



Raylane de Souza Castoldi

**Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos
reforçados com fibras de polipropileno e 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

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2018



Raylane de Souza Castoldi

**Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos
reforçados com fibras de polipropileno e sisal**

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

Prof. Antonio Domingues de Figueiredo

Departamento de Engenharia de Construção Civil – USP

Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

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

Raylane de Souza Castoldi

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Espírito Santo – UFES – em 2015. Principais áreas de interesse: Materiais compósitos, concreto reforçado com fibras.

Ficha Catalográfica

Castoldi, Raylane de Souza

Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos reforçados com fibras de polipropileno e sisal / Raylane de Souza Castoldi; orientador: Flávio de Andrade Silva; coorientadora: Lourdes Maria Silva de Souza. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2018.

v., 147 f.: il. color. ; 29,7 cm.

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia civil – Teses. 2. Concreto reforçado com fibras. 3. Fibras sintéticas. 4. Fibras naturais. 5. Comportamento mecânico. 6. Durabilidade. 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

Muitas pessoas foram essenciais no decorrer dessa caminhada. Gostaria de demonstrar toda a minha gratidão a cada uma que de alguma forma contribuiu para o meu sucesso.

Primeiramente a Deus, por me abençoar durante todo esse tempo e por me capacitar para que pudesse realizar esse sonho.

Ao meu orientador, Flávio de Andrade Silva, pela confiança que depositou em mim e no meu trabalho. Sou imensamente agradecida pelo incentivo e sugestões para conclusão dessa pesquisa. À minha coorientadora, Lourdes Maria, pela disponibilidade e paciência em me ajudar sem hesitar. Obrigada por todos os conselhos, apoio e, principalmente, pela sua amizade.

À minha mãe Angela, ao meu pai Adilson, e ao meu amor Breno, a minha gratidão eterna ao seu apoio. Obrigada pelo incentivo a sempre seguir os meus sonhos, mesmo que isso tenha significado morar longe e matá-los de saudade. Orgulhar vocês é a minha maior motivação.

A todos os técnicos do laboratório de estruturas e materiais da PUC-Rio. Euclides, Rogério, Marques, Bruno e Carlos, vocês foram essenciais para a conclusão desse projeto. Obrigada por sempre estarem dispostos a me ajudar e por fazerem o dia-a-dia do laboratório ser muito mais leve. Agradeço também a todos os estagiários que, mesmo permanecendo por pouco tempo, se tornaram grandes amigos para toda a vida.

Aos amigos que a PUC-Rio me deu de presente, obrigada por terem me acolhido tão bem. Agradeço também aos capixabas que estavam comigo no Rio de Janeiro. Ter encontrado e convivido com pessoas tão especiais fez a rotina e a saudade de casa ser mais branda. Agradeço especialmente à Ana, Daiana, Letícia, Paula e Rebecca, por todo carinho e companheirismo durante esse tempo. Vocês se tornaram a minha família carioca!

Aos amigos que deixei no Espírito Santo, obrigada por entenderem a minha ausência e me apoiarem mesmo de longe. Amigos de Liverpool, conhecê-los me tornou uma pessoa muito melhor. Obrigada por terem feito parte de um momento importante de amadurecimento da minha vida que me permitiu chegar no lugar que estou hoje.

À Viapol e *Euclid Chemical* pela disponibilização das macrofibras de polipropileno utilizadas nesse estudo.

À Capes pelo suporte financeiro para realização dessa pesquisa.

Resumo

Castoldi, Raylane de Souza; Silva, Flávio de Andrade (Orientador); Souza, Lourdes Maria Silva de (Coorientadora). **Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos reforçados com fibras de polipropileno e sisal**. Rio de Janeiro, 2018. 147p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo do desempenho mecânico e da durabilidade de concretos reforçados com macrofibras discretas de sisal e polipropileno. Foram utilizadas duas matrizes cimentícias com teores distintos de material pozolânico. As duas fibras, com comprimento de 51 mm, foram incorporadas em dosagens de 3 a 15 kg/m³. Foram realizados ensaios de tração direta para ambas as fibras, obtendo-se valores de tensões equivalentes. Para caracterização mecânica dos compósitos, foram realizados ensaios de flexão em três pontos sob carregamento monotônico, de acordo com o procedimento da norma EN 14651. Também se avaliou este comportamento sob carregamentos cíclicos. Na avaliação da aderência fibra-matriz, ensaios de arrancamento foram realizados. A fibra de sisal apresentou menor aderência nas duas matrizes. Todos os compósitos com fibras de sisal e polipropileno apresentaram comportamento *deflection softening* quando submetidos à flexão. Para se obter desempenho mecânico na flexão similar para ambas as fibras, foi necessário aproximadamente o dobro da dosagem de fibras de sisal. De acordo com a classificação proposta pelo *fib Model Code*, essas fibras podem substituir parcialmente ou integralmente o reforço convencional no estado limite último. A durabilidade dos compósitos foi estudada por meio de processo de envelhecimento acelerado, utilizando-se ciclos de molhagem e secagem. A utilização do reforço de sisal na matriz com maior alcalinidade apresentou degradação, enquanto que sua incorporação na matriz livre de hidróxido de cálcio não resultou em perdas mecânicas após os ciclos. Concretos reforçados com fibras de polipropileno não apresentaram degradação pelos processos de envelhecimento acelerado.

Palavras-chave

Concreto reforçado com fibras; fibras sintéticas; fibras naturais; comportamento mecânico, durabilidade.

Abstract

Castoldi, Raylane de Souza; Silva, Flávio de Andrade (Advisor); Souza, Lourdes Maria Silva de (Co-advisor). **Mechanical properties and durability of concretes reinforced with polypropylene and sisal fibers.** Rio de Janeiro, 2018. 147p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work aims to present a comparative study of the mechanical performance and durability of concretes reinforced with discrete sisal and polypropylene macrofibers. Two cementitious matrices with different pozzolan material content were used. The both fibers were incorporated into fractions of 3 to 15 kg/m³ and were 51 mm long. Direct tensile tests were performed for the fibers, achieving equivalent stress values. For mechanical characterization of the composites, three-point flexural tests were performed under monotonic loading in accordance with the EN 14651 procedure. The behavior under cyclic loading was also investigated. To evaluate the fiber-matrix interaction, pull out tests were performed. The sisal fiber showed lower adhesion with the two matrices. All the composites with sisal and polypropylene fibers presented deflection softening behavior when subjected to flexural loads. In order to obtain similar flexural mechanical performance for both fibers, approximately twice dosage of sisal fiber was required. According to the classification proposed by fib Model Code, these fibers can partially or fully replace the conventional reinforcement at ultimate limit state. The durability of the composites was studied by accelerated aging process through wetting and drying cycles. The use of sisal fibers as reinforcement in the matrix with higher alkalinity showed degradation, while its incorporation into the matrix free of calcium hydroxide did not result in mechanical losses after the cycles. Concretes reinforced with polypropylene fibers did not present degradation caused by accelerated aging processes.

Keywords

Fiber reinforced concrete; synthetic fibers; natural fibers; mechanical behavior; durability.

Sumário

1	Introdução	18
1.1.	Motivação	18
1.2.	Objetivos	19
1.3.	Estrutura da Dissertação	20
2	Revisão Bibliográfica	22
2.1.	Introdução	22
2.2.	Concreto reforçado com fibras	23
2.2.1.	A matriz de concreto.....	24
2.2.2.	Fibras	25
2.2.3.	Interação fibra-matriz.....	31
2.3.	Comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras	42
2.3.1.	Comportamento à compressão	42
2.3.2.	Comportamento à tração.....	45
2.3.3.	Comportamento à flexão	47
2.4.	Durabilidade do concreto reforçado com fibras	53
2.5.	Aplicações	55
3	Desenvolvimento e caracterização dos materiais	58
3.1.	Introdução	58
3.2.	Programa Experimental.....	58
3.2.1.	Materiais e dosagem	58
3.2.2.	Propriedade das matrizes no estado fresco	62
3.2.3.	Propriedades das matrizes no estado endurecido	64
3.2.4.	Fibras	68
3.3.	Conclusão	80
4	Desenvolvimento e caracterização dos compósitos	82
4.1.	Introdução	82
4.2.	Programa Experimental.....	82
4.3.	Fabricação dos compósitos.....	83
4.4.	Comportamento mecânico	85
4.4.1.	Ensaio de arrancamento.....	85

4.4.2. Ensaio de flexão	87
4.5. Resultados e discussões.....	93
4.5.1. Resultados dos ensaios de arrancamento	93
4.5.2. Resultados dos ensaios de flexão	97
4.6. Conclusão	109
5 Durabilidade de compósitos submetidos ao envelhecimento acelerado.....	111
5.1. Introdução	111
5.2. Procedimento experimental.....	112
5.2.1. Compatibilização de escala do corpo de prova	112
5.2.2. Definição dos ciclos de molhagem e secagem.....	115
5.3. Avaliação da durabilidade da interface.....	117
5.4. Avaliação da durabilidade do compósito	121
5.4.1. Análise microestrutural.....	123
5.5. Conclusão	126
6 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	128
6.1. Conclusões.....	128
6.2. Sugestões para futuros trabalhos.....	130
7 Referências bibliográficas	132
APÊNDICE A.....	144
APÊNDICE B.....	146

Lista de figuras

Figura 2.1 – Concentração de tensões para um concreto sem fibras (a) e com fibras (b) [14].	23
Figura 2.2 – Desenho esquemático da dimensão do agregado <i>versus</i> distribuição das fibras para fibras de 40 mm (adaptado de [8]).	25
Figura 2.3 – Classificação da dispersão das fibras em uma, duas e três dimensões (adaptado de [4]).	26
Figura 2.4 – Fibras de polipropileno: microfibras do tipo monofilamento (a) e fibriladas (b); macrofibras lisas (c) e torcidas (d) [24].	29
Figura 2.5 – Morfologia da fibra de sisal: seção transversal (a), zoom na seção transversal (b) e desenho esquemático mostrando as diferentes camadas da célula individual da fibra (c) (adaptado de [28]).	30
Figura 2.6 – Representação das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz (adaptado de [5]).	32
Figura 2.7 – Distribuição das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz imediatamente após a fissura quando o descolamento ocorre antes (a) e após (b) a fissuração (adaptado de [5]).	33
Figura 2.8 – Mecanismos de absorção de energia entre a fibra e a matriz [14].	34
Figura 2.9 – Representação de curvas tensão-deslizamento da fibra durante seu arrancamento, mostrando os comportamentos de <i>slip hardening</i> , <i>slip softening</i> e <i>ideal friction</i> (adaptado de [5]).	35
Figura 2.10 – Diagramas médios de ensaios de arrancamento realizados com fibras de polipropileno tratadas (PPT) e não tratadas (PP) com comprimento de embebedimento de 20 mm (adaptado de [35]).	35
Figura 2.11 – Influência do tratamento superficial no comportamento de arrancamento de compósito reforçado com fibra de sisal (adaptado de [37]).	36

Figura 2.12 – Diagrama de tensão versus deformação específica elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade (adaptado de [6]).	38
Figura 2.13 – Distribuições de tensão ao longo da fibra em função de seu comprimento crítico (adaptado de [5]).	39
Figura 2.14 – Curvas de arrancamento de fibras de polipropileno de uma matriz cimentícia com diferentes comprimentos de embebimento (adaptado de [32]).	40
Figura 2.15 – Influência dos diferentes comprimentos de embebimento no comportamento ao arrancamento do sisal (adaptado de [37]).	40
Figura 2.16 – Conceitos de <i>softening</i> e <i>hardening</i> para classificação do comportamento de concreto reforçado com fibras [14].	41
Figura 2.17 – Curvas de tensão-deformação de concretos reforçados com fibras submetidos à compressão [40].	43
Figura 2.18 – Efeito do conteúdo de fibra de polipropileno na resistência à compressão de concretos com diferentes tipos de agregados leves, formando o concreto CA com agregado leve esférico, CB com agregado leve britado e CC com agregado de xisto (adaptado de [16]).	44
Figura 2.19 – Resposta típica tensão-deformação de concreto de resistência convencional reforçado com $V_f < 5\%$ (a) e concreto de alto desempenho reforçado com $V_f > 5\%$ (b) sob tração [40].	45
Figura 2.20 – Curvas de tensão-deformação e tensão-abertura de fissura para matriz e compósitos reforçados com diferentes teores de fibra de sisal sob tração direta [46].	47
Figura 2.21 – Diagrama esquemático de carga-deflexão típica de concreto reforçado com fibras [40].	48
Figura 2.22 – Distribuição dos momentos fletores e esforço cortante para os ensaios em três (a) e quatro pontos (b) (adaptado de [14]).	49
Figura 2.23 – Curvas de carga x CMOD de vigas de concreto reforçadas com fibra de polipropileno (adaptado de [42]).	51

Figura 2.24 – Curvas tensão x deformação obtidas de ensaios de flexão com diferentes volumes de fibras de polipropileno (adaptado de [67]).	51
Figura 2.25 – Curvas carga-deflexão de compósitos reforçados com sisal (adaptado de [68]).	52
Figura 2.26 – Curva carga <i>versus</i> CMOD experimental típica (adaptado de [69]).	52
Figura 2.27 – Degradação da fibra de sisal no concreto pela decomposição e dissolução da lamela média devido a alcalinidade da água dos poros [5].	54
Figura 3.1 – Distribuição granulométrica dos agregados.	59
Figura 3.2 – Distribuição granulométrica das adições [4].	60
Figura 3.3 – Dimensões (em milímetros) do cone de Abrams e detalhe da placa de base.	62
Figura 3.4 – Resultado final do ensaio de espalhamento da matriz M1 (a) e M2 (b).	63
Figura 3.5 – Equipamento utilizado para realização da análise térmica nas matrizes cimentícias.	64
Figura 3.6 – Curvas de TG/DTG das matrizes M1 e M2.	65
Figura 3.7 – Corpo de prova cilíndrico pronto para ensaio de compressão axial com LVDTs como instrumentação externa.	67
Figura 3.8 – Gráfico comparativo do desenvolvimento da resistência à compressão em diferentes idades.	68
Figura 3.9 – Fibras de sisal previamente ao processo de tratamento térmico (a) e após passarem pelo tratamento, serem separadas e cortadas (b,c).	69
Figura 3.10 – Detalhe da fibra de sisal e polipropileno prontas para utilização como reforço discreto.	70
Figura 3.11 – Microscópio estereoscópio (a) e MEV (b) utilizados para avaliação microscópica das fibras.	71
Figura 3.12 – Micrografia com contorno realizado para cálculo da seção transversal da fibra de polipropileno (a) e sisal (b).	72
Figura 3.13 – Formato aproximado da fibra de polipropileno com destaque para as duas dimensões principais t e w.	73

Figura 3.14 – Micrografia da superfície lateral da fibra de polipropileno (a) e sisal (b).	73
Figura 3.15 – Arranjo e dimensões em milímetros da moldura de fixação em papel cartão para ensaio de tração direta da fibra de sisal.	74
Figura 3.16 – Arranjo experimental do ensaio de tração das fibras de sisal com detalhe do sistema de fixação da fibra.	75
Figura 3.17 – Arranjo experimental do ensaio de tração das fibras de polipropileno utilizado na primeira tentativa.....	76
Figura 3.18 – Arranjo experimental adotado para ensaio de tração das fibras de polipropileno com detalhe do sistema de fixação da fibra.	76
Figura 3.19 – Curvas de tensão <i>versus</i> deformação específica da fibra de sisal (a) e polipropileno (b).	78
Figura 3.20 – Fibra de polipropileno desfibrilada após ensaio de tração direta.	80
Figura 4.1 – Formas metálicas utilizadas para moldagem dos corpos de prova prismáticos (a) e corpos de prova após finalização do procedimento de moldagem (b).....	84
Figura 4.2 – Detalhe da preparação do ensaio de arrancamento: moldagem (a) e disposição final dos corpos de prova após moldagem (b).	85
Figura 4.3 – Representação do comprimento de embebimento da fibra em uma fissura.....	86
Figura 4.4 – Configuração do ensaio de arrancamento (a) e detalhe da fixação do corpo de prova (b).....	87
Figura 4.5 – Detalhes e dimensões (em milímetros) do ensaio de flexão em três pontos.	88
Figura 4.6 – Pórtico rígido com atuador hidráulico (a), detalhe do arranjo do ensaio de flexão em três pontos (b) e detalhe do dispositivo de medição de abertura de fissura (c).	89
Figura 4.7 – Procedimento de carregamento do ensaio cíclico.....	91

Figura 4.8 – Parâmetros experimentais da mecânica da fratura em um ciclo típico (a) e desenho esquemático das dimensões dos corpos de prova prismáticos (b).	92
Figura 4.9 – Curvas típicas de força de arrancamento <i>versus</i> deslizamento para diferentes comprimentos de embebimento (15, 25 e 30 mm) para os compósitos M1 PP, M2 PP e M2 SI.	94
Figura 4.10 – Curvas de tensão de aderência <i>versus</i> deslizamento para diferentes comprimentos de embebimento (15, 25 e 30 mm) para os compósitos M1 PP, M2 PP e M2 SI.....	94
Figura 4.11 – Gráfico de resistência ao arrancamento <i>versus</i> comprimento de embebimento para os compósitos M1 PP, M2 PP e M2 SI.....	97
Figura 4.12 – Gráficos de tensão-CMOD à flexão da matriz M1 (a) e M2 (b).	98
Figura 4.13 – Gráfico a-c) tensão-CMOD à flexão de concretos de matriz M1 reforçados com fibras discretas de 51 mm de polipropileno, com dosagem de 3, 6 e 10 kg/m ³ , respectivamente; ...	100
Figura 4.14 – Gráfico a-c) tensão-CMOD à flexão de concretos de matriz M2 reforçados com fibras discretas de 51 mm de polipropileno, com dosagem de 3, 6 e 10 kg/m ³ , respectivamente; ...	101
Figura 4.15 – Gráfico a-d) tensão-CMOD à flexão de concretos de matriz M2 reforçados com fibras discretas de 50 mm de sisal, com dosagem de 3, 6, 10 e 15 kg/m ³ , respectivamente;	102
Figura 4.16 – Gráfico de resistências residuais relativas correspondente ao CMOD de 1 mm, com relação à resistência de primeira fissura.....	103
Figura 4.17 – Gráficos comparativos de tensão-CMOD à flexão de concretos de matriz M2 reforçados com fibras discretas de 50 mm com dosagem de a) 3 kg/m ³ de polipropileno e 6 kg/m ³ de sisal; b) 6 kg/m ³ de polipropileno e 10 kg/m ³ de sisal; c) 10 kg/m ³ de polipropileno e 15 kg/m ³ de sisal.....	105
Figura 4.18 – Gráficos tensão-CMOD à flexão de concretos submetidos a carregamentos de flexão cíclicos reforçados com	

fibras discretas de polipropileno (a) e sisal (b) e curvas típicas obtidas nos ensaios monotônicos.	107
Figura 4.19 – Curva R dos concretos de matriz M2 reforçados com 6 kg/m ³ de polipropileno e 10 kg/m ³ de sisal submetidos a carregamento cíclico.	109
Figura 5.1 – Programa experimental do estudo de durabilidade por meio do procedimento de envelhecimento acelerado.	112
Figura 5.2 – Arranjo do ensaio de flexão em 3 pontos dos prismas com dimensões 400 x 100 x 100 mm.	113
Figura 5.3 – Gráficos comparativos de tensão-CMOD à flexão de concretos reforçados com fibras discretas com dimensão de 400 x 100 x 100 mm e 550 x 150 x 150 mm.	114
Figura 5.4 – Foto (a) e desenho esquemático (b) da câmara de ventilação forçada.	116
Figura 5.5 – Curvas da variação de massa <i>versus</i> tempo para definição do ciclo de molhagem e secagem dos corpos de prova prismáticos.	117
Figura 5.6 – Gráfico força de arrancamento <i>versus</i> deslizamento de compósitos submetidos a envelhecimento acelerado correspondente a 10, 25 e 35 ciclos de molhagem e secagem.	118
Figura 5.7 – Fibra de polipropileno rompida durante a execução do ensaio (a) e previamente à execução do ensaio (b).	119
Figura 5.8 – Gráfico tensão-CMOD à flexão de concretos submetidos a envelhecimento acelerado correspondente a 10 e 25 ciclos de molhagem e secagem.	122
Figura 5.9 – Micrografia da superfície longitudinal de fibras de polipropileno de referência (a) e extraídas de compósitos de matriz M1 após 10 ciclos (b) e 25 ciclos (c) de molhagem e secagem.	124
Figura 5.10 – Micrografia da superfície longitudinal de fibras de sisal de referência (a) e extraídas de compósitos de matriz M1 após 10 ciclos (b) e 25 ciclos (c) de molhagem e secagem.	125
Figura 5.11 – Micrografia da superfície longitudinal de fibras de sisal de referência (a) e extraídas de compósitos de matriz M1 após 10 ciclos (b) e 25 ciclos (c) de molhagem e secagem.	126

Figura A.1 – Curvas de força de arrancamento <i>versus</i> deslizamento do compósito M1 PP com comprimento de embebimento de 15 (a), 25 (b) e 30 mm (c).....	144
Figura A.2 – Curvas de força de arrancamento <i>versus</i> deslizamento do compósito M2 PP com comprimento de embebimento de 15 (a), 25 (b) e 30 mm (c).....	144
Figura A.3 – Curvas de força de arrancamento <i>versus</i> deslizamento do compósito M2 SI com comprimento de embebimento de 15 (a), 25 (b) e 30 mm (c).....	144
Figura A.4 – Curvas de força de arrancamento <i>versus</i> deslizamento do compósito M1 SI com comprimento de embebimento de 25 mm..	145
Figura B.1 – Curvas de força de arrancamento <i>versus</i> deslizamento do compósito M1 PP após 10 (a), 25 (b) e 35 (c) ciclos de molhagem e secagem.	146
Figura B.2 – Curvas de força de arrancamento <i>versus</i> deslizamento do compósito M2 PP após 10 (a), 25 (b) e 35 (c) ciclos de molhagem e secagem.	146
Figura B.3 – Curvas de força de arrancamento <i>versus</i> deslizamento do compósito M2 SI após 10 (a), 25 (b) e 35 (c) ciclos de molhagem e secagem.....	146
Figura B.4 – Curvas de força de arrancamento <i>versus</i> deslizamento do compósito M1 SI após 10 (a), 25 (b) e 35 (c) ciclos de molhagem e secagem.....	147

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades típicas de fibras utilizadas como reforço (adaptado de [5]).	26
Tabela 2.2 – Propriedades típicas das fibras sintéticas [5].	27
Tabela 2.3 – Propriedades típicas de algumas fibras naturais [5].	31
Tabela 3.1 – Composição química e massa específica do metacaulim de acordo com o fabricante.	60
Tabela 3.2 – Composição da matriz M1 e M2.	61
Tabela 3.3– Resultados do ensaio de consistência para as matrizes M1 e M2.	63
Tabela 3.4 – Resumo dos resultados obtidos a partir do ensaio de compressão axial.	67
Tabela 3.5 – Características principais da fibra de polipropileno disponibilizadas pelo fabricante.	70
Tabela 3.6 – Área da seção transversal da fibra de sisal e polipropileno.	71
Tabela 3.7 – Propriedades mecânicas da fibra de sisal e polipropileno, com respectivos desvios padrão entre parênteses.	79
Tabela 4.1 – Resumo do programa experimental.	83
Tabela 4.2 – Intervalos de classificação da relação $f_{R,3}/f_{R,1}$ que são obtidas pelo ensaio EN 14651 (adaptado de [66]).	91
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de arrancamento dos compósitos M1 PP, M2 PP e M2 SI com diferentes comprimentos de embebimento (15, 25 e 30 mm).	95
Tabela 4.4 – Resumo dos parâmetros de flexão dos compósitos.	99
Tabela 4.5 – Resumo da classificação dos concretos reforçados com fibras de acordo com recomendações do <i>fib Model Code</i> .	106
Tabela 4.6 – Resumo dos parâmetros da mecânica da fratura.	108
Tabela 5.1 – Resumo dos parâmetros de flexão dos corpos de prova com dimensão original (500x150x150 mm) e modificada (400x100x100 mm).	115

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios de arrancamento de compósitos submetidos a envelhecimento acelerado correspondente a 10, 25 e 35 ciclos de molhagem e secagem.....120

Tabela 5.3 – Resumo dos parâmetros de flexão dos compósitos submetidos a envelhecimento acelerado correspondente a 10 e 25 ciclos de molhagem e secagem.123

1

Introdução

1.1. Motivação

O concreto é um dos materiais mais amplamente utilizados na construção civil e continua sendo assunto contínuo de pesquisas. Isso se deve ao fato das inúmeras vantagens desse material, que incluem a elevada resistência mecânica, fácil produção e moldagem, com custo relativamente baixo [1,2]. Entretanto, o concreto apresenta algumas limitações, como a baixa capacidade de deformação e a rápida propagação de fissuras quando submetido a esforços de tração, sendo considerado um material frágil [1,3–5]. Dentro desse contexto, é comum a utilização de barras de aço em conjunto com o concreto. Nesse caso, as armaduras passam a absorver os esforços de tração a que a estrutura está submetida, permitindo maior capacidade de deformação e reduzindo a fragilidade do concreto [5].

Outra alternativa para minimização dessa limitação do concreto convencional é o emprego de fibras dispersas na matriz cimentícia. A armadura convencional é localizada em pontos específicos, e é necessário um procedimento de montagem antes do lançamento do concreto. Por outro lado, a utilização de fibras como reforço elimina essa etapa, pois as fibras são adicionadas diretamente durante a mistura e são distribuídas aleatoriamente. Com isso, é possível reduzir o tempo de execução da moldagem, reduzir a necessidade de mão de obra e, de maneira geral, reduzir o custo associado à execução em relação ao processo tradicional [6]. A incorporação das fibras na matriz promove ao concreto maior tenacidade à flexão, resistência à fadiga e ao impacto. Além disso, concretos reforçados com fibras se tornam mais eficientes após a formação da primeira fissura [6,7] pois, no momento do aparecimento das fissuras, as fibras passam a atuar como ponte de transferência de forças, aumentando a capacidade de absorção de energia do material e reduzindo a propagação e expansão das fissuras formadas [5,7,8].

Atualmente existem diversos tipos de fibras disponíveis, produzidas com diferentes materiais e formas. Apesar da possibilidade de utilização na forma de tecidos, a utilização de fibras aleatoriamente dispersas na matriz sempre esteve mais em evidência, por razões econômicas [4]. Dentre as fibras discretas, as mais utilizadas como reforço do concreto são as fibras de aço e polipropileno. Ambas são utilizadas como reforço secundário no concreto, controlando a abertura e propagação das fissuras. As fibras de aço também podem ser utilizadas como reforço primário [2], entretanto estão susceptíveis a degradação por corrosão. As macrofibras poliméricas surgiram como alternativa à utilização de fibras de aço, principalmente devido a sua vantagem em relação a resistência química e durabilidade elevada [6]. Atualmente, são muito utilizadas para aplicações em pisos e pavimentos, concreto projetado e elementos pré-fabricados [2,5,6]. Apesar da possibilidade da utilização dessas fibras em aplicações com maior responsabilidade estrutural, há limitações ao seu uso como reforço primário principalmente pela falta de normas técnicas específicas para o caso de fibras poliméricas [9].

Dentro do contexto da construção civil, que é considerado um dos setores industriais com grande impacto ambiental [10], as fibras provenientes de recursos naturais surgem como alternativa às fibras sintéticas. As fibras naturais existem em abundância e tem seu uso incentivado por serem renováveis, biodegradáveis e com elevada disponibilidade à baixo custo [11]. Entretanto, a produção de elementos usados na construção com esse material ainda é pequena. Isso se deve ao fato de que, para que se possa dimensionar de forma segura e econômica com fibras naturais, é necessário avaliar e prever com precisão seu comportamento mecânico. Além disso, a baixa durabilidade desse tipo de fibra em meio alcalino ainda é uma barreira à sua utilização em larga escala [12] e a utilização dessas fibras como reforço discreto no concreto ainda é pouco estudada. Portanto, a avaliação da aplicação desse tipo de fibra é importante para incentivar a sua utilização e torná-las competitivas em relação às fibras sintéticas.

1.2. Objetivos

O principal objetivo desse trabalho consistiu na avaliação de macrofibras de polipropileno e sisal como reforço discreto em concretos, de forma a avaliar a

viabilidade de utilização de fibras provenientes de fontes naturais em aplicações onde comumente são utilizadas fibras sintéticas.

Dentre os objetivos secundários, incluiu-se a caracterização das matrizes adotadas, sendo uma matriz com menor teor de materiais pozolânicos e outra com maior teor, com substituição parcial de 50% do cimento por 30% de metacaulim e 20% de cinza volante. Além disso, as fibras foram caracterizadas. Os compósitos foram submetidos a ensaios de flexão em três pontos sob carregamentos monotônicos e cíclicos, com intuito de avaliar a resposta mecânica dos concretos reforçados com os dois tipos de fibras. A interface entre as matrizes e as fibras também foi avaliada por meio de ensaios de arrancamento.

Além disso, também foi objetivo deste trabalho avaliar a durabilidade dos compósitos e das respectivas interfaces quando submetidos ao envelhecimento acelerado, por meio de ciclos de molhagem e secagem. Avaliou-se a influência da composição da matriz na durabilidade das fibras incorporadas, tanto em relação à degradação da capacidade de reforço das fibras no compósito, quanto em relação à degradação da interface fibra-matriz.

1.3. Estrutura da Dissertação

O Capítulo 1 traz a introdução, motivação para realização deste trabalho e os objetivos da pesquisa.

O Capítulo 2 traz a revisão bibliográfica, a qual aborda a utilização de fibras discretas como reforço de matrizes cimentícias, com ênfase para a aplicação de fibra de polipropileno e sisal em concretos. São destacados trabalhos relacionados à utilização dessas fibras, o comportamento da interface fibra-matriz, o desempenho mecânico e durabilidade de concretos reforçados com fibras discretas.

O Capítulo 3 apresenta os materiais utilizados para produção dos concretos, bem como a caracterização das matrizes no estado fresco e endurecido. Além disso, traz a caracterização das fibras em termos da sua resistência à tração e microestrutura.

O Capítulo 4 descreve o desenvolvimento dos compósitos e a caracterização mecânica dos concretos reforçados com fibra de sisal e polipropileno submetidos

à flexão. Também traz a avaliação da interface fibra-matriz.

