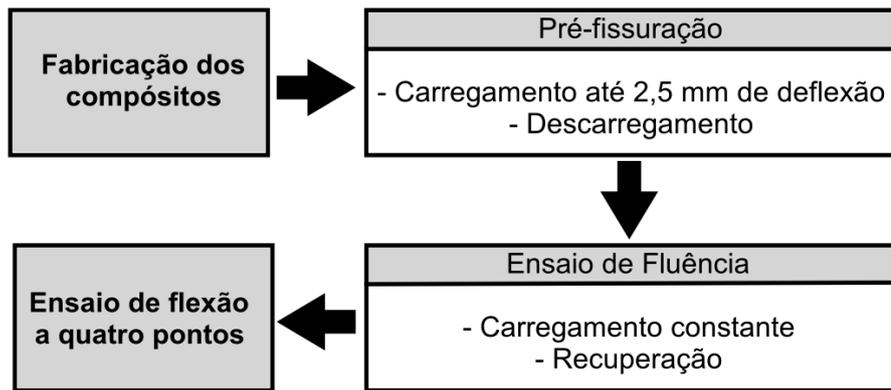


Figura 5.7 - Metodologia utilizada para o ensaio de fluência a flexão de compósitos reforçados com 3 camadas de fibras de sisal.

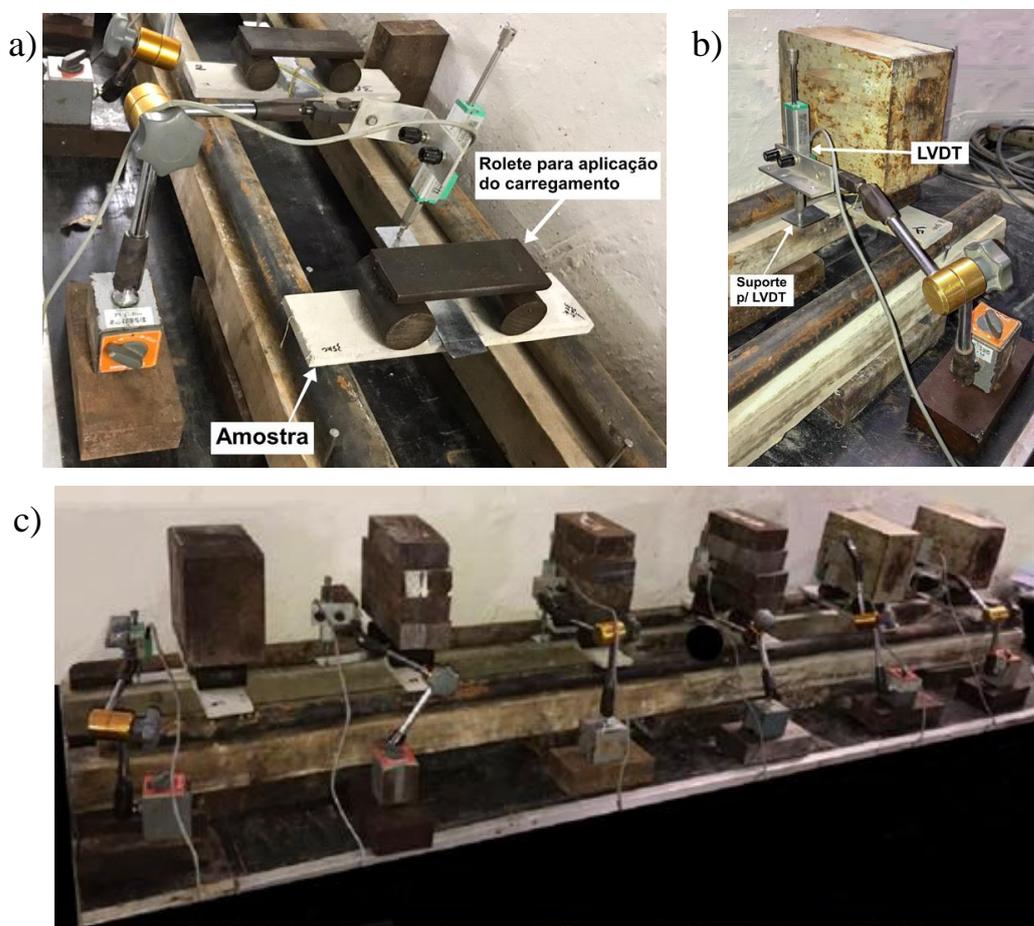


Figura 5.8 - Arranjo experimental usado no ensaio de carregamento constante: (a) rolete para distribuição da carga nos mesmos pontos do carregamento de pré-fissuração; (b) suporte para apoio do LVDT e (c) amostras totalmente carregadas.

Todas as amostras foram carregadas com 50% da carga resistida pelo compósito equivalente ao deslocamento de 2,5 mm. A carga foi mantida constante

por um período de 59 dias, com mais 7 dias de recuperação. A Tabela 5.2 mostra as cargas correspondentes para cada amostra.

Tabela 5.2 - Valor das cargas adicionadas para cada amostra para o ensaio de fluência à flexão.

Compósito	Amostra	Carga constante (N)
3 Camadas reforçado com fibras saturadas	1	210
	2	195
	3	175
3 Camadas reforçado com fibras com umidade natural	1	180
	2	217
	3	210

A idealização do processo do ensaio de fluência a flexão está apresentada na Figura 5.9. No processo descrito, σ_1 corresponde a tensão no início da primeira fissura, σ_{cr} e w_{cr} são a tensão e a deflexão correspondente, respectivamente, para o nível de deflexão na etapa de pré-fissuração, ou seja, 2,5mm, w_{cr}^{res} é a deflexão residual do compósito no descarregamento da amostra, $\sigma_p^{máx}$ e $w_p^{máx}$ são a tensão máxima no ramo pós-fissuração e sua deflexão correspondente, respectivamente.

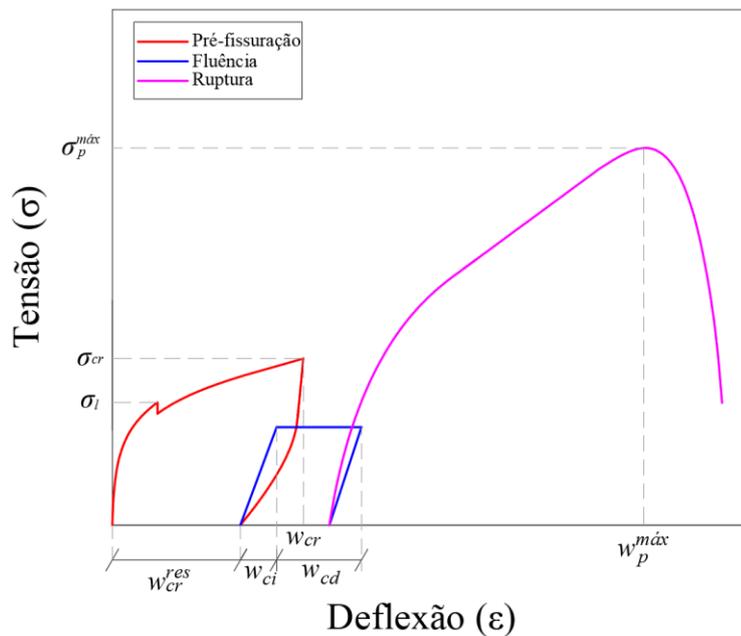


Figura 5.9 - Idealização do processo de ensaio da fluência a flexão.

Alguns parâmetros podem ser obtidos por meio do ensaio de fluência para caracterizar a resposta de cada amostra sob carregamento sustentado. Esses parâmetros são foco das análises dos resultados experimentais e podem definidos e agrupados como indicado a seguir:

- Taxa de recuperação (r): está relacionada ao estágio de pré-fissuração. Mede a recuperação da deflexão logo após a pré-fissuração. É definida seguindo a Equação 5.2, em que W_{cr} é a deflexão máxima atingida ao pré-fissurar a amostra e W_{pr}^{res} é a deflexão residual quando a amostra é descarregada após a pré-fissuração.

$$r = \frac{W_{cr} - W_{pr}^{res}}{W_{cr}} \quad \text{Eq. (5.2)}$$

- W_{ci} é o valor de deflexão no início da fluência, após a aplicação da carga e $W_{cd}(j)$ é o valor de deflexão medida em determinado tempo (j) após a aplicação da carga.

Coeficiente de fluência $\varphi(j)$: é definido a partir da Equação 5.3 em diferentes períodos (j) como razão da deflexão no tempo j , $W_{cd}(j)$ e a deflexão inicial no início da fluência.

$$\varphi(j) = \frac{W_{cd}(j)}{W_{ci}} \quad \text{Eq. (5.3)}$$

Após a etapa de fluência, as amostras são levadas novamente ao ensaio monotônico de flexão a quatro pontos até a ruptura total dos compósitos. Esta etapa é representada pela terceira etapa do processo de fluência e é caracterizada por uma linha ascendente até tensão máxima resistida e continua com a curva de desempenho residual da amostra.

Foram utilizados roletes para aplicação do carregamento no mesmo ponto de aplicação durante a pré-fissuração. Um LVDT foi posicionado no centro do vão para cada amostra submetida ao carregamento constante e o deslocamento foi monitorado durante todo o ensaio. O sistema de aquisição utilizado para coleta dos resultados foi o HBM 1615 com o auxílio do software CatmanEasy, a uma frequência de aquisição de 1 dado a cada 50 segundos (Figura 5.10).

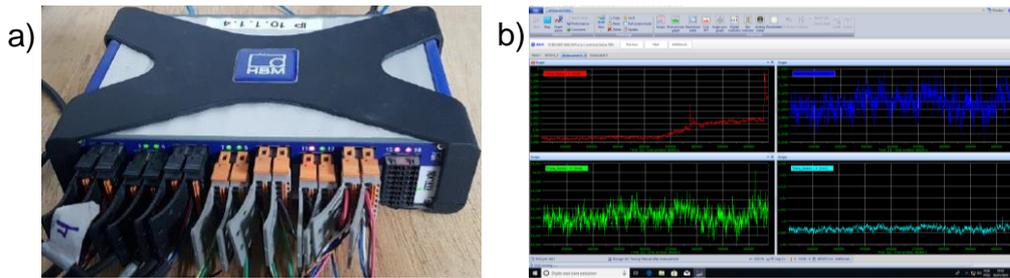


Figura 5.10 - Hardware HBM 1615 utilizado para adquirir os dados (a) e interface gráfica do software CatmanEasy (b).

Para o acompanhamento e monitoramento das fissuras ao longo do ensaio, foi utilizado um microscópio estereoscópico portátil. As fissuras foram medidas antes do carregamento, imediatamente após o carregamento, 24h depois e a cada 7 dias no restante do ensaio.

5.2.6 Fluência à tração

Amostras dos compósitos de 500 mm x 50 mm e 10 mm (comprimento x largura x espessura) foram produzidas para os ensaios de fluência à tração. As amostras foram reforçadas com 3 camadas de reforço (saturado e com umidade natural) de tecido unidirecional de sisal e sua fabricação se deu da mesma forma descrita no item 4.2.1. Os ensaios de tração direta, relativos à etapa de pré-fissuração, foram realizados utilizando a máquina e o arranjo experimental do ensaio de tração, descrito no item 4.2.2.2 deste trabalho. O ensaio de fluência à tração foi realizado na mesma sala de realização de fluência à flexão com temperatura e umidade controladas, conforme a Figura 5.2.

Os compósitos foram pré-fissurados, em seguida testados em carregamento constante durante 75 dias, com mais 7 dias em recuperação. A metodologia adotada foi baseada no trabalho de Zhao et al. [71] e é melhor representada na Figura 5.11.

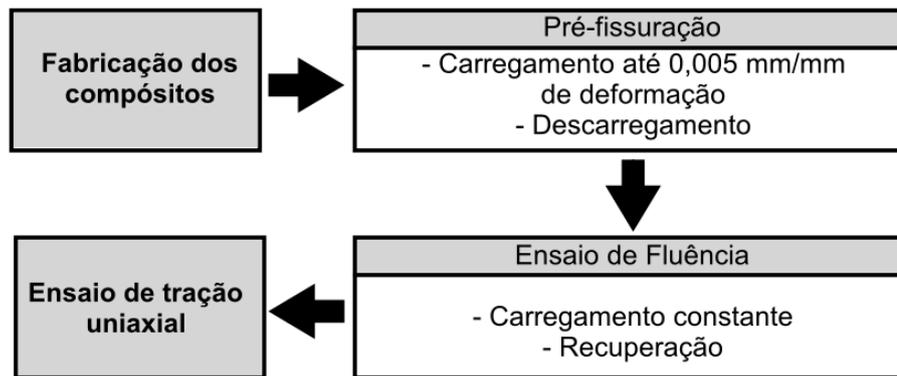


Figura 5.11 - Metodologia utilizada para o ensaio de fluência à tração de compósitos reforçados com 3 camadas de fibras de sisal.

Na primeira etapa do ensaio, as amostras foram pré-fissuradas após 28 dias de cura. Foram usados dois compósitos reforçados com tecido unidirecional de sisal, sendo um com reforço saturado e o segundo com fibras com umidade natural. Após os compósitos serem carregados até uma deformação de 0,005 mm/mm de acordo com o ensaio tração, as amostras foram totalmente descarregadas com aquisição dos dados.

As amostras pré-fissuradas foram carregadas e submetidas a um carregamento constante de acordo com o arranjo mostrado na Figura 5.11. O arranjo foi baseado no trabalho de Vrijdaghs et al. [72] e usou um sistema de alavanca para aplicação da carga necessária. O sistema foi validado usando uma célula de carga de 5 toneladas posicionada no local da amostra para verificar a carga transferida no carregamento. Um carregamento foi aplicado durante 24h para verificar qualquer instabilidade existente. Os pórticos foram eficientes em multiplicar em 7 e 8,41 vezes a carga aplicada.

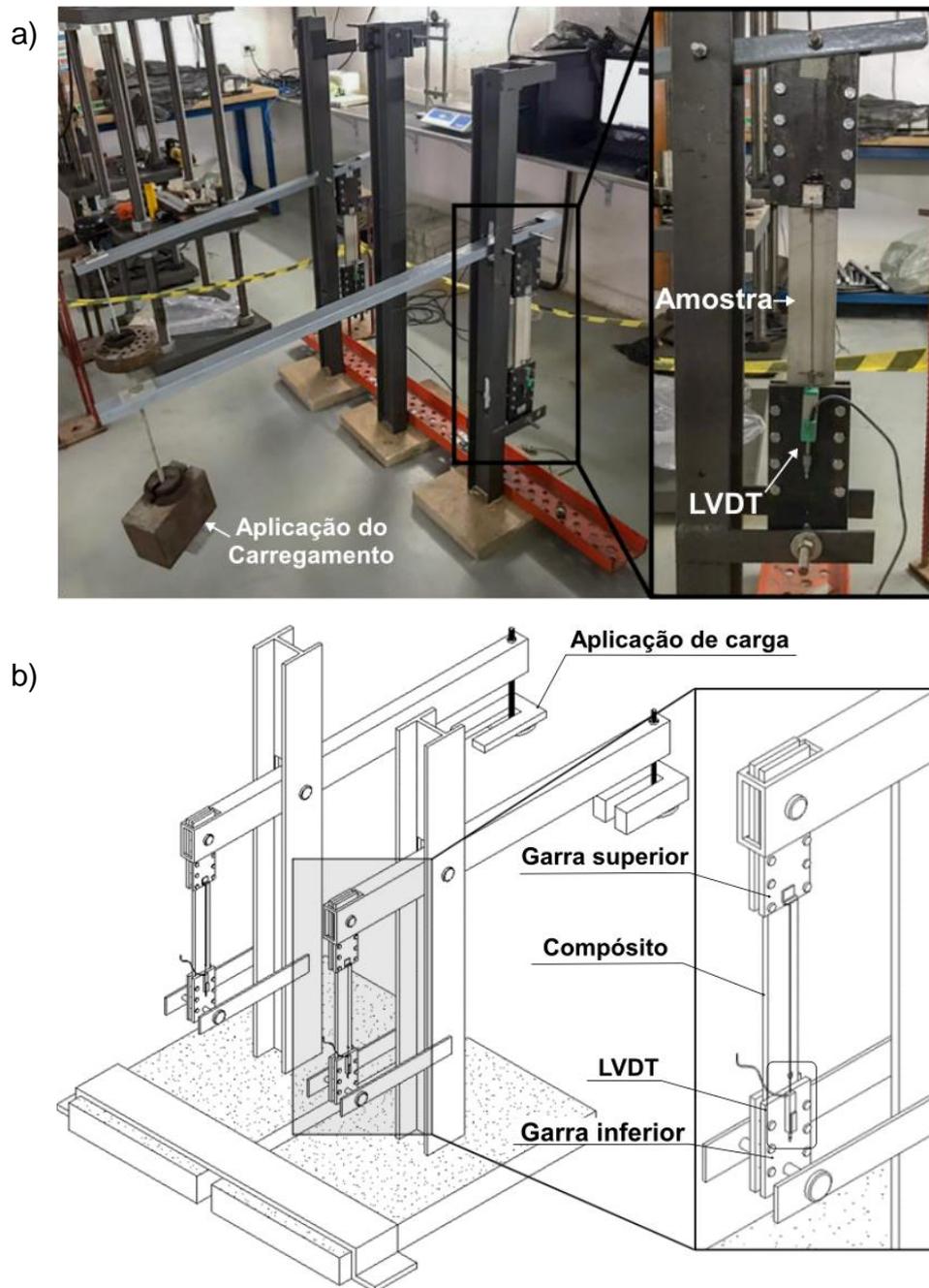


Figura 5.12 - Arranjo experimental utilizado nos ensaios de fluência à tração do compósito (a) e esquema representativo do arranjo (b).

As amostras foram carregadas com 50% da carga resistida pelo compósito equivalente ao deslocamento de 5 mm. A carga foi mantida constante por um período de 75 dias, com mais 7 dias de recuperação. A Tabela 5.3 mostra as cargas correspondentes para cada amostra.

Tabela 5.3 - Valor das cargas adicionadas para cada amostra para o ensaio de fluência à tração.

Pórtico	Compósito	Carga aplicada (N)	Carga transferida (N)	Tensão (MPa)
1	3 Camadas reforçado com fibras saturadas	162,86	1140	1,9
2	3 Camadas reforçado com fibras com umidade natural	214,03	1800	3,0

A idealização do processo do ensaio de fluência à tração está apresentada na Figura 5.23, análogo ao ensaio de fluência à flexão e com suas particularidades, que neste contexto os parâmetros utilizados para caracterização do comportamento dependente do tempo dos compósitos são obtidos por meio da deformação.

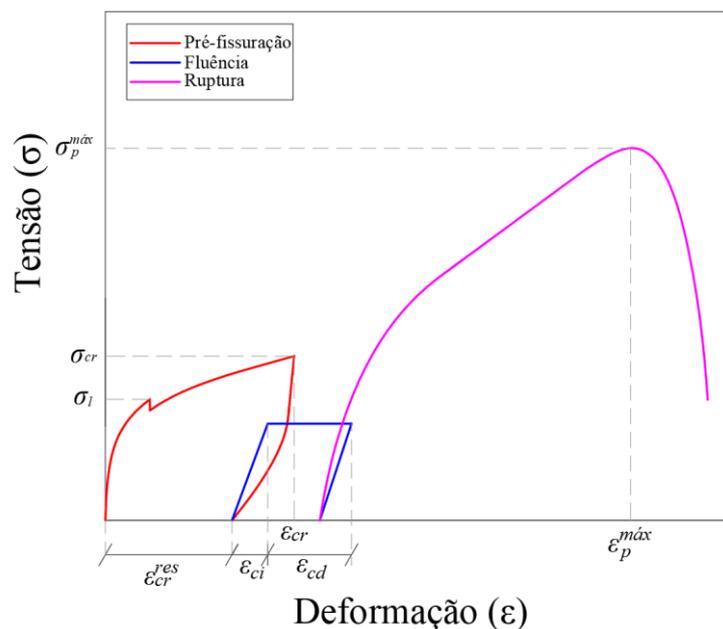


Figura 5.13 - Idealização do processo de ensaio da fluência à tração.

Um LVDT foi posicionado entre as garras superior e inferior para cada amostra submetida ao carregamento constante e o deslocamento foi adquirido durante todo o ensaio. O sistema de aquisição de dados utilizado foi o hardware National Instruments modelo NI cDAQ-9172 com auxílio do *software* LabView 2011, a uma frequência de aquisição de 1 dado a cada 60 s.

Para o acompanhamento e monitoramento das fissuras ao longo do ensaio, foi utilizado um microscópio estereoscópico portátil. As fissuras foram medidas antes do carregamento, imediatamente após o carregamento, 24h depois e a cada 7 dias no restante do ensaio.

5.3 Resultados e discussões

5.3.1 Resultados dos ensaios de fluência da fibra

A Figura 5.14 apresenta a evolução da deformação de um único filamento de fibra de sisal com umidade natural quando submetido a um teste típico de fluência-recuperação com diferentes níveis de carregamento. Quando a fibra é carregada em até 40% da sua resistência, é verificada uma deformação instantânea no carregamento, e uma deformação dependente do tempo (deformação por fluência). Cisse et al. [96] atribui o comportamento de fibras naturais na fluência à tendência da estrutura molecular dos componentes amorfos da celulose em alinhar-se na direção do carregamento, quando a tensão aplicada é suficiente para fornecer energia para superar as ligações secundárias que definem a sua estrutura macromolecular inicial e movimentar esses componentes.

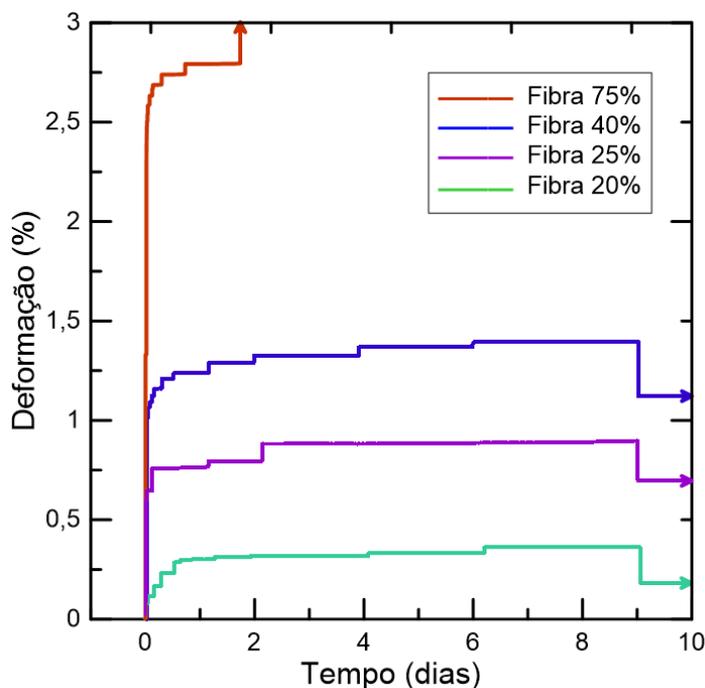


Figura 5.14 - Curvas deformação versus tempo para fibras de sisal carregadas com 20%, 25%, 40% e 75% da sua resistência última.

Para a maioria dos materiais viscoelásticos, a fluência primária é considerada como a porção recuperável dependente do tempo, enquanto a fluência secundária é a parcela da deformação total da amostra que não é recuperável após a remoção da carga [97]. Após a remoção do carregamento, um pequeno peso (aproximadamente 0,5 N) foi mantido para manter o alinhamento da fibra. Durante o descarregamento, a fibra se contrai rapidamente (recuperação instantânea). No entanto, a deformação instantaneamente recuperada é significativamente menor quando comparada com a deformação inicial instantânea. A Tabela 5.4 mostra as propriedades obtidas a partir dos ensaios de fluência do filamento de fibra.

Tabela 5.4 - Propriedades determinadas a partir do ensaio de fluência da fibra.

Propriedade	Fibra com nível de 20%	Fibra com nível de 25%	Fibra com nível de 40%	Fibra com nível de 75%
Deformação instantânea (ϵ_{inst}) [μs]	1130	6410	10070	23300
Deformação por fluência ($\epsilon_{fluência}$) [μs]	2470	2530	3900	4620
Deformação total (ϵ_{total}) [μs]	3600	8940	13970	27920
Recuperação instantânea (ϵ_{REC}) [μs]	1790	2450	2750	-
Coefficiente de recuperação ($\epsilon_{REC}/\epsilon_{TOTAL}$) [%]	49,7%	27,4%	19,7%	-

A maior parte da deformação gerada e irreversível pode ser explicada devido ao fenômeno envolvendo a cristalização da celulose induzida pela deformação e um mecanismo denominado *stick-slip* [98]. Esse complexo mecanismo fornece uma resposta plástica na tração que reconstitui a matriz amorfa entre as microfibrilas da celulose dentro da parede celular, principalmente feitas de pectina e hemicelulose, mantendo suas propriedades mecânicas [98].

A fibra carregada com 75% da sua resistência apresentou uma deformação instantânea e fluência primária no primeiro dia de ensaio, até uma ruptura brusca entre o primeiro e segundo dia de carregamento. A fibra utilizada por se tratar de uma fibra natural, pode apresentar defeitos, imperfeições e ligações fracas na sua estrutura. Assim, a tensão aplicada pode ter sido suficiente para romper o filamento

de fibra em pontos de imperfeições ou em pontos da interface entre a pectina e as fibrilas, que possui uma ligação fraca e um possível local de falha brusca e instantânea [99].

A seção transversal das fibras correspondente a cada curva é mostrada na Figura 5.15. Antes dos ensaios de fluência das fibras, foram realizadas micrografias dos filamentos de cada amostra. A área individual das fibras foi correlacionada com a resistência obtida por meio do ensaio de tração direta.

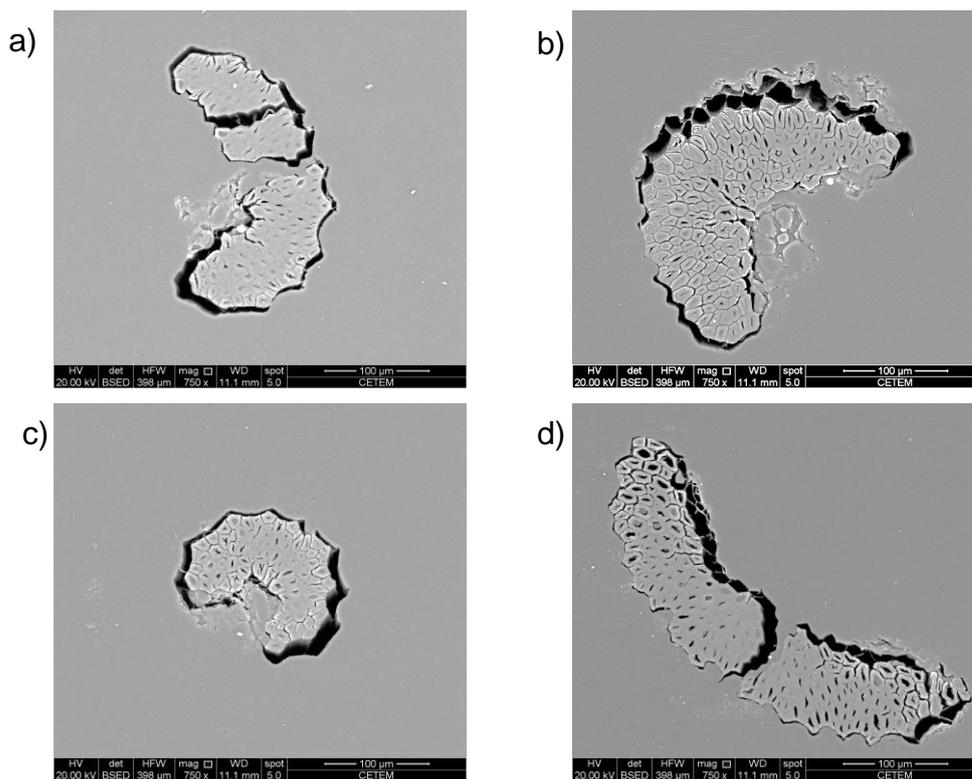


Figura 5.15 - Seção transversal das fibras de sisal antes de passarem pelo processo de fluência. Fibras relativas aos níveis de (a) 20%, (b) 25%, (c) 40% e (d) 75% da sua resistência última.

Fibras sintéticas de polipropileno (PP) foram ensaiadas de maneira análoga por Lima [68] e uma comparação é feita com as fibras de sisal, caracterizadas neste trabalho. As curvas de fluência das fibras de polipropileno com níveis de tensão de 25%, 50% e 75% são representadas no gráfico da Figura 5.16 em comparação com as deformações por fluência das fibras de sisal. Se tratando de fibras diferentes, foram utilizadas curvas *compliance* (ϵ/σ) versus tempo para as fibras analisadas para uma melhor comparação, descontando a parcela de deformação elástica.

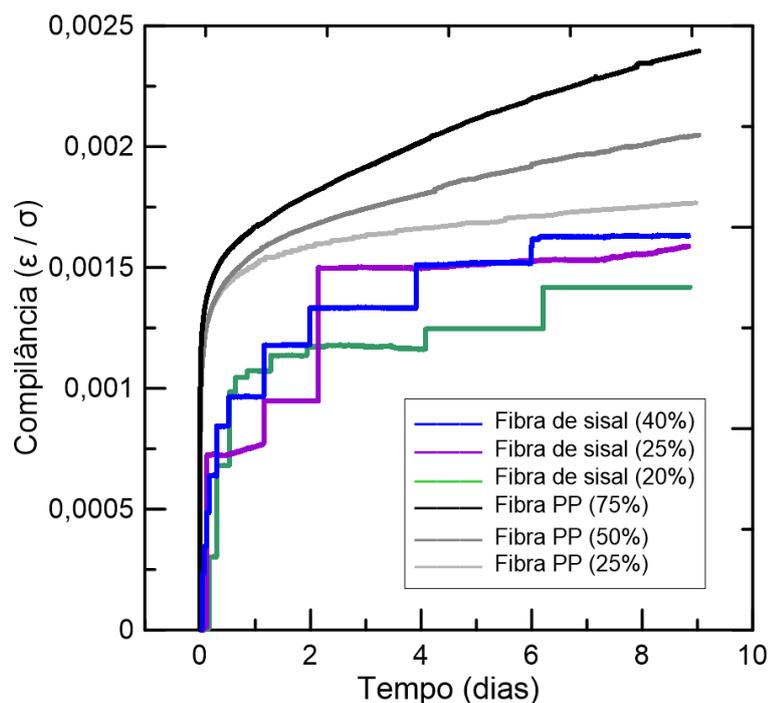


Figura 5.16 – Curvas *compliance* (ϵ/σ) versus tempo para comparação entre a fluência das fibras de sisal e de polipropileno [68] sob carregamento contínuo, descontada a parcela da deformação elástica inicial.

Lima [68] atribui a fluência das fibras sintéticas flexíveis ao seu comportamento viscoelástico, o que gera uma deformação significativamente grande. Além disso, as fibras de polipropileno apresentaram módulo de elasticidade de 3,38 GPa e uma deformação de aproximadamente 30% obtidos por meio do ensaio estático de tração direta. Enquanto as fibras de sisal apresentaram uma média de 18,43 GPa e 2,5% de módulo elasticidade e deformação, respectivamente. Essa diferença de resistência e rigidez dos materiais são fatores que, junto aos níveis de tensão, são responsáveis pela diferença entre as deformações ao longo do tempo das fibras de sisal e de polipropileno.

5.3.2 Resultados dos ensaios de retração por secagem

Foram realizados ensaios de retração por secagem das matrizes com o propósito de avaliar a deformação por retração após os 28 dias. No entanto, os ensaios de retração começaram logo após a desforma e chegou aos 61 dias. Além disso, aproveitou-se para entender qual a influência da adição do metacaulim no processo de retração em argamassas.

O efeito do metacaulim nas propriedades da retração ainda é um tema controverso. Geralmente, é esperado que a retração por secagem diminua com adição do metacaulim quando utilizado como substituição parcial do cimento em concretos [3,100–102]. Sua incorporação oferece muitas vantagens, como o aumento da resistência e diminuição da permeabilidade [100,103,104].

Os gráficos da Figura 5.17 mostram a retração das matrizes com diferentes teores de metacaulim. Foi possível observar um aumento na retração por secagem à medida em que o nível de adição de metacaulim aumentou. As amostras M2003 tiveram um comportamento semelhante à referência a partir dos 20 dias, porém com valores médios maiores até o final do ensaio. Os resultados são coerentes com os apresentados por Courard et al. [105] que estudaram a adição de 5% a 20% de metacaulim e observaram um aumento da retração com o aumento da substituição do cimento para os 60 primeiros dias e, ao final de 14 semanas essa diferença não se mostrou significativa. Outro estudo conduzido por Melo [106] propôs a analisar o efeito de escória de alto forno com diferentes concentrações de ativadores na retração por secagem. As misturas com maiores teores de SiO_2 e Na_2O apresentaram retração por secagem significativamente maiores, em razão do aumento da retração autógena e deformação causada pela perda de água para o ambiente.

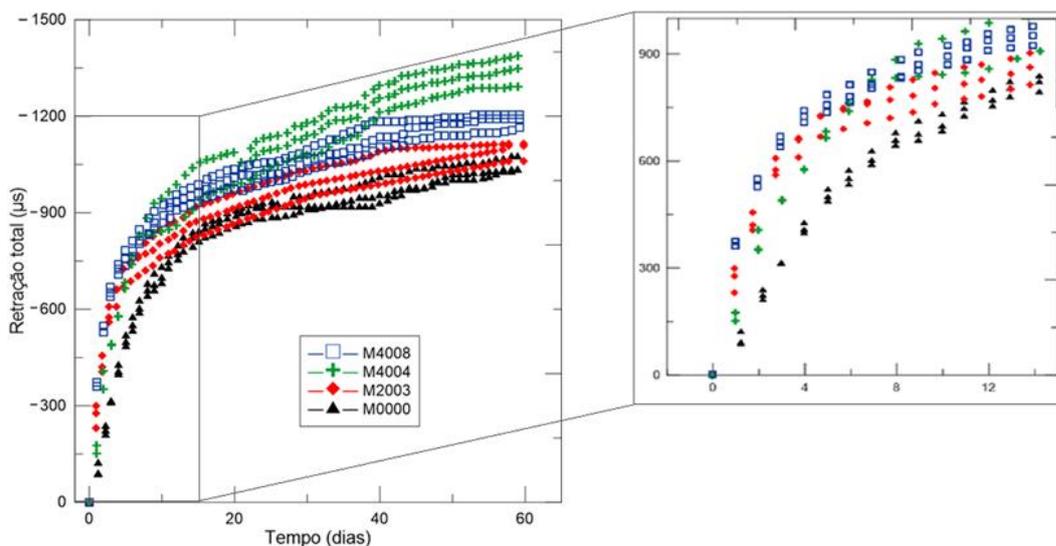


Figura 5.17 - Influência da adição de metacaulim e superplastificante na reposta de retração por secagem. Gráficos retração por secagem versus tempo.