O Capítulo 5 aborda o estudo da durabilidade. Ciclos de molhagem e secagem foram realizados para avaliação da degradação da interface e da degradação mecânica do compósito. Foram produzidos compósitos com e sem substituição parcial de cimento para verificar de que forma essa substituição influencia na durabilidade.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2

Revisão Bibliográfica

2.1. Introdução

O concreto convencional é considerado um material compósito, ou seja, é obtido a partir da combinação de diferentes materiais que resultam em um novo, apresentando características não apresentadas pelos seus constituintes isoladamente. É constituído, portanto, de duas fases principais: a matriz cimentícia e os agregados. Sua ampla utilização na construção civil está associada às suas vantagens, que incluem o fato de ser um material de simples fabricação e com propriedades vantajosas, tal como boa relação entre custo e durabilidade e boa resistência a esforços de compressão. Entretanto, apresenta algumas limitações, como por exemplo a sua baixa relação resistência/peso. Além disso, possui um comportamento marcadamente frágil, com baixa capacidade de deformação antes da sua ruptura quando submetido a esforços de tração. Em geral, a resistência a esses esforços de tração corresponde a apenas $9 \pm 2\%$ da sua resistência à compressão [1].

Dessa forma, no dimensionamento de estruturas de concreto, em geral, despreza-se sua capacidade de resistência à tração e barras de aço são utilizadas para absorver esses esforços [6]. Entretanto, o aumento da resistência e ductilidade do concreto também pode ser obtido pela adição de fibras, que vem se tornando uma importante alternativa para essa finalidade [5]. Além das vantagens em relação à melhoria do comportamento da matriz frágil, a utilização de fibras como reforço também é vantajosa em relação a sua produção, pois a adição ocorre como qualquer outra matéria prima, durante a mistura, eliminando a necessidade de execução das atividades que incluem montagem e instalação das armaduras convencionais [6]. Entretanto, apresenta como desvantagem o fato de que após a moldagem não é possível se avaliar com precisão o posicionamento e distribuição das fibras, resultando em incertezas quanto à sua capacidade de reforço.

O emprego de fibras com a função de melhorar o comportamento de uma matriz frágil é um conceito antigo. Alguns registros indicam que sua utilização já ocorria no Antigo Egito, onde fibras de palha de trigo eram incorporadas à argila para confecção de tijolos, há aproximadamente 3500 anos [5,6]. Em tempos mais recentes, o uso comercial em grande escala de fibras de amianto em matrizes cimentícias foi amplamente incentivada com a invenção do processo de *Hatschek*, em 1898. Entretanto, devido às propriedades cancerígenas dessas fibras, alguns tipos alternativos de fibras começaram a ser exploradas para que pudessem substituí-las. Dentre alguns exemplos de fibras que são utilizadas atualmente como reforço em matrizes cimentícias, destacam-se as fibras de aço, vidro, carbono, algumas fibras sintéticas de baixo módulo como as fibras de polipropileno e as fibras provenientes de origem natural como o sisal e a juta [13].

2.2. Concreto reforçado com fibras

Quando se considera o concreto convencional sem fibras, no momento em que ocorre a fissuração da matriz, essa fissura se torna uma barreira ao fluxo de tensões. Como consequência, ocorre concentração dessas tensões na extremidade da fissura. No momento em que essa tensão acumulada for maior do que a resistência da matriz, ocorre a ruptura abrupta do material, caracterizando um comportamento marcadamente frágil. No entanto, a presença de fibras na região fissurada resultará na minimização da concentração de tensões. Isso ocorre porque as fibras passam a servir como ponte de transferência das tensões, reduzindo a velocidade de propagação das fissuras, apresentando capacidade resistente após a fissuração. Esse novo comportamento passa a ser denominado pseudo-dúctil ou não frágil [6]. A Figura 2.1 representa o mecanismo de aumento da capacidade portante pós-fissuração proporcionado pelas fibras.

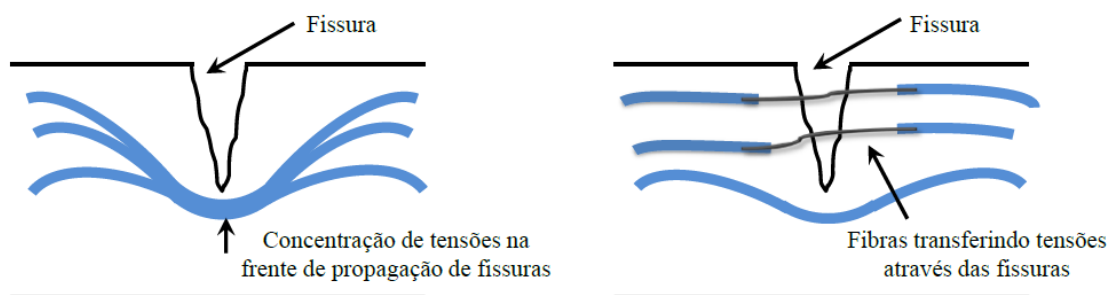


Figura 2.1 – Concentração de tensões para um concreto sem fibras (a) e com fibras (b) [14].

As propriedades dos concretos reforçados com fibras são dependentes dos materiais os quais os formam e pela estrutura final formada por eles. Portanto, para se analisar o material compósito resultante e prever seu comportamento em várias condições de carregamento, sua estrutura interna deve ser caracterizada. Para isso, três fases principais devem ser consideradas: a matriz, as fibras e, principalmente, a interface fibra-matriz [5].

2.2.1.

A matriz de concreto

O concreto é um material que, ao ser analisado em escala microestrutural, apresenta fissuras finas mesmo antes de ser submetido a tensões. A sua resistência está relacionada com a tensão necessária para causar a ruptura, ou seja, a máxima carga que a amostra de concreto pode suportar. No caso de esforços de compressão, o corpo de prova é considerado rompido mesmo não havendo sinais visíveis de fratura externa. Entretanto, as fissuras internas atingem um estado avançado no qual não é mais possível o suporte de cargas. Por outro lado, quando submetido a esforços de tração, a fratura do concreto convencional é caracterizada pela ruptura do corpo de prova. Nesse caso, basta uma energia relativamente baixa para que se inicie a progressão e interligação do sistema de fissuras na matriz, caracterizando uma ruptura frágil. Na compressão, essa ruptura é menos frágil, sendo necessário maiores níveis de energia para que fissuras se formem e se desenvolvam na matriz [1].

Em se tratando da composição da matriz, a princípio, qualquer tipo de concreto convencional pode ser reforçado com fibras. No seu traço, podem ser utilizados aditivos químicos e adições minerais para melhoria da resistência e trabalhabilidade. Entretanto, a presença de fibras poderá dificultar a mobilidade das partículas maiores, reduzindo a fluidez do material [2,4,15]. Além disso, alguns tipos de fibras absorvem água, o que também pode ser prejudicial à consistência [8]. Em relação ao cimento, não existe restrição ao tipo para a composição do concreto porém, deve estar de acordo com a utilização e a resistência requerida [6].

A dimensão máxima do agregado passa a ser de suma importância para o desenvolvimento desses compósitos. As partículas do concreto não devem exceder 20 mm e, se possível, com dimensão de até 10 mm para não prejudicar a

distribuição das fibras [6,8]. De acordo com Figueiredo [2,15], quanto maior a dimensão do agregado, maiores são os problemas referentes à interferência com a fibra, o que compromete o desempenho do compósito. A Figura 2.2 apresenta um desenho esquemático de como a dimensão do agregado pode interferir na distribuição das fibras. Quando são utilizados teores relativamente baixos de fibra ($< 2\%$ em volume) a produção desses compósitos não apresenta nenhuma diferença dos meios convencionais. Quando se adicionam maiores teores, algumas tecnologias de mistura devem ser consideradas com base na reologia e microestrutura do material [5].

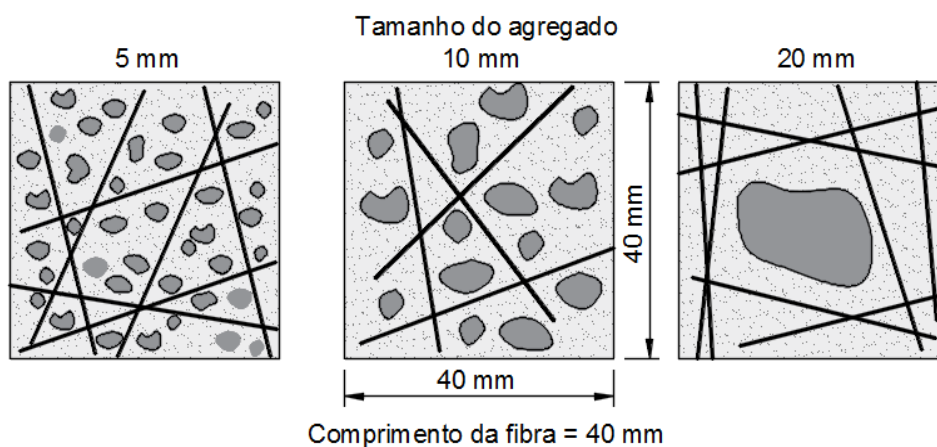


Figura 2.2 – Desenho esquemático da dimensão do agregado *versus* distribuição das fibras para fibras de 40 mm (adaptado de [8]).

2.2.2. Fibras

Paralelamente ao estudo dos concretos reforçados com fibras, houve também um constante desenvolvimento na tecnologia de produção das próprias fibras. As fibras são materiais essenciais para o comportamento adequado do compósito formado por uma matriz frágil, como o concreto. Um resumo das propriedades de algumas fibras utilizadas como reforço estão listadas na Tabela 2.1.

Dentre as aplicações na engenharia, algumas fibras são mais adequadas para determinadas situações específicas. No caso de fibras de vidro, por exemplo, destaca-se o uso em painéis pré-fabricados não estruturais. Fibras de aço são mais comuns em pavimentos e em concreto projetado, enquanto que a utilização de fibras de polipropileno vem crescendo como reforço secundário, para melhoria da ductilidade pós-fissuração do concreto, além de serem utilizadas para controle de

fissuras provenientes da retração. As fibras naturais, por sua vez, são mais comumente utilizadas em materiais de construção de baixo custo, como reforço secundário [5]. Novas tecnologias envolvendo a obtenção e aperfeiçoamento dessas fibras estão sendo desenvolvidas e, por consequência, novas aplicações vem surgindo.

Tabela 2.1 – Propriedades típicas de fibras utilizadas como reforço (adaptado de [5]).

Fibra	Diâmetro (µm)	Peso Específico	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5 – 500	7,84	200	0,5 – 2	0,5 – 3,5
Vidro	9 – 15	2,6	70 – 80	2 – 4	2 – 3,5
Amianto	0,02 – 0,4	3,4	196	3,5	2 – 3
Polipropileno	20 – 400	0,9 – 0,95	3,5 – 10	0,45 – 0,76	15 – 25
Carbono	8 – 9	1,6 – 1,7	230 – 380	2,5 – 4	0,5 – 1,5
Celulose	–	1,2	10	0,3 – 0,5	–
Fibra de Madeira	–	1,5	71	0,9	–
Sisal	10 – 50	1,5	–	0,8	3

As fibras a serem utilizadas como reforço nas matrizes podem ser de duas formas distintas: na forma de monofilamentos ou na forma de tecidos. Além disso, há dois tipos de arranjos de reforço que devem ser considerados: reforço contínuo, com fibras alinhadas em uma direção preferencial, ou com fibras discretas, distribuídas aleatoriamente na matriz. Portanto, as fibras podem estar presentes na matriz em arranjos 1D, 2D e 3D (Figura 2.3). No caso de fibras dispersas aleatoriamente na matriz, uma distribuição uniforme é raramente alcançada [5].

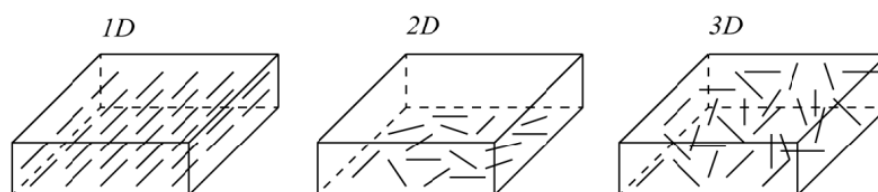


Figura 2.3 – Classificação da dispersão das fibras em uma, duas e três dimensões (adaptado de [4]).

Além do tipo e comprimento das fibras, a dosagem das fibras no concreto influenciará no comportamento final do compósito. Em geral, baixas frações volumétricas ($< 1\%$) resultam em redução da fissuração por retração, distribuindo as cargas de forma mais eficiente na matriz. Com frações moderadas (1 a 2%), há um incremento na tenacidade à fratura, módulo de ruptura e resistência ao impacto, com absorção de cargas mesmo após o aparecimento da primeira fissura.

Por outro lado, altos teores de fibra ($> 2\%$) resultam em concretos de alta resistência, onde as fibras são utilizadas como reforço principal, obtendo-se concretos com maiores resistências e módulo de elasticidade [5].

2.2.2.1. Fibras sintéticas

As fibras sintéticas têm sido utilizadas para reforço de materiais cimentícios desde 1965, mas foram estudadas em larga escala apenas 15 anos depois [13]. Apesar das fibras de aço apresentarem comportamento mecânico superior quando comparado às sintéticas, a densidade elevada e a baixa resistência à corrosão das metálicas restringem sua aplicação e abrem espaço para a utilização de fibras sintéticas [16]. As propriedades de algumas fibras sintéticas comuns são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Propriedades típicas das fibras sintéticas [5].

Tipo de fibra	Diâmetro (µm)	Peso Específico	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Acrílico	20 – 350	1,16 – 1,18	14 – 19	0,2 – 1	10 – 50
Aramida (kevlar)	10 – 12	1,44	63 – 120	2,3 – 3,5	2 – 4,5
Carbono (PAN)	8 – 9	1,6 – 1,7	230 – 380	2,5 – 4	0,5 – 1,5
Carbono (Pitch)	9 – 18	1,6 – 1,21	30 – 480	0,5 – 3,1	0,5 – 2,4
Nylon	23 – 400	1,14	4,1 – 5,2	0,75 – 1	16 – 20
Poliéster	10 – 200	1,34 – 1,39	10 – 18	0,23 – 1,2	10 – 50
Polietileno	25 – 1000	0,92 – 0,96	5	0,08 – 0,6	3 – 100
Poliolefina	150 – 635	0,91	2,7	2,75	15
Polipropileno	20 – 400	0,9 – 0,95	3,5 – 10	0,45 – 0,76	15 – 25
PVA	14 – 650	1,3	29 – 36	0,8 – 1,5	5,7

Apesar de serem fibras fabricadas industrialmente, observa-se pela Tabela 2.2 uma grande variabilidade de valores dos parâmetros indicados, principalmente no que diz respeito ao módulo de elasticidade, resistência à tração e deformação na ruptura. Além disso, não há um procedimento experimental normalizado exclusivo para determinação dos parâmetros mecânicos das fibras sintéticas. A norma EN 14889-2 [17] apresenta alguns requerimentos em relação às fibras poliméricas para uso estrutural e não estrutural em concretos. Entretanto, indica que o procedimento de caracterização mecânica deve seguir a norma EN 10002-1 [18], que tem como foco fibras metálicas. Sendo assim, a inexistência de

uma metodologia de ensaio para avaliar diretamente a fibra abre uma série de possibilidade de resultados, dependendo dos parâmetros adotados para ensaio [19].

Dentre as fibras sintéticas, destaca-se a fibra de polipropileno, extensivamente utilizada e considerada de grande eficiência [20]. Essa fibra é considerada adequada para incorporação no concreto pois tem como características principais a sua resistência ao ambiente alcalino e seu ponto de fusão relativamente alto (165°C). Além disso, apresenta baixo custo, facilidade de dispersão e boa capacidade de ancoragem [21]. Por outro lado, dentre suas desvantagens destacam-se a baixa aderência química com matrizes cimentícias, baixa resistência ao fogo e alta sensibilidade a incidência solar e oxigênio. Apesar disso, algumas dessas desvantagens podem ser facilmente eliminadas pelo fato de que a matriz protege as fibras e diminui a sua susceptibilidade ao fogo e aos efeitos ambientais. A redução na aderência causada pela estrutura química dessas fibras, consideradas hidrofóbicas, pode ser superada através de tratamentos superficiais adequados e mudanças na sua geometria, que garantem maior interação mecânica [5,22].

Existem dois tipos básicos de fornecimento das fibras poliméricas: as microfibras, com comprimento entre 3 e 18 mm, e as macrofibras, de 30 a 60 mm [6]. As microfibras atuam principalmente na redução da fissuração por retração, com pouca ou nenhuma influência na resistência última do compósito. Além disso, distinguem-se em microfibras do tipo monofilamento e fibrilada (Figura 2.4-a,b). A vantagem das microfibras fibriladas é que estas promovem um aumento na aderência entre a fibra e a matriz devido ao efeito de intertravamento mecânico [5]. As macrofibras, por sua vez, também exercem pouca influência na resistência última à compressão, tração e flexão do concreto, mas modificam o seu comportamento pós-fissuração, aumentando a ductilidade e tenacidade da matriz frágil. Além disso, pesquisas [5,23] apontam que a presença de macrofibras sintéticas pode aumentar a resistência do concreto ao fogo. Quando essas fibras são submetidas a altas temperaturas, tendem a se degradar e a formar canais que permitem a liberação da pressão de vapor de água formada durante a incidência do fogo, reduzindo a tendência ao deslocamento do concreto.

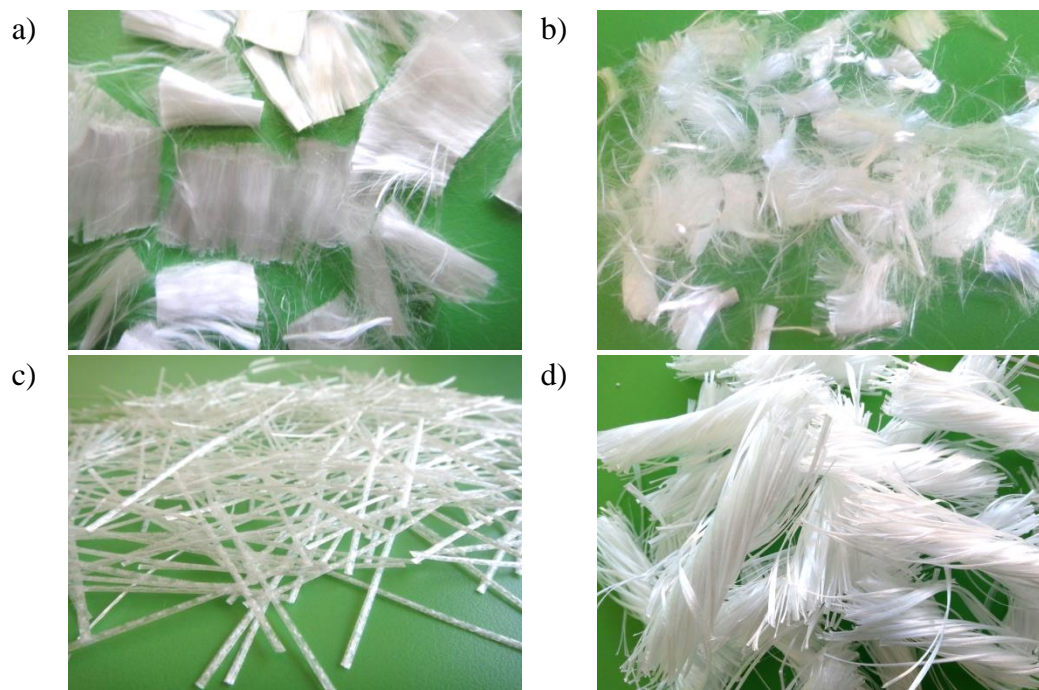


Figura 2.4 – Fibras de polipropileno: microfibras do tipo monofilamento (a) e fibriladas (b); macrofibras lisas (c) e torcidas (d) [24].

2.2.2.2. Fibras naturais

As fibras naturais são classificadas, em geral, como vegetais, animais e minerais, dependendo de sua origem. Dentre as fibras vegetais, existem diversas fontes as quais as fibras podem ser obtidas, tais como das folhas, dos frutos, do caule, entre outras [25]. Apesar da grande gama de fontes possíveis para a obtenção dessas fibras, sua química básica é similar, constituídas pelos mesmos componentes e variando apenas os teores desses componentes na sua composição [5].

A fibra natural é considerada um compósito natural pois contém microfibrilas de celulose em uma matriz de lignina e hemicelulose. As fibras também são formadas por pectina, ceras e componentes solúveis em água [26]. A composição química da fibra de sisal, por exemplo, compreende por aproximadamente 54 – 66% de celulose, 7 – 14% de lignina, 1% pectina e 1 – 7% de cinza [27]. A Figura 2.5 apresenta a morfologia da fibra de sisal, composta por células individuais conectadas pela lamela média, formada por lignina e hemicelulose.

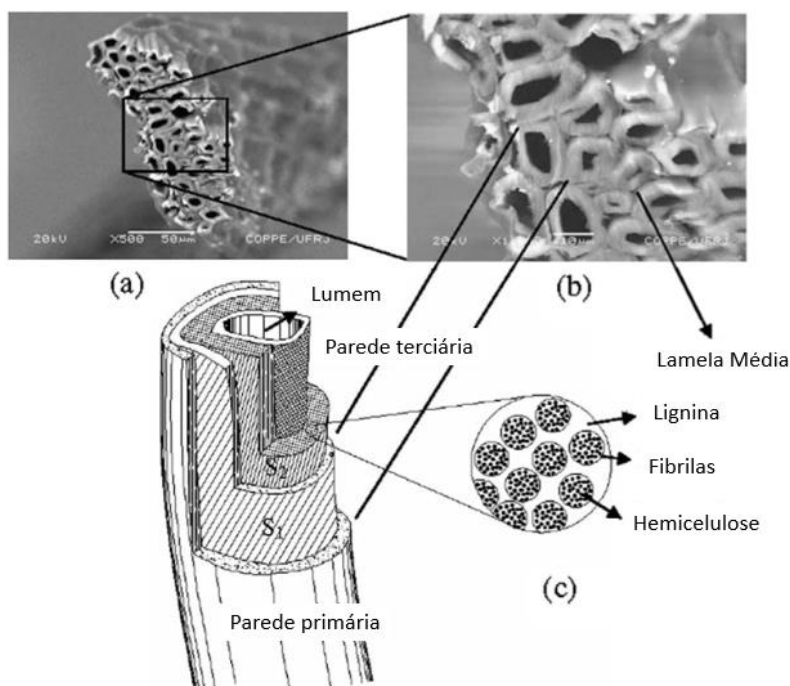


Figura 2.5 – Morfologia da fibra de sisal: seção transversal (a), zoom na seção transversal (b) e desenho esquemático mostrando as diferentes camadas da célula individual da fibra (c) (adaptado de [28]).

Em geral, o uso dessas fibras como reforço em matrizes cimentícias são na forma de polpa ou curtas. Nesse caso, o compósito apresenta uma carga residual a esforços de tração, com pouca ou nenhuma alteração na resistência última da matriz. Sendo assim, são utilizadas para aplicações não estruturais. Alternativamente, fibras naturais longas e alinhadas são utilizadas como reforço de matrizes cimentícias com intenção de se obter compósitos com maior eficiência, nos quais há aumento da capacidade resistente com aparecimento de múltiplas fissuras em detrimento de uma única fissura [27].

O uso de fibras naturais é incentivado pelo bom comportamento mecânico, além de serem renováveis, biodegradáveis e pela sua disponibilidade a baixo custo, possibilitando a produção de compósitos economicamente viáveis. Apesar das vantagens, essas fibras possuem algumas limitações. Apresentam alta absorção de água, susceptibilidade ao ataque de fungos e insetos e baixa durabilidade em ambiente alcalino [12]. Além disso, apresentam instabilidade dimensional com a variação de umidade e variabilidade de propriedades entre fibras do mesmo tipo. Essa variabilidade é justificada devido a sua origem, que a torna susceptível a fatores naturais. Essas desvantagens listadas são responsáveis pela pouca aplicação comercial dessas fibras como reforço de matrizes

cimentícias, apesar do interesse do mercado e do desenvolvimento contínuo de pesquisas. Apesar disso, a utilização dessas fibras se apresenta não só como um atrativo econômico, mas também como atrativo do ponto de vista ambiental. As fibras sintéticas, que são mais comumente usadas, requerem mais energia no processo de produção, são provenientes de fontes não renováveis e não são biodegradáveis. Portanto, a possibilidade de substituição desse tipo de fibra por fibras naturais vem se tornando cada vez mais importante dentro do conceito de sustentabilidade [11].

A Tabela 2.3 apresenta as propriedades de algumas fibras naturais mais comuns. Além da estrutura e propriedades das próprias fibras, as condições experimentais tais como comprimento da fibra e velocidade do ensaio, podem afetar os resultados obtidos, podendo resultar em grande variabilidade entre eles [27].

Tabela 2.3 – Propriedades típicas de algumas fibras naturais [5].

Tipo de fibra	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação na ruptura (%)	Absorção de água (%)
Sisal	13 – 26	280 – 750	3 – 5	60 – 70
Juta	26 – 32	250 – 350	1,5 – 1,9	–
Coco	19 – 26	120 – 200	10 – 25	130 – 180
Cana-de-açúcar	15 – 29	170 – 290	–	70 – 75
Bagaço	1,7	20	–	78,5

Pesquisas no Brasil e no exterior concentram-se nas fibras de coco e principalmente fibras de sisal, disponíveis a preço relativamente baixo (0,36 US\$/kg) [29,30]. A fibra de sisal é obtida de uma planta formalmente conhecida como *Agave sisalana*. A folha da planta de sisal é constituída de aproximadamente 4% de fibra, 1% de cutícula, 8% de matéria seca e 87% de água [31]. Apesar de seu grande potencial para ser utilizada como reforço, as fibras de sisal são comumente usadas para produção de cordas, tapetes, sacos, dentre outros produtos artesanais.

2.2.3. Interação fibra-matriz

A eficiência das fibras como reforço de uma matriz frágil está relacionada com dois fatores principais: o processo de transferência de tensão da matriz para

as fibras e a capacidade das fibras em atuar como pontes para a transferência das tensões em uma matriz fissurada [5]. Os processos envolvidos nos mecanismos de interação entre o concreto e a fibra ocorrem em uma região denominada zona de transição interfacial. Nessa região, as propriedades da matriz são diferentes do restante da pasta, sendo mais porosa e com considerável volume de partículas de hidróxido de cálcio. Como esse composto apresenta menor resistência mecânica que o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), essa é uma região limitante da resistência do compósito [5]. Devido às características individuais dessa zona, a interação entre a fibra e a matriz é um fator determinante para o entendimento do comportamento mecânico final.

Segundo Bentur & Mindess [5], o processo de transferência de tensões pode ser dividido em duas fases, sendo uma fase anterior à fissuração da matriz e uma outra fase após a fissuração. Antes da fissuração, o mecanismo dominante é o elástico, e os deslocamentos longitudinais na interface da fibra e da matriz são geometricamente compatíveis. Em estágios mais avançados de carregamento, ocorre o descolamento da fibra da matriz e o mecanismo de transferência de tensões passa a ser por atrito. Nessa fase, há deslocamentos relativos entre a fibra e a matriz. A transição entre os mecanismos de transferência de tensão ocorre quando a tensão cisalhante interfacial excede a tensão cisalhante de aderência última (τ_{au}). Após o início do descolamento entre a fibra e matriz, a máxima tensão tangencial de atrito que pode ocorrer na interface é denominada τ_{fu} (Figura 2.6).

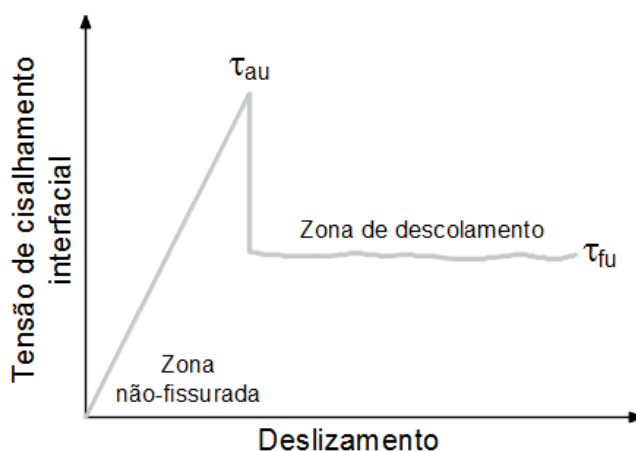


Figura 2.6 – Representação das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz (adaptado de [5]).

A transição entre os mecanismos de transferência de tensão é um processo gradual. No entanto, quando o descolamento da fibra ocorre anteriormente ao início da fissuração da matriz, pode ocorrer um efeito combinado dos mecanismos. Esta situação ocorre quando a tensão cisalhante na interface excede a tensão cisalhante de aderência última, ocorrendo a perda de aderência antes da fissuração da matriz. Por outro lado, em compósitos em que a matriz possui baixa resistência, a fissuração pode ocorrer antes da degradação da aderência. Na Figura 2.7 observa-se a distribuição de tensão cisalhante na interface imediatamente após a fissura, quando o descolamento ocorre antes e após a fissuração [6]. Além da interação por aderência química/física e atrito, algumas fibras podem apresentar ancoragem mecânica induzida por deformações na sua superfície.

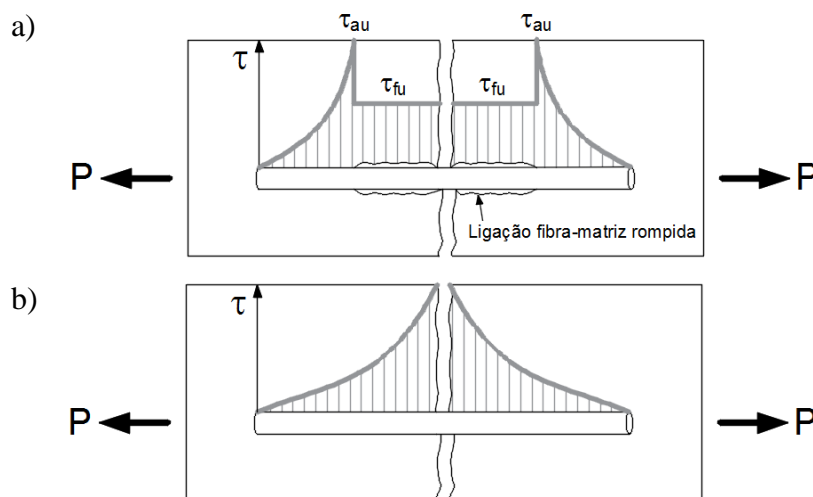


Figura 2.7 – Distribuição das tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz imediatamente após a fissura quando o descolamento ocorre antes (a) e após (b) a fissuração (adaptado de [5]).

O comportamento dúctil do compósito após a fissuração da matriz é resultado de alguns tipos de interações das fibras com a matriz, que leva à absorção de energia na zona fissurada. Essas interações incluem a capacidade de a fibra transferir tensões através da fissura, arrancamento da fibra e a ruptura da fibra em uma seção fissurada. Além disso, considera-se a possibilidade da quebra da ligação fibra-matriz e a própria fissuração da matriz (Figura 2.8). Embora o total da absorção de energia associado a cada mecanismo de uma única fibra não seja significativo, quando se considera um grande número de fibras em uma seção fissurada, o efeito da absorção de energia passa a ser considerável [32,33].