O aumento da retração por secagem pode ser atribuído a um efeito de refinamento microestrutural [107]. Em geral, o uso de adições minerais tende a contribuir para o aumento da retração, em virtude da melhora no empacotamento e refinamento dos poros da matriz cimentícia [108]. O refinamento dos poros pode aumentar a tensão superficial nos pequenos poros capilares e, assim, aumentar a retração por secagem induzida pela perda de água desses poros [107]. Além disso, o hidróxido de cálcio tem um efeito de restringir a retração, similar aos agregados no concreto. Assim, o consumo de hidróxido de cálcio pelas reações pozolânicas confere um aumento no refinamento e a perda de um elemento que ajuda na restrição da retração [109].

A taxa média de retração para as amostras nos primeiros 10 dias de ensaio foi obtida a partir do gráfico da Figura 5.17. A Tabela 5.5 mostra um aumento da velocidade de retração à medida em que o nível de substituição do cimento por metacaulim aumentou.

Tabela 5.5 - Taxa média de retração das argamassas para os 10 primeiros dias, desvio entre parênteses.

Amostra	Taxa de retração ($\mu\text{s}/\text{dia}$)
M0000	- 79,26 (1,82)
M2003	- 98,85 (3,54)
M4008	- 110,86 (2,20)
M4004	- 113,72 (2,47)

A Tabela 5.6 apresenta os valores médios de retração das matrizes com adição de metacaulim quando comparadas às amostras de referência ao final de 60 dias de ensaio.

Tabela 5.6 - Retração média das argamassas ao final de 60 dias, desvio padrão entre parênteses.

Amostra	Deformação por retração (μs)
M0000	- 1049,33 (23,09)
M2003	- 1095,00 (29,60)
M4008	- 1186,67 (20,53)
M4004	- 1342,67 (48,22)

O gráfico da Figura 5.18 apresenta a perda de massa, em %, ao longo do tempo das amostras durante o ensaio de retração por secagem. Como pode ser observado, a perda de massa é alta nos 10 primeiros dias para todas as amostras. Após os 20 dias de ensaio, ocorre uma estabilização na perda de massa das misturas. A intensidade da perda de água depende de um conjunto de características da mistura no momento da perda de água, principalmente a cinética de hidratação, a natureza dos produtos hidratados e a estrutura porosa [106]. A hidratação e reação pozolânica reduz a quantidade de água livre na argamassa, o que pode explicar uma maior perda de massa para as argamassas sem adição de metacaulim [102].

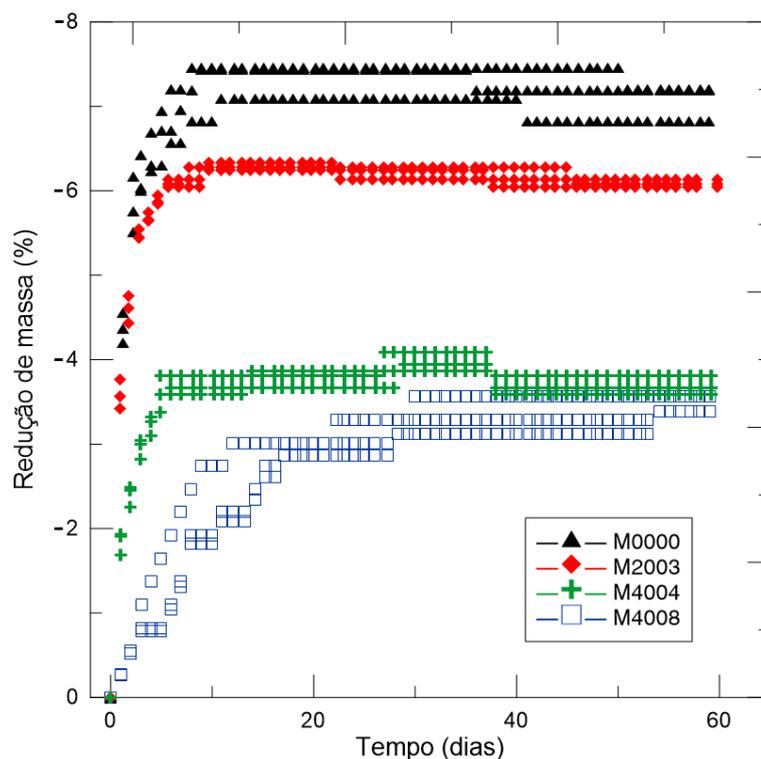


Figura 5.18 - Gráfico redução de massa versus tempo das amostras do ensaio de retração total.

O gráfico da Figura 5.19 apresenta a retração das amostras submetidas a cura saturada e o efeito da adição do metacaulim. Como pode ser observado, as matrizes de referência e a matriz com 20% de metacaulim tiveram uma resposta semelhante. Nos primeiros 10 dias, as amostras M2003 apresentaram uma expansão maior e, após 30 dias, essas matrizes começaram a retrair. Resultando em uma retração média um pouco superior à referência ao final dos 60 dias de ensaio. Já as matrizes

com 40% de metacaulim tiveram uma expansão mais elevada, sendo maior para a M4004.

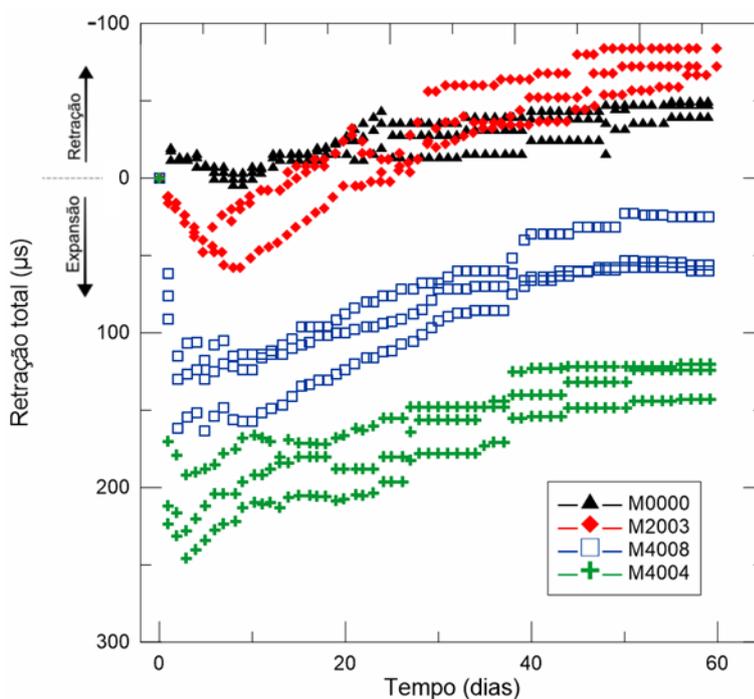


Figura 5.19 - Influência da adição de metacaulim e superplastificante na reposita de retração por secagem nas amostras submetidas a cura saturada.

A reação pozolânica do metacaulim ocorre pela interação da mecaulinita com o hidróxido de cálcio presente na pasta cimentícia, formando silicatos (C-S-H) e aluminatos de cálcio hidratado (C_2ASH_8 , C_4AH_{13} e C_3AH_6) [110]. A expansão observada ocorre durante a saturação contínua, o que indica que pelo menos parte da expansão ocorre devido à absorção adicional da água pela rede de hidratos. No entanto, à medida que a adição de metacaulim aumenta, a expansão é maior. Isso pode ocorrer porque os produtos hidratados formados com alto teor de metacaulim são capazes de absorver mais água e expandir mais do que aqueles formados com baixa quantidade de adição de metacaulim [82].

A expansão total das amostras pode ser explicada devido a precipitação de produtos da hidratação que possuem um volume menor do que os reagentes iniciais [82]. A diferença de volume produzida, que se manifesta como espaço adicional de poros no sistema, é imediatamente ocupada por água extra fornecida pela cura saturada contínua, atraída por ação capilar. E, também, pode ser resultado da alteração na rede de hidratos, ou seja, à medida que a quantidade de CH no sistema

diminui, o C_4AH_{13} é gradualmente substituído pelo C_2ASH_8 de baixa densidade, fornecendo uma contribuição adicional ao processo de expansão [82].

O gráfico da Figura 5.20 apresenta a perda de massa para as matrizes analisadas. Pode-se notar que a matriz de referência e a M4008 não apresentou uma perda de massa significativa ao final do ensaio quando comparadas com as matrizes M2003 e M4004 que tiveram um ganho de massa 4% e 7,5%, respectivamente.

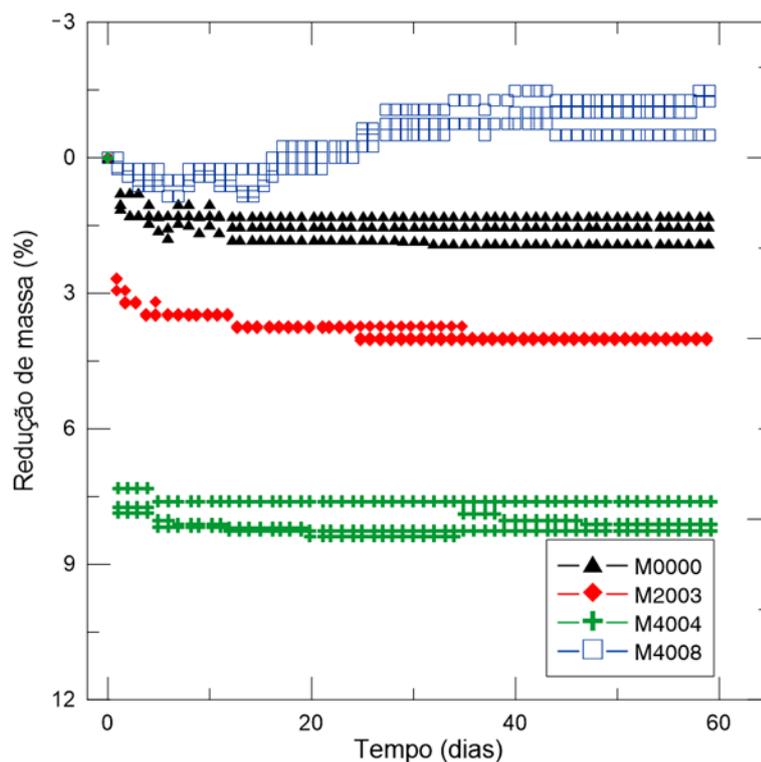


Figura 5.20 - Gráfico redução de massa versus tempo das amostras do ensaio de retração total das amostras submersas.

5.3.1 Resultados do ensaio de absorção e índice de vazios

Para analisar a absorção e o volume de vazios das matrizes, ensaios de absorção foram realizados para as amostras estudadas. As Tabelas 5.7-8 mostram os resultados obtidos para as amostras após o ensaio de retração por secagem. Como pode ser observado, as amostras com adição de metacaulim apresentaram um aumento da porosidade total das amostras em relação à referência, sem metacaulim. Além disso, a adição do metacaulim pode ter sido responsável pelo aumento do número de pequenos poros à medida que a adição de metacaulim aumentou [104]. Já as amostras submetidas à cura saturada apresentaram valores inferiores de

absorção e volumes de vazios, em relação às amostras submetidas a secagem em temperatura e umidade relativa controlada. Em relação a densidade das matrizes, estas tiveram valores semelhantes para todos os níveis de substituição, o que pode ser explicado pela densidade aproximada dos dois materiais utilizados.

Tabela 5.7 - Resultados de absorção, densidade e volume de vazios para amostras submetidas a cura em temperatura e umidade controladas de $24 \pm 1^\circ\text{C}$ e $41 \pm 2\%$, respectivamente. Desvio padrão entre parênteses.

Amostra	Absorção após imersão (%)	Absorção após imersão e aquecimento (%)	Densidade da amostra seca (Mg/m^3)	Densidade da amostra após imersão (Mg/m^3)	Densidade da amostra após imersão e aquecimento (Mg/m^3)	Volume de vazios (%)
M0000	9,1 (0,12)	9,7 (0,33)	1,64 (0,01)	1,78 (0,01)	1,79 (0,08)	15,93 (0,52)
M2003	11,1 (0,25)	11,5 (0,34)	1,72 (0,02)	1,91 (0,02)	1,92 (0,03)	19,81 (0,32)
M4008	11,8 (0,23)	12,2 (0,54)	1,65 (0,01)	1,84 (0,07)	1,85 (0,04)	20,07 (0,89)
M4004	11,9 (0,35)	12,2 (0,65)	1,67 (0,06)	1,87 (0,06)	1,88 (0,03)	20,34 (1,12)

Tabela 5.8 - Resultados de absorção, densidade e volume de vazios para amostras submetidas a cura saturada. Desvio padrão entre parênteses.

Amostra	Absorção após imersão (%)	Absorção após imersão e aquecimento (%)	Densidade da amostra seca (Mg/m^3)	Densidade da amostra após imersão (Mg/m^3)	Densidade da amostra após imersão e aquecimento (Mg/m^3)	Volume de vazios (%)
M0000	1,2 (0,16)	1,7 (0,22)	1,86 (0,03)	1,88 (0,02)	1,89 (0,03)	3,13 (0,32)
M2003	1,8 (0,21)	1,9 (0,41)	1,86 (0,01)	1,89 (0,02)	1,90 (0,02)	3,62 (0,37)
M4008	2,3 (0,13)	2,5 (0,32)	1,85 (0,01)	1,89 (0,01)	1,89 (0,02)	4,68 (0,55)
M4004	3,3 (0,22)	3,6 (0,41)	1,80 (0,03)	1,86 (0,03)	1,87 (0,04)	6,51 (0,68)

5.3.2 Resultados dos ensaios de fluência à compressão

A figura 5.21 mostra o resultado do ensaio de fluência à compressão das matrizes a fim de analisar a influência da adição do metacaulim na mistura.

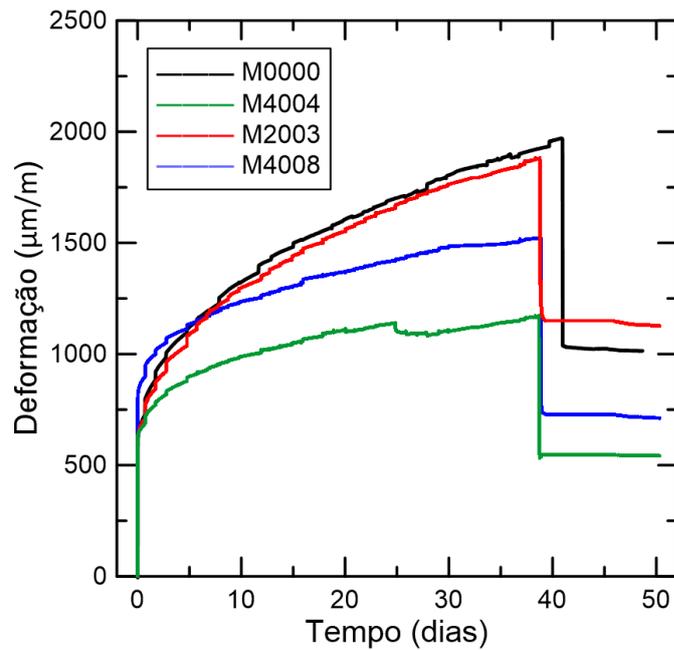


Figura 5.21 - Influência da adição de metacaulim no comportamento de fluência a compressão.

A Figura 5.22 apresenta a deformação por fluência para as matrizes analisadas, descontada a deformação instantânea. Como pode ser observado, à medida em que a quantidade de metacaulim aumentou, a fluência sofreu uma redução. A argamassa M4004 apresentou uma deformação por fluência inferior ao esperado, já que sua resistência à compressão é menor do que M2003 e M4008.

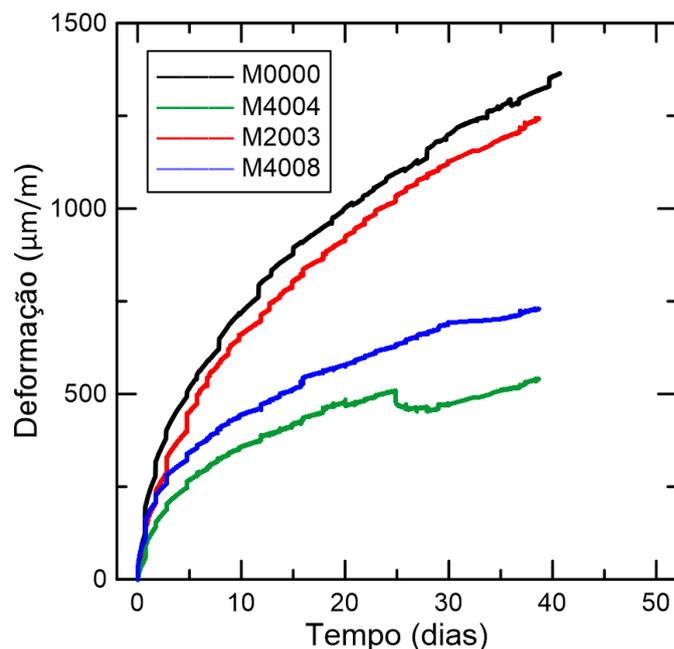


Figura 5.22 - Deformação por fluência para as matrizes analisadas.

A partir da Tabela 5.9 podemos afirmar que a adição de metacaulim reduz a fluência, com uma redução maior para maiores níveis de substituição do cimento (40%).

Tabela 5.9 - Propriedades obtidas a partir do ensaio de fluência à compressão.

Propriedade	M0000	M2003	M4008	M4004
Retração total ($\epsilon_{RT,28}$) [μs]	922,67 (19,56)	983,33 (31,56)	1052,0 (21,33)	1121,33 (35,56)
Deformação instantânea ($\epsilon_{inst,28}$) [μs]	604,67 (67,78)	637,33 (15,11)	792,17 (13,11)	630,8 (43,13)
Deformação por fluência ($\epsilon_{fluência}$) [μs]	1319,5 (87,67)	1218,97 (35,44)	724,24 (53,24)	480,75 (72,36)
Deformação total ($\epsilon_{RT,28}$ + ϵ_{inst} + $\epsilon_{fluência}$) [μs]	2846,83 (30,11)	2839,63 (46,99)	2568,41 (43,22)	2232,88 (39,36)
Coefficiente de fluência ($\epsilon_{fluência}/\epsilon_{inst}$) [μs]	2,24 (0,39)	1,91 (0,04)	0,91 (0,08)	0,76 (0,16)
Recuperação instantânea (ϵ_{REC}) [μs]	888,13 (30,43)	693,03 (24,36)	783,71 (13,86)	633,50 (11,28)
Coefficiente de recuperação ($\epsilon_{REC}/\epsilon_{TOTAL}$) [μs]	0,31 (0,02)	0,24 (0,02)	0,30 (0,06)	0,28 (0,03)

A Figura 5.23-26 apresenta os estágios do ensaio de fluência na compressão para cada matriz analisada e a carga aplicada equivalente a 30% da resistência de cada matriz. É possível observar que as amostras de referência e as matrizes com adição de 20% de metacaulim apresentaram uma recuperação instantânea superior à deformação instantânea, enquanto as matrizes M4008 e M4004 apresentaram uma recuperação instantânea com valores semelhantes à deformação instantânea.

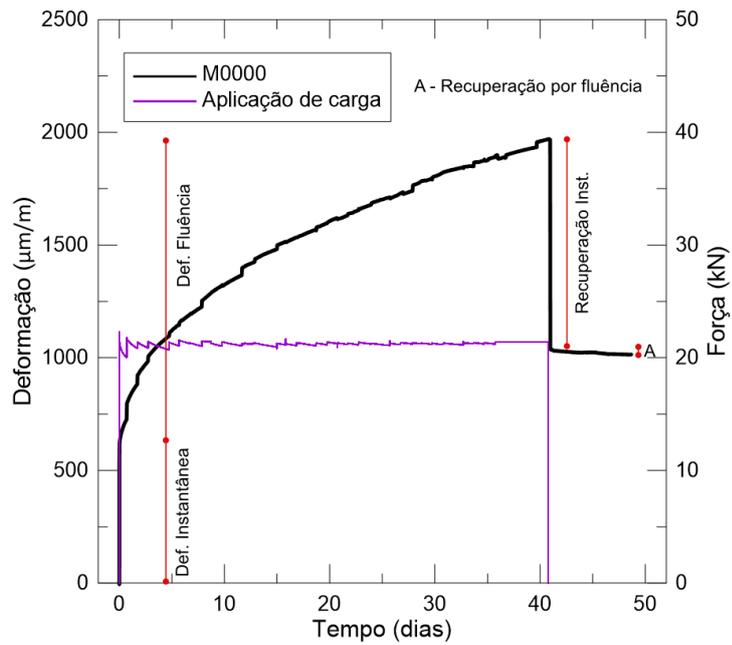


Figura 5.23 - Curva deformação versus tempo da matriz de referência.

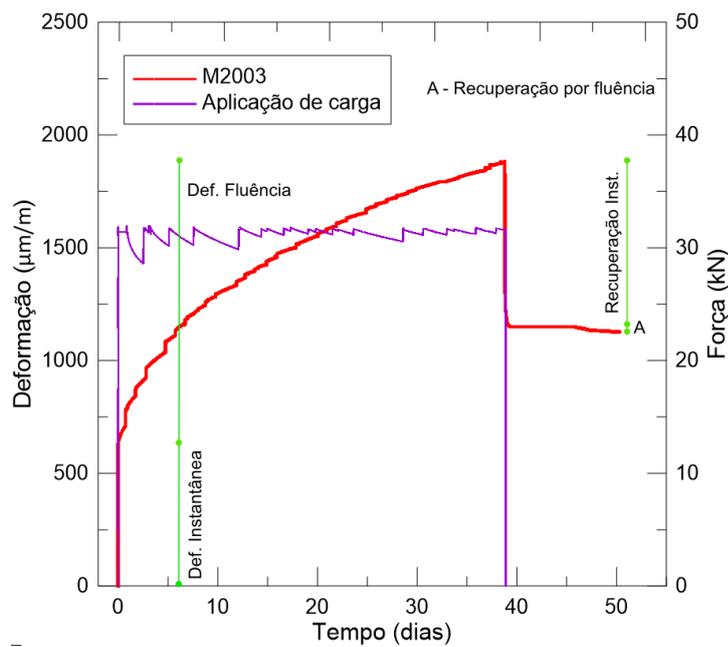


Figura 5.24 - Curva deformação versus tempo da matriz M2003.

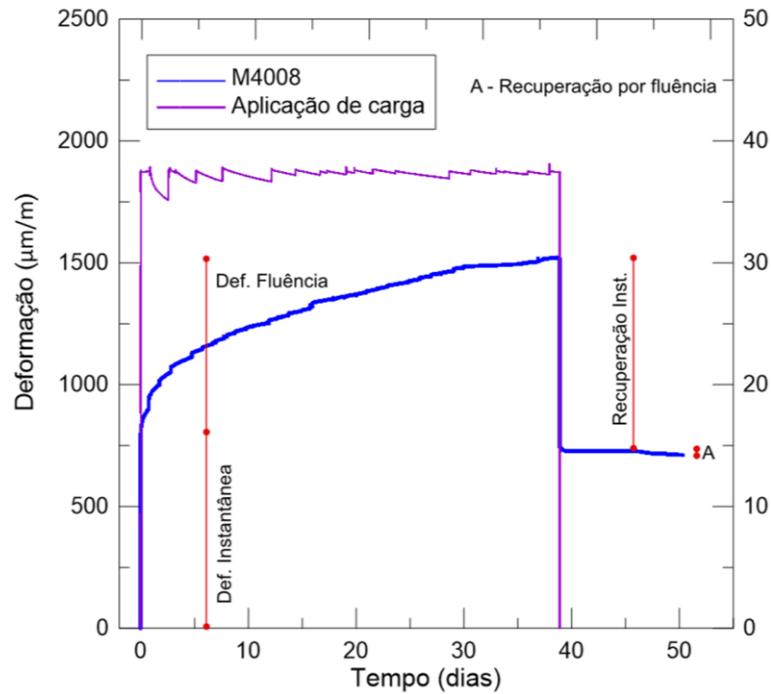


Figura 5.25 - Curva deformação versus tempo da matriz M2003.

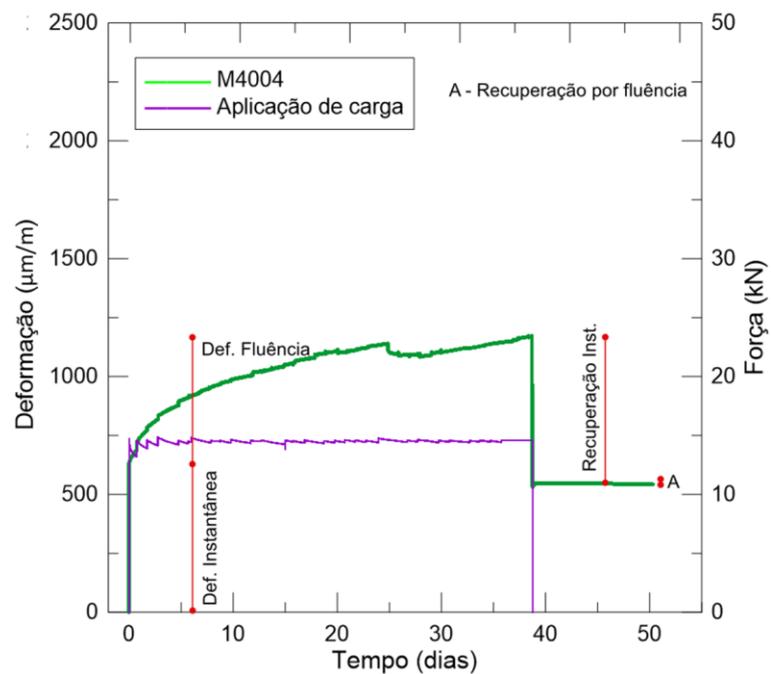


Figura 5.26 - Curvas deformação versus tempo da matriz M2003.

A redução da fluência pode ser atribuída a uma estrutura mais densa e uma maior resistência da matriz como resultado da formação adicional das fases hidratadas devido as reações pozolânicas e efeito de *filler* proporcionados pela reação do metacaulim com o hidróxido de cálcio [111]. Como resultado da reação

pozolânica, produtos de maior densidade são formados e conseqüentemente uma matriz mais resistente [79, 110].

5.3.3 Resultados dos ensaios da fluência à flexão

Como descrito no programa experimental, utilizou-se dois tipos de compósitos para o ensaio de fluência à flexão, um compósito reforçado com 3 camadas de reforço saturado e outro com 3 camadas de reforço com umidade natural. Os compósitos com 3 camadas com reforço saturado foram submetidos a uma carga equivalente a 50% e 70% da tensão resistida pelos corpos de prova no ensaio de flexão a quatro pontos durante a etapa de pré-fissuração, enquanto para o compósito com reforço com umidade natural foi de 50%.

O gráfico do processo do ensaio está apresentado na Figura 5.27, contendo a pré-fissuração, fluência, recuperação e ruptura das amostras reforçadas com fibras saturadas e com umidade natural com carga equivalente a 50% da tensão resistida na etapa de pré-fissuração. Já a Figura 5.28 apresenta a comparação entre as amostras com reforço saturado com tensão aplicada referente à 50% e 70%.

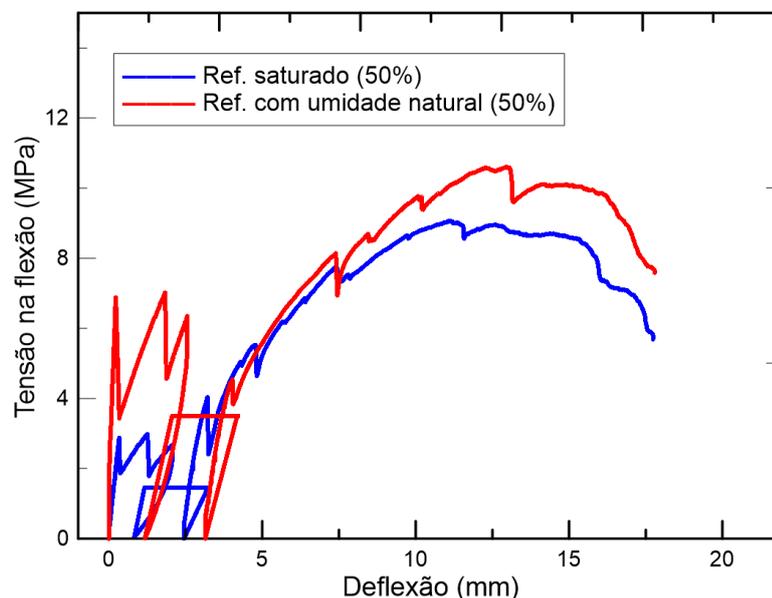


Figura 5.27 - Processo do ensaio de fluência a flexão das amostras reforçadas com 3 camadas de fibras saturadas e com umidade natural com carga equivalente a 50%.

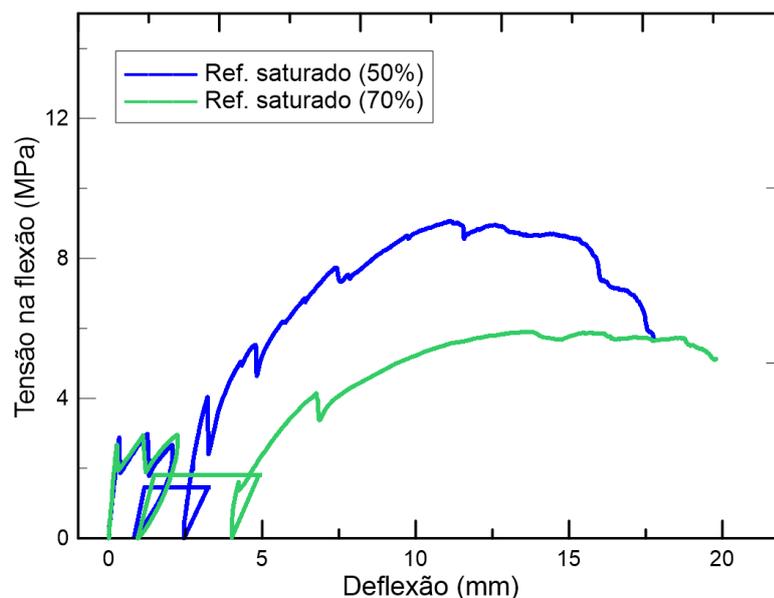


Figura 5.28 - Processo do ensaio de fluência a flexão das amostras reforçadas 3 camadas de fibras saturadas com níveis de carregamento de 50% e 70%.

Para melhor compreender os dados expostos nas curvas, montou-se uma tabela resumo (Tabela 5.10) com todos os parâmetros definidos: taxa de recuperação, tensão correspondente à primeira fissura, taxa de deflexão para diferentes períodos e os coeficientes de fluência.

Tabela 5.10 - Parâmetros calculados para representar os dados obtidos no ensaio de fluência.

Amostra	Taxa de recuperação (r)	σ_L (MPa)	Wci (mm)	Wcd (mm)			Coeficiente de fluência (ϕ)		
				20 dias	40 dias	60 dias	20 dias	40 dias	60 dias
Ref. saturado com carga equivalente a 50%	0,67	1,46	1,82	1,93	2,07	1,24	1,32	1,41	1,46
Ref. saturado com carga equivalente a 70%	0,60	1,48	2,95	3,27	3,41	2,00	2,21	2,31	1,48
Ref. umidade natural com carga equivalente a 50%	0,53	1,56	1,95	2,07	2,12	1,25	1,32	1,36	1,56

A partir das curvas apresentadas na Figura 5.27-28 e com auxílio da Tabela 5.10, é possível perceber que após 60 dias com carga contínua atuando como peso permanente, as amostras com reforço saturado possuem uma maior taxa de recuperação e menores coeficientes de fluência. Esse comportamento, sob carga

constante, pode ser explicado pela maior resistência adquirida pela zona interfacial fibra-matriz durante a fabricação dos compósitos. As fibras saturadas não absorvem umidade da matriz e ainda podem funcionar como agente de cura interna, fornecendo água para a hidratação tardia dos grãos de cimento não hidratados da interface, resultando em uma interface mais densa e resistente. A interface é responsável por restringir a deflexão na fluência por meio do arrancamento da fibra. Assim, os compósitos reforçados com fibras com umidade natural apresentaram uma deflexão superior devido a um enfraquecimento da interface e um maior descolamento das fibras. A taxa de recuperação para esse tipo de compósito foi menor, já que no ensaio monotônico de flexão existe o mecanismo combinado de deflexão da matriz, alongamento das fibras e arrancamento das fibras da matriz. Com uma interface menos resistente, o mecanismo principal se torna o arrancamento, o qual impossibilita maiores recuperações.

Além disso, é possível observar que com um maior nível de carregamento, a deformação se torna maior, a taxa de recuperação diminui e o coeficiente de fluência aumenta, devido a carga estar mais próxima do nível de fissuração do compósito.

Como pode ser visto na Figura 5.29-31 curvas que representam a comparação entre o ensaio monotônico e o processo do ensaio de fluência. A partir dessas curvas, é possível perceber que após 60 dias das amostras sob carga constante, a resistência final foi reduzida. Além disso, uma diminuição na capacidade de deflexão também é observada.