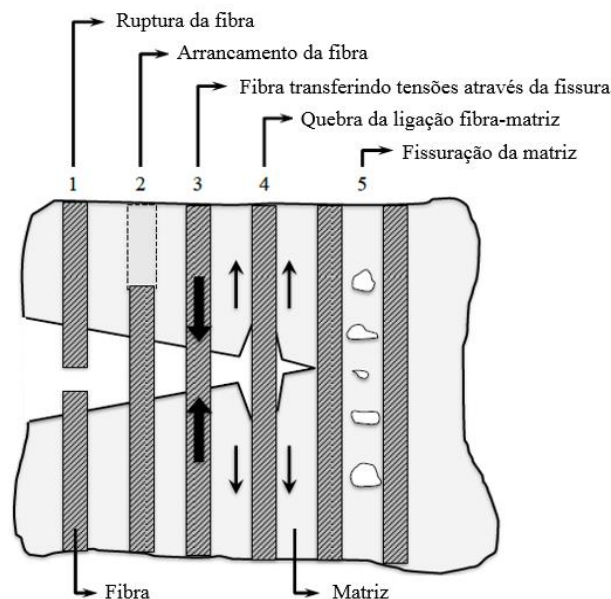


Figura 2.8 – Mecanismos de absorção de energia entre a fibra e a matriz [14].

De acordo com Cifuentes *et al.* [34], concretos de alta resistência reforçados com fibras tendem a apresentar o mecanismo de fratura associado à ruptura das fibras. Isso ocorre pois, para que se ocorra o início da fissuração do compósito, é preciso que a tensão aplicada seja maior do que a resistência da matriz que, por sua vez, apresenta resistência maior do que a resistência da fibra. Por esse motivo ocorre a fratura das fibras antes que ocorra o processo de descolamento e posterior arrancamento. Por outro lado, em concretos de resistência moderada e baixa, o mecanismo principal de fratura é pelo descolamento e posterior arrancamento das fibras, sendo que as propriedades mecânicas e geométricas adequadas das fibras são aquelas que proporcionam uma maior aderência com a matriz e que permitem um maior alongamento antes da ruptura.

A avaliação da interação entre a fibra e a matriz é feita por meio de ensaios conhecidos como ensaios de arrancamento. Existem vários tipos diferentes de ensaios sendo que, em todos os casos, determina-se a força necessária para o arrancamento de uma fibra da matriz, que coincide com o fim da fase elástica. Além disso, a carga residual obtida após o arrancamento corresponde à região de atrito. A partir dessas cargas, é possível obter os valores de tensão cisalhante de aderência última τ_{au} e tensão máxima tangencial de atrito τ_{fu} , cujo comportamento está compreendido entre os intervalos de *slip softening* e *slip hardening* [5], de acordo com a Figura 2.9.

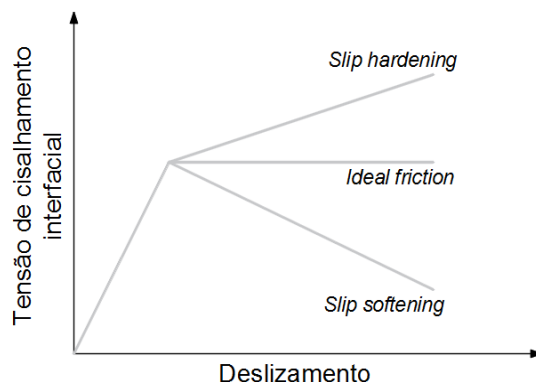


Figura 2.9 – Representação de curvas tensão-deslizamento da fibra durante seu arrancamento, mostrando os comportamentos de *slip hardening*, *slip softening* e *ideal friction* (adaptado de [5]).

A efetividade das fibras de polipropileno em um compósito cimentício depende apenas da aderência mecânica entre a fibra e a matriz. Sabe-se que o polipropileno é quimicamente inerte e hidrofóbico, portanto, elimina-se o potencial por aderência química. Atualmente, já foram desenvolvidos tratamentos superficiais que garantem a essas fibras a aderência química necessária para melhoria da interação. Maida *et al.*[35] sugerem que o tratamento superficial das macrofibras de polipropileno seja feito com nano-sílica. Nesse caso, houve um aumento considerável nas características de aderência durante o processo de arrancamento. Para o descolamento das fibras com tratamento foi necessário o dobro de carga do que o necessário para fibras sem tratamento. As curvas da Figura 2.10 apresentam o resultado de ensaios de arrancamento realizados com fibras tratadas (PPT) e não tratadas (PP), para comprimento de embeбimento de 20 mm.

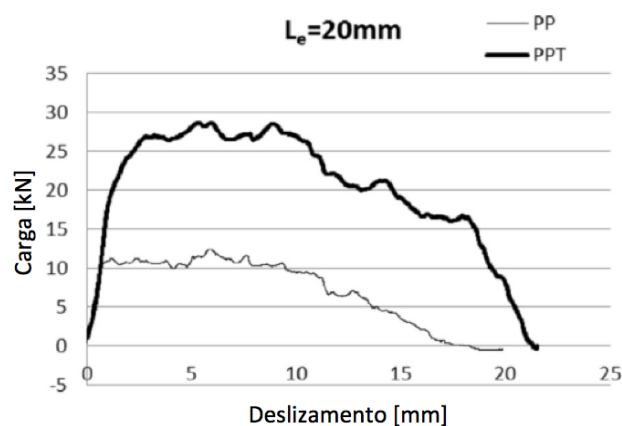


Figura 2.10 – Diagramas médios de ensaios de arrancamento realizados com fibras de polipropileno tratadas (PPT) e não tratadas (PP) com comprimento de embeбimento de 20 mm (adaptado de [35]).

As fibras de sisal, por sua vez, possuem uma aderência química reduzida, sendo principalmente devido a forças de *Van der Waals* e interações OH^- da celulose e do hidróxido de cálcio. Além disso, essas fibras possuem grupos hidroxilos que fazem com que se tornem hidrofílicas. Portanto, além da baixa aderência química, essas fibras absorvem uma grande quantidade de água, levando a uma redução da aderência física entre a fibra e a matriz [36]. Alguns tratamentos superficiais podem melhorar as propriedades de aderência dessas fibras e, simultaneamente, reduzir a absorção de água por elas e melhorar sua durabilidade. Ferreira *et al.* [37] mostraram que alguns tratamentos como hornificação (processo de molhagem e secagem para se atingir a estabilidade dimensional), tratamento alcalino e impregnação polimérica, resultaram em aumento da aderência entre a fibra de sisal e a matriz cimentícia. Com os tratamentos foi possível obter maiores aderências, apresentando até um comportamento de *slip hardening* no caso de um tratamento híbrido (Figura 2.11).

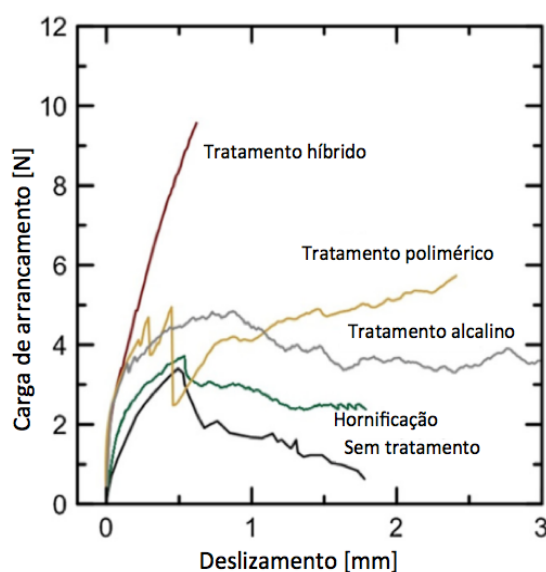


Figura 2.11 – Influência do tratamento superficial no comportamento de arrancamento de compósito reforçado com fibra de sisal (adaptado de [37]).

Como a eficiência da fibra como reforço depende da sua atuação na transferência de tensões ao longo da fissura do concreto, deve-se considerar alguns aspectos tecnológicos em relação a utilização desse material. Alguns desses tópicos a serem considerados são as características das fibras, como resistência e módulo de elasticidade, a geometria da fibra e o teor de fibras incorporado na matriz [6].

2.2.3.1.

Efeito do módulo de elasticidade e resistência da fibra

Figueiredo [6] afirma que o módulo de elasticidade e a resistência mecânica são as duas propriedades principais das fibras, que refletirão na sua capacidade de reforço em uma matriz cimentícia. A resistência afeta diretamente o comportamento pós-fissuração pois, quando há o aparecimento da fissura, ocorre a transferência de tensão da matriz para a fibra. Quanto maior for a resistência da fibra, maior será a capacidade de resistência residual. Por outro lado, o módulo de elasticidade da fibra reflete na rigidez e capacidade de conter a propagação de fissuras do compósito. Portanto, a caracterização dessas duas propriedades é essencial [19].

Em relação ao módulo de elasticidade, podem ser classificadas em dois grupos: fibras de baixo e alto módulo de elasticidade. Dentre as fibras de baixo módulo, tem-se como exemplo as fibras de polipropileno, nylon e fibras naturais. Nesse caso, as fibras interferem pouco nas resistências à tração e compressão do compósito. Entretanto, por apresentar grande deformabilidade, permitem que a estrutura apresente grande fissuração antes do completo colapso. As fibras de alto módulo, representadas pelas fibras de aço e carbono, promovem alteração na resistência do concreto.

A Figura 2.12 representa a influência do módulo de elasticidade das fibras no comportamento do concreto. Os comportamentos foram considerados como elástico perfeitos. A linha O-A representa o comportamento tensão *versus* deformação linear típico de um concreto sem reforço. As linhas O-B e O-C representam o comportamento típico do concreto reforçado com fibras de alto e baixo módulo, respectivamente. Observa-se que, quando a matriz rompe (ponto A), a fibra de baixo módulo de elasticidade possui um baixo nível de tensão (ponto C). Nesse momento, a tensão é transferida para a fibra e, para se atingir o mesmo nível de tensão da matriz (ponto D), apresentará uma elevada deformação. Há, portanto, uma baixa capacidade de reforço pós-fissuração. No caso das fibras de alto módulo de elasticidade, no momento de ruptura da matriz a fibra já apresenta um elevado nível de tensão (ponto B), o que lhe permitirá atuar como reforço a partir desse ponto. Contudo, caso a fibra de alto módulo apresente baixa

resistência, poderá ocorrer a ruptura das fibras antes da ruptura da matriz, reduzindo ou eliminando a sua capacidade de reforço pós-fissuração [6].

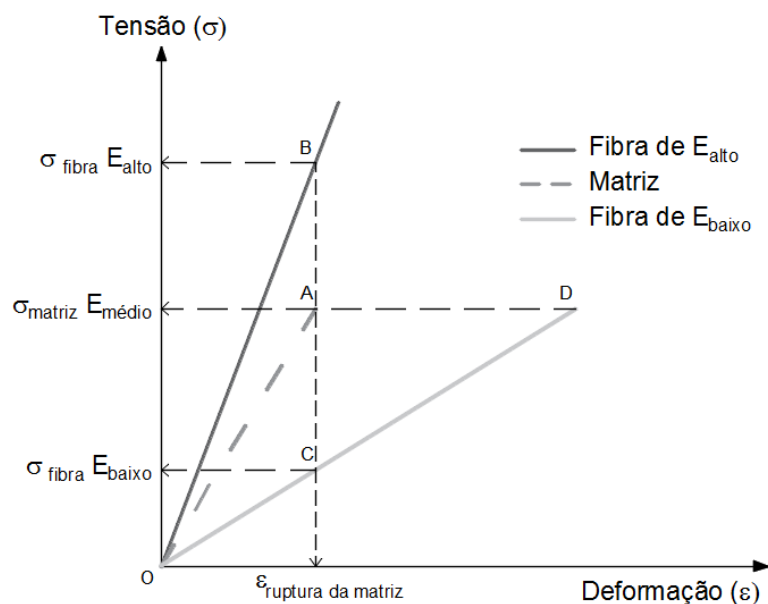


Figura 2.12 – Diagrama de tensão versus deformação específica elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade (adaptado de [6]).

2.2.3.2. Efeito da geometria da fibra

Um importante conceito associado a geometria da fibra utilizada como reforço é o seu comprimento crítico (l_c). Figueiredo [6] define o comprimento crítico como aquele que, quando da ocorrência de uma fissura perpendicular à fibra e posicionada no centro do seu comprimento, atinge uma tensão igual à sua tensão de ruptura naquele ponto. Essa definição se baseia no modelo em que se assume que a transferência de tensões entre a fibra e a matriz aumenta de forma linear dos extremos para o centro da fibra. Essa tensão passa a ser máxima quando se iguala à tensão de cisalhamento na interface (σ_{fu}). Na Figura 2.13 observa-se as possíveis distribuições de tensão ao longo de uma fibra em função do seu comprimento, sendo ele menor, igual ou maior que l_c .

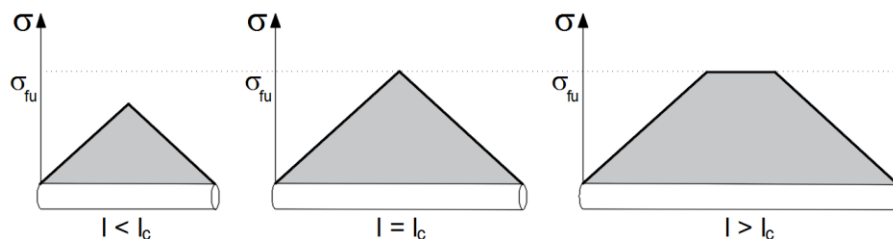


Figura 2.13 – Distribuições de tensão ao longo da fibra em função de seu comprimento crítico (adaptado de [5]).

Quando a fibra apresenta um comprimento menor que o comprimento crítico, a carga de arrancamento proporcionada por esse comprimento não é suficiente para produzir uma tensão de cisalhamento que se iguale à resistência da fibra. Nesse caso, com o aumento da abertura da fissura, a fibra que está atuando como ponte de transferência de tensões será arrancada pelo lado que possuir menor comprimento embutido. Por outro lado, quando esse comprimento é maior que o comprimento crítico, é possível desenvolver na fibra uma tensão que se iguale a sua resistência. Nesse caso, a ruptura do compósito será por ruptura da fibra. No entanto, a utilização de fibras com grandes comprimentos pode prejudicar a consistência da matriz [5]. Visando a ocorrência do mecanismo de arrancamento da fibra, em geral, as fibras poliméricas disponibilizadas para utilização como reforço do concreto possuem comprimentos menores que o comprimento crítico. Dessa forma, garante-se a tenacidade do compósito em detrimento do comportamento frágil causado pela ruptura das fibras no momento do surgimento da fissura [6].

Ao avaliar a interface fibra-matriz, tem-se como comportamento geral que, na medida em que se aumenta o comprimento de embebedimento de uma fibra na região da fissura, maior será a sua resistência ao arrancamento. Singh *et al.* [32] avaliaram o comportamento ao arrancamento de fibras de polipropileno de uma matriz cimentícia, com diferentes comprimentos de embebedimento (19, 25 e 38 mm). Assim como esperado, houve um progressivo aumento na carga de arrancamento com o incremento no comprimento, além de mudança de comportamento na fase de cisalhamento por atrito, passando de um comportamento *slip softening* para *slip hardening* (Figura 2.14). O mesmo foi observado por Babafemi & Boshoff [38] e Maida *et al.* [35] para diferentes comprimentos de embebedimento.

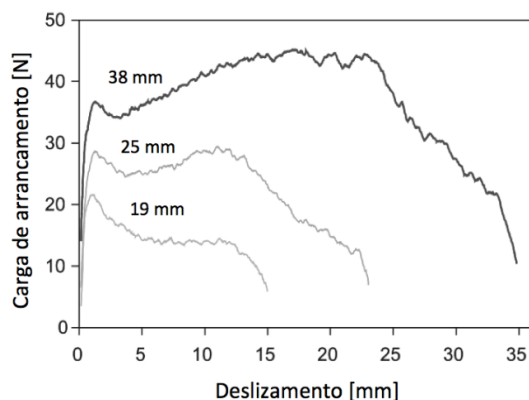


Figura 2.14 – Curvas de arrancamento de fibras de polipropileno de uma matriz cimentícia com diferentes comprimentos de embebimento (adaptado de [32]).

Para fibras de sisal, Ferreira *et al.*[37] também encontraram o mesmo padrão. Com a mudança no comprimento de embebimento, ocorreu variação no mecanismo de arrancamento da fibra. Para fibras com 5 e 10 mm de embebimento, foi observada uma aderência ideal, sem variação de tensão de cisalhamento após o início do arrancamento. Com 25 mm, o comportamento obtido foi do tipo *slip hardening*. Entretanto, para 50 mm ocorreu a fratura das fibras após a fase elástica linear (Figura 2.15).

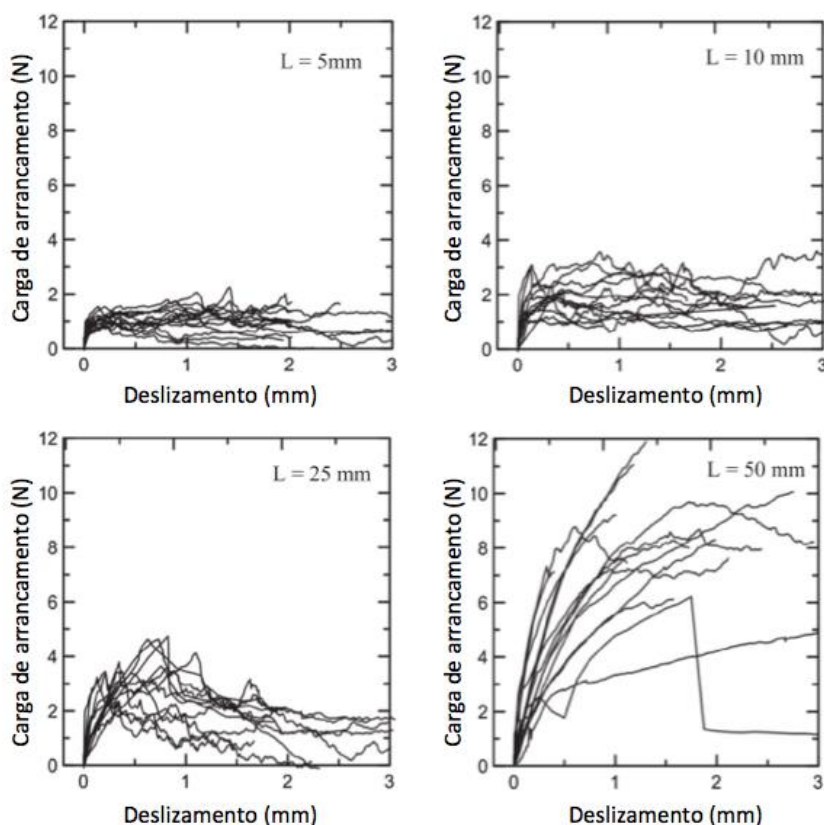


Figura 2.15 – Influência dos diferentes comprimentos de embebimento no comportamento ao arrancamento do sisal (adaptado de [37]).

Além do comprimento, a seção transversal das fibras também influenciará o comportamento pós-fissuração do concreto. Quando a seção transversal é pequena, a área de contato da fibra com a matriz também será pequena. Como consequência, menor será a carga que a fibra conseguirá suportar antes da sua ruptura. Por outro lado, maiores seções transversais resultarão em maior capacidade de carga devido à maior área de contato na interface [6].

2.2.3.3.

Efeito do teor de fibras

O teor de fibras é considerado como um dos principais definidores do comportamento do concreto reforçado com fibras[6]. Um conceito que está atrelado ao teor de fibras é o volume crítico (V_c), o qual representa o teor de fibras para o qual a capacidade portante do compósito é mantida após a ruptura da matriz. Como a eficiência da fibra depende da sua atuação como ponte para transferência de tensões na seção fissurada, quanto maior a quantidade de fibras, maior será a capacidade das fibras em absorver os esforços. Portanto, acima do volume crítico, o compósito continua aceitando níveis de carregamentos de tração crescentes após a ruptura da matriz, denominado como um comportamento de *strain hardening* [7].

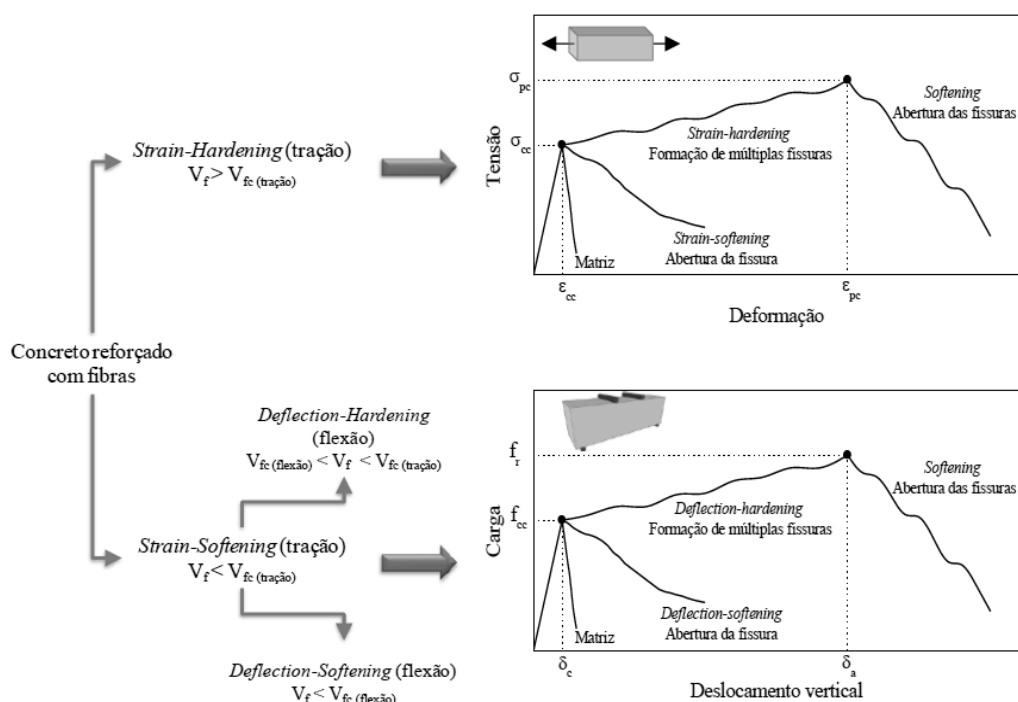


Figura 2.16 – Conceitos de *softening* e *hardening* para classificação do comportamento de concreto reforçado com fibras [14].

Por outro lado, para teores abaixo do volume crítico, a ruptura à tração da matriz é seguida de uma queda na carga a qual o material tem capacidade de suportar. Nesse caso, o comportamento denomina-se *strain softening*, e é comum em concretos reforçados com baixos teores de fibras curtas (< 50 mm) aleatoriamente distribuídas [5]. Para o caso de flexão, os diferentes comportamentos denominam-se *deflection softening* e *deflection hardening* [7]. A Figura 2.16 ilustra esses diferentes comportamentos para um compósito submetido à esforços de tração e flexão. O trecho elástico linear inicial corresponde ao comportamento pré-fissuração da matriz, e a influência do teor de fibras pode ser observada após esse estágio inicial, no estágio pós-fissuração.

2.3.

Comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras

O comportamento do concreto reforçado com fibras é resultado da interação entre a fibra e a matriz, assim como discutido anteriormente. Na prática, deseja-se conhecer o desempenho a curto e a longo prazo dos compósitos no estado endurecido. Entretanto, é importante frisar que esse desempenho dependerá diretamente das interações fibra-matriz no estado fresco. Para isso, deve-se garantir que o processo de fabricação seja adequado, com teores de fibra compatíveis com a matriz de concreto escolhida, com fibras uniformemente distribuídas e não degradadas durante a produção do compósito. Problemas como aglomeração de fibras, incorporação de ar e incompatibilidade entre a fibra e a matriz podem prejudicar o comportamento final do compósito, mesmo que esses materiais sejam de boa qualidade quando considerados isoladamente [8].

A seguir são apresentadas algumas propriedades mecânicas dos concretos reforçados com fibras, as quais permitem melhor compreender o comportamento do material.

2.3.1.

Comportamento à compressão

Em geral a adição de fibras numa matriz cimentícia tem pouca influência na resistência a compressão do compósito [5]. Com teores convencionais de fibras (menores que 2% em volume), o comportamento à compressão não é tão alterado

quanto o comportamento à tração e à flexão. Entretanto, quando são adicionados maiores volumes de fibras, pode haver influência negativa no comportamento. Isso ocorre devido à dificuldade de dispersão de um grande volume de fibras na matriz, aumento do teor de ar incorporado na mistura, dentre outras consequências que fazem com que a matriz tenha o seu comportamento comprometido [5]. No entanto, como as fibras atuam como ponte de transferência de tensões pela fissura, o concreto poderá apresentar modificações no seu comportamento pós-pico [6,39]. Fanella & Naaman [39] observaram que a presença de um teor de 1% de fibras discretas proporcionou uma alteração mínima na resistência à compressão da matriz (Figura 2.17). Entretanto, em todos os casos houve um aumento da tenacidade, enfatizada pela declividade mais suave no ramo descendente das curvas de tensão *versus* deformação. Nesse caso, a presença das fibras evita que a ruptura do concreto apresente um comportamento frágil no momento do colapso.

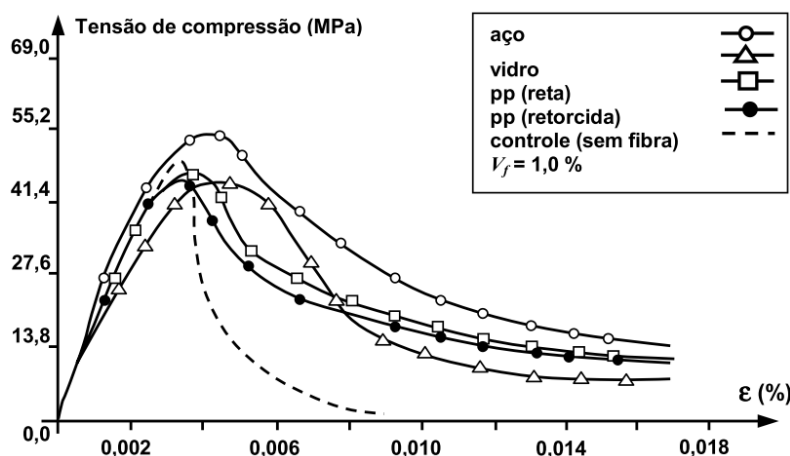


Figura 2.17 – Curvas de tensão-deformação de concretos reforçados com fibras submetidos à compressão [40].

O direcionamento das fibras também influenciará no comportamento do compósito quando submetido à compressão, principalmente no que diz respeito ao gasto energético pós-fissuração. Se o concreto for carregado no sentido perpendicular a direção das fibras, apresentará um maior gasto energético após a fissuração do que quando solicitado na direção paralela às fibras [2].

Algumas pesquisas foram realizadas para avaliação do comportamento do compósito à compressão quando reforçado com fibras de polipropileno. Em geral, com os teores de fibra variando de 0,1 a 0,2% em volume, não há grande variação

em relação à capacidade de carga dos corpos de prova. Entretanto, a adição das fibras tem efeito significativo no mecanismo de fratura dos cilindros de concreto, que passaram a romper de forma mais dúctil [13]. Mazaheripour *et al.* [41] também afirmaram que a presença de fibras discretas de polipropileno não resultaram em impacto significativo na resistência à compressão de concretos autoadensáveis reforçados com teores de até 0,3% de fibras, assim como Yin *et al.* [42] para concretos convencionais reforçados com teor de 4 kg/m³ de fibras discretas. A Figura 2.18 apresenta os resultados obtidos por Li *et al.* [16] sobre o efeito do conteúdo de fibras de polipropileno na resistência à compressão do concreto. Observa-se que há um aumento progressivo, seguido de um decréscimo da resistência em matrizes com os teores de fibras maiores que 9 kg/m³. Kim *et al.* [43] também observaram o mesmo comportamento para uma matriz reforçada com fibras de polipropileno de 51 mm, sendo que a resistência à compressão aumentou com o aumento do teor de fibras, mas foi observado decréscimo para teores acima de 3%.

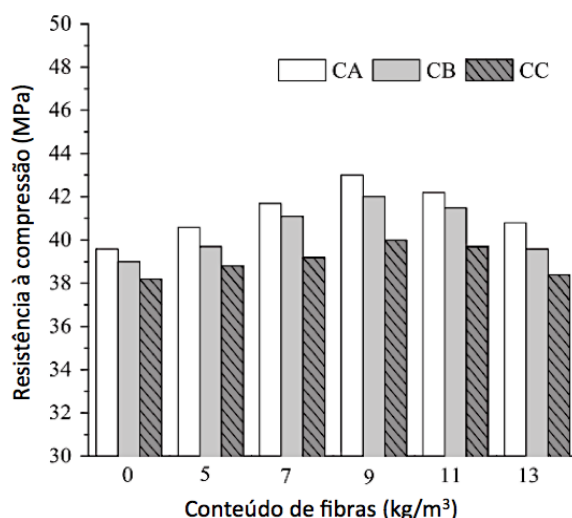


Figura 2.18 – Efeito do conteúdo de fibra de polipropileno na resistência à compressão de concretos com diferentes tipos de agregados leves, formando o concreto CA com agregado leve esférico, CB com agregado leve britado e CC com agregado de xisto (adaptado de [16]).

Em geral, a adição de fibras discretas de sisal pouco influencia na resistência à compressão do compósito. Entretanto, deve-se atentar ao fato de que existem valores ótimos para volume e comprimento das fibras, de forma que, acima desses valores, pode haver um decréscimo da resistência. Alguns pesquisadores [13,44] comprovaram essa afirmação, mostrando experimentalmente que a presença de fibras de sisal reduziu a resistência à

compressão dos compósitos, mas que esse efeito foi maior para o caso de matrizes cimentícias reforçadas com fibras de 45 mm em comparação a matrizes com fibras de 25 mm. Entretanto, foram observadas maiores deformações antes da ruptura da matriz com reforço [44].

2.3.2. Comportamento à tração

Um dos parâmetros mais importantes em relação ao comportamento à tração do compósito é a fração volumétrica de fibras [7]. A influência desse parâmetro é evidenciada na resposta tensão *versus* deformação dos concretos reforçados com fibras. De maneira geral, essa curva pode ser dividida em três zonas, no caso de altas frações volumétricas de fibras ($> 5\%$), e em duas zonas para o caso de menores frações ($< 5\%$) (Figura 2.19). Em ambos os casos, o estágio I representa a fase elástica linear, que ocorre previamente ao rompimento da matriz. Para concretos convencionais reforçados com baixos teores de fibras, o próximo estágio (estágio II) é caracterizado por uma redução da capacidade de carga, mas com uma resistência residual proveniente da transferência de tensões nas fissuras pelas pontes formadas pelas fibras. Por outro lado, em concretos com elevado volume de fibras, no estágio II o material tem capacidade de resistir a cargas maiores do que a carga de rompimento da matriz, caracterizado pela formação de múltiplas fissuras. O estágio III, por sua vez, representa a fase de arrancamento das fibras, que passam a não mais absorver acréscimo de cargas [40].

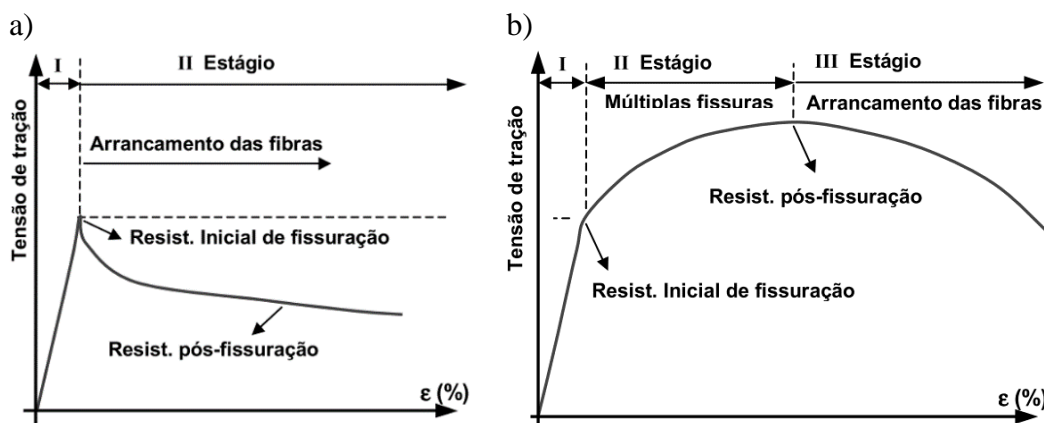


Figura 2.19 – Resposta típica tensão-deformação de concreto de resistência convencional reforçado com $V_f < 5\%$ (a) e concreto de alto desempenho reforçado com $V_f > 5\%$ (b) sob tração [40].

Apesar do melhor comportamento dos concretos com elevado volume de fibras, a obtenção de concretos reforçados com altos teores de fibras curtas discretas não é prático, devido às limitações em relação a redução da trabalhabilidade e dificuldade de distribuição homogênea das fibras na matriz. Além disso, o comprimento de embebedimento pode não ser suficiente para que tenha influência sobre a capacidade de carga após a fissuração, mesmo com altos teores [8].

A partir do melhor entendimento dos mecanismos de transferência de tensões e avanços na produção das matrizes, foi possível alcançar, mesmo com fibras curtas, compósitos com elevado desempenho. Nesse caso ocorre o aparecimento de múltiplas fissuras, apresentando um aumento nos níveis de tensão à tração mesmo após a fissuração da matriz (*strain hardening*). Um comportamento similar foi obtido por Li *et al.* [45] em compósitos reforçados com fibras poliméricas discretas. Nesse caso, observou-se um pequeno aumento da resistência após a primeira fissura, seguido da ruptura após atingir grandes deformações. Esse comportamento também foi obtido em compósitos reforçados com fibras curtas de sisal [37]. Se tratando de compósitos convencionais reforçados com fibras curtas, o comportamento sob tração direta é caracterizado por uma redução de tensão após a primeira fissura e manutenção de um valor residual de tensão a grandes deformações (*strain softening*).

Lima *et al.* [46] avaliaram o comportamento de argamassas reforçadas com fibras curtas de sisal sob ensaio de tração direta. A matriz sem fibras apresentou comportamento frágil. Entretanto, com a adição de 1, 2 e 3% de fibras, observou-se uma modificação no processo de fissuração do material, com manutenção da resistência residual e redução da propagação da fissura, mesmo após grandes deslocamentos (Figura 2.20).

Os ensaios para avaliação do comportamento do compósito a esforços de tração podem ser diretos ou indiretos. No entanto, esses diferentes métodos de ensaio fornecem diferentes resultados para um mesmo material. Em geral, resultados provenientes de ensaios indiretos apresentam valores maiores do que os obtidos em ensaios de tração direta, os quais mais se aproximam ao real valor da resistência a tração do compósito. Porém, existem dificuldades de se obter um resultado confiável a partir de ensaios de tração direta devido a configuração dos ensaios. Há a possibilidade de acúmulo de tensões na região de fixação do corpo

de prova e, além disso, o próprio formato do corpo de prova pode influenciar no resultado encontrado [47]. Deve-se garantir que as fissuras ocorram na região central do corpo de prova, de tal forma que a fissuração não seja proveniente da concentração de tensões na região de apoio. Devido a essa dificuldade, o ACI 544.2R [48] recomenda a utilização de um método brasileiro (ASTM C 496 [49]) para obtenção indireta da resistência à tração. Entretanto, a identificação da primeira fissura no corpo de prova pode ser difícil de ser detectada, e não é possível obter o comportamento após a ruptura da matriz. Existem ainda outros tipos de ensaios de tração indireta, como o *Double Punch Test* [50,51] e o *Double Edge Wedge Splitting Test* [52,53].

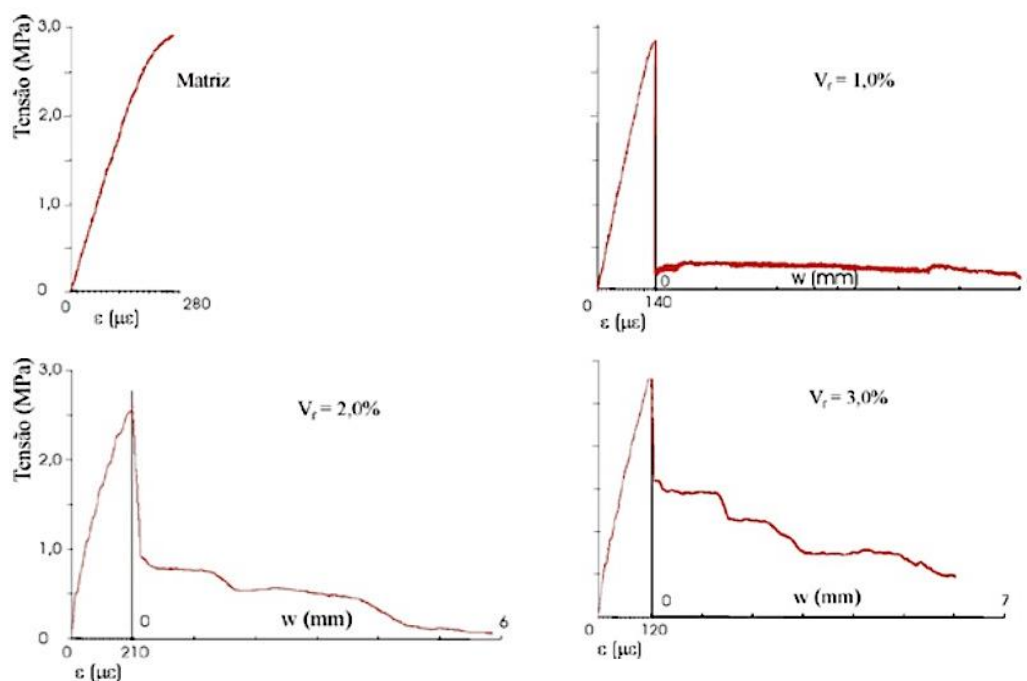


Figura 2.20 – Curvas de tensão-deformação e tensão-abertura de fissura para matriz e compósitos reforçados com diferentes teores de fibra de sisal sob tração direta [46].

2.3.3. Comportamento à flexão

Bentur & Mindess [5] afirmam que o comportamento à flexão de compósitos é diretamente afetado pelo volume e fator de forma das fibras, que estão associados ao volume e comprimento crítico de cada tipo de fibra, e também por sua orientação. Fibras mais longas tendem a se posicionar na direção do comprimento do corpo de prova, resultando em um aumento da resistência [54,55]. Em relação ao teor de fibras, um aumento até o volume crítico, em geral,

resulta em melhores comportamentos. Entretanto, volumes muito superiores ao ideal podem resultar em redução no desempenho do compósito, devido à dificuldade de dispersão das fibras.

A Figura 2.21 apresenta uma curva típica de concretos reforçados com fibras submetidos à flexão. Observam-se três diferentes estágios, sendo que o estágio I, assim como na tração, representa o comportamento linear do compósito até atingir a resistência de fissuração da matriz. O estágio II caracteriza-se por um comportamento não linear no qual ocorre a transferência progressiva da tensão da matriz fissurada para as fibras. Para altos teores de fibras, com a carga crescente as fibras tendem a ser arrancadas gradualmente da matriz até a carga última, representada ponto B. Nesse caso, a resistência à flexão não coincide com a resistência inicial de fissuração do compósito. No estágio III, há o completo arrancamento das fibras e a capacidade de carga passa a ser reduzida progressivamente. No caso de baixos teores de fibras, o estágio II caracteriza-se pelo decréscimo da curva após atingir a resistência inicial de fissuração do compósito que, portanto, coincide com a sua resistência à flexão [40].

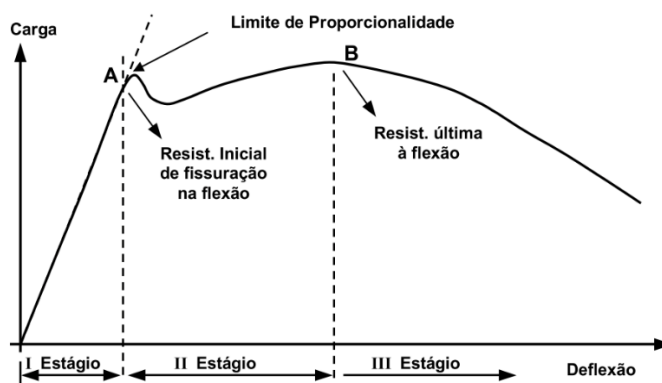


Figura 2.21 – Diagrama esquemático de carga-deflexão típica de concreto reforçado com fibras [40].

Diversos ensaios foram desenvolvidos para caracterizar os compósitos quanto ao seu comportamento à flexão. Os ensaios mais comuns são aqueles que utilizam corpos de prova prismáticos, pois simulam de forma mais realista as situações práticas [56]. Alguns desses ensaios são realizados em corpos de prova sem entalhe, com sistema de aplicação de carga em quatro pontos. Para essa configuração, obtém-se a curva de carga/tensão *versus* deflexão, a qual é medida na metade do seu vão, com a utilização de um dispositivo denominado *yoke*.

Nesse sistema de ensaio o corpo de prova deve romper no terço central, região correspondente ao momento fletor máximo e força cortante igual a zero. Outro tipo de ensaio realizado é caracterizado pela execução de um entalhe no centro da face inferior do corpo de prova. Nesse caso, o carregamento é feito por três pontos e obtém-se a curva de força/tensão *versus* abertura de entalhe (*Crack Mouth Opening Displacement*, CMOD). Essa configuração tem como objetivo reduzir a variabilidade de resposta do material, visto que a formação da fissura sempre ocorre no plano do entalhe [56,57]. A configuração para cada tipo de ensaio encontra-se na Figura 2.22.

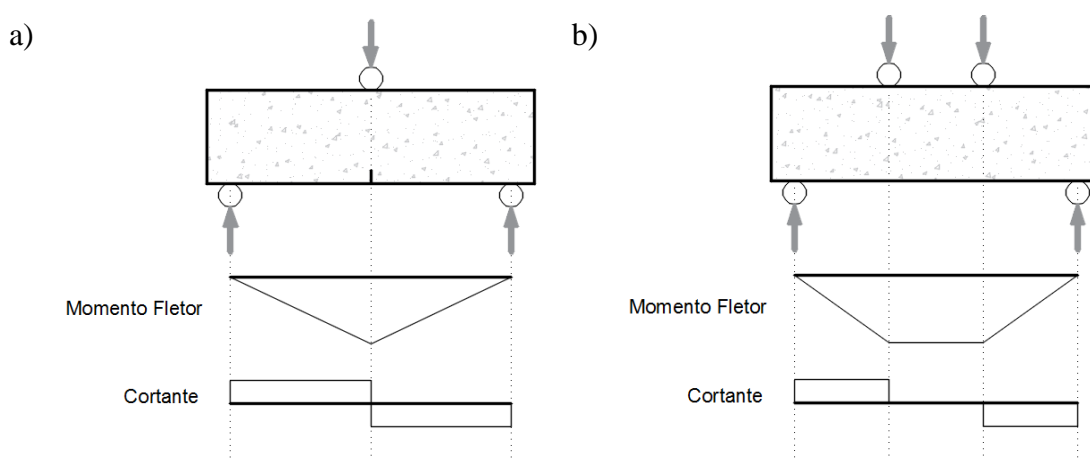


Figura 2.22 – Distribuição dos momentos fletores e esforço cortante para os ensaios em três (a) e quatro pontos (b) (adaptado de [14]).

Além da configuração do ensaio, o sistema operacional do equipamento também tem influência nos resultados obtidos. Em geral, os sistemas de carregamento utilizados dividem-se em dois tipos: sistema *open loop* e *closed loop* [58]. Sistemas *open loop* caracterizam-se pelo controle do ensaio pela velocidade do pistão. Nesse caso, o intervalo entre o ponto de fissuração da matriz e o ponto em que as fibras passam a atuar como reforço não é bem caracterizado. Isso ocorre pois, no momento que a matriz atinge a sua carga máxima e fissura, a carga é transferida para as fibras de forma abrupta, ocorrendo instabilidade [58,59]. Por outro lado, *closed loop* caracteriza-se por um sistema fechado de controle de ensaio, reduzindo a instabilidade pós-pico em ensaios de flexão. As variáveis utilizadas como controle do ensaio são o deslocamento vertical ou abertura da fissura, sendo que, a aplicação de carga varia proporcionalmente à

deformação do corpo de prova [58,59]. A instrumentação externa é utilizada para gerar um sinal de *feedback* para controlar a execução do ensaio.

Um dos primeiros métodos de ensaio à flexão normalizados de corpos de prova prismáticos é o apresentado pela norma japonesa JSCE-SF4 [60]. Nesse caso, o controle é do tipo *open loop*, sendo o deslocamento vertical do pistão a variável de controle. Além disso, o carregamento é realizado em quatro pontos, assim como prescrito pelas normas ASTM C1609 [61] e ASTM C1018 [62]. Entretanto, nesses casos utiliza-se o deslocamento vertical do corpo de prova como variável de ensaio, demandando um sistema *closed loop*. A norma ASTM C1399 [63] não prescreve a utilização de um sistema desse tipo. Entretanto, propõe um procedimento dividido em etapas, as quais tem como objetivo minimizar a instabilidade pós-pico devido a adoção desse tipo de controle. Por outro lado, a norma EN 14651 [64] propõe ensaio de flexão em três pontos, com um sistema *closed loop*, onde a variável de controle do ensaio é a abertura da fissura. A norma RILEM TC 162-TDF [65] também recomenda a realização de ensaios de flexão de prisma em três pontos.

Para viabilização da aplicação de fibras discretas como reforço estrutural, foi publicado em 2010 o novo *fib Model Code* [66], o qual recomenda práticas que servem como base para os métodos de dimensionamento de estruturas utilizando concreto reforçado com fibras discretas [57]. O método de ensaio recomendado para controle de qualidade desses materiais é o ensaio de flexão em três pontos de acordo com a norma EN 14651 [64]. As resistências residuais obtidas a partir da execução do ensaio são relacionadas com o seu Estado Limite de Serviço (ELS) e o Estado Limite Último (ELU), de forma a obter as equações constitutivas do material e classificar o seu comportamento quanto à tenacidade [9,57,66]. Entretanto, esse ensaio é considerado de difícil execução, sendo observada grande dispersão entre resultados obtidos por diferentes laboratórios [9].

A partir do ensaio de flexão em três pontos em um prisma com entalhe, Yin et al. [42] observaram que concretos reforçados com fibras de polipropileno (virgens e recicladas) apresentaram uma redução da carga com o aumento do CMOD, após atingida a carga de fissuração da matriz (Figura 2.23). O mesmo comportamento foi observado por Lee et al. [67] a partir do estudo do efeito da variação da porcentagem em volume de fibras de polipropileno (0,25, 0,5, 0,75 e

1%) em prismas de concreto submetidos à flexão em quatro pontos (Figura 2.24). Observou-se um aumento da capacidade de carga após a fissuração com o progressivo aumento nos teores de fibra na matriz.

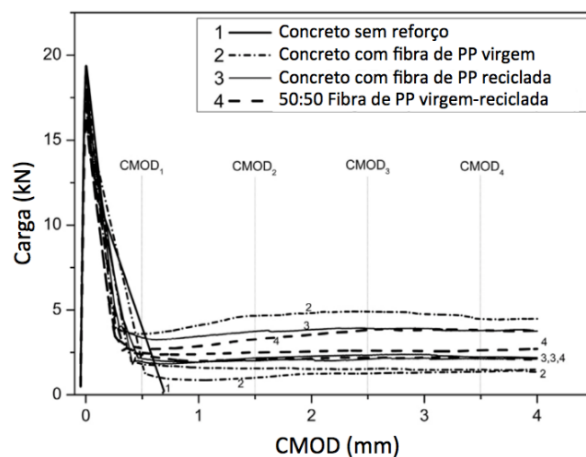


Figura 2.23 – Curvas de carga x CMOD de vigas de concreto reforçadas com fibra de polipropileno (adaptado de [42]).

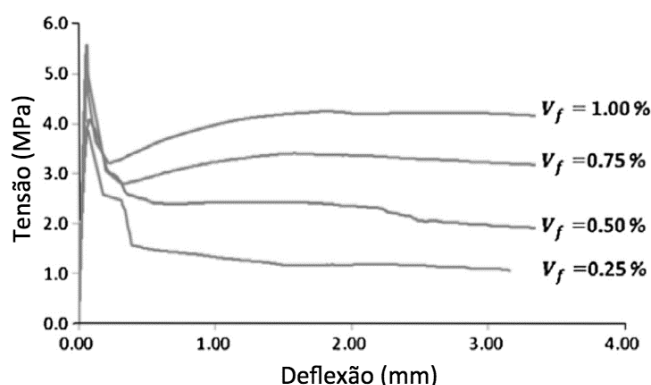


Figura 2.24 – Curvas tensão x deformação obtidas de ensaios de flexão com diferentes volumes de fibras de polipropileno (adaptado de [67]).

Santos *et al.* [68] avaliaram o comportamento de diferentes comprimentos de fibras discretas de sisal utilizadas como reforço de uma matriz cimentícia (dosagem de 2%), a partir de ensaios de flexão em três pontos. É possível observar pelas curvas obtidas (Figura 2.25) que a adição de fibras eliminou o comportamento frágil da matriz, apresentando maior capacidade de deformação após a sua ruptura. Além disso, o progressivo aumento no comprimento da fibra resultou em melhoria no comportamento pós-fissuração.

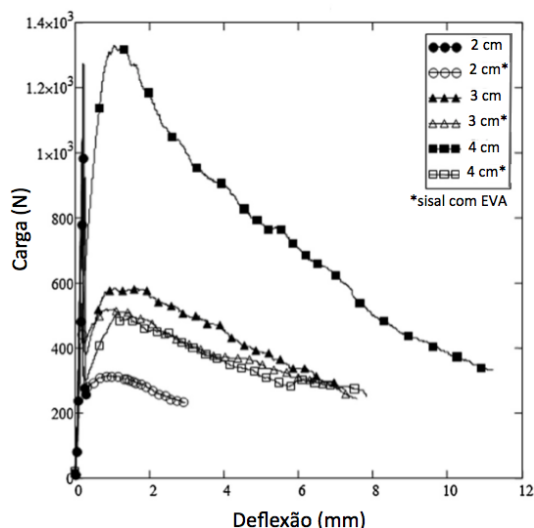


Figura 2.25 – Curvas carga-deflexão de compósitos reforçados com sisal (adaptado de [68]).

Muitos estudos do concreto reforçado com fibras submetido a esforços de flexão são realizados sob carregamento monotônico. Entretanto, poucos são os que avaliam esses compósitos sob carregamento cíclico [54,55]. Similarmente à execução de ensaios de flexão em três pontos, o comitê RILEM TC 89-FMT [69] recomenda a realização de ensaios de flexão cíclicos em corpos de prova prismáticos com entalhe, submetidos a ciclos de carregamento e descarregamento (Figura 2.26). Com a curva carga *versus* CMOD, obtém-se alguns parâmetros característicos dos ciclos: a carga no início de cada ciclo, o valor de CMOD residual e a conformidade (C_i , C_u) dos ciclos. A partir desse procedimento, é possível a obtenção de parâmetros da fratura suficientes para caracterização da resistência à fratura e dissipação de energia do compósito [69,70]. Pesquisas anteriores mostraram que a variação de conformidade observada a cada ciclo executado representa a dissipação de energia com o desenvolvimento da abertura da fissura durante o carregamento [54,55,70–72].

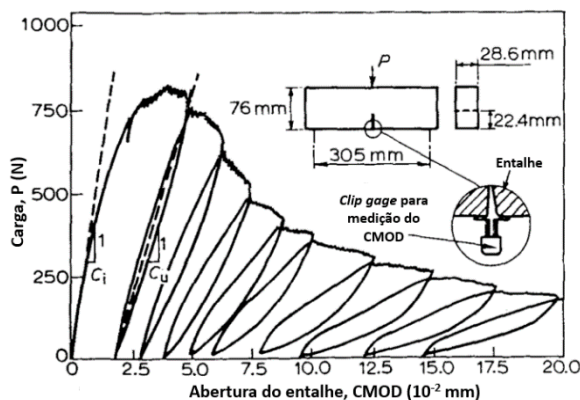


Figura 2.26 – Curva carga *versus* CMOD experimental típica (adaptado de [69]).

2.4.

Durabilidade do concreto reforçado com fibras

É comum que o comportamento mecânico de um compósito seja a principal propriedade usada para avaliar a eficiência desses materiais, que serão utilizados em estruturas. Entretanto, a avaliação da durabilidade também é de suma importância, visto que esses materiais devem ser duráveis para garantir a integridade da estrutura, obedecendo ao ciclo de vida pré-determinado. Em geral, essa durabilidade está associada à degradação da fibra, da interface e da própria matriz [5].

Em relação a degradação do compósito cimentício reforçado com fibras naturais, alguns fatores são determinantes: a elevada taxa de variação dimensional das fibras com as mudanças de umidade do ambiente, a degradação em ambiente alcalino, ataque biológico e a mineralização [5,73]. As fibras naturais são formadas pela celulose, que é o seu componente estrutural mais importante. As cadeias de celulose formam as microfibrilas, que são mantidas unidas pela hemicelulose e lignina, formando as fibrilas. As fibrilas, por sua vez, são agrupadas em camadas, formando a estrutura da fibra [73]. Nesse contexto, de acordo com os teores de cada um desses componentes das fibras, maior será sua degradação devido a algum dos processos listados.

A capacidade de absorção de umidade das fibras está relacionada com o conteúdo de hemicelulose que ela apresenta sendo que, quanto maior esse teor, maior será a absorção [74]. A movimentação de água pode ocorrer no comprimento da fibra, o que provoca inchaço e fissuração na fibra. Essa variação de volume poderá ter influência na interação fibra-matriz envolvida, pois a movimentação da água dentro do compósito pode modificar as características da zona de transição interfacial [73]. A presença de água incentiva a formação de novos produtos de hidratação, resultando em uma zona mais densa. Para interface mais porosa, o mecanismo principal é o arrancamento da fibra. Entretanto, com a densificação dessa região, o mecanismo passa a ser a fratura da fibra, devido à elevada aderência em uma matriz menos porosa [73]. Além disso, os novos produtos de hidratação formados pela presença de água, principalmente o hidróxido de cálcio, podem migrar para as paredes, lumens e vazios das fibras, ocasionando a sua mineralização [12,27,75–77].

Dentre os mecanismos de degradação alcalina das fibras naturais, dois tipos são considerados: efeito *peeling off* e a hidrólise alcalina [5]. O efeito *peeling off* consiste na liberação dos grupos finais das cadeias moleculares da celulose em função da reação com os íons OH^- , enquanto a hidrólise alcalina consiste na divisão das cadeias moleculares, reduzindo seu nível de polimerização [5]. Para as fibras de sisal, o mecanismo principal de ataque alcalino está associado à dissolução e decomposição da hemicelulose e lignina da lamela média, quebrando as ligações entre as células individuais (Figura 2.27). Como consequência, há a redução da capacidade de reforço dessas fibras [5,12]. O ataque biológico, por sua vez, é causado por bactérias e fungos que podem crescer em um ambiente úmido durante ciclos de molhagem e secagem, em combinação a um clima quente [73].

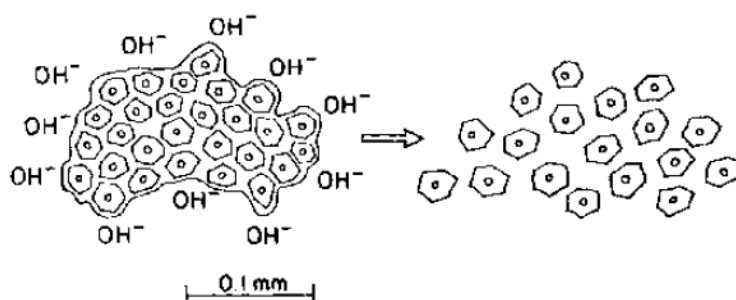


Figura 2.27 – Degradação da fibra de sisal no concreto pela decomposição e dissolução da lamela média devido a alcalinidade da água dos poros [5].

Existem dois métodos principais para melhorar a durabilidade de fibras naturais em uma matriz cimentícia. Uma delas é a proteção das fibras com um *coating*, selando a fibra para evitar o efeito da presença da água, principalmente devido a alcalinidade da água dos poros internos da matriz [75]. Outro método é a modificação da própria matriz, com intuito de reduzir o teor de hidróxido de cálcio. A substituição de cimento por materiais pozolânicos vem sendo estudada por diversos pesquisadores [76,78–80], e mostra-se como uma boa alternativa para garantia da integridade das fibras [73]. Uma forma de avaliar o processo de degradação dessas fibras é por meio de ensaios de ciclos de molhagem e secagem, verificando de que forma esse processo influencia no comportamento mecânico após realização do envelhecimento acelerado [75].

Silva *et al.* [27] realizaram ensaios mecânicos para avaliar a influência de ciclos de imersão em água quente no comportamento mecânico dos compósitos

reforçados com fibra de sisal. Como conclusão, a resistência a flexão foi em média 3,8 vezes maior e a ductilidade 42,4 vezes maior para os compósitos formados pela matriz sem hidróxido de cálcio em relação à matriz convencional. A matriz sem hidróxido de cálcio foi obtida a partir da substituição parcial de 50% de cimento do traço por 30% de metacaulim e 20% de resíduo de tijolo moído. Melo Filho *et al.* [80] observaram que compósitos reforçados com fibras longas de sisal formados por matrizes convencionais, perderam completamente sua ductilidade após 25 ciclos de molhagem e secagem, sendo que após 10 ciclos já foi observada degradação no seu comportamento mecânico.

Toledo Filho *et al.* [79] observaram que a execução de 25 ciclos de molhagem e secagem foi suficiente para modificação no comportamento de uma matriz cimentícia reforçada com fibras longas de sisal de *strain hardening* para *strain softening*, associado à degradação pela mineralização das fibras. A substituição de 50% do cimento do traço, resultando em uma matriz livre de hidróxido de cálcio, foi suficiente para evitar completamente a degradação dessas fibras. Bergstrom & Gram [12] também observaram que a durabilidade de compósitos reforçados com fibra de sisal é melhorada com a redução da alcalinidade da solução dos poros da matriz, obtida a partir da substituição de 45% de cimento por sílica ativa. Outros autores comprovaram que a substituição parcial de cimento por diferentes materiais pozolânicos garantiram maior durabilidade das fibras naturais [76,78,80,81].

As fibras sintéticas, por outro lado, são conhecidas por seu bom comportamento em ambiente alcalino e por serem consideradas quimicamente inertes [5,82]. Entretanto, existem outros problemas associados a utilização dessas fibras. Salvador [14] mostrou que as fibras de polipropileno podem sofrer processo de degradação causada pela mistura com os agregados, apresentando superfície áspera e irregular devido ao processo abrasivo resultante.

2.5. Aplicações

Em geral o uso de fibras está associado a três aplicações principais [5]. Uma delas é em componentes finos, onde barras de aço não podem ser empregadas, e as fibras passam a exercer o papel de reforço principal. Nesse caso, a concentração de fibras é relativamente alta (em torno de 5% em volume) para que

seja possível se obter o comportamento *strain hardening*, ou seja, aumento da resistência pós fissuração e ductilidade. Uma segunda aplicação trata da necessidade em aumentar a ductilidade e absorção de energia localmente, como no caso de revestimento de túneis e estruturas que devem ser resistentes a carga explosiva. A terceira aplicação é a adição de fibras como reforço secundário, controlando as fissuras provenientes de variações na umidade e temperatura. Nesse caso, a presença de fibras resulta em ductilidade após a fissuração, com tensões inferiores à tensão última resistida pelo compósito [5].

Apesar das aplicações citadas serem possíveis para qualquer tipo de fibra, há aplicações específicas que garantem melhor desempenho para cada tipo existente. Fibras naturais, por exemplo, além das aplicações convencionais em componentes finos, podem ser utilizadas na estabilização do solo. Fibras naturais estão presentes na construção civil principalmente no desenvolvimento de materiais de construção de baixo custo para utilização em países em desenvolvimento. Também podem ser utilizadas com agentes de cura interno, devido à alta absorção de água, sendo utilizadas na produção de componentes de concreto para realização do processo de autocura [5,83].

Fibras sintéticas, por sua vez, são utilizadas principalmente em aplicações com baixo consumo de fibras e em estruturas contínuas. As macrofibras são utilizadas, em geral, como substitutas parciais do reforço convencional, enquanto que as microfibras são utilizadas para redução da fissuração por retração [57]. Segundo Figueiredo [6], o grande mercado para as macrofibras de polipropileno é na aplicação em pisos e pavimentos, além da utilização em concretos projetados e pré-fabricados. A presença dessas fibras proporciona melhor distribuição das fissuras, com larguras limitadas no estado limite de serviço do elemento estrutural [57].