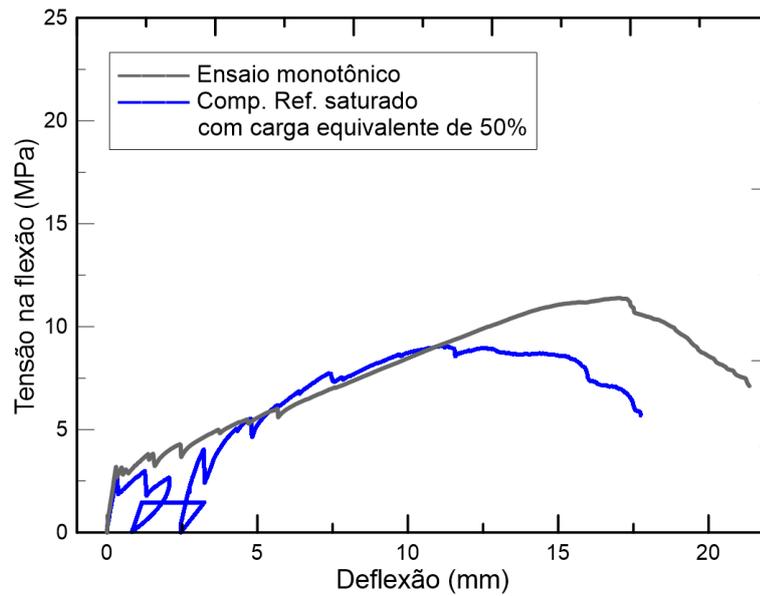


Figura 5.29 - Comparação do compósito de 3 camadas com reforço saturado submetido à carga de 50% durante o ensaio de fluência a flexão e sua curva tensão versus deflexão obtida através do ensaio monotônico de flexão a quatro pontos.

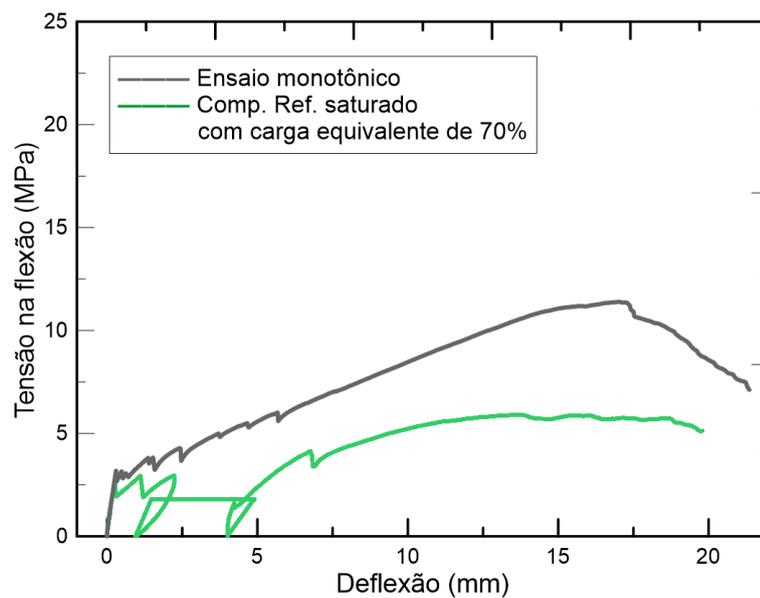


Figura 5.30 - Comparação do compósito de 3 camadas com reforço saturado submetido à carga de 70% durante o ensaio de fluência a flexão e sua curva tensão versus deflexão obtida através do ensaio monotônico de flexão a quatro pontos.

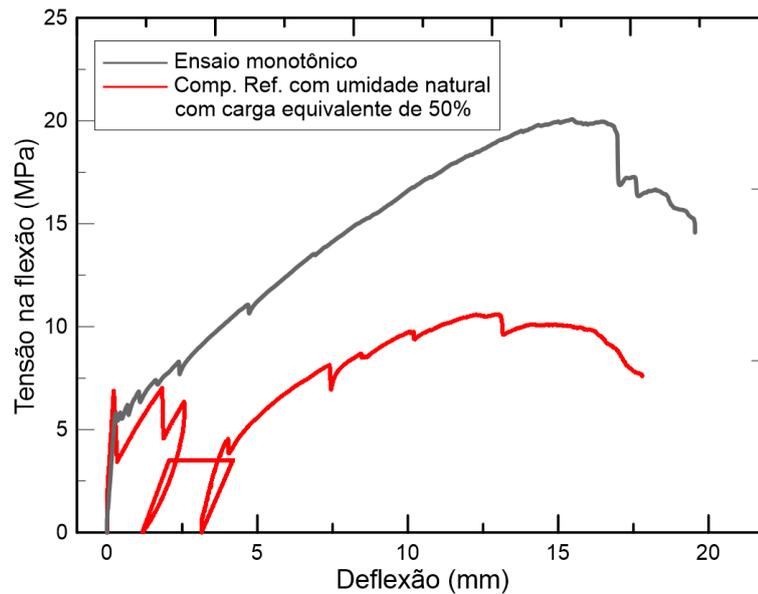


Figura 5.31 Comparação do compósito de 3 camadas com reforço com umidade natural submetido à carga de 50% durante o ensaio de fluência a flexão e sua curva tensão versus deflexão obtida através do ensaio monotônico de flexão a quatro pontos.

A Tabela 5.11 apresenta as propriedades mecânicas para os compósitos ao final do ensaio de fluência a flexão. Para os compósitos com reforço saturado submetidos a uma carga equivalente de 50% apresentaram uma redução na tensão e na deflexão de aproximadamente 20,8% e 41,3%, respectivamente. Já para as amostras submetidas a carga de 70% a queda de tensão máxima e deflexão foi de 48,2% e 35,3%, respectivamente. Logo, o aumento do valor da carga aplicada não influenciou significativamente a deflexão das amostras. No entanto, ao final do ensaio, os corpos de prova apresentaram uma maior perda de tensão resistida, quando comparadas entre si. Esses parâmetros refletem na tenacidade das amostras que resultaram em queda de 13,27 kJ/m² para 6,22 kJ/m² e 4,77 kJ/m², para as amostras com carga equivalente de 50% e 70%, respectivamente. No caso dos compósitos com reforço com umidade natural, observou-se uma queda na tensão máxima de aproximadamente 70% e na deflexão de 28,9%, resultando em uma queda na tenacidade das amostras de 56,5%.

Tabela 5.11 - Propriedades mecânicas para os três compósitos ao final do ensaio de fluência à flexão. Desvio padrão entre parênteses.

Compósito	Tensão Máxima (MPa)	Deflexão máxima (mm)	Tenacidade (kJ/m²)	Tenacidade no ensaio monotônico
Ref. saturado com carga equivalente a 50%	9,0 (1,9)	9,7 (2,6)	6,2 (2,9)	13,3 (1,6)
Ref. saturado com carga equivalente a 70%	5,9 (1,6)	10,7 (2,4)	4,8 (1,0)	13,3 (1,6)
Ref. umidade natural com carga equivalente a 50%	10,6 (2,5)	11,0 (1,8)	8,7 (2,7)	20,0 (1,6)

Observando agora os gráficos da Figura 5.32, que contêm apenas os dados do ensaio de fluência, pode-se perceber que as amostras reforçadas com fibras saturadas com carregamento equivalente a 50% da tensão resistida tiveram uma deflexão por fluência inferior quando comparadas com as fibras com umidade natural. Enquanto as amostras submetidas a uma carga equivalente de 70% resultaram em uma deformação 2,2 vezes superior. No entanto, quando observamos a Tabela 5.12, a deflexão instantânea para essas amostras foi 2,6 vezes maior. Assim, para uma melhor análise do comportamento dos compósitos sob carregamento contínuo, podemos comparar isoladamente a deflexão por fluência, tendo em vista que a deflexão instantânea pode ser afetada pelo grau de fratura que os compósitos sofreram durante a etapa de pré-fissuração.

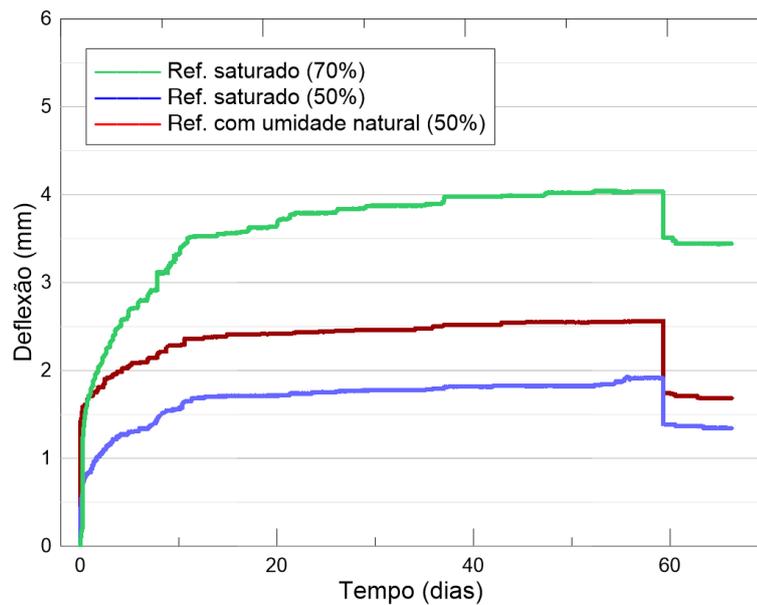


Figura 5.32 - Curvas deflexão versus tempo para as amostras submetidas ao carregamento contínuo.

O comportamento à flexão dos compósitos ao longo do tempo pode ser explicado devido ao aumento das aberturas das fissuras resultantes da etapa de pré-fissuração. Sabendo-se que, durante o ensaio monotônico de flexão a quatro pontos, a etapa que antecede a fratura dos compósitos é a saturação das fissuras, o ensaio de fluência pode ter sido responsável por aumentar a abertura das fissuras, formando pontos de fratura, sem que houvesse a formação de novas fissuras. Logo, houve uma redução na resistência e da deflexão final.

A Tabela 5.12 apresenta as propriedades determinadas por meio do ensaio de fluência a flexão, como a deflexão instantânea, a deflexão por fluência, deflexão total, recuperação instantânea e coeficiente de recuperação. Os valores foram obtidos por meio da média dos resultados obtidos para cada variação do compósito, tendo em vista que foram utilizadas duas amostras para cada variação.

Tabela 5.12 - Propriedades determinadas por meio do ensaio de fluência à flexão.

Desvio padrão entre parênteses.

Propriedade	Ref. saturado com carga equivalente a 50%	Ref. saturado com carga equivalente a 70%	Ref. com umidade natural com carga equivalente a 50%
Deflexão instantânea (w_{inst}) [mm]	0,61	1,59	1,42
Deflexão por fluência ($w_{fluência}$) [mm]	1,28	2,50	1,13
Deflexão total (w_{total}) [mm]	1,86	4,09	2,56
Recuperação instantânea (w_{REC}) [mm]	0,52	0,65	0,87
Coeficiente de recuperação (w_{REC}/w_{TOTAL}) [%]	31,2 (2,1)	24,8 (2,3)	31,0 (6,8)

A abertura de fissuras foi monitorada após a ruptura de amostras com a utilização de um microscópio estereoscópico portátil. A partir das imagens obtidas foi possível observar que o deslocamento gerado pela carga contínua influenciou na abertura de fissuras. A Figura 5.33 apresenta as curvas da evolução da abertura das fissuras durante o período de ensaio de fluência à flexão. É possível observar que a tendência da abertura das fissuras é de apresentar um comportamento semelhante ao comportamento global dos compósitos na deflexão quando submetidos a uma carga contínua. Com um trecho ascendente no momento de aplicação da carga, e um crescimento lento e progressivo ao longo do ensaio.

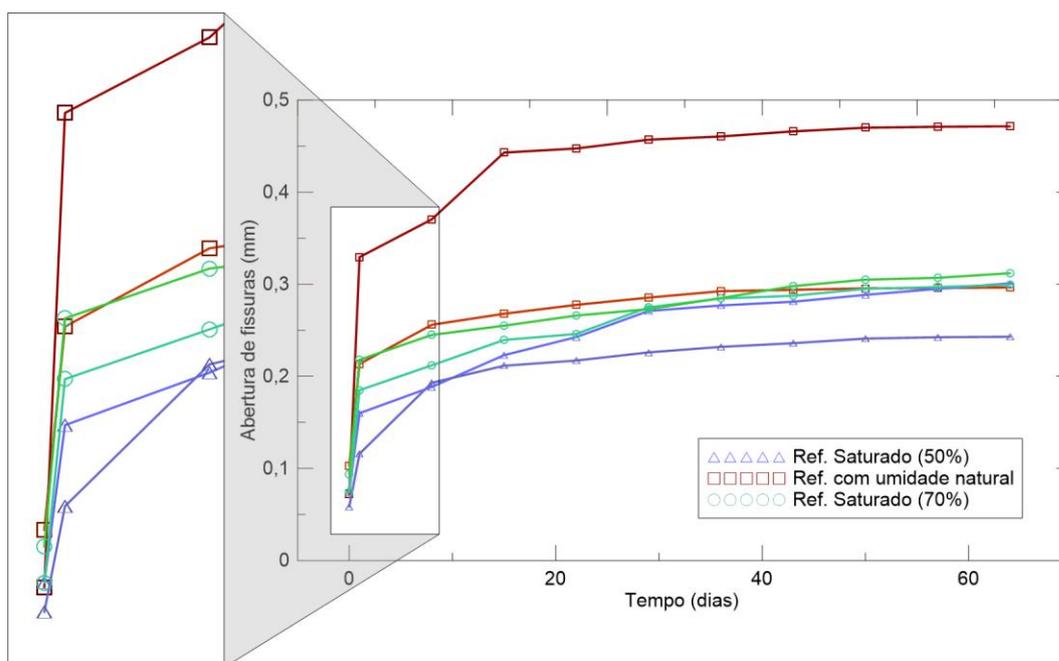


Figura 5.33 - Curvas da abertura média de fissuras versus tempo dos compósitos durante o processo de fluência.

Algumas fissuras podem não apresentar um aumento durante o ensaio, enquanto outras, possuem uma evolução mais evidente. Essa diferença é mais clara para as fissuras localizadas no centro das amostras, enquanto as fissuras localizadas nas extremidades apresentaram uma abertura mais constante ao longo do ensaio. Como dito anteriormente, a abertura das fissuras pode ser influenciada pela adesão fibra-matriz, devido à resistência da interface e ao mecanismo combinado de alongamento e arrancamento da fibra. As fibras de sisal, como visto na seção 5.3.1, possuem um comportamento viscoelástico sob carga constante e isso, junto ao arrancamento das fibras da matriz, podem explicar o aumento da deflexão dos compósitos reforçados com fibras unidirecionais de sisal.

A Figura 5.34 mostra exemplos de fissuras transversais que foram monitoradas para cada amostra durante o ensaio de fluência à flexão. Como pode ser observado, após a aplicação da carga as fissuras aumentaram de tamanho de forma instantânea, no entanto, ao longo do ensaio de fluência as fissuras aumentaram de tamanho de forma progressiva e lenta, permitindo a sua visualização mais clara por meio das análises das imagens com uso do software ImageJ utilizando o número de pixels como referência.

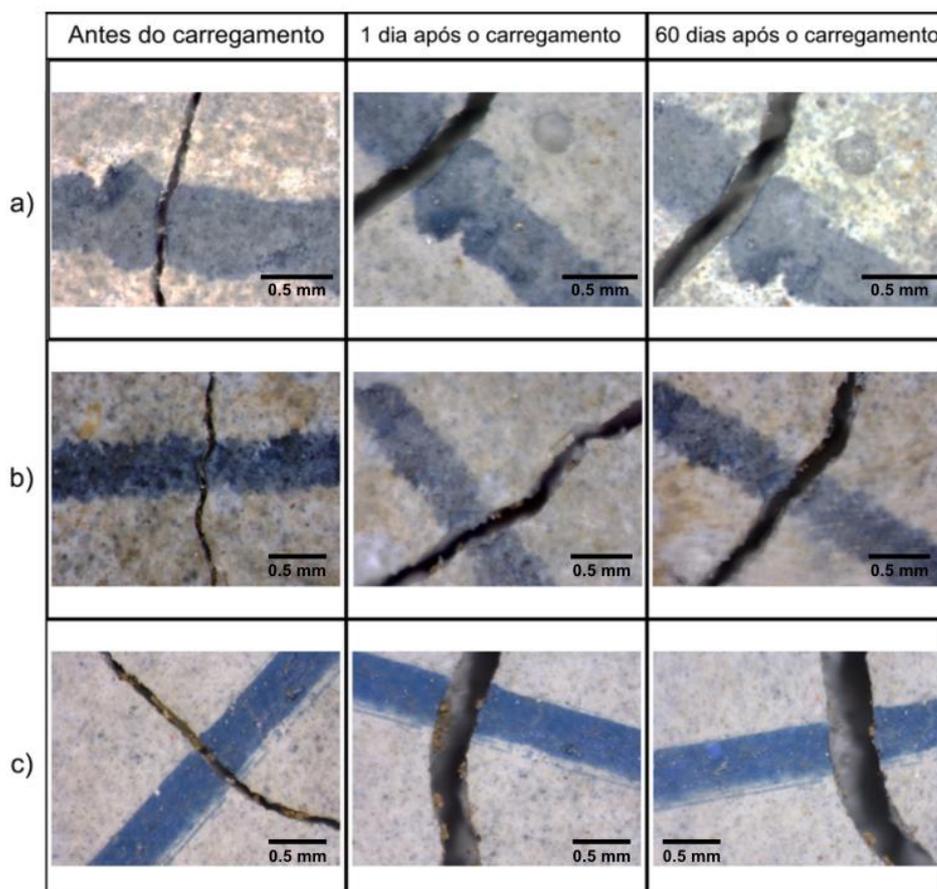


Figura 5.34 - Exemplo da evolução das fissuras das amostras após a etapa de pré-fissuração e submetidas ao ensaio de fluência à flexão. Imagens correspondentes às amostras com reforço saturado com carga equivalente a 50% da resistência (a), com reforço saturado com carga equivalente a 70% da resistência (b) e com reforço com umidade natural com carga equivalente a 50% da resistência (c).