Para a aplicação em pisos e pavimentos, a vantagem da utilização de fibras de polipropileno é a eliminação da necessidade de posicionamento da armadura, reduzindo tempo e custo de mão de obra dessa etapa. A mistura da fibra pode ser feita no próprio caminhão betoneira, e as fibras são homogeneamente distribuídas na matriz, de tal forma que proporcionam reforço a todo o piso [6]. Para utilização como concreto projetado e concreto pré-fabricado, as fibras eliminam a necessidade da tela metálica. Para o revestimento de túneis, por exemplo, além da eliminação da fase de instalação da tela metálica, a espessura do revestimento

pode ser reduzida pois, não mais é necessário o cobrimento que deveria existir no caso de utilização da tela [6]. Com a projeção do concreto reforçado com fibras, as fibras são alinhadas em duas dimensões preferenciais, resultando em maior eficiência da capacidade de reforço do compósito [5]. Tradicionalmente, para elementos pré-fabricados, as fibras de aço são mais utilizadas. Entretanto, as macrofibras poliméricas podem proporcionar maior durabilidade aos elementos expostos a ambientes agressivos, como aduelas e tubos para água e esgoto [5] e dormentes de concreto [84].

A utilização dessas fibras em aplicações de maior responsabilidade estrutural como reforço primário foi incentivado pela publicação do *fib Model Code* [66] em 2010. Esse documento apresenta recomendações quanto a utilização do concreto reforçado com fibras para funções estruturas, permitindo maior conforto para os projetistas no dimensionamento de estruturas utilizando esse tipo de compósito [9]. Entretanto, ainda há limitações principalmente pela dificuldade na execução dos ensaios de controle do material, que apresentam grande variação quando executados por diferentes laboratórios [9,57].

Apesar da vasta utilização das fibras de polipropileno para aplicações semi-estruturais, estas requerem mais energia no processo de produção, são provenientes de fontes não renováveis e não são biodegradáveis. Portanto, a possibilidade de substituição desse tipo de fibra por fibras naturais vem se tornando cada vez mais importante dentro do conceito de sustentabilidade, visto que sua eficiência como reforço em concretos já foi confirmada por diversos autores.

3

Desenvolvimento e caracterização dos materiais

3.1.

Introdução

A fim de serem utilizadas em compósitos, as matrizes devem atender a alguns requisitos em relação ao processo de produção. Tais exigências variam conforme as propriedades mecânicas e durabilidade esperadas do compósito, além das propriedades da fibra. A consistência da matriz é um dos principais pontos a serem considerados pois, em geral, a trabalhabilidade da mistura pode ser significativamente prejudicada com a adição de fibras [4,41,54,85–88]. Deve-se garantir que a matriz tenha consistência adequada para que a aderência e a transferência de cargas entre a mesma e a fibra sejam garantidas, independente da dosagem de fibra utilizada.

Para tanto, a matriz M1 foi adotada, com traço adaptado a partir do concreto desenvolvido por Marangon [89], uma vez que este concreto apresentou bom comportamento no estado fresco, mesmo com altos teores de fibra de aço. Além disso, um segundo traço (M2) foi proposto com objetivo de se obter uma matriz com baixo teor de hidróxido de cálcio, a fim de contribuir para a durabilidade das fibras naturais [12,27,28,76,78–80]. Para tal, metade da massa total de cimento do traço foi substituída por cinza volante e metacaulim.

Neste capítulo, são apresentadas as propriedades dos materiais que compõem as matrizes, assim como as propriedades das matrizes no estado fresco e endurecido e as características das fibras de sisal e polipropileno.

3.2.

Programa Experimental

3.2.1.

Materiais e dosagem

O cimento utilizado nas matrizes foi o cimento Portland CP II F-32 do fabricante *Lafarge Holcim* que, de acordo com a norma brasileira NBR 11578

[90], apresenta resistência à compressão mínima de 32 MPa aos 28 dias. O agregado graúdo utilizado foi a brita 0, com dimensão máxima de 12,5 mm. O teor de agregado graúdo variou conforme com a dosagem de fibra adicionada na mistura, considerando volumes equivalentes. Além disso, foram utilizadas duas frações de agregados miúdos de areia natural quartzosa: fração S1, passante na peneira 0,85 mm e retida na peneira 0,15 mm e fração S2, passante na peneira 4,8 mm retida na peneira 0,85 mm. Portanto, a areia natural quartzosa passou pelo processo de peneiramento para obtenção das frações determinadas no traço. A areia peneirada resultante apresentou dimensão máxima característica de 2,36 mm e módulo de finura 2,62, classificada como agregado miúdo da zona ótima de acordo com a NBR 7211 [91]. As composições granulométricas da areia, assim como a do agregado graúdo, foram determinadas de acordo com a NBR NM 248 [92] e estão apresentadas na Figura 3.1.

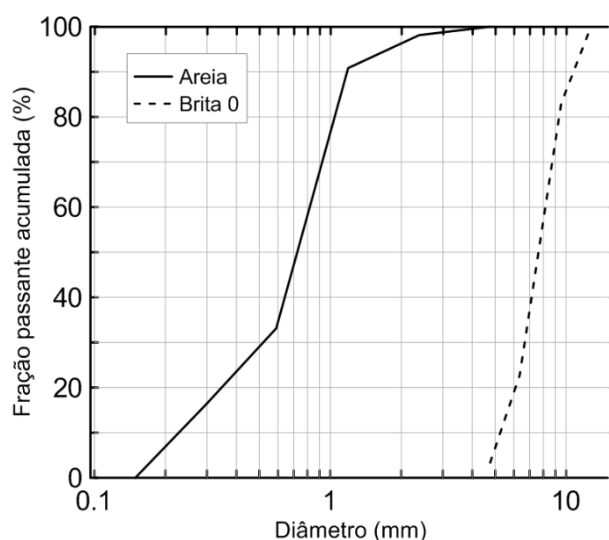


Figura 3.1 – Distribuição granulométrica dos agregados.

Um alto teor de cimento na dosagem de um concreto aumenta consideravelmente seu custo e resulta em altas temperaturas liberadas durante as reações de hidratação. Devido a esse fato, é comum que se realize substituição parcial de cimento por adições minerais, tais como cinza volante, sílica ativa, escória de alto forno e fíler calcário [93]. Essas adições contribuem para redução da porosidade da matriz, devido a efeitos químicos (reações pozolânicas) e/ou mecânicos (efeito fíler), resultando em maior descontinuidade dos poros. Como consequência, a permeabilidade e velocidade de penetração de agentes agressivos

nas estruturas de concreto também é reduzida, tornando-as mais duráveis e resistentes [94].

As adições minerais usadas nos traços das matrizes M1 e M2 foram cinza volante (*POZOFLY*[®]), sílica ativa (*SILMIX*[®] tipo D), sílica 325 (pó de quartzo) e metacaulim (empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio Ltda). Além da melhoria em relação ao empacotamento da mistura [1,95], o efeito químico pelo desenvolvimento das reações pozolânicas resultam em menores teores de hidróxido de cálcio na matriz cimentícia [27,75]. A Figura 3.2 apresenta as composições granulométricas da sílica ativa, cinza volante e sílica 325 utilizadas no traço, obtidas por Pereira [4]. A composição química do metacaulim, fornecida pelo fabricante, está apresentada na Tabela 3.1.

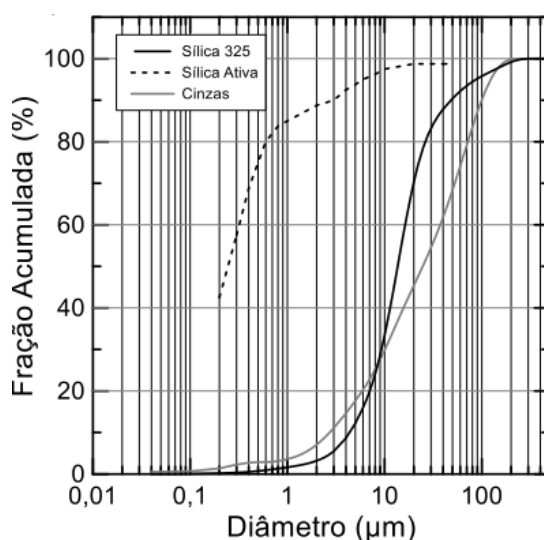


Figura 3.2 – Distribuição granulométrica das adições [4].

Tabela 3.1 – Composição química e massa específica do metacaulim de acordo com o fabricante.

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

Além das adições minerais, aditivos químicos podem ser incorporados na mistura para conferir ao concreto desempenhos diferenciados. Nesse caso, visando uma maior fluidez da matriz mantendo resistências elevadas, optou-se pela utilização de aditivo superplastificante *MasterGlenium*[®] 51, produzido pelo fabricante BASF dentro do estabelecido pela norma NBR 11768 [96]. O teor de superplastificante foi calculado em relação à massa de cimento presente na composição das misturas (6% em massa), sendo que, no ajuste do traço foi considerado um teor de sólidos de 31,5%, dentro do intervalo de controle do fabricante ($30,5 \pm 1,5\%$).

As dosagens das matrizes M1 e M2 são apresentadas na Tabela 3.2. Para o traço da matriz M2, 50% da massa total de cimento foi substituída por 30% em massa de metacaulim e 20% em massa de cinza volante. Com isso, esperou-se menores teores de hidróxido de cálcio na matriz M2 aos 28 dias de cura, quando comparada à matriz M1 [12,27,28,68,76,78–80].

Tabela 3.2 – Composição da matriz M1 e M2.

Composição	Matriz M1 (kg/m³)	Matriz M2 (kg/m³)
Agregado Graúdo	492,0	492,0
Agregado Miúdo S1	826,7	826,7
Agregado Miúdo S2	99,6	99,6
Cimento	360,0	180,0
Cinza Volante	168,0	224,0
Metacaulim	0,0	94,8
Sílica 325	70,0	70,0
Sílica Ativa	45,0	45,0
Água	155,7	155,7
Superplastificante	21,6	21,6

O processo de mistura das matrizes seguiu o seguinte procedimento:

- mistura dos agregados (brita, areia S1 e S2) com 70% da água do traço por 1 minuto;
- inserção de todos os aditivos minerais determinados no traço (cinza volante, sílica ativa, sílica 325, metacaulim) por mais 1 minuto;
- mistura de todo o cimento do traço por mais 1 minuto;
- adição do superplastificante com o restante da água (30%) por mais 10 minutos ou até que se obtivesse uma matriz consistente.

De acordo com o volume que se desejava obter, um misturador adequado era utilizado, sendo eles: betoneira com capacidade de 400 l, misturador planetário com capacidade de 30 l, argamassadeira planetária com capacidade de 20 e 5 l.

3.2.2. Propriedade das matrizes no estado fresco

3.2.2.1. Consistência

Para avaliação das matrizes no estado fresco, ensaios de espalhamento foram realizados com base na norma NBR 15823-2 [97]. Dentre as principais características analisadas neste tipo de ensaio, tem-se a medição do espalhamento, distribuição dos materiais constituintes, forma assumida pelo volume de concreto e avaliação da segregação e exsudação.

Para execução do ensaio utilizou-se um molde em forma de tronco de cone (cone de Abrams), com as dimensões explicitadas na Figura 3.3. O molde era posicionado sobre uma base metálica e preenchido com as misturas até a borda superior. O molde era então retirado verticalmente de forma cuidadosa e, após a retirada do molde, eram realizadas duas medições do diâmetro da circunferência formada pelo escoamento total da mistura. O resultado foi a média entre os valores de diâmetros obtidos. Uma redução na medida do diâmetro indicou menor fluidez do material.

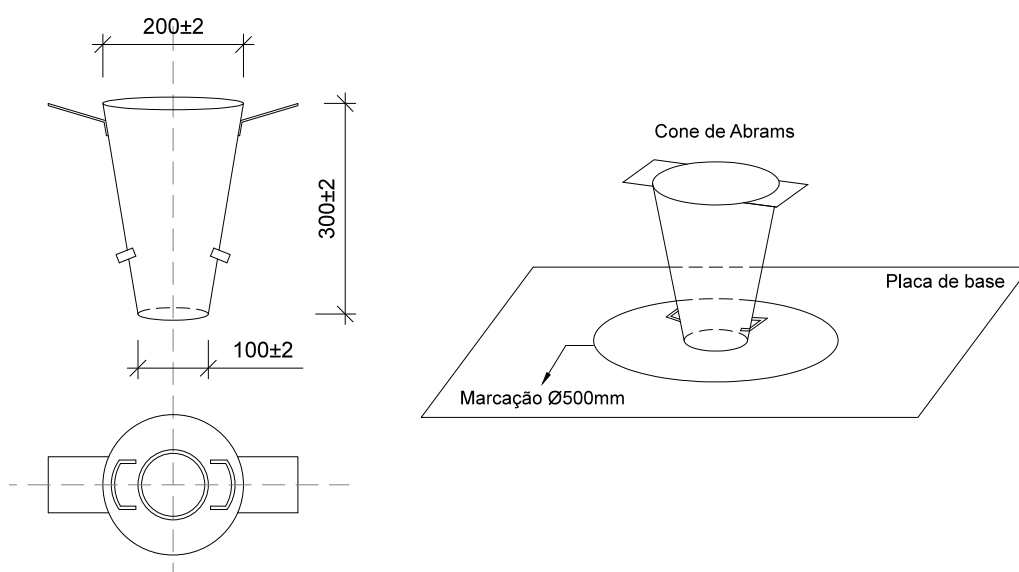


Figura 3.3 – Dimensões (em milímetros) do cone de Abrams e detalhe da placa de base.

Os resultados obtidos a partir do ensaio de espalhamento para as matrizes M1 e M2 são apresentados na Tabela 3.3. Foram realizadas três séries de ensaios para cada matriz, sendo que o valor apresentado corresponde à média do resultado dos três ensaios consecutivos. Observa-se que a matriz M1 apresentou maior fluidez quando comparada à matriz M2. Isso é explicado devido ao fato de que matrizes com alta proporção de metacaulim apresentam maior demanda de água devido à finura dos grãos desse material [98], influenciando de forma negativa a sua consistência. Apesar disso, em nenhum dos casos foram observados problemas relacionados com a segregação dos materiais do traço ou exsudação de água. De acordo com a NBR 15823-2 [97], a matriz M1 está dentro da classificação de concreto autoadensável, com classe de espalhamento *SF1* (550 a 650 mm), enquanto que a matriz M2 não se enquadra nessa classificação. O resultado final do espalhamento das matrizes está apresentado na Figura 3.4.

Tabela 3.3 – Resultados do ensaio de consistência para as matrizes M1 e M2.

Matriz	Diâmetro médio (mm)
M1	650 (5)
M2	479 (2)

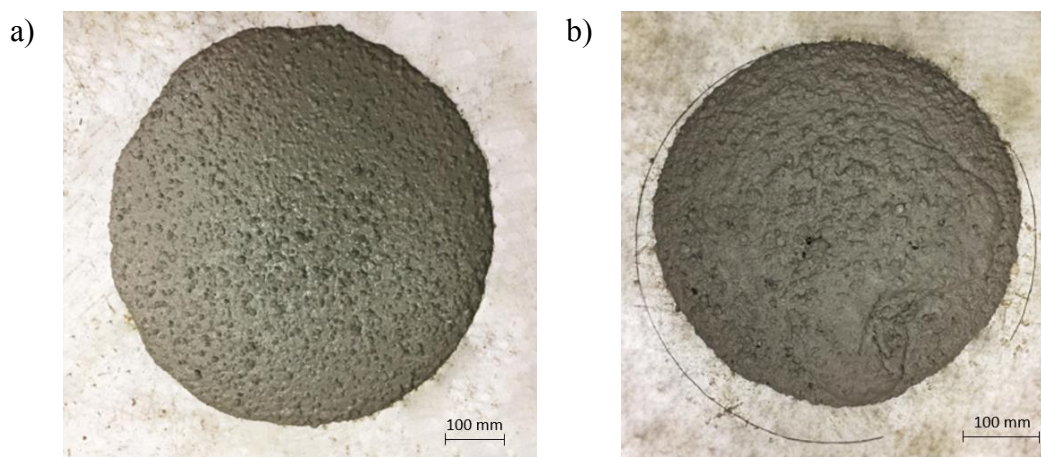


Figura 3.4 – Resultado final do ensaio de espalhamento da matriz M1 (a) e M2 (b).

3.2.3. Propriedades das matrizes no estado endurecido

3.2.3.1. Análise térmica

Para avaliação da composição das matrizes, foram realizados ensaios de termogravimetria. Esse ensaio consiste em uma técnica de análise térmica que avalia a perda de massa de uma determinada amostra em função do aumento de temperatura a que o material é submetido [99]. Conforme mencionado anteriormente, foi realizada a substituição parcial do cimento na matriz M2. Portanto, foi importante avaliar de que forma essa substituição influenciaria na composição química da nova matriz.

Foram produzidas amostras de pastas compostas por cimento, cinza volante, sílica ativa, sílica 325, metacaulim e água, seguindo as proporções estabelecidas para cada matriz adotada, M1 e M2. As avaliações foram realizadas após 28 dias de cura. As análises termogravimétricas foram realizadas no equipamento da marca SETARAM, modelo *SETSYS Evolution* 1750 (Figura 3.5). Os ensaios foram realizados em cadinhos de platina. O equipamento operou a uma taxa de aquecimento de 10°C/min, de 35°C até 900°C, em atmosfera de nitrogênio com fluxo do registrador de 10 ml/min.



Figura 3.5 – Equipamento utilizado para realização da análise térmica nas matrizes cimentícias.

A Figura 3.6 apresenta as curvas de termogravimetria (TG) e termogravimetria derivada (DTG) das matrizes avaliadas. Nas curvas de DTG, tem-se que o pico entre 35°C e 200°C corresponde à decomposição do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e etringita [80,100,101]. Além disso, de acordo com alguns autores [102], o segundo pico apresentado pela matriz M2 nessa faixa de temperatura indica a degradação de fases aluminato (aluminato de cálcio hidratado). Também há indicação da presença de fases aluminato pela matriz M1, em menores proporções, dentro da faixa de 200°C a 400°C [102]. No pico apresentado pela matriz M1 entre 450°C e 600°C, ocorre a desidratação do hidróxido de cálcio [80,100,101,103]. Finalmente, entre 750°C e 900°C, ocorre a decomposição do carbonato de cálcio e outros carbonatos presentes na composição da matriz [103].

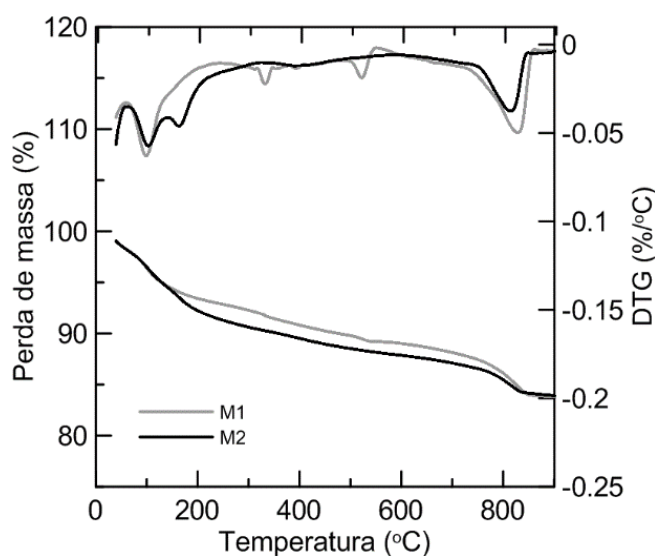


Figura 3.6 – Curvas de TG/DTG das matrizes M1 e M2.

Conforme pode ser observado nas curvas de DTG, a matriz M2 apresentou maior consumo de hidróxido de cálcio, evidenciado pela eliminação do pico referente à degradação desse composto. Por outro lado, a matriz M1 apresentou pico entre o intervalo de temperatura de degradação do hidróxido de cálcio, pois não houve consumo desse material na fase de hidratação da matriz. Esse resultado está em concordância com estudos anteriores [6]–[12], onde a redução da proporção de cimento e aumento no teor de materiais pozolânicos, como metacaulim e cinza volante, garantiu à matriz menor teor de hidróxido de cálcio.

3.2.3.2.

Comportamento mecânico sob compressão uniaxial

Ensaio de compressão simples e determinação do módulo de elasticidade à compressão axial foram realizados aos 28 dias, de acordo com as normas NBR 5739 [104] e NBR 8522 [105], respectivamente. Além disso, visando avaliar a influência da substituição de cimento da matriz M1 por metacaulim e cinza volante para a matriz M2 [106], ensaios de compressão uniaxial foram realizados em diferentes idades (84, 168 e 224 dias).

Foram moldados cilindros de 200 mm de altura e 100 mm de diâmetro. Previamente à moldagem, o molde foi preparado com uma demão de óleo desmoldante e, durante a moldagem, o concreto foi adensado apenas por vibração externa, com golpes externos com martelo de borracha. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e mantidos submersos em água saturada com hidróxido de cálcio durante todo o tempo de cura. Aproximadamente 24 horas antes do ensaio, os corpos de prova passaram pelo processo de faceamento da base e do topo para garantir a regularização da superfície e paralelismo entre as faces. Com isso, garante-se que a transferência de tensões durante o carregamento seja uniforme.

Os ensaios foram realizados em uma máquina de ensaios da fabricante *Controls*, modelo MCC8, servo-controlada, com capacidade de carga de 2000 kN e velocidade de carregamento de 0,35 MPa/s. Quando era de interesse a determinação do módulo de elasticidade, dois transdutores de deslocamento verticais (LVDT) acoplados a anéis cilíndricos foram posicionados no entorno do corpo de prova para a medição da deformação (Figura 3.7). O valor de deformação do corpo de prova foi obtido pela relação entre o valor médio do deslocamento medido e o comprimento inicial que os transdutores cobriam. A tensão foi calculada como sendo a relação entre a carga aplicada e a área da seção transversal do corpo de prova. O módulo de elasticidade corresponde ao coeficiente angular da região inicial da curva tensão *versus* deformação, até aproximadamente 30% da tensão máxima. Cada resultado obtido corresponde à média de resultados de três ensaios consecutivos. A Tabela 3.4 apresenta os resultados de resistência, módulo e desvio padrão das matrizes M1 e M2 em diferentes idades.

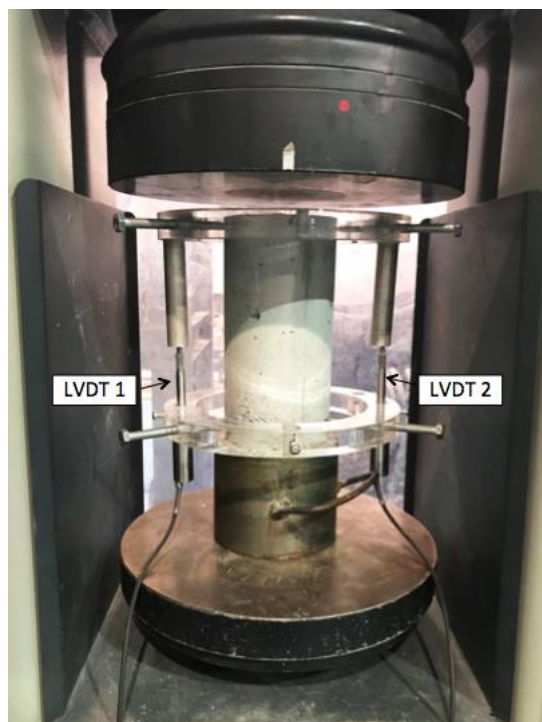


Figura 3.7 – Corpo de prova cilíndrico pronto para ensaio de compressão axial com LVDTs como instrumentação externa.

Tabela 3.4 – Resumo dos resultados obtidos a partir do ensaio de compressão axial.

Idade (dias)	Matriz	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
28	M1	91,67 (1,55)	47,51 (3,40)
	M2	57,02 (1,05)	33,69 (1,62)
84	M1	91,73 (2,35)	-
	M2	60,29 (1,41)	-
168	M1	91,95 (1,08)	-
	M2	66,08 (3,54)	-
224	M1	-*	-
	M2	70,14 (2,48)	-

*O ensaio de compressão com 224 dias para a matriz M1 não foi realizado.

A partir dos resultados obtidos observa-se que a resistência inicial da matriz M2, aos 28 dias, apresentou valor inferior ao obtido pela matriz M1. Esse fato pode ser explicado pela redução do teor de cimento, importante na resistência da matriz nas primeiras idades. Menos cimento, em geral, implica em menos produtos formados pelas reações de hidratação aos 28 dias [107]. Apesar disso, é importante destacar o fato de que mesmo com substituição de 50% do cimento do

traço, a redução na resistência à compressão aos 28 dias não foi proporcional, sendo de 37,8%.

Em idades mais avançadas, observa-se um aumento progressivo das resistências das matrizes M1 e M2 devido ao desenvolvimento das reações pozolânicas. Os compostos quimicamente ativos das adições minerais reagem com o hidróxido de cálcio, que é produzido pela hidratação dos silicatos do cimento Portland, formando novos produtos hidratados. Como o hidróxido de cálcio contribui pouco para a resistência da matriz cimentícia, seu consumo a partir dessas reações proporciona uma estrutura química e mecanicamente mais resistente [106,108]. Para a matriz M1, foi observado um aumento de apenas 0,31% na resistência à compressão axial após 168 dias, quando comparada à resistência obtida aos 28 dias. Por outro lado, a matriz M2 apresentou um acréscimo de 16% na resistência no mesmo período considerado (Figura 3.8). Aos 224 dias, esse ganho foi de 23% para a matriz M2.

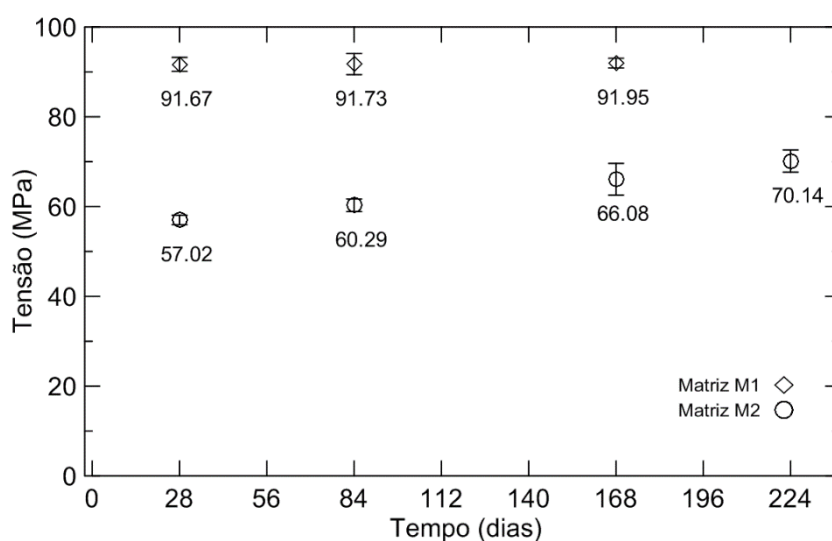


Figura 3.8 – Gráfico comparativo do desenvolvimento da resistência à compressão em diferentes idades.

3.2.4. Fibras

As fibras de sisal utilizadas nesse trabalho foram extraídas das folhas da planta *Agave sisalana* por um processo mecânico chamado decorticação [30,109,110]. As fibras são provenientes do município de Valente (Bahia), e foram recebidas agrupadas em fardos de fibras longas. Entretanto, antes da

utilização dessas fibras como reforço, foi necessária a realização de um procedimento preliminar para retirada das impurezas e para deixá-las adequadas para utilização. Esse procedimento consistiu na submersão das fibras em água a $70 \pm 5^\circ\text{C}$, por uma hora. Posteriormente, as fibras foram secas ao ar por 48 horas e, finalmente, foram separadas e cortadas no comprimento pré-estabelecido de $50 \pm 1 \text{ mm}$ (Figura 3.9). Como se trata de uma fibra de origem natural, há uma grande variabilidade nas características físicas e mecânicas encontradas por diferentes autores (item 2.2.2.2). Essa variação pode ser justificada por diferentes fatores que influenciam nas suas características, como por exemplo as propriedades do solo, condições climáticas e geográficas, além das variações nos procedimentos de ensaio [30,111].

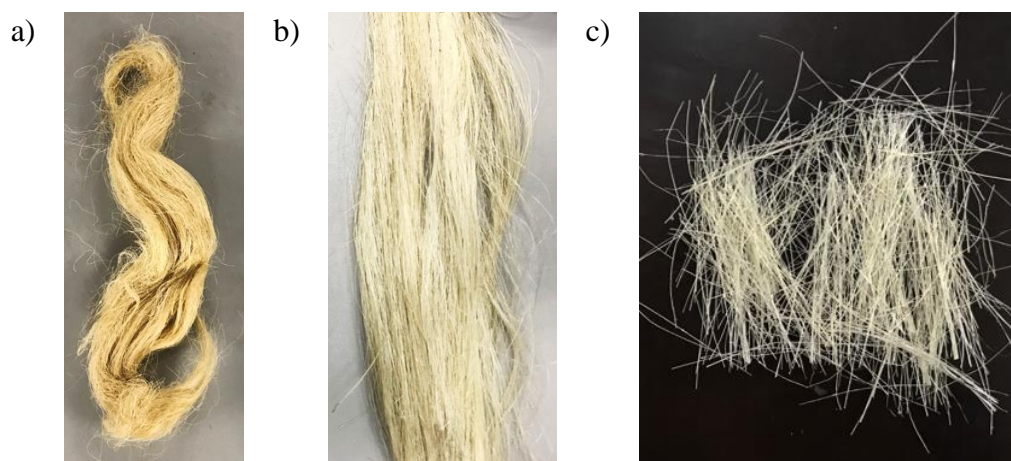
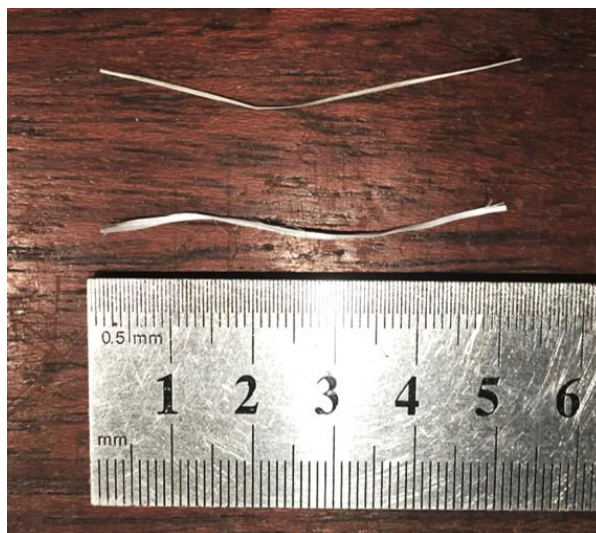


Figura 3.9 – Fibras de sisal previamente ao processo de tratamento térmico (a) e após passarem pelo tratamento, serem separadas e cortadas (b,c).