5.3.4 Resultados dos ensaios da fluência à tração

Como descrito no programa experimental, utilizaram-se dois tipos de compósitos para o ensaio de fluência à tração, um compósito reforçado com 3 camadas com reforço saturado e outro com 3 camadas de reforço com umidade natural. Os compósitos foram submetidos a uma carga equivalente a 50% da tensão resistida pelos corpos de prova no ensaio tração direta durante a etapa de pré-fissuração.

O gráfico do processo do ensaio está apresentado na Figura 5.35, contendo a pré-fissuração, fluência, recuperação e ruptura.

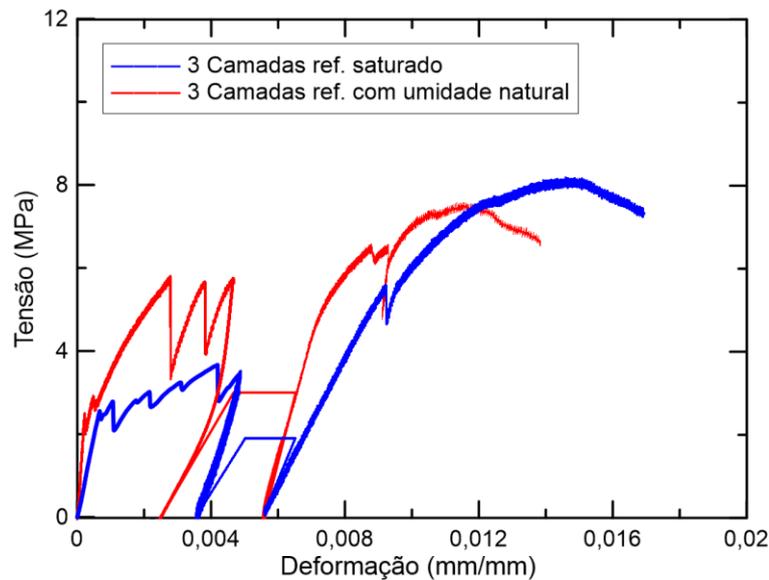


Figura 5.35 - Processo do ensaio de fluência à tração englobando os estágios de pré-fissuração, fluência, recuperação e ruptura das amostras reforçadas 3 camadas de fibras saturadas e com umidade natural.

Observando agora o gráfico da Figura 5.36, que contém apenas os dados do ensaio de fluência, pode-se perceber que as amostras reforçadas com fibras com umidade natural tiveram uma deformação por fluência superior quando comparadas com as fibras saturadas. Porém, como pode ser observado na Tabela 5.13, a deformação instantânea para essas amostras foi 18% inferior. Assim, para uma melhor análise do comportamento dos compósitos sob carregamento contínuo podemos comparar isoladamente a deformação por fluência, a qual o compósito reforçado com fibras com umidade natural apresentou um valor 2,29 vezes maior que o com reforço com umidade natural, o que pode ser explicado, em grande parte, pela abertura de novas fissuras do compósito. Entretanto o mecanismo faz parte do processo que evidencia que na tração direta a interface tem grande influência sobre o comportamento de longa duração dos compósitos.

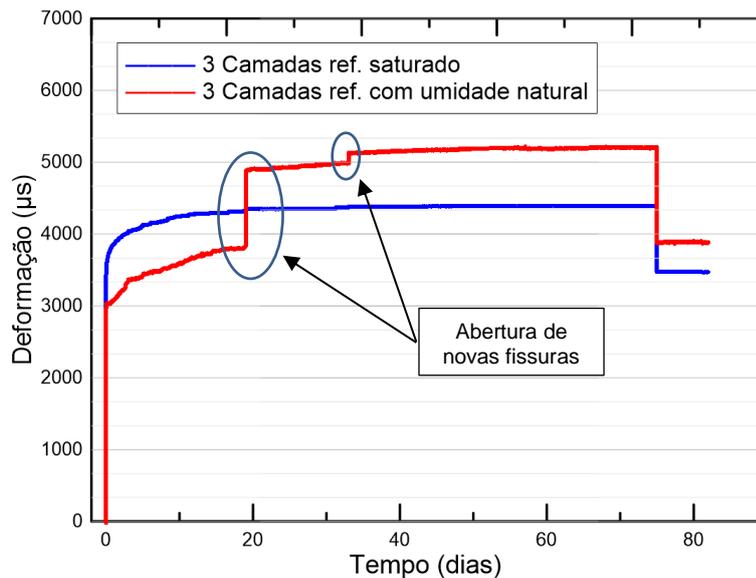


Figura 5.36 - Influência do grau de saturação do reforço no comportamento de fluência à tração.

Para melhor compreender os dados expostos nas curvas, montou-se uma tabela resumo (Tabela 5.13) com todos os parâmetros definidos: taxa de recuperação, tensão correspondente à primeira fissura e os coeficientes de fluência para diferentes períodos do ensaio.

Tabela 5.13 - Parâmetros calculados para representar os dados obtidos no ensaio de fluência.

Amostra	Taxa de recuperação (r)	σ_L (MPa)	ϵ_{ci} (μm)	ϵ_{cd} (μm)			Coeficiente de fluência (φ)		
				26 dias	52 dias	78 dias	26 dias	56 dias	78 dias
Ref. umidade natural	0,50	2,4	2406	2187	2337	2458	0,91	0,97	1,02
Ref. saturado	0,31	2,5	1006	880	896	905	0,37	0,37	0,38

A partir das curvas apresentadas na Figura 5.36 e com auxílio da Tabela 5.13, é possível perceber que após 75 dias com carga contínua atuando como peso permanente, o compósito com reforço saturado apresentou menores coeficientes de fluência. Esse comportamento, sob carga constante, pode ser explicado pela maior resistência adquirida pela zona interfacial fibra-matriz durante a fabricação dos compósitos. As fibras saturadas não absorvem umidade da matriz e ainda funcionam como repositório

de umidade interno, fornecendo água para a hidratação tardia dos grãos de cimento não hidratados da interface, resultando em uma interface mais densa e resistente. A zona de transição interfacial (ITZ), a vizinhança da fibra com a matriz, é uma zona na qual a fibra e a matriz se influenciam. Os compósitos com fibras com umidade natural apresentam um mecanismo de falha frágil [89]. Os compósitos com fibras saturadas apresentam uma ligação fibra-matriz mais forte que, por sua vez, restringem o arrancamento da fibra. Além disso, as propriedades da ITZ mudam com o tempo, em que a matriz tende a comprimir as fibras pela contínua precipitação dos produtos de hidratação ao redor das fibras [113].

Além disso, pode ser visto na Figura 5.37-38 curvas que representam a comparação entre o ensaio monotônico e o processo do ensaio de fluência. A partir dessas curvas é possível perceber que após 75 dias das amostras sob carga constante, a resistência final foi reduzida. Além disso, uma diminuição na capacidade de deformação também é observada.

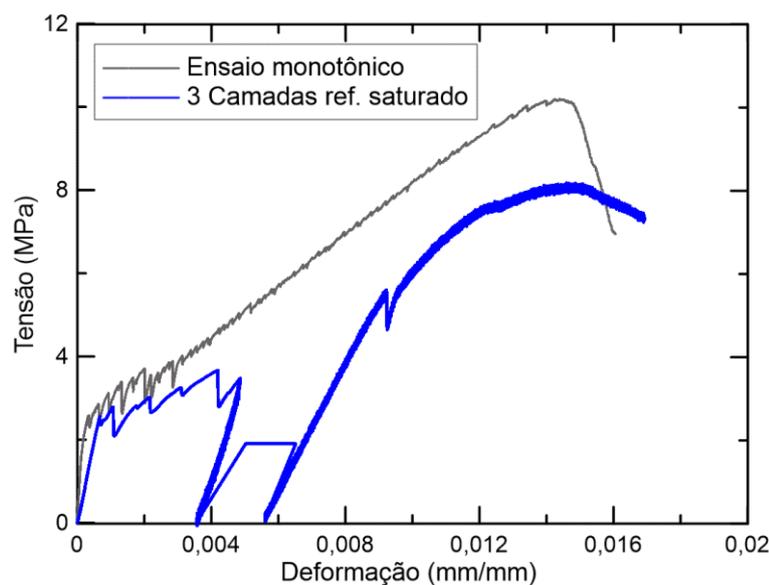


Figura 5.37 – Comparação do compósito reforçado com fibras saturadas submetido ao ensaio de fluência à tração e ensaio monotônico de tração direta.

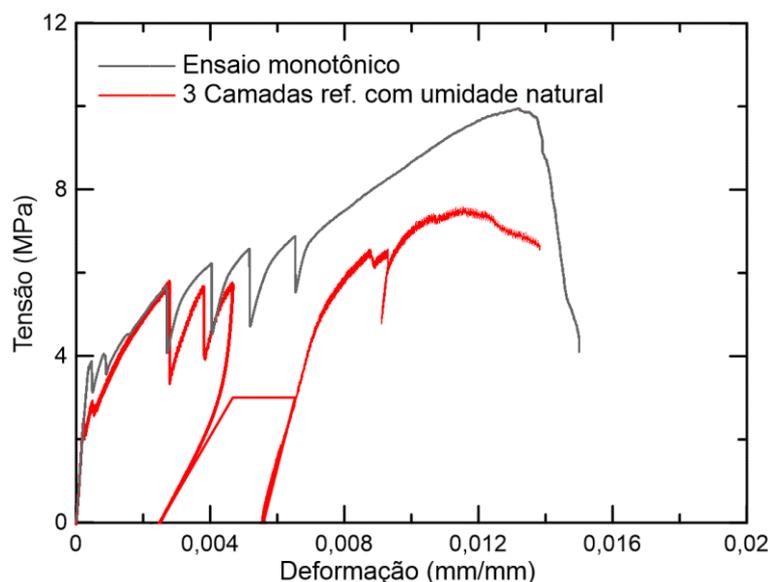


Figura 5.38 - Comparação do compósito reforçado com fibras com umidade natural submetido ao ensaio de fluência à tração e ensaio monotônico de tração direta.

A partir da Tabela 5.14 pode ser observada uma redução na tensão máxima e na deformação foi de 20,1% e 17,9%, respectivamente para o compósito com reforço saturado. Já para a amostra com fibras com umidade natural, a redução da tensão e deformação foi de 6,9% e 5,4%, respectivamente. Essa redução na tensão e deformação resultou em uma queda da tenacidade de 36,9% e 48,5%.

Tabela 5.14 - Propriedades mecânicas para os três compósitos ao final do ensaio de fluência à tração.

Compósito	Tensão Máxima (MPa)	Deformação máxima (%)	Tenacidade (kJ/m ²)	Tenacidade no ensaio monotônico (kJ/m ²)
Ref. saturado com carga equivalente a 50%	8,12	1,19	12,49	19,8 (1,2)
Ref. umidade natural com carga equivalente a 50%	7,56	1,23	9,53	18,5 (1,0)

A Tabela 5.15 apresenta as propriedades determinadas por meio do ensaio de fluência à tração, como a deformação instantânea, a deformação por fluência, deformação total, recuperação instantânea e coeficiente de recuperação.

Tabela 5.15 - Propriedades determinadas por meio do ensaio de fluência à tração.

Propriedade	Ref. saturado com carga equivalente a 50%	Ref. com umidade natural com carga equivalente a 50%
Deformação instantânea (ϵ_{inst}) [μs]	3364	2857
Deformação por fluência ($\epsilon_{fluência}$) [μs]	1022	2346
Deformação total (ϵ_{total}) [μs]	4387	5203
Recuperação instantânea (ϵ_{REC}) [μs]	915	1322
Coefficiente de recuperação ($\epsilon_{REC}/\epsilon_{TOTAL}$) [%]	20,9%	25,4%

A abertura de fissuras foi monitorada após a pré-fissuração das amostras com a utilização de um microscópio estereoscópico portátil. A partir das imagens obtidas foi possível observar que o deslocamento gerado pela carga contínua influenciou na abertura de fissuras. As fissuras monitoradas são identificadas na Figura 5.39 dentro da área de interesse de 190 mm entre as garras. Os pontos escolhidos de monitoração nas fissuras transversais são identificados na Figura 5.39 em locais próximos às extremidades e na faixa central da amostra.

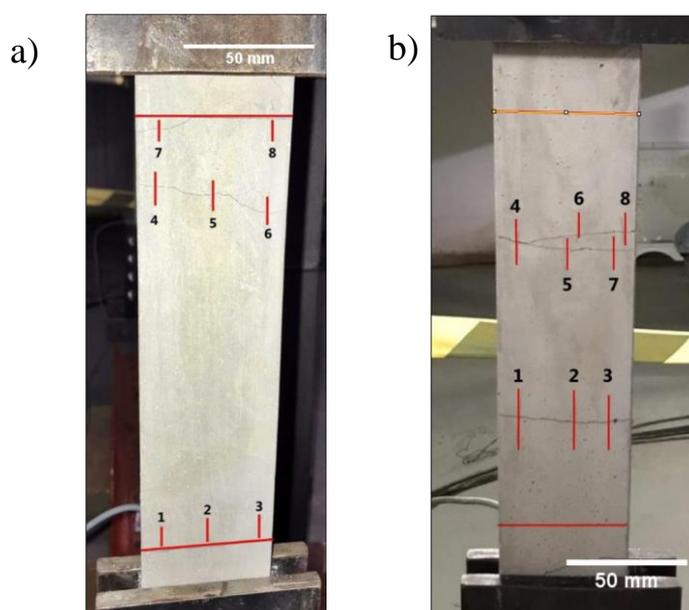


Figura 5.39 - Pontos de monitoramento das fissuras durante o ensaio de fluência à tração: (a) compósito com reforço saturado e (b) compósito com reforço com umidade natural.

Durante o ensaio de fluência à tração, duas fissuras surgiram no compósito com fibras com umidade natural. A segunda fissura se trata de uma ramificação da primeira. Essas novas fissuras podem ser vistas na Figura 5.40 e é indicada na curva de deformação versus tempo (Figura 5.36).

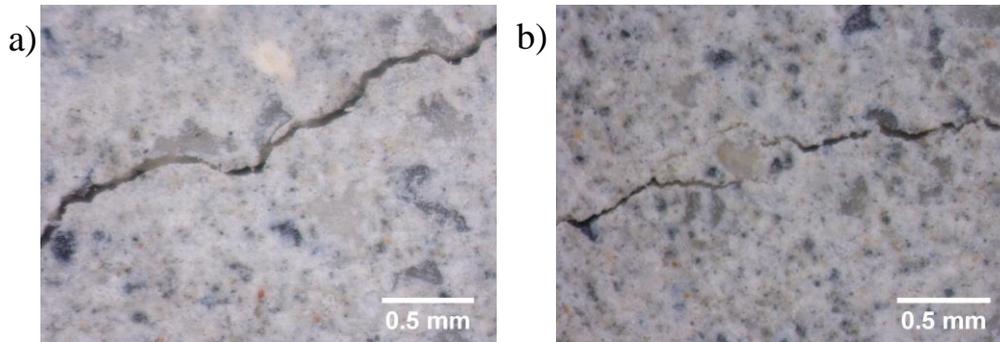


Figura 5.40 - Imagens das novas fissuras que surgiram durante o ensaio de fluência à tração: (a) abertura de nova fissura e (b) ramificação da fissura existente.

A Figura 5.41 apresenta as curvas da evolução da abertura das fissuras durante o período de ensaio de fluência à tração. É possível observar que a tendência da abertura das fissuras é de apresentar um comportamento semelhante ao comportamento global dos compósitos na tração quando submetidos a uma carga contínua. Com um trecho ascendente no momento de aplicação da carga, e um crescimento lento e progressivo ao longo do ensaio. Como pode ser observado, a média da abertura de fissuras para as amostras com reforço com umidade natural foi superior ao com reforço saturado. Esse comportamento pode ser observado no ensaio monotônico de tração direta e por meio da correlação digital de imagens (DIC), onde os compósitos com reforço com umidade natural apresentaram abertura de fissuras maior.