As fibras de polipropileno, por sua vez, foram recebidas prontas para a sua utilização. Trata-se de macrofibras sintéticas de 51 mm de comprimento, utilizadas comercialmente em aplicações estruturais. As principais características destas macrofibras, segundo informações fornecidas pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 3.5. As fibras apresentam geometria torcida, que visa facilitar o procedimento de mistura assim como melhorar a ancoragem mecânica na interface da fibra com a matriz. Além disso, cada fibra é resultado da união de cerca de 3 fios agrupados entre si, conferindo à fibra seções transversais irregulares ao longo do comprimento. Na Figura 3.10 é possível visualizar o aspecto físico das duas fibras utilizadas.

Tabela 3.5 – Características principais da fibra de polipropileno disponibilizadas pelo fabricante.

Densidade (g/cm ³)	0,92
Comprimento (mm)	51
Fator de forma	74

**Figura 3.10** – Detalhe da fibra de sisal e polipropileno prontas para utilização como reforço discreto.

3.2.4.1. Microestrutura

Para medição da seção transversal e avaliação das características longitudinais das fibras, foram utilizadas imagens obtidas por meio de técnicas de microscopia. Para isso, para cada tipo de fibra, 12 amostras foram analisadas. As fibras de polipropileno foram analisadas em microscópio estereoscópio da marca *Nikon*, modelo SMZ800N (Figura 3.11-a). Por outro lado, como as fibras de sisal apresentam seção reduzida em relação ao polipropileno, elas foram analisadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo Jeol JSM 6510LV, operando de 10 a 20 kV, do Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Engenharia de Materiais da PUC-Rio (Figura 3.11-b). As amostras das fibras de sisal precisaram passar por um procedimento de preparação prévio, que consistiu em imersão em água por 48 horas, seguido de um corte com lâmina perpendicular ao eixo longitudinal do filamento. Além disso, foi realizada metalização das fibras com ouro.

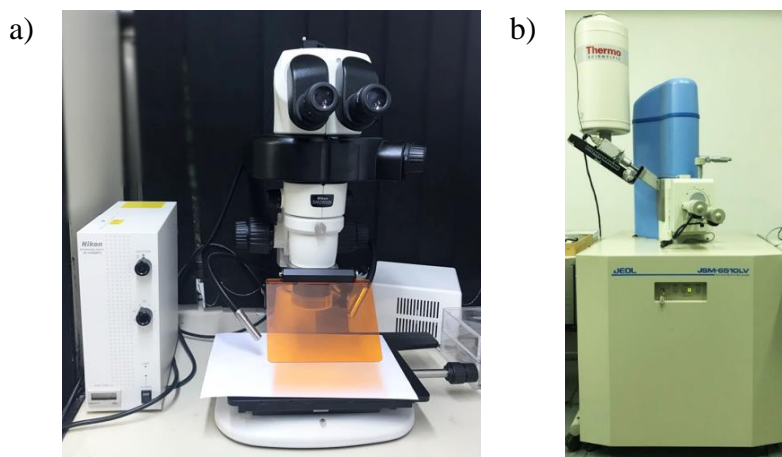


Figura 3.11 – Microscópio estereoscópio (a) e MEV (b) utilizados para avaliação microscópica das fibras.

Com as micrografias foi possível determinar a área da seção transversal de ambas as fibras, com auxílio do *software ImageJ*. A partir de uma medida de referência, foi realizado o contorno manual da fibra, tendo como resultado final a área da seção (Figura 3.12). Observa-se que, ambas as fibras apresentam uma seção não circular. Segundo Silva *et al.* [28], a fibra de sisal é formada por microfibrilas, unidas por uma matriz de lignina e celulose, sendo que os vazios destacados na Figura 3.12-b, correspondem aos lumens. Por outro lado, a fibra de polipropileno apresenta uma seção transversal densa e sem vazios. A Tabela 3.6 apresenta as áreas obtidas para cada amostra, assim como a média e o desvio padrão para cada tipo de fibra. Observa-se que a fibra de polipropileno apresenta uma área total média 21 vezes maior do que a fibra de sisal.

Tabela 3.6 – Área da seção transversal da fibra de sisal e polipropileno.

Seção Transversal	Polipropileno (mm ²)	Sisal (mm ²)
CP1	0,579	0,018
CP2	0,520	0,042
CP3	0,451	0,031
CP4	0,460	0,029
CP5	0,771	0,021
CP6	0,590	0,050
CP7	0,700	0,031
CP8	0,705	0,033
CP9	0,785	0,020
CP10	0,728	0,026
CP11	0,507	0,026
CP12	0,767	0,031
Média	0,630 (0,126)	0,030 (0,010)

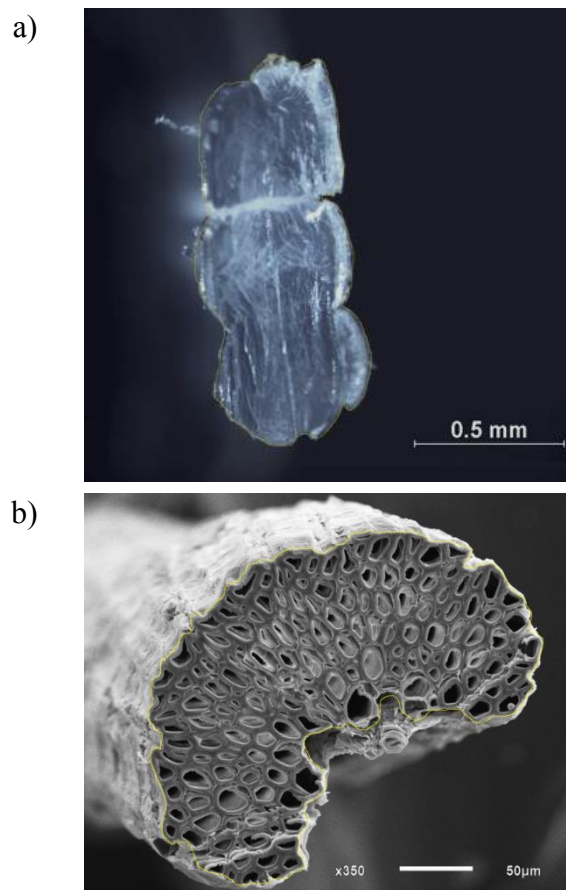


Figura 3.12 – Micrografia com contorno realizado para cálculo da seção transversal da fibra de polipropileno (a) e sisal (b).

Considerando uma seção circular, é possível obter o diâmetro equivalente relacionado com a área da seção transversal de cada fibra. Nesse caso, o diâmetro equivalente obtido para a fibra de polipropileno foi de $0,89 \pm 0,09$ mm e, para a fibra de sisal, $0,19 \pm 0,03$ mm. A partir desses valores, obtém-se o fator de forma das fibras, que é a relação entre o comprimento e o diâmetro equivalente. A fibra de polipropileno possui fator de forma característica de $57,77 \pm 6,07$ e a fibra de sisal de $269,67 \pm 39,26$, sendo 4,4 vezes maior. Bentur & Mindess [5] afirmam que a melhoria do comportamento do concreto reforçado com fibras é mais evidente com fibras de maiores fatores de forma [22]. Entretanto, pode haver efeitos adversos na trabalhabilidade do concreto no estado fresco [8,112,113].

De acordo com fabricante da fibra de polipropileno, a área da seção transversal da fibra pode ser determinada a partir da medição de duas das suas dimensões (Figura 3.13). Dessa forma, por se tratar de uma seção não circular, a área é obtida a partir da Equação 1. Para determinação da área da seção transversal da fibra da mesma forma que o fabricante, um paquímetro foi utilizado

para obtenção das dimensões t e w de 12 fibras, obtendo-se uma seção transversal média de $0,507 \pm 0,037 \text{ mm}^2$. Esse valor é aproximadamente 20% menor que o obtido a partir das micrografias das fibras. Essa diferença também é evidenciada pelo fator de forma, sendo $63,59 \pm 2,27$ nesse caso.

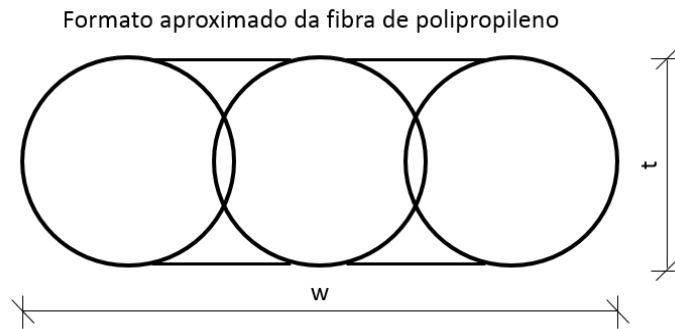


Figura 3.13 – Formato aproximado da fibra de polipropileno com destaque para as duas dimensões principais t e w .

$$\text{Área da seção transversal} = \pi \left(\frac{t}{2} \right)^2 + (w - t)t \quad (\text{Eq. 1})$$

A Figura 3.14 apresenta a micrografia lateral das fibras. A fibra de polipropileno apresenta superfície que pode ser considerada lisa, o que confere a fibra uma aderência reduzida. Entretanto, observa-se uma geometria torcida, que resulta em uma maior ancoragem mecânica. A fibra de sisal, por sua vez, apresenta uma superfície rugosa, o que pode contribuir para uma melhor aderência na matriz cimentícia.

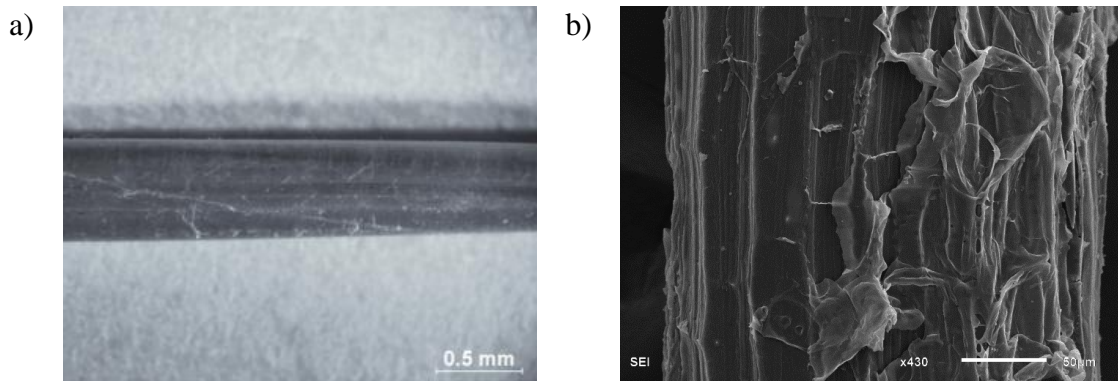


Figura 3.14 – Micrografia da superfície lateral da fibra de polipropileno (a) e sisal (b).

3.2.4.2. Tração

Para obtenção dos parâmetros mecânicos das fibras utilizadas, foram realizados ensaios de tração direta. A partir dos ensaios foi possível determinar as curvas de tensão *versus* deformação específica, resistência à tração, assim como o módulo de elasticidade. Por se tratar de fibras com comportamento mecânico diferentes, foi necessário o desenvolvimento de metodologias próprias para cada tipo. Para ambas as fibras, 10 amostras foram analisadas.

Os ensaios de tração direta para as fibras de sisal seguiram recomendações da norma ASTM C1557 [114], com modificações. As fibras foram colocadas em molduras para que fossem fixadas às garras da máquina de ensaio. Além de fixação, as molduras serviam como guia para alinhamento da fibra com o eixo do equipamento. As molduras foram confeccionadas em papel cartão com densidade de 140 g/cm^2 , com as dimensões apresentadas na Figura 3.15. A fibra foi posicionada no centro da moldura, e posteriormente a aba esquerda foi dobrada e colada sobre a aba direita, com cola instantânea. O conjunto foi então fixado nas garras do equipamento e cortes foram feitos nas laterais da moldura, permitindo que apenas a fibra fosse tracionada durante o carregamento.

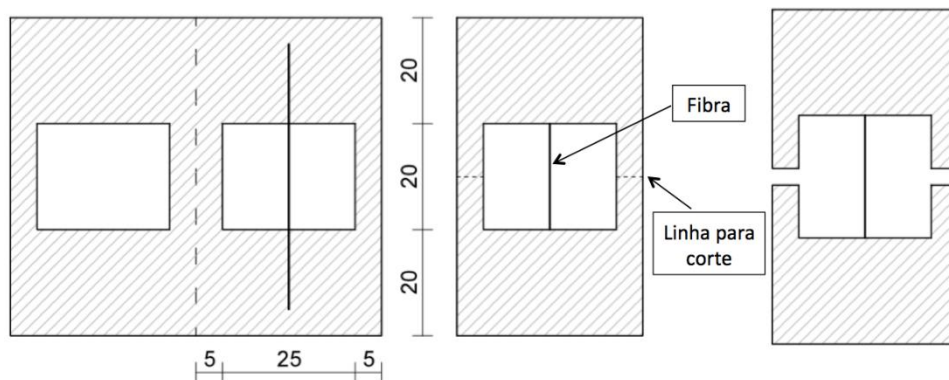


Figura 3.15 – Arranjo e dimensões em milímetros da moldura de fixação em papel cartão para ensaio de tração direta da fibra de sisal.

Os ensaios de tração na fibra de sisal foram realizados em uma máquina universal de ensaios mecânicos MTS 810, com capacidade de carga de 250 kN. Uma célula de carga com capacidade de 100 N foi acoplada ao arranjo pois a capacidade de carga do equipamento era muito superior à previsão de carga do ensaio (aproximadamente 10 N). O controle do ensaio foi por deslocamento, a uma taxa de 0,1 mm/min. Um LVDT de 7 mm foi utilizado para aquisição externa

do deslocamento vertical. A deformação específica, portanto, correspondeu à relação entre o deslocamento vertical, medido com o LVDT, e o comprimento livre inicial, 20 mm. A tensão, por sua vez, correspondeu à relação entre a carga obtida pela célula de carga e a área da seção transversal apresentada no item 3.2.4.1. A Figura 3.16 apresenta o arranjo experimental do ensaio.

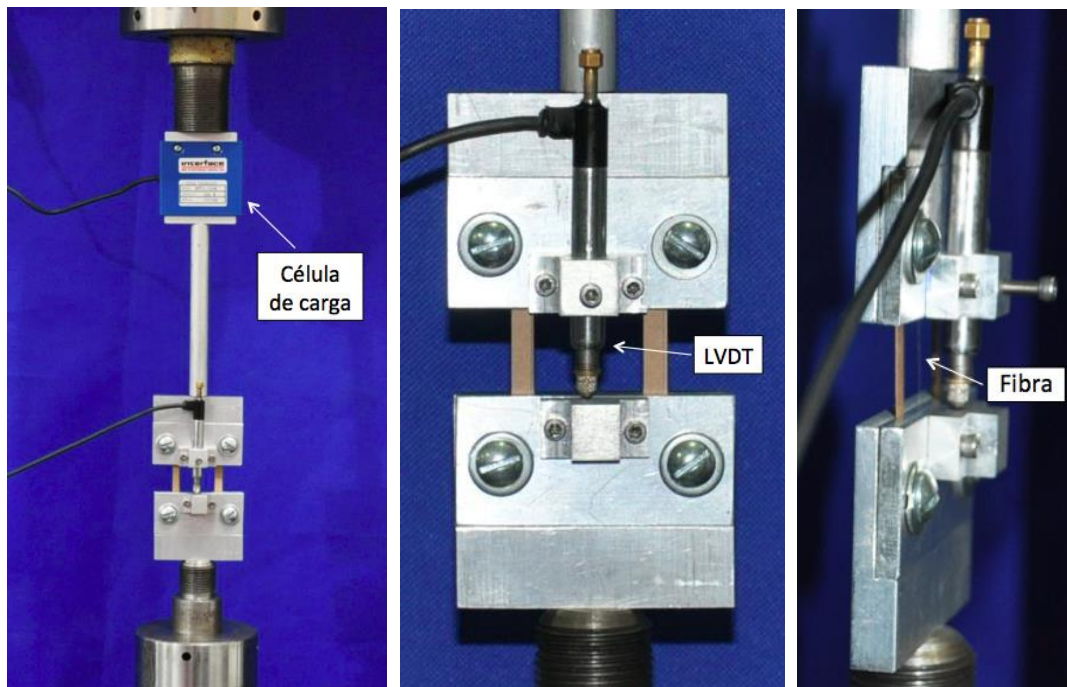


Figura 3.16 – Arranjo experimental do ensaio de tração das fibras de sisal com detalhe do sistema de fixação da fibra.

O arranjo experimental para o ensaio de tração das fibras de polipropileno não seguiu o mesmo padrão. Não foi possível a reprodução do ensaio realizado para a fibra de sisal pois, como as fibras de polipropileno apresentam carga de ruptura elevada (em torno de 200 N), a fixação da fibra na moldura com cola poderia não ser suficiente para fixá-la de forma eficiente. Como consequência, a fibra poderia deslizar e o procedimento de ensaio seria interrompido. Dessa forma, inicialmente foi desenvolvido o arranjo experimental formado por quatro roldanas, apresentado na Figura 3.17. Esse arranjo teve como base o ensaio realizado pelo próprio fabricante, onde fibras longas de 2 metros eram utilizadas. Entretanto, em todas as tentativas de ensaio houve deslizamento da fibra ou ruptura na região de fixação, inviabilizando a caracterização da fibra quanto à sua resistência.

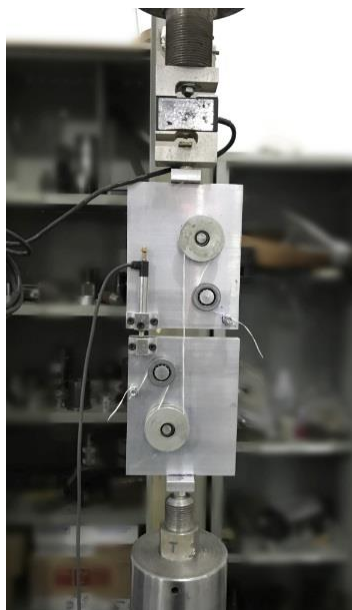


Figura 3.17 – Arranjo experimental do ensaio de tração das fibras de polipropileno utilizado na primeira tentativa.

De forma a viabilizar a execução do ensaio, um novo arranjo experimental foi desenvolvido (Figura 3.18). Nesse caso, um sistema de duas roldanas foi utilizado, sendo que foram realizadas duas voltas antes de fixar as fibras longas com amarração em cada extremidade, de forma a minimizar o escorregamento da fibra. As roldanas possuíam diâmetro total de 100 mm.

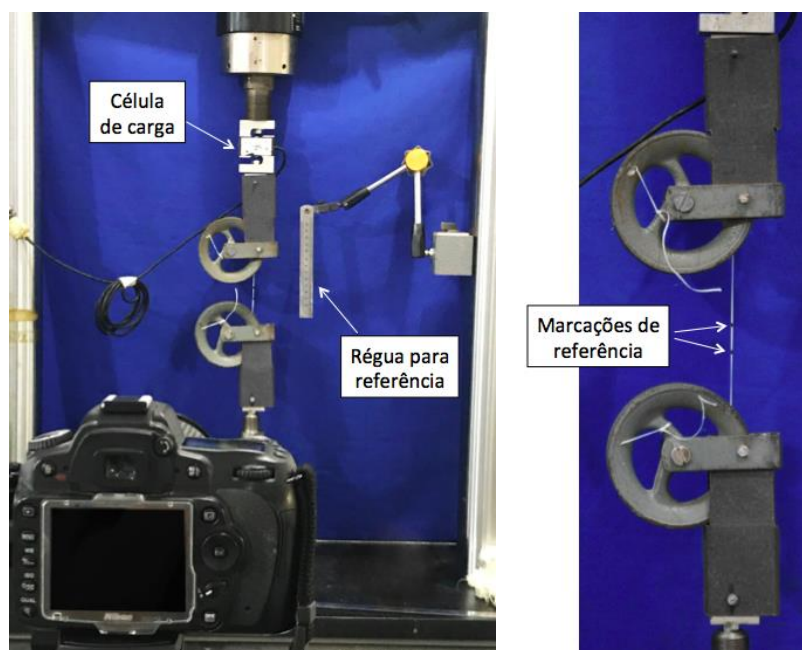


Figura 3.18 – Arranjo experimental adotado para ensaio de tração das fibras de polipropileno com detalhe do sistema de fixação da fibra.

Da mesma forma que para os ensaios na fibra de sisal, os ensaios para a fibra de polipropileno foram realizados em uma máquina universal de ensaios mecânicos MTS 810, com capacidade de carga de 250 kN. Nesse caso, uma célula de carga com capacidade de 1 kN foi acoplada ao arranjo. O controle do ensaio foi por deslocamento, a uma taxa de 5 mm/min. Os deslocamentos foram obtidos a partir de fotos tiradas em intervalos de 120 segundos. Foram feitas marcações de referência nas fibras e, para cada foto, a distância entre os pontos foram obtidos pelo *software ImageJ*. Uma régua foi posicionada no mesmo plano da fibra de forma a servir como referência para escala das medições. A deformação específica, portanto, correspondeu à relação entre o deslocamento vertical e o comprimento inicial, medido entre as marcações de referência. A tensão correspondeu à relação entre a carga obtida pela célula de carga e a área da seção transversal obtida pelo *software ImageJ* a partir das micrografias das fibras, assim como apresentada no item 3.2.4.1.

3.2.4.3.

Resultados e discussões

As curvas tensão *versus* deformação específica obtidas dos ensaios de tração direta das fibras de sisal e polipropileno são apresentadas na Figura 3.19. A partir da plotagem das curvas, foi possível obter os valores de carga máxima, tensão máxima e módulo de elasticidade das fibras. O módulo de elasticidade corresponde ao coeficiente angular da região inicial da curva, até aproximadamente 30% da tensão máxima. A Tabela 3.7 apresenta o resultado das propriedades mecânicas obtidas a partir do ensaio de tração direta, assim como seus respectivos desvios padrões.

As curvas da Figura 3.19-a apresentam os resultados do ensaio de tração das fibras de sisal. É possível observar que há claramente dois grupos, com diferentes módulos de elasticidade e resistência. Isso pode ser explicado devido a variabilidade da microestrutura das fibras de sisal. De acordo com Silva *et al.* [111] e Li *et al.* [30], as propriedades da fibra de sisal apresentam alta variabilidade. Essa variação depende de qual parte da planta a fibra é extraída da folha, sendo que as fibras se diferenciam pela resistência e seção transversal. O grupo definido neste trabalho como grupo 1, apresentou módulo de elasticidade de

$12,01 \pm 1,30$ GPa e resistência à tração de $414,34 \pm 46,15$ MPa, enquanto que esses parâmetros foram $5,52 \pm 0,58$ GPa e $353,43 \pm 33,42$ MPa para o grupo 2. Os resultados médios de todas as 10 amostras avaliadas encontram-se na Tabela 3.7.

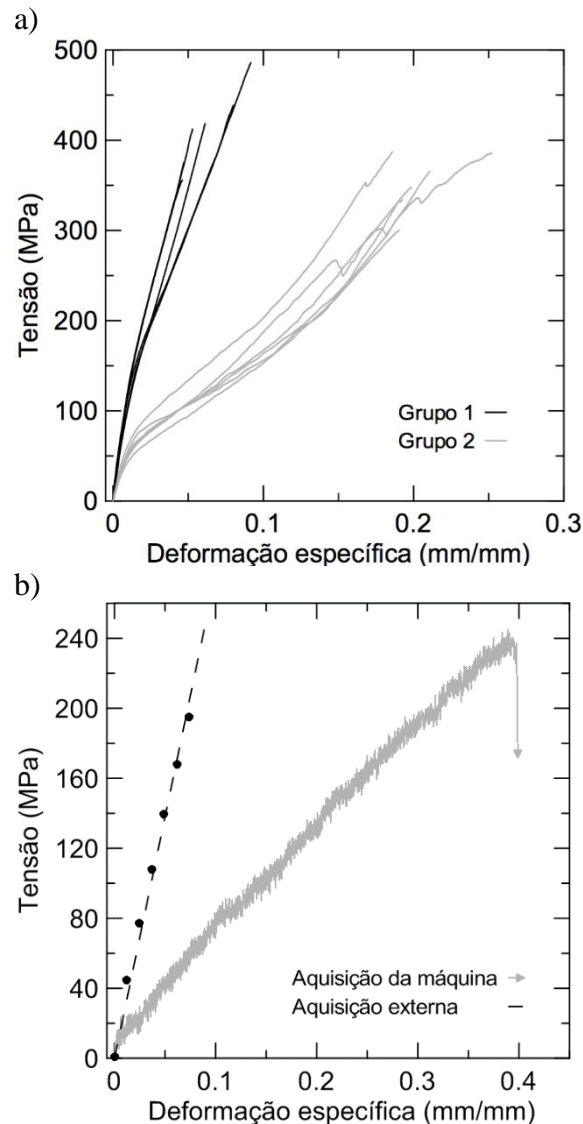


Figura 3.19 – Curvas de tensão *versus* deformação específica da fibra de sisal (a) e polipropileno (b).

As curvas apresentadas na Figura 3.19-b representam o comportamento típico obtido pelas fibras de polipropileno avaliadas. Uma das curvas é resultado dos dados obtidos da própria máquina de ensaios (transdutor interno). A outra curva apresenta o resultado obtido pela aquisição de dados externa, ou seja, pela célula de carga e pelas fotos para medição do deslocamento. O módulo de elasticidade obtido pela curva da aquisição interna foi de $0,70 \pm 0,07$ GPa, sendo 69% menor do que o obtido pela aquisição externa, $2,29 \pm 0,56$ GPa, apresentado

na Tabela 3.7. Isso é explicado devido ao fato de que a medida de deformação feita diretamente pelo deslocamento da máquina incorpora todas as acomodações da fibra e deformações do sistema. Dessa forma, a deformação medida tende a ser superestimada em relação àquela medida diretamente da fibra e justifica-se, portanto, a necessidade da aquisição externa.

A partir da análise da Tabela 3.7 observa-se que a carga de ruptura da fibra de polipropileno é aproximadamente 15 vezes maior do que a carga máxima obtida para a fibra de sisal. Entretanto, devido a grande diferença de área da seção transversal dessas fibras, a resistência à tração da fibra de sisal foi 47% maior do que a resistência da fibra de polipropileno, em termos de tensão máxima. A ruptura da fibra de sisal caracterizou-se pela formação de uma superfície de ruptura transversal bem definida. Por outro lado, a fibra de polipropileno rompeu por um mecanismo de desfibrilamento (Figura 3.20), no qual a fibra rompe em inúmeros microfilamentos.

Tabela 3.7 – Propriedades mecânicas da fibra de sisal e polipropileno, com respectivos desvios padrão entre parênteses.

Fibra	Carga máxima (N)	Tensão máxima (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Polipropileno	164,85 (8,47)	260,72 (13,15)	2,29 (0,56)
Sisal	11,34 (1,57)	383,88 (49,88)	8,77 (3,53)

Quando se considera a área da seção transversal obtida de acordo com o procedimento adotado pelo fabricante (Item 3.2.4.1), obtém-se valor de tensão máxima da fibra de polipropileno de $318,20 \pm 24,94$ MPa e módulo de elasticidade de $2,84 \pm 0,69$ GPa. Nesse caso, a resistência à tração da fibra de sisal foi 21% maior do que a resistência da fibra de polipropileno, reduzindo a diferença de resistência à tração entre elas.

Os resultados obtidos para a fibra de sisal estão de acordo com os resultados encontrados na literatura [5,111,115]. Por outro lado, os valores de resistência e módulo de elasticidade obtidos para a fibra de polipropileno foram inferiores aos apresentados pelo fabricante. De acordo com o fabricante, a fibra em questão deveria apresentar resistência à tração de 625 ± 25 MPa, e módulo de elasticidade de 9,5 GPa, sendo 140% maior em relação à resistência máxima e 315% maior em

relação ao módulo de elasticidade, obtidos nos ensaios realizados. Entretanto, os resultados obtidos estão de acordo com pesquisas anteriores. Cáceres *et al.*[19], por exemplo, encontrou um valor médio de $3,39 \pm 0,51$ GPa de módulo de elasticidade para uma fibra semelhante a utilizada neste trabalho. Salvador [14], por sua vez, obteve um módulo de elasticidade médio de $2,63 \pm 0,09$ GPa para fibra do mesmo tipo.



Figura 3.20 – Fibra de polipropileno desfibrilada após ensaio de tração direta.

3.3. Conclusão

Neste Capítulo, caracterizaram-se os concretos que serão reforçados com fibras. Inicialmente, foram apresentados os materiais constituintes do traço das duas matrizes escolhidas, M1 e M2. A matriz M2 foi resultado de um ajuste realizado na dosagem da matriz M1, onde 50% do total em massa de cimento foi substituído por 30% de metacaulim e 20% de cinza volante. O objetivo foi obter uma matriz que apresentasse um baixo teor de hidróxido de cálcio, contribuindo para o aumento da durabilidade da fibra natural que posteriormente será utilizada como reforço. A avaliação das matrizes a partir de análises termogravimétricas mostrou que a matriz com substituição de cimento teve todo o seu teor de hidróxido de cálcio consumido pelos materiais pozolânicos.

Considerando que a adição de fibras influencia na fluidez da matriz, as matrizes foram caracterizadas segundo essa propriedade por meio de ensaios de espalhamento. A matriz M1 apresentou maior fluidez, com diâmetro de espalhamento de aproximadamente 650 mm. Já no caso da matriz M2, houve uma redução na trabalhabilidade devido a presença do metacaulim, apresentando um diâmetro de espalhamento de 479 mm.

A caracterização mecânica das matrizes foi realizada através de ensaios de compressão uniaxial. Aos 28 dias, a matriz M1 apresentou resistência à compressão de $91,67 \pm 1,55$ MPa, com módulo de elasticidade de $47,51 \pm 3,40$ GPa. Por outro lado, a matriz M2 apresentou $57,02 \pm 1,05$ MPa de resistência e módulo de elasticidade de $33,69 \pm 1,62$ GPa. A resistência à compressão foi medida ao longo do tempo para avaliação do ganho de resistência tardia devido a presença de alto teor de materiais pozolânicos. Para a matriz M1, foi observado um aumento de apenas 0,31% na resistência à compressão axial após 168 dias, quando comparada à resistência obtida aos 28 dias. Por outro lado, a matriz M2 apresentou um acréscimo de 16% na resistência no mesmo período considerado.