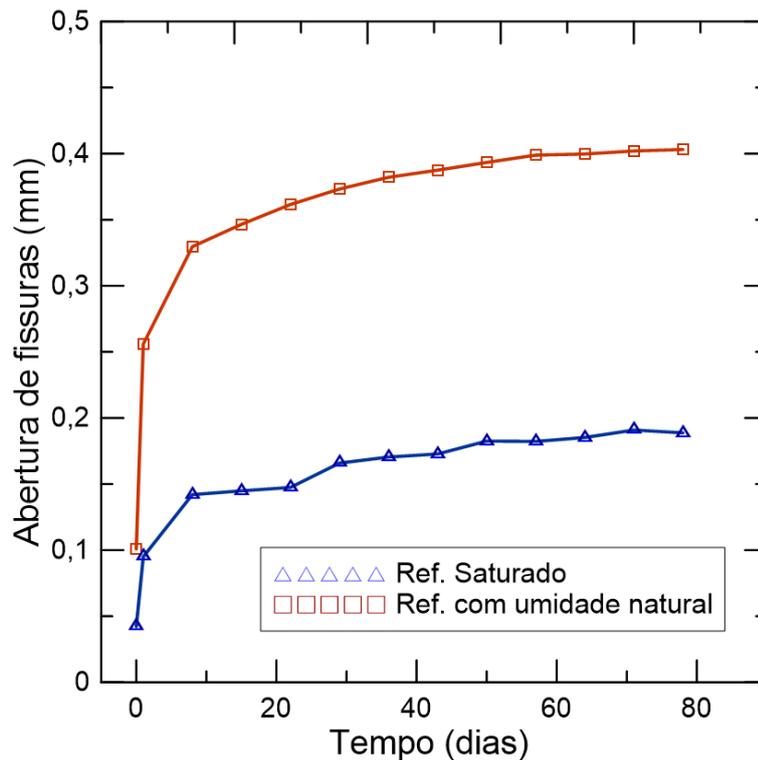


Figura 5.41 - Curvas da abertura média de fissuras versus tempo dos compósitos durante o processo de fluência.

A Figura 5.42 mostra exemplos de fissuras transversais que foram monitoradas para cada amostra durante o ensaio de fluência à tração. Pôde-se observar a diferença de tamanho das fissuras entre os dois tipos de compósitos. O compósito com fibras saturadas apresentou fissuras menores e uma menor abertura de fissuras ao longo da fluência. Assim como na fluência à flexão, as fissuras aumentaram de tamanho de forma instantânea após a aplicação do carregamento, no entanto, ao longo do período de ensaio de fluência as fissuras aumentaram de tamanho de forma progressiva e lenta. Porém, como é o caso das imagens da 5.41 (b) a fissura é visivelmente maior nos três momentos analisados (antes do carregamento, 1 dia após o carregamento e ao final de 60 dias de carregamento).

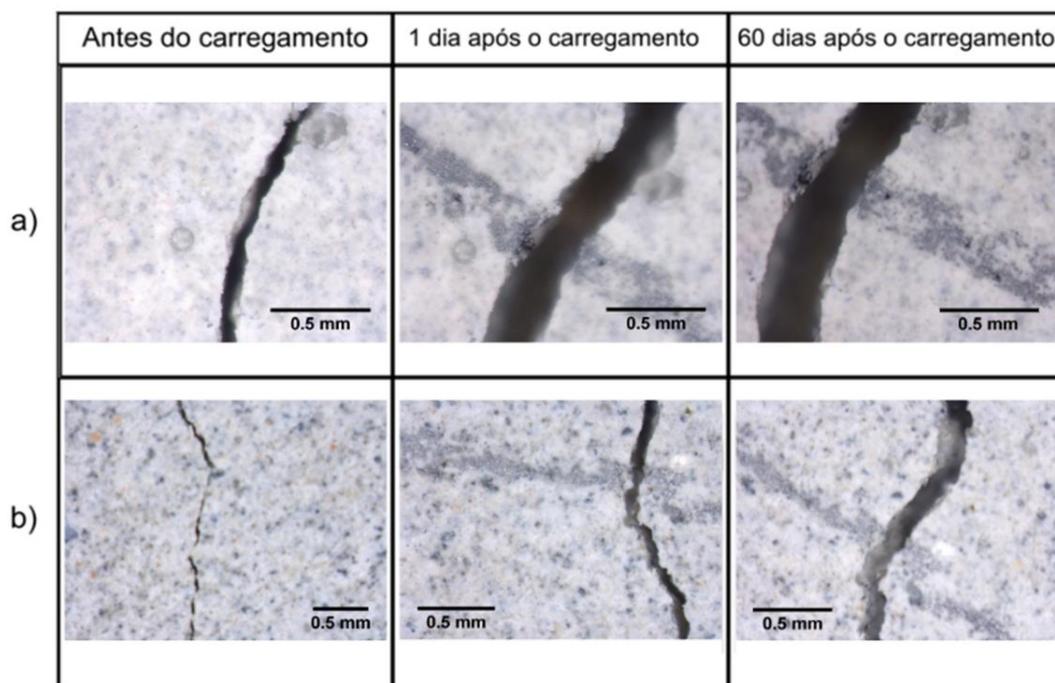


Figura 5.42 - Exemplo da evolução das fissuras das amostras após a etapa de pré-fissuração e submetidas ao ensaio de fluência à tração. Imagens correspondentes às (a) amostras com reforço com umidade natural e (b) amostras com reforço saturado.

5.4 Conclusão

A partir dos ensaios de fluência na fibra foi visto que as deformações da fibra de sisal tendem a aumentar com o decorrer do tempo. Para um carregamento equivalente de até 40% da resistência das fibras, as curvas de deformações apresentaram a deformações instantâneas, fluência primária, secundária e recuperação instantânea. Já para uma carga equivalente a 75% da resistência, as fibras apresentaram uma ruptura brusca após os primeiros dias de carregamento. O comportamento sob carga sustentada de fibras naturais é relacionado com a estrutura molecular dos componentes amorfos da celulose e a tendência desses componentes de alinhar-se na direção do carregamento. Além disso, foi possível observar que a deformação recuperada após o descarregamento foi menor do que a deformação instantânea, o que pode indicar uma recuperação dos componentes da celulose através de mecanismos complexos de reconstituição da fibra.

A partir do ensaio de retração foi possível observar que a adição do metacaulim aumentou a deformação por retração de argamassas quando submetidas

à secagem em ambiente com temperatura e umidade controladas de $24 \pm 1^\circ\text{C}$ e $41 \pm 2\%$, respectivamente, sendo maior para níveis elevados de substituição (40%). Já para as amostras submetidas à cura saturada, resultou em uma expansão da matriz à medida em que os níveis de adição do metacaulim aumentou. Após o ensaio de retração, as amostras foram submetidas ao ensaio de absorção, e verificou-se um aumento de 29,7% da absorção e volume de vazios de 26%, para as amostras com adição de 40% de metacaulim em relação a referência. Para as amostras submetidas à cura saturada, estas apresentaram uma redução média na absorção e no volume de vazios de aproximadamente 80% para as matrizes analisadas.

Nos ensaios de fluência à compressão, pôde-se compreender a contribuição da adição de metacaulim nas deformações ao longo do tempo. A fluência apresentou uma pequena redução média de 3,5% para as amostras com substituição de 20% do cimento por metacaulim e 21,2% para as argamassas com adição de 40%. Esse comportamento pode ser explicado a partir do aumento da resistência à compressão das matrizes e aumento do módulo de elasticidade, associados à formação adicional das fases hidratadas devido as reações pozolânicas e efeito de *filler* proporcionados pela reação do metacaulim com o hidróxido de cálcio.

Para os ensaios de fluência a flexão, pôde-se compreender o comportamento dos compósitos pré-fissurados sob carregamento contínuo. Notou-se a importância da interface das amostras e como suas propriedades podem afetar a tensão resistida e a deflexão, além de influenciar na abertura de fissuras. Foi observado que para os casos das amostras com fibras saturadas a resposta resultou em deflexões menores e um melhor controle na abertura de fissuras, quando comparadas com as amostras reforçadas com fibras com umidade natural. No entanto, os dois tipos de compósitos apresentaram uma redução na tensão máxima resistida e na deflexão.

Para os ensaios de fluência à tração, pôde-se observar o comportamento dos compósitos pré-fissurados sob carga contínua equivalente à 50% da carga resistida pelas amostras ao longo do tempo. Foi possível observar que os compósitos tiveram deformações instantâneas diferentes, sendo maior para a amostra com reforço saturado. As deformações por fluência dos dois tipos de compósitos apresentaram uma tendência inicial similar, porém o compósito com reforço com umidade natural apresentou novas fissuras durante o ensaio.

6 Conclusões e trabalhos futuros

6.1 Conclusões

A fibra estudada e utilizada como reforço em matriz cimentícia foi a de sisal, por possuir bom comportamento mecânico e boa disponibilidade no mercado. Além disso as fibras de sisal longas e alinhadas em uma só direção se mostraram eficientes como reforço de compósitos de matriz cimentícia. Uma matriz com menor consumo de cimento foi utilizada, por sua vantagem de melhorar a durabilidade das fibras naturais em ambiente alcalino e, também, por ser uma alternativa para a redução da emissão de CO₂ na atmosfera. A substituição do cimento por metacaulim e cinza volante resultaram em algumas vantagens para a matriz, como o aumento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade. Além disso, a matriz apresentou boas propriedades reológicas que facilitaram a melhor penetração da matriz no tecido de sisal, sendo adequada a sua utilização em compósitos têxteis.

Pôde-se observar que com o aumento no número de camadas, maior a formação de fissuras e maiores os valores de tensão última. Os compósitos alcançaram altos valores de resistência, até 12,2 ($\pm 1,44$) e 29,2 ($\pm 1,21$) MPa nos ensaios de tração e flexão, respectivamente. Análises feitas a partir de campos de deformação gerados por DIC se mostraram eficientes tanto para acompanhamento da evolução da formação das fissuras quanto para estimativa da abertura média das fissuras durante o ensaio.

As fibras de sisal com umidade natural apresentaram alta resistência à tração de 334,8 (172,2) MPa e capacidade de deformação de 2,54 (0,28) %. No entanto, foram produzidos também compósitos reforçados com 3 camadas com fibras saturadas e com fibras com umidade natural. Foi observado que a saturação das fibras usadas como reforço melhorou o comportamento de formação de fissuras (quantidade, abertura e espaçamento) quando comparadas com os compósitos de 3 camadas com reforço com umidade natural, no entanto estes apresentaram uma resistência de primeira fissura e tensão última superiores.

As propriedades de longa duração foram estudadas em várias escalas, desde a fluência à tração do filamento de fibra em diferentes níveis de carregamento, ensaios de retração e fluência à compressão da matriz e, por fim, ensaios de fluência à tração e à flexão dos compósitos. A partir do ensaio de retração foi possível compreender o efeito da adição do metacaulim em matrizes cimentícias quando submetidas à secagem em ambiente com temperatura e umidade controladas, resultando em uma maior retração à medida que a quantidade de metacaulim aumentou. Já para as amostras submetidas à cura saturada, as matrizes apresentaram uma expansão à medida em que maiores níveis de adição do metacaulim foram utilizados. Nos ensaios de fluência à compressão, pôde-se compreender a contribuição da adição de metacaulim nas deformações ao longo do tempo. As deformações por fluência apresentaram reduções à medida em que os níveis de substituição do cimento por metacaulim aumentaram, sendo maior para as matrizes com adição de 40%.

Para os ensaios de fluência à flexão, pôde-se compreender a importância da zona de transição interfacial e como suas propriedades podem afetar o comportamento dos compósitos sob carregamento contínuo. A saturação das fibras resultou em compósitos com menor deformação por fluência, além de uma melhor recuperação com a retirada do carregamento. Foi possível observar que quanto maior o carregamento aplicado, maior a deformação por fluência e maior a abertura de fissuras ao longo do tempo. Os compósitos com fibras saturadas resultaram em deflexões menores e um melhor controle na abertura de fissuras, quando comparadas com as amostras reforçadas com fibras com umidade natural. No entanto, os dois tipos de compósitos apresentaram uma redução na tensão máxima resistida e na deflexão.

Para os ensaios de fluência à tração, pôde-se avaliar o comportamento dos compósitos fissurados sob carga contínua equivalente à 50% da carga resistida ao longo do tempo. Foi possível observar que os compósitos tiveram uma deformação instantânea diferentes, sendo maior para a amostra com reforço saturado. O carregamento aplicado se mostrou insuficiente para resultar em deformações por fluência significativamente diferentes. Porém o compósito com fibras com umidade natural se mostrou mais susceptível a abertura de novas fissuras devido ao mecanismo de arrancamento das fibras da matriz sob tração direta.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Algumas sugestões são dadas a seguir a fim de melhor justificar e fundamentar os efeitos não conclusivos deste trabalho como, por exemplo:

- Modelagem do ensaio de fluência das fibras de sisal;
- Microscopia para caracterização da interface fibra-matriz para os diferentes níveis de saturação das fibras e dos produtos de hidratação precipitados na interface ao longo do tempo;
- Microscopia para verificar a distribuição das fibras nas camadas dos compósitos;
- Ensaio de arrancamento da fibra de sisal com diferentes níveis de saturação;
- Modelagem dos compósitos desenvolvidos para fins de previsão de comportamento e comparação com campos gerados pelo DIC;
- Ensaio de arrancamento sob carregamento contínuo;
- Ensaio de fluência com maiores níveis de carregamento, tanto na flexão quanto na tração.

7 Referências

- [1] Ardanuy M., Claramunt J., Toledo Filho R. D. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. **Construction and Building Materials**, v. 79.p. 115–28, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>.
- [2] Pacheco-Torgal F, Jalali S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. **Construction and Building Materials**. v. 25, p. 575–81, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>.
- [3] Filho J. D. A. M., Silva F. D. A., Toledo Filho R. D. Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems. **Cement and Concrete Composites** v. 40. p. 30–9, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.003>.
- [4] Tolêdo Filho R. D., Ghavami K., England G. L., Scrivener K. Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, p. 185–96, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00018-5).
- [5] Seyed M., Ghavami K., Soboyejo W. O. Cementitious composites reinforced with vegetable. **1st Inter American Conference On Nonconventional Materials And Technologies In The Ecoconstruction And Infrastructure**, p. 1–27, 2003.
- [6] Barros J. A. O., Silva F. D. A., Toledo Filho R. D. Experimental and numerical research on the potentialities of layered reinforcement configuration of continuous sisal fibers for thin mortar panels. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 792–801, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.018>.
- [7] 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, p. 721–30, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.07.004>.
- [8] Terai M. Basic Study on Mechanical Properties of Bamboo Fiber Reinforced Concrete Basic Study on Mechanical Properties of Bamboo Fiber

Reinforced Concrete. **Global Thinking In Structural Engineering: Recent Achievements**, v. 8, p. 17–24, 2014.

[9] Xie X., Zhou Z., Jiang M., Xu X., Wang Z., Hui D. Cellulosic fibers from rice straw and bamboo used as reinforcement of cement-based composites for remarkably improving mechanical properties. **Composites Part B: Engineering**, v. 78, p. 153–61, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.086>.

[10] Lima P. R. L., Toledo Filho R. D., Nagahama KJ, Fairbairn EM. Mechanical characterization of cement-based thin-walled laminates reinforced with sisal fibre. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 644–51, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000600014>.

[11] Mobasher B., Filho R. D. T. Mechanical Behavior of Strain Hardening Sisal Fiber Cementitious Composites Under Quasi Static and. **2nd International RILEM Conference on Strain Hardening Cementitious Composites**, p. 121–129, 2009.

[12] Marrero R. E., Soto H. L., Benítez F. R., Medina C., Suárez O. M., Engineering E. Study of high-strength concrete reinforced with bamboo fibers 2017:2015–8.

[13] Joseph K., Ghavami K., England G. L. The use of sisal fibre as reinforcement in cement based composites. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, p. 245–256,199.

[14] Bentur A., Mindess S., Routledge. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. 2006.

[15] Toledo Filho R. D., Silva F. D. A., Fairbairn E. M. R., Filho J. de A. M. Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2409–20, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.10.012>.

[16] P. S. Mukherjee, K. G. Satyanarayana. Structure and properties of some vegetable fibres. **Journal Of Materials Science**, v. 19, 1989. <https://doi.org/0022-2461/84>.

[17] Swift D. G., Smith R. B. L. The flexural strength of cement-based composites using low modulus (sisal) fibres. **Composite Structures**, v. 10, p. 145–8, 1979.

[18] Silva F. D. A., Mobasher B., Soranakom C., Filho R. D. T. Effect of fiber shape and morphology on interfacial bond and cracking behaviors of sisal fiber

cement based composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, p. 814–23, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.003>.

[19] Silva F. A. Mechanical behavior and durability of compression moulded sisal fiber-cement mortar laminates (SFCML). ICTRC'2006 - **1st International RILEM Conference on Textile Reinforced Concrete, RILEM Publications SARL**, p. 171–80, 2006. <https://doi.org/10.1617/2351580087.017>.

[20] Fidelis M. E. A. Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios textêis reforçados com fibras de juta. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), 2014.

[21] Campbell M. D., Coutts R. S. P. Wood fibre-reinforced cement composites. **Journal of Materials Science**, v. 15, p. 1962–70, 1980. <https://doi.org/10.1007/BF00550621>.

[22] Diaz J. P. V. Comportamento Mecânico de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de Pupunha. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2016.

[23] Ghavami K. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, p. 637–49, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.06.002>.

[24] Umoh A. A. Use of Coconut Fiber As Reinforcement in Bamboo Leaf Ash Blended Cement - Based Composite Panels. **Jordan Journal of Civil Engineering**, v. 9, p. 435–44, 2015. <https://doi.org/10.14525/jjce.9.4.3116>.

[25] Munawar S. S., Umemura K., Kawai S. Characterization of the morphological, physical, and mechanical properties of seven nonwood plant fiber bundles. **Journal of Wood Science**, v. 53, p. 108–13, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10086-006-0836-x>.

[26] Oksman K., Wallström L., Berglund L. A., Filho R. D. T. Morphology and mechanical properties of unidirectional sisal-epoxy composites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 84, p. 2358–65, 2002. <https://doi.org/10.1002/app.10475>.

[27] Sivaraja M., Kandasamy, Velmani N., Pillai M. S. Study on durability of natural fibre concrete composites using mechanical strength and microstructural properties. **Bulletin of Materials Science**, v. 33, p. 719–29, 2010. <https://doi.org/10.1007/s12034-011-0149-6>.

[28] Ramaswamy H. S., Ahuja B. M., Krishnamoorthy S. Behaviour of concrete

reinforced with jute , coir and bamboo fibres. **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 5, p. 3–13, 1983.

[29] Ghavami K. Bamboo and composites reinforced with vegetable fibers: Materials of the 21th century [s.d.].

[30] Yan L., Kasal B., Huang L. A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. **Composites Part B: Engineering**, v. 92, p. 94–132, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.002>.

[31] Li Y., Mai Y., Ye L. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. **Composites Science and Technology**, v. 60, p. 2037–55, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00101-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00101-9).

[32] Fan M., Weclawski B. Long natural fibre composites. *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*, Elsevier; p. 141–77, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00006-6>.

[33] Silva F. A., Chawla N., Filho R. D. T. Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers. **Composites Science and Technology**, v. 68, p. 3438–43, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.10.001>.

[34] Castoldi R. de S., Souza L. M. S., de Andrade Silva F.. Comparative study on the mechanical behavior and durability of polypropylene and sisal fiber reinforced concretes. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 617–28, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.282>.

[35] Methacanon P., Weerawatsophon U., Sumransin N., Prahsarn C., Bergado D.T. Properties and potential application of the selected natural fibers as limited life geotextiles. **Carbohydrate Polymers**, v. 82, p. 1090–6, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.06.036>.

[36] Jawaid M., Abdul K. H.P.S. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 86, p. 1–18, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.043>.

[37] M. Garside. Major countries in worldwide cement production from 2012 to 2017 (in million metric tons). The statistic Portal 2020;2019:3. <https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/>.

[38] Brandt A. M. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. **Composite Structures**, v. 86, p. 3–9, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.006>.

- [39] Callister W. D. *Materials Science and Engineering*. 1994.
- [40] Ferreira S. R, Pepe M., Martinelli E., Silva F. A. **Proceedings of Italian Concrete Days**, vol. 10, 2016.. Cham: Springer International Publishing; 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-78936-1>.
- [41] Dey V. *Innovative Structural Materials and Sections with Strain Hardening Cementitious Composites*. Tese de Doutorado - Arizona State University, 2016.
- [42] Filho R.D.T. *Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: caracterização experimental*. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 1997.
- [43] Monteiro P. K., Metha. P. J. M. *Concrete: Microstructure, properties, and materials*. 2006. <https://doi.org/10.1036/0071462899>.
- [44] Filho J. de A. M. *Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal*. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), 2012.
- [45] Theodorakopoulos D. D. Creep characteristics of glass reinforced cement under flexural loading. **Cement and Concrete Composites**, v. 17, p. 267–79, 1995. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(95\)00016-6](https://doi.org/10.1016/0958-9465(95)00016-6).
- [46] Araújo J. M de. *Modelos de previsão da fluência e da retração do concreto*. *Estruturas de Concreto*, p. 26, 2002.
- [47] Atrushi D. S. *Tensile and Compressive Creep of Early Age Concrete: Testing and Modelling*. The Norwegian University of Science and Technology, 2003.
- [48] Atrushi D. *Tensile and Compressive Creep of Early Age Concrete : Testing and Modelling*. The Norwegian University of Science and Technology, 2003.
- [49] Bazant ZP. Creep of concrete: Plain, reinforced and prestressed. **Cement and Concrete Research**, v. 3, p. 223–4, 1973. [https://doi.org/10.1016/00088846\(73\)90052-5](https://doi.org/10.1016/00088846(73)90052-5).
- [50] Findley W. N., Lai J. S., Onaran K., Christensen R. M. *Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials With an Introduction to Linear Viscoelasticity*. vol. 44. 1977. <https://doi.org/10.1115/1.3424077>.
- [51] Kak A, Chong T, Group A, Kong H. *Numerical Modelling of Time-dependent*. Tese de Doutorado - The University of New South Wales, 2004.
- [52] Kovler K. *A New Look at the Problem of Drying Creep of Concrete under*

Tension. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 11, p. 84–7, 1999. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1999\)11:1\(84\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1999)11:1(84)).

[53] Niyogi AK, Hsu P, Meyers BL. The influence of age at time of loading on basic and drying creep. **Cement and Concrete Research** 1973;3:633–44. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(73\)90100-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(73)90100-2).

[54] Zhang Q, Le Roy R, Vandamme M, Zuber B. Long-term creep properties of cementitious materials: Comparing microindentation testing with macroscopic uniaxial compressive testing. **Cement and Concrete Research** 2014;58:89–98. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.01.004>.

[55] Sorelli L, Frech-Baronet J, Charron J-P. Creep Behavior of Cement Paste, Mortar, and Concrete: The Role of Relative Humidity and Interface Porosity 2003:296–305.

[56] Parrott L. J. An examination of the effects of age at loading upon the creep of hardened cement paste. **Magazine of Concrete Research**, v. 25, p. 28–31, 1973.

[57] Briffaut M., Benboudjema F., Torrenti J., Nahas G. Concrete early age basic creep: Experiments and test of rheological modelling approaches. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 373–80, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.101>.

[58] Filho R. D. T. Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: caracterização experimental. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 1997.

[59] García-Taengua E, Arango S, Martí-Vargas JR, Serna P. Flexural creep of steel fiber reinforced concrete in the cracked state. **Construction and Building Materials** 2014;65:321–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.139>.

[60] Zheng X., Ji T., Easa S. M., Zhang B., Jiang Z. Tensile basic creep behavior of lightweight aggregate concrete reinforced with steel fiber. **Construction and Building Materials**, v. 200, p. 356–67, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.138>.

[61] Xu Y., Liu J., Liu J., Zhang Q., Zhao H. Creep at early ages of ultrahigh-strength concrete: Experiment and modelling. **Magazine of Concrete Research**, v. 71, p. 847–59, 2019. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00551>.

[62] Babafemi A. J., Boshoff W. P. Cement & Concrete Composites Tensile creep of macro-synthetic fibre reinforced concrete (MSFRC) under uni-axial tensile loading. **Cement And Concrete Composites**, v. 55, p. 62–9, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.08.002>.

[63] Hamed E. Non-linear creep effects in concrete under uniaxial compression. **Magazine of Concrete Research**, v. 67, p. 876–84, 2015. <https://doi.org/10.1680/mac.14.00307>.

[64] Han B., Xie H. B., Zhu L., Jiang P. Nonlinear model for early age creep of concrete under compression strains. **Construction and Building Materials**, v. 2017; 147:203–11. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.119>.

[65] Mangat P. S, Azari M. M. Compression creep behaviour of steel fibre reinforced cement composites. **Materials and Structures**, v. 19, p. 361–70, 1986. <https://doi.org/10.1007/BF02472126>.

[66] Spůra D., Vodička J., Abramowicz M. Volume Changes of Fibre Concrete with Steel and Synthetic Fibres. **Brittle Matrix Composites 8**, vol. C, Elsevier; 2006, p. 285–92. <https://doi.org/10.1533/9780857093080.285>.

[67] Aslani F, Nejadi S, Aslani F, Nejadi S. Creep and Shrinkage of Self-Compacting Concrete with and without Fibers. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 11, p. 337–52, 2013. <https://doi.org/10.3151/jact.11.251>.

[68] Lima V. N. Fluência e propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com fibra de aço e polipropileno. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2019.

[69] Błyszko J. Comparative analysis of creep in standard and fibre reinforced concretes under different load conditions. **Procedia Engineering**, v. 193, p. 478–85, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.240>.

[70] William P Boshoff, Mouton CJ. Initial study on the tensile creep of cracked steel fibre reinforced concrete. **8th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete: challenges and opportunities (BEFIB 2012)**. RILEM Publications SARL, p. 326–37, 2012.

[71] Zhao G., di Prisco M., Vandewalle L. Experimental investigation on uniaxial tensile creep behavior of cracked steel fiber reinforced concrete. **Materials and Structures**, v. 48, p. 3173–85, 2015. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0389-1>.

[72] Vrijdaghs R., di Prisco M., Vandewalle L. Creep of cracked polymer fiber reinforced concrete under sustained tensile loading. **Proceedings of the 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures**, 2016. <https://doi.org/10.21012/FC9.059>.

- [73] Nieuwoudt P. D, Babafemi A. J., Boshoff W. P. The response of cracked steel fibre reinforced concrete under various sustained stress levels on both the macro and single fibre level. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 828–43, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.022>.
- [74] Abrishambaf A, Barros JAO, Cunha VMCF. Time-dependent flexural behaviour of cracked steel fibre reinforced self-compacting concrete panels. **Cement and Concrete Research**, v. 72, p. 21–36, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.010>.
- [75] Souza L. O. Mecanismos de fissuração e autocicatrização de compósitos cimentícios reforçados com tecido de curauá. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2017.
- [76] Sales A. T. C. Retração, fluência e fratura em compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2006.
- [77] Kawashima S., Shah S. P. Early-age autogenous and drying shrinkage behavior of cellulose fiber-reinforced cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, p. 201–8, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.018>.
- [78] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11578**: Cimento Portland composto, n. 5, 2016.
- [79] Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12653** - Materiais pozolânicos, n.3, 2015.
- [80] American Society for Testing and Materials. **ASTM C230**. Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement 1. Annual Book of ASTM Standards, p. 4–9, 2010. <https://doi.org/10.1520/C0230>.
- [81] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers. **ASTM C1557**, p.1–10, 2014. <https://doi.org/10.1520/C1557-14.2>.
- [82] Wild S, Khatib JM, Jones A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, p. 1537–44, 1996. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(96\)00148-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(96)00148-2).
- [83] Neville A., Brooks J. Tecnologia Do Concreto. 5º ed. Porto Alegre: BOOKMAN; 2018.

- [84] RILEM Technical Committee 232-TDT (Wolfgang Brameshuber), Brameshuber W, Hinzen M, Dubey A, Peled A, Mobasher B, et al. Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete: Uniaxial tensile test: test method to determine the load bearing behavior of tensile specimens made of textile reinforced concrete. **Materials and Constructions**, v. 49, p. 4923–7, 2016. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0839-z>.
- [85] Sutton M., Wolters W., Peters W., Ranson W., McNeill S. Determination of displacements using an improved digital correlation method. **Image and Vision Computing**, v. 1, p. 133–9, 1983. [https://doi.org/10.1016/0262-8856\(83\)90064-1](https://doi.org/10.1016/0262-8856(83)90064-1).
- [86] Kabir M. M., Wang H., Lau K. T., Cardona F. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. **Composites Part B: Engineering**, v. 43, p. 2883–92, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053>.
- [87] Rong M. Z., Zhang M. Q., Liu Y., Zhang Z. W., Yang G. C., Zeng H. M. Mechanical properties of sisal reinforced composites in response to water absorption. **Polymers and Polymer Composites**, v. 10, p. 407–26, 2002. <https://doi.org/10.1177/096739110201000601>.
- [88] Mai Y. W., Hakeem M. I. Slow crack growth in bleached cellulose fibre cements. **Journal of Materials Science Letters**, v.3, p. 127–30, 1984. <https://doi.org/10.1007/BF00723094>.
- [89] Żukowski B. Design and characterization of strain hardening curauá fiber cement-based composites. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), 2017.
- [90] Arango S. E., Serna P., Martí-Vargas J. R., García-Taengua E. A Test Method to Characterize Flexural Creep Behaviour of Pre-cracked FRC Specimens. **Experimental Mechanics**, v. 52, p. 1067–78, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11340-011-9556-2>.
- [91] Santulli C. Creep behaviour of plant fibre composites. **Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction**, Elsevier, p. 459–77, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00018-2>.
- [92] Alves L. S. Ciência cidadã por meio de estações modulares: construindo as condições para um monitoramento meteorológica colaborativo. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFSC), 2018.

- [93] American Society for Testing and Materials. Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete. **ASTM C490**. Annual Book of ASTM Standards, p. 1-5, 2011. <https://doi.org/10.1520/C0490>.
- [94] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. **ASTM C642**. Annual Book of ASTM Standards 1997:1–3. <https://doi.org/10.1097/NAN.0b013e31824d1b7a>.
- [95] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression. **ASTM C512**. Annual Book of ASTM Standards, p. 1–5, 2010. <https://doi.org/10.1520/C0512>.
- [96] Cisse O., Placet V., Guicheret-Retel V., Trivaudey F., Boubakar M. L. Creep behaviour of single hemp fibres. Part I: viscoelastic properties and their scattering under constant climate. **Journal of Materials Science**, v. 50, p. 1996–2006, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8767-1>.
- [97] Placet V, Cissé O, Lamine Boubakar M. Nonlinear tensile behaviour of elementary hemp fibres. Part I: Investigation of the possible origins using repeated progressive loading with in situ microscopic observations. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 56, p. 319–27, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.11.019>.
- [98] Keckes J., Burgert I., Frühmann K., Müller M., Kölln K., Hamilton M. Cell-wall recovery after irreversible deformation of wood. **Nature Materials**, v. 2, p. 810–4, 2003. <https://doi.org/10.1038/nmat1019>.
- [99] Bos H. L., Van Den Oever M. Tensile and compressive properties of flax fibres. **Journal of Materials Science**, v. 37, p. 1683–92, 2002.
- [100] Bredy P, Chabannet M, Pera J. Microstructure and Porosity of Metakaolin Blended Cements. **MRS Proceedings**, v. 137, p. 431, 1988. <https://doi.org/10.1557/PROC-137-431>.
- [101] Gleize P., Cyr M., Escadeillas G. Effects of metakaolin on autogenous shrinkage of cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, p. 80–7, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.09.005>.
- [102] Khatib J. M., Baalbaki O., ElKordi A. A. Metakaolin. Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete, p. 493–511, 2018. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102156-9.00015-8>.
- [103] Kim H. S, Lee S. H., Moon H. Y. Strength properties and durability aspects

of high strength concrete using Korean metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1229–37, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.007>.

[104] Khatib J. M, Clay R. M. Absorption characteristics of metakaolin concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 19–29, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00188-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00188-1).

[105] Courard L., Darimont A., Schouterden M., Ferauche F., Willem X., Degeimbre R. Durability of mortars modified with metakaolin. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1473–9, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00090-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00090-5).

[106] Neto A. A. Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - (POLI-USP), 2002.

[107] Khatibmasjedi M., Ramanathan S., Suraneni P., Nanni A. Shrinkage Behavior of Cementitious Mortars Mixed with Seawater. **Advances in Civil Engineering Materials**, v. 8, 2019. <https://doi.org/10.1520/acem20180110>.

[108] Silva E. F. Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) 2014 2007:1–5.

[109] Zhang M., Tam C., Leow M. Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 1687–94, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00149-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00149-2).

[110] Siddique R., Klaus J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. **Applied Clay Science**, v. 43, p. 392–400, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.11.007>.

[111] Brooks JJ, Megat Johari MA. Effect of metakaolin on creep and shrinkage of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 23, p. 495–502, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00095-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00095-0).

[112] Picchi, F. A., Agopyan, V. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2007.

[113] Filho R. D. T., Scrivener K., England G. L., Ghavami K. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, p. 127–43, 2000. <https://doi.org/10.1016/s09589465>

(99)00039-6

[114] Leemann, P. Lura, and R. Loser. Shrinkage and creep of SCC - The influence of paste volume and binder composition. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2283–2289, 2011.

[115] Z. P. Bazant, A. A. Asghari, and J. Schmidt. Experimental study of creep of hardened Portland cement paste at variable water content. **Matériaux et Construction**, v. 9, n. 52, p. 279–290, 1976.

[116] E. W. Bennett and D. R. Loat. Shrinkage and creep of concrete as affected by the fineness of Portland cement. **Magazine of concrete research**, v. 22, n. 71, p. 69–78, 1970.

[117] T. Vidal, A. Sellier, W. Ladaoui, and X. Bourbon. Effect of Temperature on the Basic Creep of High-Performance Concretes Heated between 20 and 80°C. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 7, p. 1–7, 2015.

[118] M. Briffaut, F. Benboudjema, J. M. Torrenti, and G. Nahas. Concrete early age basic creep: Experiments and test of rheological modelling approaches. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 373–380, 2012.

[119] Alexander M, Beushausen H. Deformation and volume change of hardened concrete. 9th ed. Midrand, South Africa: 2009.