As fibras também foram caracterizadas. Para obtenção da resistência à tração, ensaios de tração direta foram realizados em ambas as fibras. A resistência a tração média para a fibra de polipropileno foi de $260,72 \pm 13,15$ MPa e $383,88 \pm 49,88$ MPa para a fibra de sisal. Além disso, obteve-se um módulo de elasticidade de $2,29 \pm 0,56$ GPa e $8,77 \pm 3,53$ GPa para as fibras de polipropileno e sisal, respectivamente. Os valores obtidos para a fibra de sisal e polipropileno foram compatíveis com os resultados encontrados na literatura.

4

Desenvolvimento e caracterização dos compósitos

4.1.

Introdução

A fim de se comparar o comportamento mecânico de concretos reforçados com fibras discretas de polipropileno e sisal, compósitos foram produzidos com matrizes e dosagens de fibras diferentes. Duas matrizes foram utilizadas, sendo elas a matriz M1, considerada uma matriz convencional, e a matriz M2, com teor de hidróxido de cálcio reduzido. Para o caso das fibras de sisal, utilizou-se apenas a matriz M2, visando garantir a integridade da fibra em uma matriz com alcalinidade reduzida [12,27,76,78–80,116,117]. As dosagens escolhidas foram 3, 6 e 10 kg/m³ de fibras de 51 mm de comprimento. Essa escolha teve como base o intervalo recomendado pelo fabricante da fibra sintética, de 1,8 a 12 kg/m³. Além disso, a dosagem de 15 kg/m³ de fibra de sisal também foi utilizada.

Para avaliar a interface entre as fibras e as matrizes adotadas, ensaios de arrancamento foram realizados em corpos de prova cilíndricos com comprimentos de embebedimento da fibra de 15, 25 e 30 mm. Para avaliação do comportamento mecânico, ensaios de flexão em três pontos foram realizados em todas as combinações de matriz, tipos e dosagens de fibra. Ensaios de flexão com carregamento cíclico também foram realizados em alguns tipos de compósitos.

4.2.

Programa Experimental

A nomenclatura dos compósitos seguiu o seguinte padrão: M1 ou M2, referente ao tipo de matriz; PP ou SI referente ao tipo de fibra, polipropileno ou sisal; e o comprimento de embebedimento (15 mm, 25 mm ou 30 mm) no caso de corpos de prova de arrancamento ou a dosagem de fibra (3, 6, 10 e 15) no caso de corpos de prova prismáticos para flexão. A Tabela 4.1 apresenta um resumo do programa experimental.

Tabela 4.1 – Resumo do programa experimental.

Ensaio de arrancamento	Matriz M1	Polipropileno	15 mm	M1 PP 15 mm
			25 mm	M1 PP 25 mm
			30 mm	M1 PP 30 mm
	Matriz M2	Polipropileno	15 mm	M2 PP 15 mm
			25 mm	M2 PP 25 mm
			30 mm	M2 PP 30 mm
Ensaio de flexão monotônicos	Matriz M1	Referência	-	M1
		Polipropileno	3 kg/m ³	M1 PP 3
			6 kg/m ³	M1 PP 6
	Matriz M2	Polipropileno	10 kg/m ³	M1 PP 10
			-	M2
			3 kg/m ³	M2 PP 3
		Sisal	6 kg/m ³	M2 PP 6
			10 kg/m ³	M2 PP 10
			15 kg/m ³	M2 PP 15
Ensaio de flexão cíclicos	Matriz M2	Polipropileno	6 kg/m ³	M2 PP 6
		Sisal	10 kg/m ³	M2 PP 10

4.3.

Fabricação dos compósitos

As preparações dos corpos de prova foram realizadas de acordo com o procedimento de mistura apresentado no item 3.2.1. Para o caso dos corpos de prova prismáticos produzidos para realização dos ensaios de flexão monotônicos e cíclicos, a mistura foi realizada em betoneira com capacidade total de 400 l. Além disso, a dispersão das fibras foi realizada como um passo adicional àqueles já descritos para produção das matrizes. Posteriormente aos 10 minutos finais de mistura do restante da água com o superplastificante da matriz, era realizada a inserção das fibras de forma gradual na betoneira, a qual era mantida em rotação por mais 5 minutos para completa dispersão. Devido à elevada absorção de água pelas fibras naturais [5,37], estas são mais facilmente dispersas quando são

saturadas antes de serem lançadas na matriz. Dessa forma, para o caso de compósitos reforçados com fibra de sisal, as fibras foram submersas em água por 24 horas antes do procedimento de mistura. Por outro lado, as fibras de polipropileno foram dispersas na matriz sem a necessidade de nenhum procedimento prévio.

As dimensões dos corpos de prova foram 550 x 150 x 150 mm. As formas metálicas eram preparadas com óleo desmoldante previamente ao lançamento do concreto, o qual foi feito pela parte superior da forma (Figura 4.1). O adensamento foi realizado por golpes externos com a utilização de martelo de borracha durante todo o processo de lançamento. Ao final do preenchimento da forma, um plástico filme era posicionado na face superior do prisma, única face exposta ao ar, de forma a evitar a perda excessiva de água nas primeiras idades. A desforma era realizada 24 horas após a conclusão da moldagem, e era seguida de cura com condição de umidade de 65,7% e temperatura de 24,4°C, por 28 dias. Seguindo recomendação da norma EN 14651 [64], entalhes de 25 mm de altura foram realizados com a utilização de uma serra de diamante de 3 mm de espessura, centralizados na face inferior do prisma.

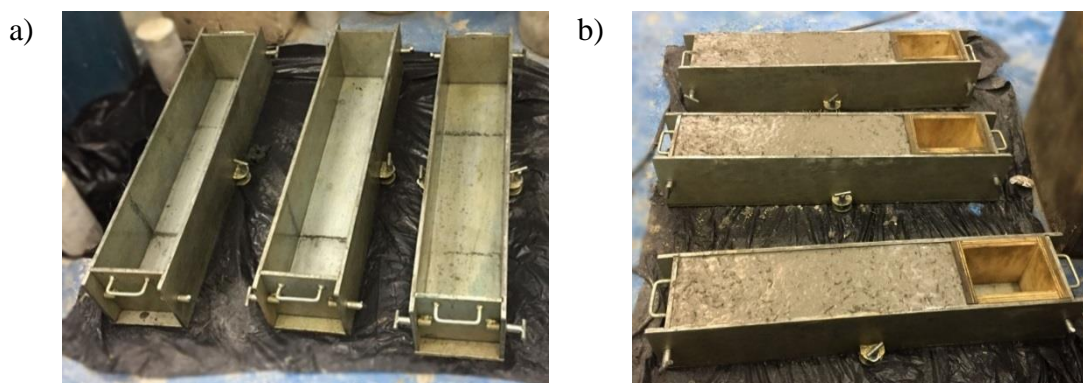


Figura 4.1 – Formas metálicas utilizadas para moldagem dos corpos de prova prismáticos (a) e corpos de prova após finalização do procedimento de moldagem (b).

Para a moldagem dos corpos de prova do ensaio de arrancamento, foi utilizada uma argamassadeira planetária com capacidade de 5 l. Nesse caso, por se tratar de um volume pequeno de matriz para cada corpo de prova, não foi possível a utilização de agregado graúdo na mistura. Os moldes foram tubos de PVC de 25 mm de diâmetro, fixados em duas placas acrílicas. O processo de moldagem iniciava-se com a fixação dos tubos de PVC em uma das placas de acrílico. Essa

placa tinha orifícios por onde a fibra era inserida e fixada com fita adesiva na parte inferior. Posteriormente, a matriz era adicionada e a placa superior era posicionada, sendo que as fibras eram novamente inseridas nos orifícios e fixadas com fita adesiva, de forma a mantê-las alinhadas. Após 28 dias de cura, em ambiente com 100% de umidade e temperatura de $21 \pm 2^\circ\text{C}$, os corpos de prova estavam prontos para a execução do ensaio de arrancamento. A Figura 4.2 apresenta a moldagem dos corpos de prova.

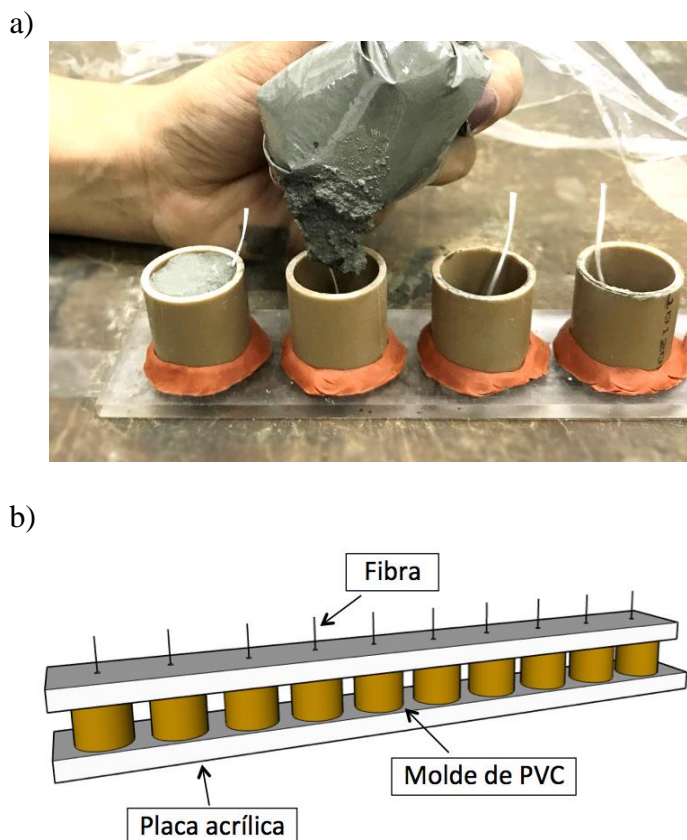


Figura 4.2 – Detalhe da preparação do ensaio de arrancamento: moldagem (a) e disposição final dos corpos de prova após moldagem (b).

4.4. Comportamento mecânico

4.4.1. Ensaio de arrancamento

Com intuito de avaliar a transferência de esforços por cisalhamento entre as fibras e as diferentes matrizes, foram realizados ensaios de arrancamento. Foram moldadas amostras com fibra de polipropileno embebida na matriz M1 e M2 e

amostras com fibra de sisal em combinação com a matriz M2, que foram as combinações escolhidas para estudo do compósito.

Como o comprimento das fibras adotadas para composição do compósito foi de 51 mm, as amostras foram moldadas com comprimento de embebimento (L_c) das fibras de 25 mm. A escolha desse comprimento de embebimento teve como objetivo simular o que ocorre no concreto reforçado com essas fibras pois, a metade do comprimento total é o comprimento que define o comportamento de arrancamento ou fissuração da fibra. Caso a fibra tenha um comprimento embebido maior de um lado em relação ao outro na região da fissura, o menor comprimento será aquele que definirá o comportamento da interface pois terá menor área de cisalhamento (Figura 4.3) [2,5,32]. Além de 25 mm, outros comprimentos de embebimento (15 e 30 mm) foram testados para avaliar como essa variação pode influenciar na característica ao arrancamento do compósito.

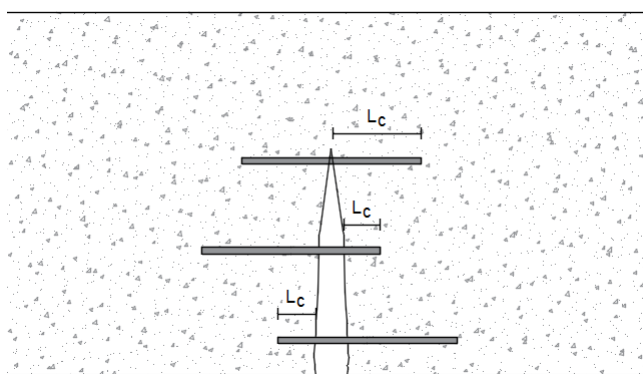


Figura 4.3 – Representação do comprimento de embebimento da fibra em uma fissura.

Para se garantir a representatividade dos resultados, 10 corpos de prova de cada combinação de fibra e matriz foram ensaiados. Os ensaios de arrancamento foram realizados na máquina de ensaios do tipo MTS, modelo 810, com célula de carga de 1 kN. O controle do ensaio foi feito por deslocamento, com taxa de 1,5 mm/min. Os corpos de prova foram fixados em garras em um sistema de contorno fixo. O deslizamento da fibra foi obtido pelo deslocamento da máquina. A medição diretamente pelo deslocamento da máquina foi validada por Trindade [118], a qual observou que os deslizamentos obtidos a partir da medição com LVDT eram similares aos obtidos pela aquisição interna da máquina de ensaios, utilizando o mesmo arranjo. A Figura 4.4 apresenta a configuração do ensaio.

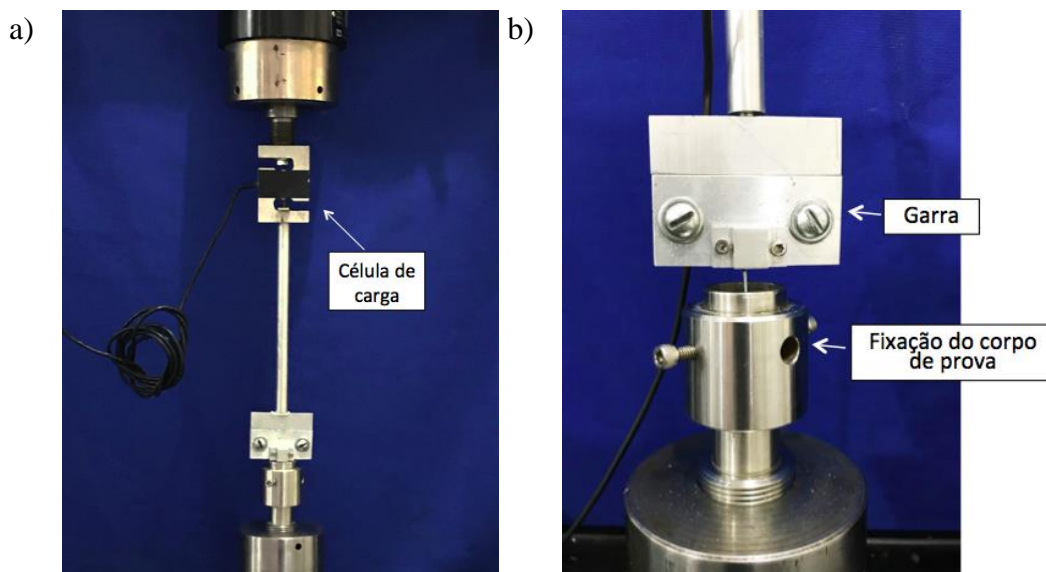


Figura 4.4 – Configuração do ensaio de arrancamento (a) e detalhe da fixação do corpo de prova (b).

A tensão cisalhante máxima ($\tau_{\text{máx}}$) foi obtida a partir dos valores de carga dos ensaios, seguindo a relação:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{P_{\text{máx}}}{2\pi r L_c} \quad (\text{Eq. 2})$$

sendo $P_{\text{máx}}$ a carga máxima, r o raio equivalente obtido a partir da área da seção transversal da fibra (pois tratam-se de fibras não circulares) e L_c o comprimento de embebimento.

4.4.2. Ensaio de flexão

4.4.2.1. Carregamento monotônico

Ensaio de flexão em três pontos foram realizados em elementos prismáticos de seção retangular, seguindo recomendações da norma EN 14651 [64]. As dimensões dos corpos de prova foram 550 x 150 x 150 mm, com entalhe de 25 mm de altura na região central da face inferior dos prismas. Para moldagem dos corpos de prova, a mistura do concreto foi realizada em betoneira com capacidade de 400l, seguindo o procedimento descrito no item 4.3. A Figura 4.5 apresenta a configuração final do corpo de prova prismático com suas dimensões.

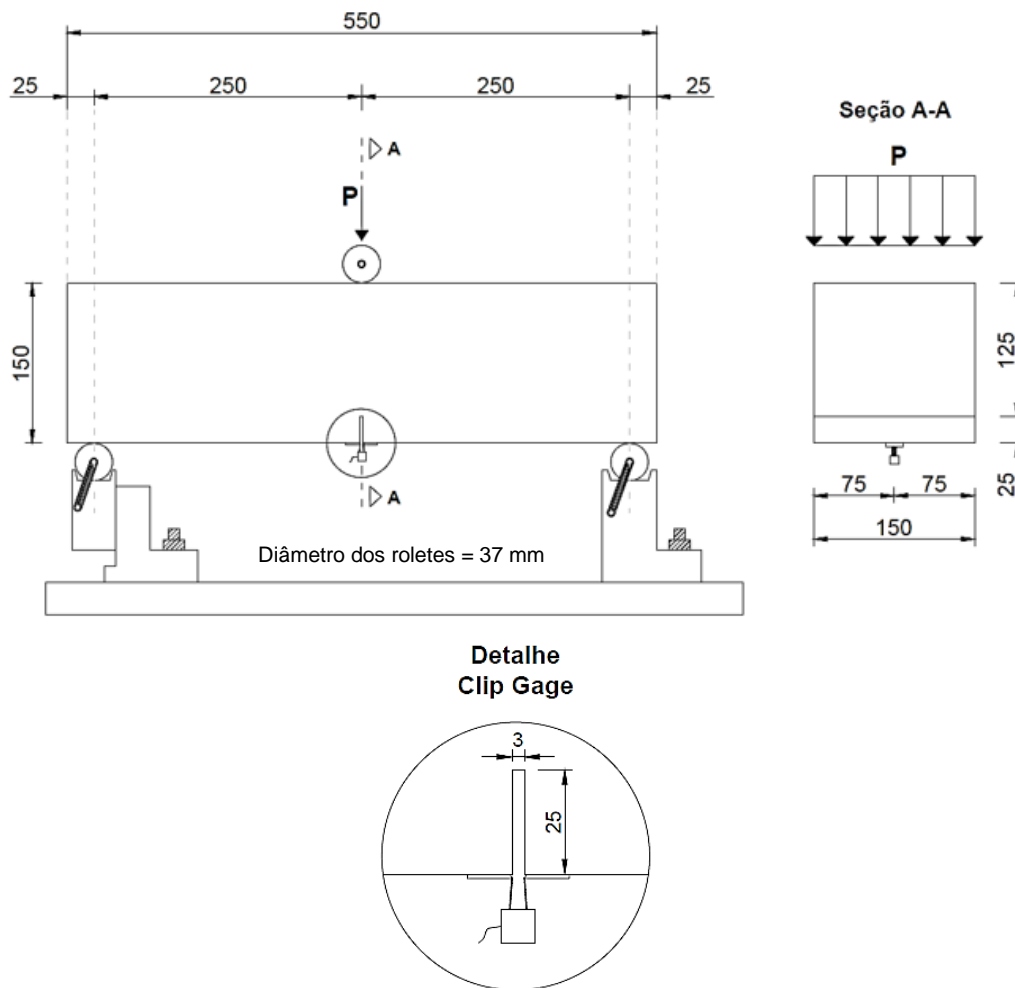


Figura 4.5 – Detalhes e dimensões (em milímetros) do ensaio de flexão em três pontos.

Para montagem do aparato de ensaio, primeiramente posicionavam-se os roletes de apoio. Os roletes possuíam 37 mm de diâmetro, e distavam 500 mm entre si e 25 mm das bordas dos prismas. Os roletes possuíam liberdade de movimento horizontal, entretanto o rolete esquerdo apresentava menor liberdade. Essa liberdade para deslocamentos horizontais evita a indução de esforços normais nos apoios, o que poderia aumentar os valores de esforços obtidos. O rolete de aplicação de carga era rotulado na direção transversal e possuía o mesmo diâmetro dos roletes de apoio. A aplicação de carga foi centralizada em relação à face superior do prisma. O equipamento de ensaio utilizado foi um atuador hidráulico MTS com capacidade de carga de 100 kN montado em um pórtico rígido (Figura 4.6-a). Para controlar o pistão, foi utilizado um controlador *Flex-test* 60, resultando em um sistema do tipo *closed loop*.

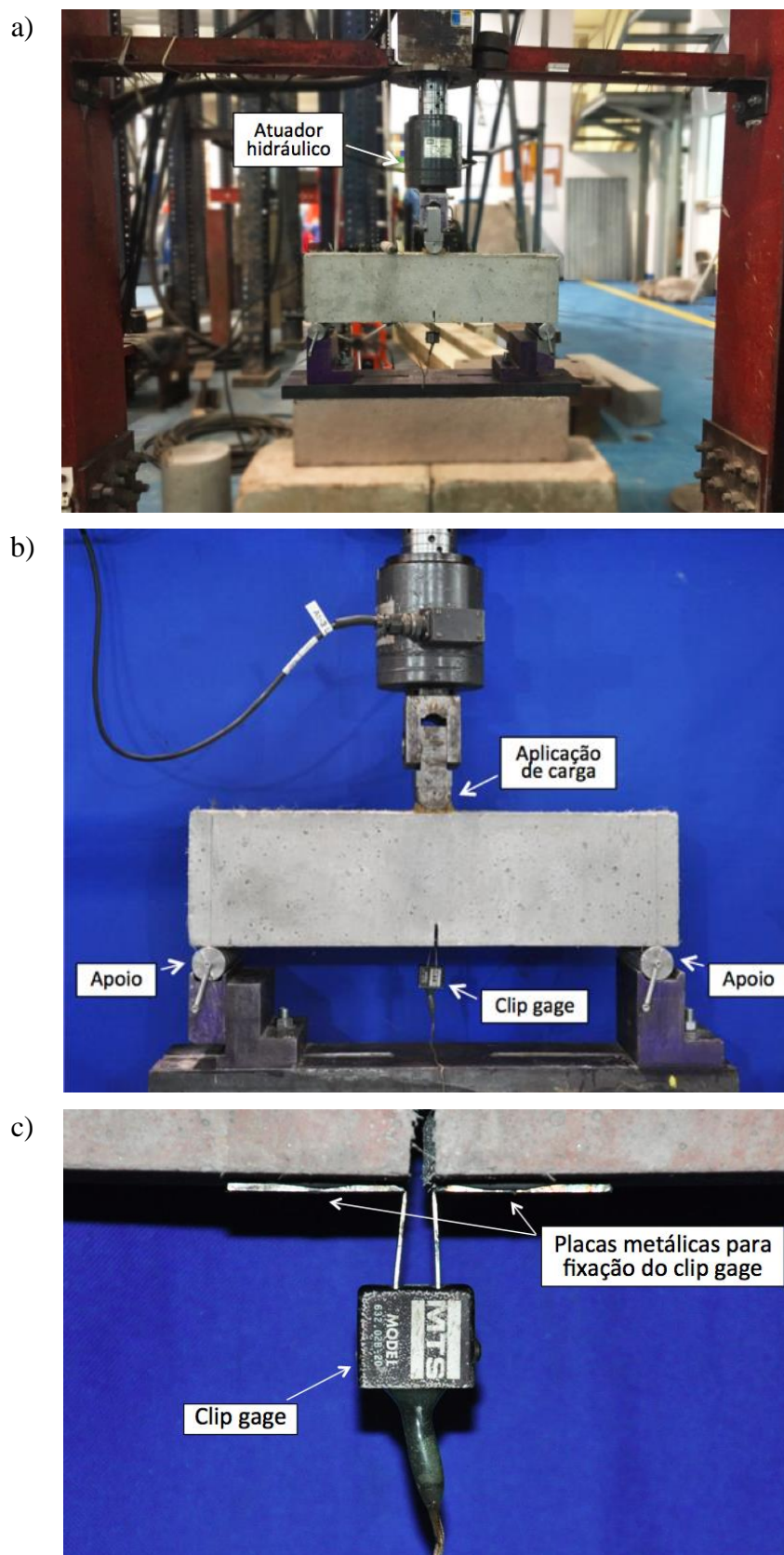


Figura 4.6 – Pórtico rígido com atuador hidráulico (a), detalhe do arranjo do ensaio de flexão em três pontos (b) e detalhe do dispositivo de medição de abertura de fissura (c).

A abertura de fissura (*Crack Mouth Opening Displacement*, CMOD) foi medida a partir do entalhe, que induzia o posicionamento da fissura naquela seção. Os valores de CMOD foram obtidos com a utilização de um *clip gage* da marca MTS e modelo 632.02B-20, encaixado em peças metálicas fixadas no corpo de prova na região do entalhe (Figura 4.6-b). O CMOD foi adotado como parâmetro de controle do ensaio, realizado a taxa de 0,1 mm/min, até a abertura de fissura de 4 mm. Os dados foram adquiridos com frequência de 5 Hz. A Figura 4.6-c apresenta o detalhe do dispositivo de medição da abertura da fissura.

Como resultado dos ensaios, é possível plotar as curvas de tensão *versus* CMOD, sendo os valores de tensão obtidos a partir da Equação 3. O termo P refere-se à carga, S ao vão de ensaio, b a largura do corpo de prova, e h_{sp} a distância entre o topo do entalhe e a face superior do prisma.

$$\sigma = \frac{3 \times P \times S}{2bh_{sp}^2} \quad (\text{Eq. 3})$$

A grande vantagem desse tipo de ensaio é que, devido a presença do entalhe na região central do corpo de prova, a formação da fissura é induzida a ocorrer nessa posição e propaga-se apenas nessa seção transversal. Dessa forma, a deformação é sempre localizada, o que minimiza a dissipação de energia por todo o corpo de prova ensaiado. Portanto, toda a energia absorvida pode ser diretamente associada à fratura ao longo do plano do entalhe e toda a energia dissipada pode ser correlacionada com a resposta do compósito avaliado [42,119,120].

A partir da execução do ensaio de flexão de acordo com a norma EN 14651 [64], o *fib Model Code* [66] recomenda a determinação das tensões residuais $f_{R,1}$ e $f_{R,3}$. A tensão $f_{R,1}$ é correspondente à abertura de fissura de 0,5 mm e está relacionada com o estado limite de serviço. Por outro lado, a tensão $f_{R,3}$ é correspondente à abertura de fissura de 2,5 mm e está relacionada com o estado limite último. A classificação quanto à tenacidade do compósito é realizada pela verificação de dois parâmetros: $f_{R,1}$ e a relação $f_{R,3}/f_{R,1}$. O valor de $f_{R,1}$ pode variar de 1 a 8 MPa, enquanto que a relação $f_{R,3}/f_{R,1}$ se classifica como apresentado na Tabela 4.2. Além disso, de acordo com o *fib Model Code* [66] o reforço com fibras discretas pode substituir parcialmente ou integralmente o reforço convencional no estado limite último se a relação $f_{R,3}/f_{R,1} \geq 0,5$ for satisfeita.

Tabela 4.2 – Intervalos de classificação da relação $f_{R,3}/f_{R,1}$ que são obtidas pelo ensaio EN 14651 (adaptado de [66]).

Classificação	Condição
a	$0,5 < f_{R,3}/f_{R,1} \leq 0,7$
b	$0,7 < f_{R,3}/f_{R,1} \leq 0,9$
c	$0,9 < f_{R,3}/f_{R,1} \leq 1,1$
d	$1,1 < f_{R,3}/f_{R,1} \leq 1,3$
e	$1,3 < f_{R,3}/f_{R,1}$

4.4.2.2. Carregamento cíclico

Para a determinação de parâmetros relacionados com a mecânica da fratura, ensaios de flexão sob carregamento cíclico foram executados de acordo com as recomendações da RILEM TC 89-FMT [69]. O arranjo do ensaio seguiu o mesmo padrão apresentado para os ensaios de flexão monotônicos, mantendo-se os mesmos parâmetros e dimensões estabelecidas, com exceção do procedimento de carregamento. A aplicação de carga foi controlada pelo sinal obtido pelo *clip gage*, ou seja, pela abertura de fissura. Por outro lado, o descarregamento se deu pelo controle de carga. Até o valor de CMOD de 0,18 mm, o corpo de prova foi submetido a uma taxa de carregamento constante de 0,05 mm/min. A partir de 0,18 mm, a taxa de carregamento passou a ser 0,2 mm/min. A taxa de descarregamento adotada foi de 8 kN/min para todos os ciclos. Os ciclos eram executados em valores pré-determinados de abertura de fissura, sendo elas 0,02, 0,04, 0,06, 0,10, 0,14, 0,18, 0,30 e 0,50 mm. A Figura 4.7 apresenta o procedimento de carregamento e descarregamento adotado nos ensaios cíclicos.

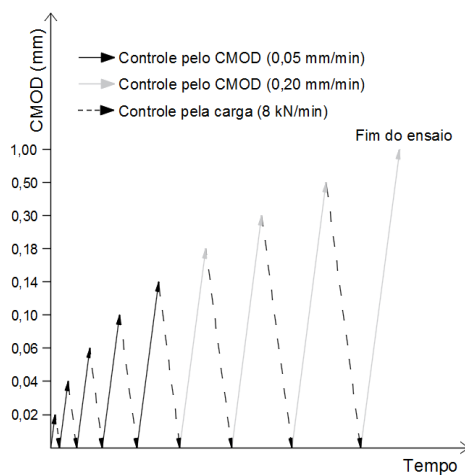


Figura 4.7 – Procedimento de carregamento do ensaio cíclico.

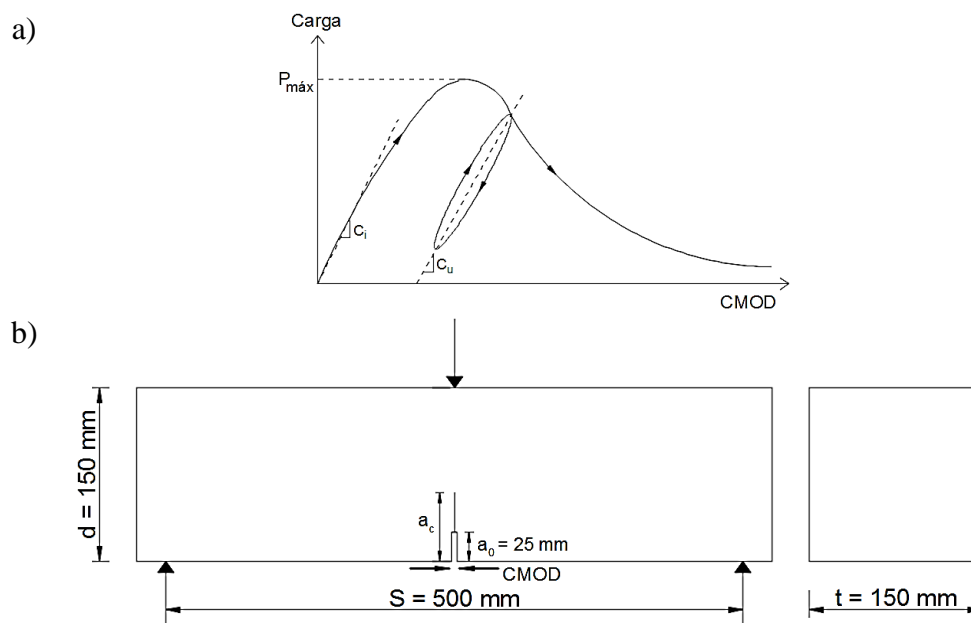


Figura 4.8 – Parâmetros experimentais da mecânica da fratura em um ciclo típico (a) e desenho esquemático das dimensões dos corpos de prova prismáticos (b).

Seguindo recomendações da RILEM TC 89-FMT [69], alguns parâmetros da mecânica da fratura podem ser obtidos a partir das curvas resultantes do ensaio cíclico. A Figura 4.8 apresenta uma curva típica de um ciclo de carregamento e descarregamento, com destaque para parâmetros experimentais que devem ser definidos a cada ciclo. Além disso, indica as dimensões dos corpos de prova prismáticos adotados para o ensaio. O valor de $P_{máx}$ refere-se a carga máxima à flexão de corpos de prova de seção transversal $d \times t$, com vão de ensaio definido como S e entalhe de comprimento inicial a_0 . O módulo de ruptura aparente (MOR) é obtido pela correlação desses parâmetros (Equação 4).

$$MOR = \frac{3P_{máx}S}{2t(d - a_0)^2} \quad (\text{Eq. 4})$$

O módulo de elasticidade (E) é calculado por meio da Equação 5, sendo que, o parâmetro C_i é definido como sendo a conformidade no trecho inicial de carregamento. Além disso, $V(\alpha)$ é calculado pela relação da Equação 6, onde α_0 é o comprimento de entalhe normalizado, definido como a_0/d .

$$E = \frac{6Sa_0V(\alpha_0)}{C_id^2t} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$V(\alpha) = 0,76 - 2,28\alpha + 3,87\alpha^2 - 2,04\alpha^3 + \frac{0,66}{(1 - \alpha)^2} \quad (\text{Eq. 6})$$

O comprimento efetivo crítico da fissura, definido como a_c , é o comprimento crítico em que a fissura se torna instável [71]. Esse parâmetro pode ser calculado pela Equação 6 em qualquer ciclo de descarregamento. O termo C_u é a conformação correspondente ao ciclo de descarregamento e é obtido de forma semelhante à conformidade inicial C_i . Além disso, α_c , que é o comprimento crítico da fissura normalizado, é obtido pela relação a_c/d .

$$a_c = \frac{EC_u d^2 t}{6SV(\alpha_c)} \quad (\text{Eq. 7})$$

O fator de intensidade de tensão crítica (K_{IC}) é calculado pela seguinte relação:

$$K_{IC} = 3P_{\text{máx}} \frac{S\sqrt{(\pi a_c)}F(\alpha_c)}{2d^2 t} \quad (\text{Eq. 8})$$

onde,

$$F(\alpha_c) = \frac{1,99 - \alpha_c(1 - \alpha_c)(2,15 - 3,93\alpha_c + 2,7\alpha_c^2)}{\sqrt{\pi}(1 + 2\alpha_c)(1 - \alpha_c)^{3/2}} \quad (\text{Eq. 9})$$

Além disso, o deslocamento crítico da abertura da ponta da fissura ($CTOD_c$) e a tenacidade crítica para iniciação da fissura (G_{IC}) são obtidos pelas Equações 9 e 10, sendo β_0 equivalente à relação a_0/a_c .

$$CTOD_c = \frac{6P_{\text{máx}} S a_c V(\alpha_c)}{Ed^2 t} \sqrt{(1 - \beta_0)^2 + (1,081 - 1,149\alpha_c)(\beta_0 - \beta_0^2)} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E} \quad (\text{Eq. 11})$$

4.5. Resultados e discussões

4.5.1. Resultados dos ensaios de arrancamento

A eficiência das fibras como reforço depende principalmente das interações na interface, e incluem a adesão química, friccional e ancoragem mecânica. A adesão química corresponde à adesão primária da interface, resultado das reações químicas resultantes da composição tanto das fibras quanto da matriz. A partir de ensaios de arrancamento é possível, por meio da análise das cargas e

deslocamentos relativos que ocorrem entre a fibra e a matriz, avaliar o comportamento da fibra quando submetida ao arrancamento e definir valores de tensão de aderência [5].

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam as curvas típicas de força de arrancamento/tensão de aderência *versus* deslizamento obtidas para as três combinações de fibra e matriz (M1 PP, M2 PP e M2 SI), para diferentes comprimentos de embebimento (15, 25 e 30 mm). A curva de cada tipo de compósito apresentada corresponde àquela que melhor representou o comportamento obtido após 10 ensaios realizados. As curvas de todos os corpos de prova ensaiados estão apresentadas no Apêndice A. Além disso, os valores experimentais de carga máxima ($P_{\text{máx}}$) e deslocamento máximo ($\delta_{\text{máx}}$), assim como tensão de aderência máxima ($\tau_{\text{máx}}$), são apresentados na Tabela 4.3, com os desvios padrão referentes a cada série de ensaios.

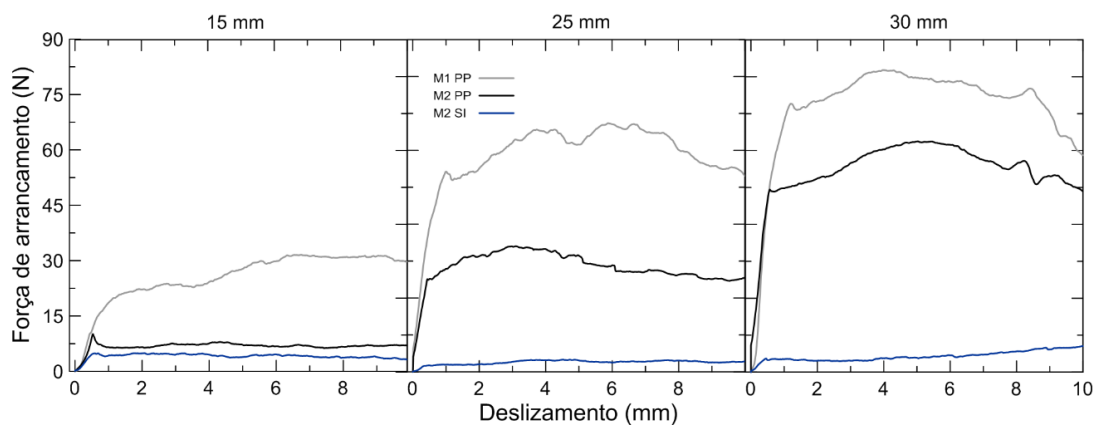


Figura 4.9 – Curvas típicas de força de arrancamento *versus* deslizamento para diferentes comprimentos de embebimento (15, 25 e 30 mm) para os compósitos M1 PP, M2 PP e M2 SI.

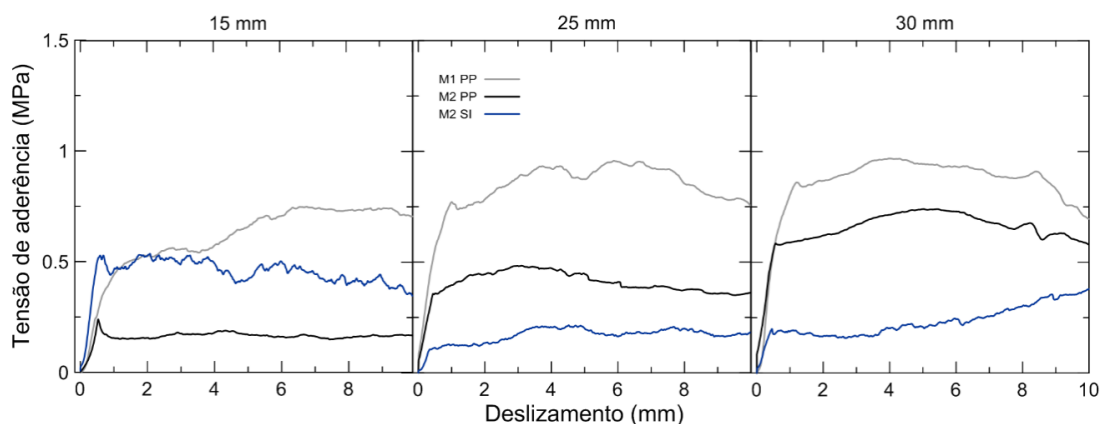


Figura 4.10 – Curvas de tensão de aderência *versus* deslizamento para diferentes comprimentos de embebimento (15, 25 e 30 mm) para os compósitos M1 PP, M2 PP e M2 SI.

Observa-se pelas curvas que ocorreu o completo arrancamento da fibra em todos os comprimentos e tipos de fibra avaliados, considerado como sendo um comportamento ideal. Esse fato é um indicador de que a aderência entre a fibra e a matriz na interface é mais fraca do que a resistência da matriz ou da fibra. Em todos os casos, a carga de arrancamento inicialmente cresce de forma linear, até o início do processo de descolamento. A indicação do início do processo de descolamento é a não linearidade da curva até a carga $P_{\text{máx}}$. A partir desse ponto, o comportamento é governado pela resistência ao cisalhamento friccional e continua até a fibra ser completamente descolada e arrancada da matriz.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de arrancamento dos compósitos M1 PP, M2 PP e M2 SI com diferentes comprimentos de embebimento (15, 25 e 30 mm).

Comprimento de embebimento	Compósito	$P_{\text{máx}}$ (N)	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\delta_{\text{máx}}$ (mm)
15 mm	M1 PP	15,54 (3,73)	0,37 (0,09)	1,97 (1,09)
	M2 PP	14,07 (5,38)	0,33 (0,13)	0,79 (0,35)
	M2 SI	4,82 (1,64)	0,52 (0,18)	1,12 (0,36)
25 mm	M1 PP	41,23 (5,99)	0,59 (0,12)	1,62 (0,51)
	M2 PP	21,15 (3,91)	0,30 (0,06)	1,03 (0,18)
	M2 SI	3,85 (1,27)	0,25 (0,08)	1,06 (0,47)
30 mm	M1 PP	96,12 (5,61)	1,14 (0,07)	4,09 (1,07)
	M2 PP	46,26 (6,39)	0,55 (0,08)	0,80 (0,08)
	M2 SI	4,07 (1,12)	0,22 (0,06)	1,82 (0,47)

Para a fibra de sisal, a carga após o início do descolamento se mantém praticamente constante, sendo considerado um comportamento de aderência ideal. Resultados semelhantes foram obtidos por Ferreira *et al.* [37]. Por outro lado, para a fibra de polipropileno, na maioria dos casos observou-se um aumento da

resistência com o deslizamento da fibra, comportamento denominado *slip hardening*, sendo a única exceção o caso M2 PP 15 mm. Isso pode ser explicado devido ao fenômeno de abrasão da superfície externa da fibra durante o arrancamento, aumentando a resistência ao cisalhamento friccional e a ancoragem mecânica. Estudos anteriores [35,121] também obtiveram o comportamento *slip hardening* para fibras de polipropileno embebidas com diferentes comprimentos em uma matriz cimentícia.

Um ponto importante a ser destacado é o fato de que, apesar das cargas de arrancamento da fibra de sisal serem consideravelmente menor do que aquelas apresentadas pelas fibras de polipropileno, a tensão de aderência não seguiu o mesmo padrão. A seção transversal da fibra de sisal é menor, o que resulta em uma tensão de aderência elevada. Para o caso de comprimento de embebedimento de 15 mm, por exemplo, a tensão de aderência máxima da fibra de sisal foi 56,5% maior em relação a fibra de polipropileno embebida na mesma matriz M2. Para os outros comprimentos de embebedimento, a tensão de aderência foi menor para a fibra de sisal, entretanto essa diferença foi de 16,9% e 59,7% para 25 e 30 mm, respectivamente, sendo essas diferenças menos expressivas do que quando comparamos apenas as cargas máximas.

A Figura 4.11 apresenta um resumo da carga de arrancamento de todos os compósitos, para todos os comprimentos de embebedimento avaliados. É possível concluir que, para o caso das matrizes com polipropileno, a carga máxima aumentou na medida em que se aumentou o comprimento de embebedimento. O mesmo comportamento foi observado por Singh *et al.* [32] e Babafemi & Boshoff [38]. Entretanto, esse mesmo comportamento não foi observado para o caso da fibra de sisal, onde a carga de arrancamento se manteve praticamente constante com o aumento do comprimento, com um valor médio de 4,25 N. Esse valor está de acordo com o encontrado por Ferreira *et al.* [115] para fibras de sisal embebidas em matriz cimentícia com L_c de 25 mm, que apresentaram $3,73 \pm 1,02$ N de resistência ao arrancamento. Por outro lado, observou-se que a fibra de polipropileno embebida na matriz M1 apresentou uma interface mais eficiente do que quando comparada à matriz M2, com maiores valores de carga de arrancamento para todos os comprimentos de embebedimento avaliados. Para o caso dos comprimentos de 25 e 30 mm, a redução na carga de arrancamento foi de cerca de metade para o caso da matriz M2 em relação à matriz M1.

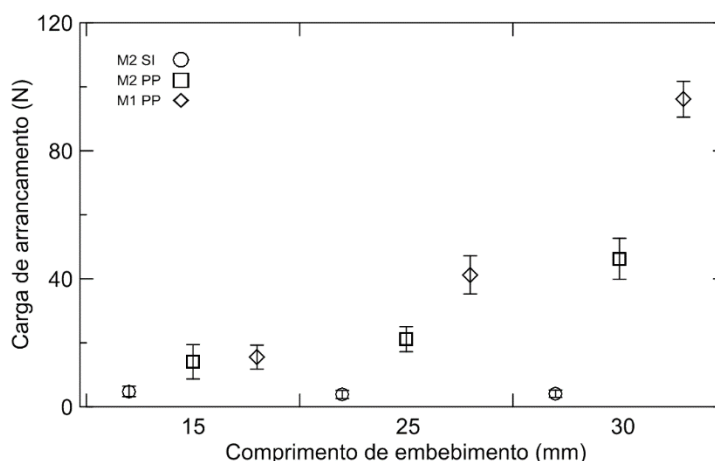


Figura 4.11 – Gráfico de resistência ao arrancamento *versus* comprimento de embebimento para os compósitos M1 PP, M2 PP e M2 SI.

4.5.2. Resultados dos ensaios de flexão

4.5.2.1. Carregamento monotônico

Ensaio de flexão com carregamento monotônico foram realizados conforme estabelecido no item 4.4.2.1. A Tabela 4.4 apresenta resultados do ensaio de flexão sendo que as variáveis dos compósitos foram a matriz, o tipo de fibra e a dosagem de fibra. Para cada tipo de compósito avaliado, foram realizados três ensaios, sendo os valores explicitados como resultado final correspondentes à média dos resultados obtidos, seguido de seu desvio padrão.

Assim como recomendado pela norma EN 14651 [64], a partir dos ensaios realizados foi possível obter alguns parâmetros característicos do compósito. Dentre eles, a tensão correspondente ao limite de proporcionalidade (σ_{LOP}), definido como a tensão correspondente à carga máxima dentro do intervalo de abertura de fissura de 0 a 0,05 mm. Determinou-se também o valor da carga última (P_U), sendo o ponto onde a inclinação da curva carga *versus* CMOD é nula. Além disso, obtiveram-se as tensões residuais em valores de CMOD pré-definidos, sendo eles 0,5, 1,5, 2,5 e 3,5 mm. Os valores de tenacidade foram definidos como a área sob as curvas de carga *versus* CMOD. O ponto limite considerado para o cálculo foi o fim do ensaio, ou seja, abertura de fissura de 4 mm.

A resistência à tração na flexão da matriz M1 sem reforço foi de $4,35 \pm 0,29$ MPa, enquanto a matriz M2 apresentou resistência de $3,45 \pm 0,11$ MPa (vide

Tabela 4.4 e Figura 4.12). Em ambos os casos os corpos de prova ensaiados apresentaram uma ruptura frágil, caracterizado pela redução brusca da capacidade resistente após o aparecimento da primeira fissura, assim como observado por diferentes pesquisadores [16,34,42]. Assim como na resistência à compressão (item 3.2.3.2), a matriz M1 apresentou maior resistência quando comparada à matriz M2, devido à considerável redução no teor de cimento do traço. A resistência à tração da matriz M1 representa 4,75% da sua resistência à compressão aos 28 dias, enquanto para a matriz M2 essa proporção foi de 6,05%.

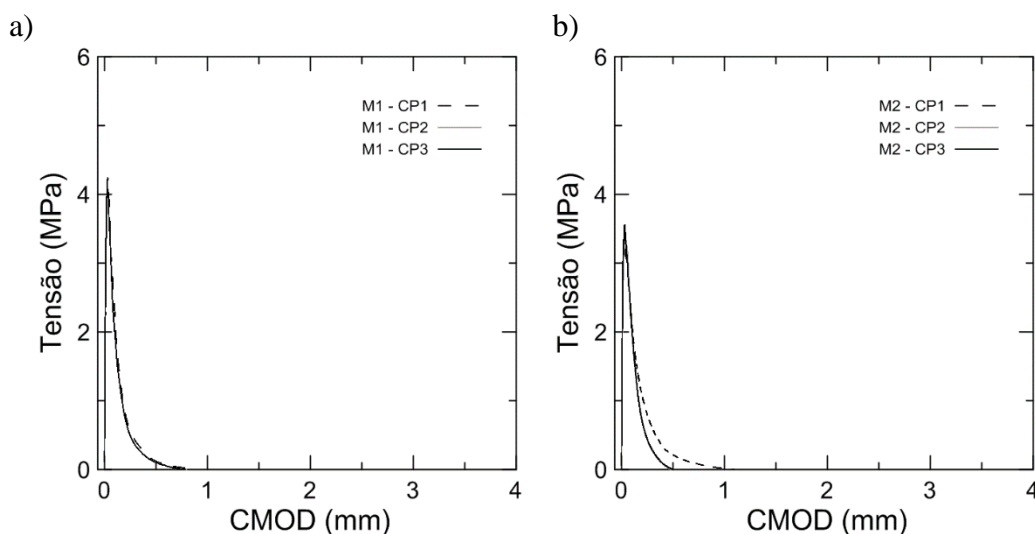


Figura 4.12 – Gráficos de tensão-CMOD à flexão da matriz M1 (a) e M2 (b).

As Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 apresentam as curvas de tensão *versus* CMOD de todos os compósitos avaliados. Observa-se que todos apresentaram um comportamento linear até o aparecimento da primeira fissura, seguido por uma diminuição da tensão com o aumento do CMOD. Esse comportamento é denominado *deflection softening*, e caracteriza-se pelo aparecimento de uma única fissura, comum em compósitos reforçados com fibras discretas [5,16,34,42,67,68]. Portanto, em todos os casos tem-se o valor de carga última como sendo correspondente à carga no limite de proporcionalidade (P_{LOP}).

Para todos os compósitos, o aparecimento da primeira fissura é relacionado com a resistência da matriz e as fibras passam a absorver os esforços de tração na região pós-fissuração. No caso da matriz M1, considerando todas as combinações de fibra e dosagem investigadas, a resistência última apresentou uma variação de apenas $11,85 \pm 5,68\%$ em relação a matriz sem reforço, e $6,01 \pm 4,24\%$ para a

matriz M2. A redução na resistência última da matriz pode ser atribuída à dificuldade de adensamento do concreto quando havia presença de fibras, o que pode resultar em maior porosidade e, conseqüentemente, redução da sua capacidade resistente. Por outro lado, um aumento da resistência última pode ser atribuído aos mecanismos de ponte das fibras para impedir o desenvolvimento de fissuras [5,16,42,54,68].

Tabela 4.4 – Resumo dos parâmetros de flexão dos compósitos.

Referência/ Compósito	P_{LOP} (kN)	σ_{LOP} (MPa)	P_U (kN)	f_{R,1} (MPa)	f_{R,2} (MPa)	f_{R,3} (MPa)	f_{R,4} (MPa)	T_{4mm} (J)
Matriz M1	13,61 (0,91)	4,35 (0,29)	13,61 (0,91)	- -	- -	- -	- -	- -
Matriz M2	10,77 (0,34)	3,45 (0,11)	10,77 (0,34)	- -	- -	- -	- -	- -
M1 PP 3kg/m ³	15,50 (1,30)	4,96 (0,42)	15,50 (1,30)	0,67 (0,04)	0,66 (0,06)	0,70 (0,08)	0,70 (0,06)	9,97 (0,86)
M1 PP 6kg/m ³	14,35 (1,07)	4,59 (0,34)	14,35 (1,07)	1,23 (0,01)	1,46 (0,06)	1,67 (0,10)	1,70 (0,12)	20,02 (0,97)
M1 PP 10kg/m ³	15,82 (0,29)	5,06 (0,09)	15,82 (0,29)	2,07 (0,12)	2,57 (0,19)	2,87 (0,21)	3,00 (0,23)	33,87 (2,30)
M2 PP 3kg/m ³	11,95 (0,60)	3,82 (0,12)	11,95 (0,60)	0,79 (0,05)	0,77 (0,06)	0,85 (0,07)	0,90 (0,09)	11,66 (0,79)
M2 PP 6kg/m ³	10,99 (0,19)	3,52 (0,06)	10,99 (0,19)	1,32 (0,21)	1,31 (0,19)	1,42 (0,20)	1,46 (0,18)	18,19 (2,37)
M2 PP 10kg/m ³	11,53 (0,30)	3,69 (0,09)	11,53 (0,30)	1,84 (0,06)	2,18 (0,22)	2,48 (0,29)	2,68 (0,42)	29,56 (3,06)
M2 SI 3kg/m ³	11,21 (0,42)	3,59 (0,14)	11,21 (0,42)	0,37 (0,11)	0,23 (0,14)	0,14 (0,13)	0,10 (0,09)	3,78 (1,53)
M2 SI 6kg/m ³	10,97 (0,73)	3,51 (0,23)	10,97 (0,73)	0,80 (0,14)	0,70 (0,12)	0,54 (0,10)	0,42 (0,10)	8,72 (1,43)
M2 SI 10kg/m ³	10,37 (0,58)	3,32 (0,19)	10,37 (0,58)	1,28 (0,25)	1,25 (0,26)	0,93 (0,22)	0,73 (0,20)	13,97 (2,75)
M2SI 15kg/m ³	9,44 (0,75)	3,02 (0,24)	9,44 (0,75)	1,63 (0,22)	1,61 (0,17)	1,19 (0,11)	0,95 (0,09)	17,48 (1,69)

P_{LOP}= carga correspondente ao limite de proporcionalidade;

σ_{LOP} = tensão correspondente ao limite de proporcionalidade;

P_U = carga última;

f_{R,1} = resistência residual à flexão correspondente a CMOD de 0,5 mm;

f_{R,2}= resistência residual à flexão correspondente a CMOD de 1,5 mm;

f_{R,3}= resistência residual à flexão correspondente a CMOD de 2,5 mm;

f_{R,4}= resistência residual à flexão correspondente a CMOD de 3,5 mm;

T_{4mm} = tenacidade correspondente a CMOD de 4 mm.

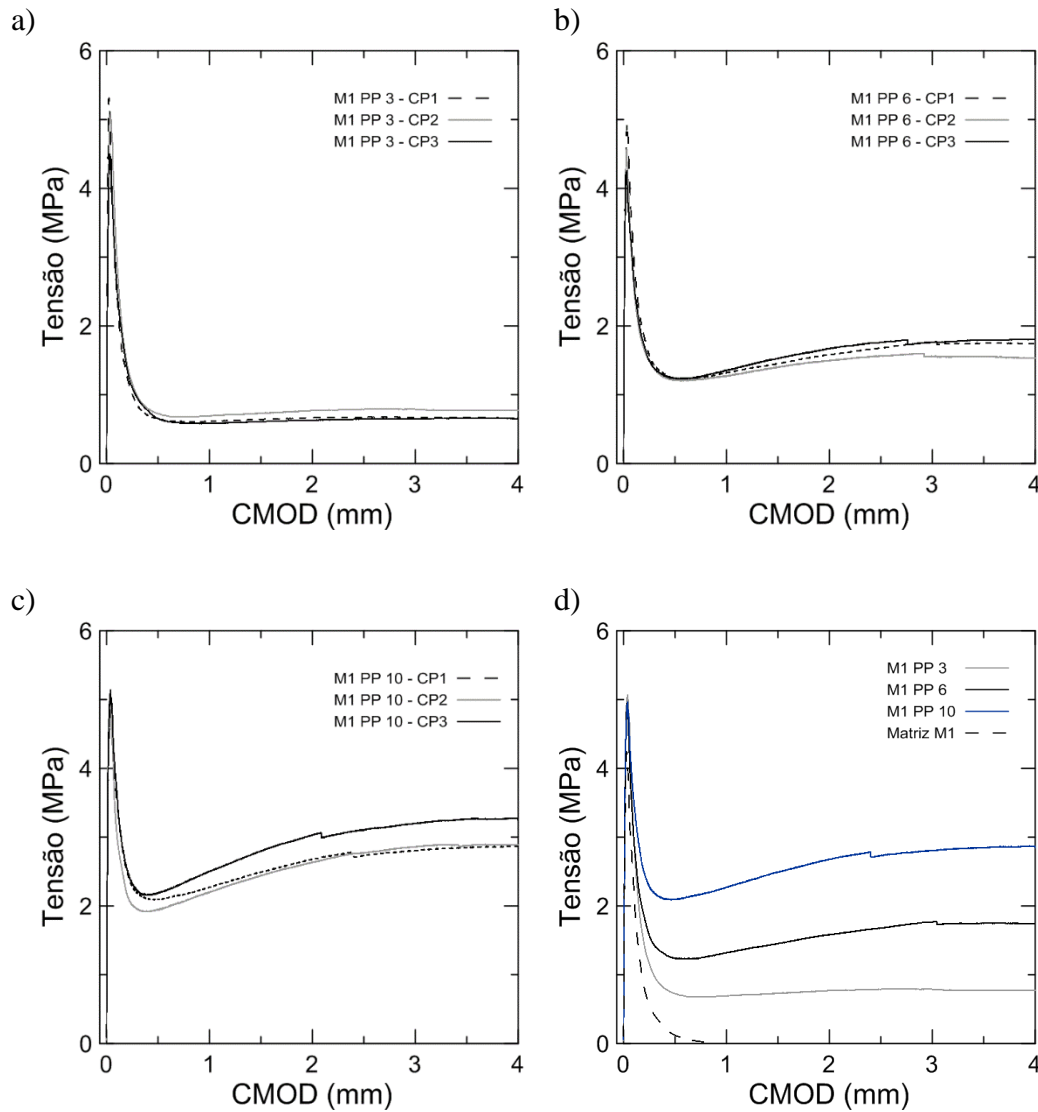


Figura 4.13 – Gráfico a-c) tensão-CMOD à flexão de concretos de matriz M1 reforçados com fibras discretas de 51 mm de polipropileno, com dosagem de 3, 6 e 10 kg/m³, respectivamente; d) comparativo das curvas típicas de diferentes dosagens com a matriz de referência.

Apesar do comportamento pré-fissuração ter sido similar para concretos de mesma matriz, o comportamento pós-fissuração variou de acordo com a dosagem e tipo de fibra. Para ambos os tipos de fibra, quanto maior foi o teor de fibra incorporada, menor foi a redução na tensão pós-fissuração, com maiores níveis de tensão residual. O mesmo comportamento foi observado por diferentes pesquisadores para reforço com fibras discretas de polipropileno [16,34,41,67] e sisal [68].

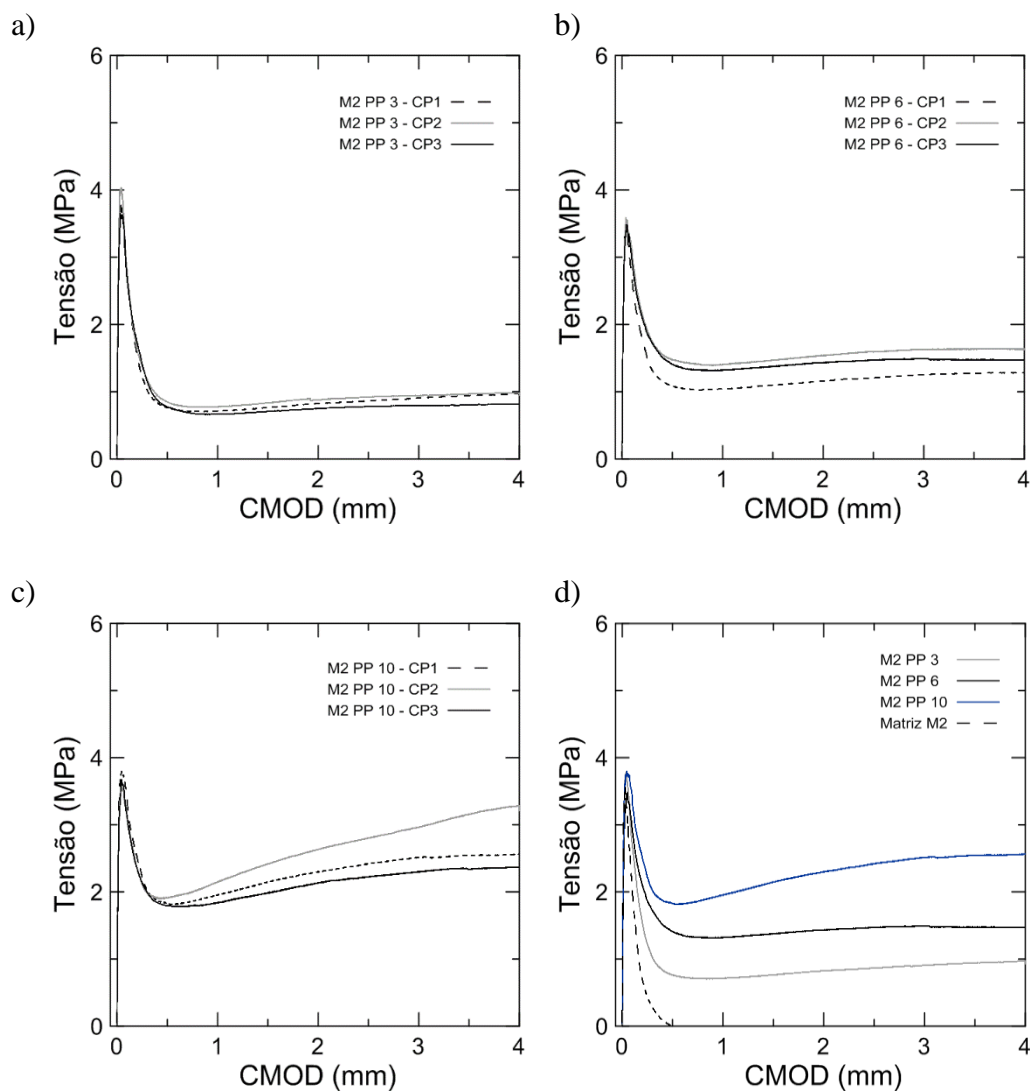


Figura 4.14 – Gráfico a-c) tensão-CMOD à flexão de concretos de matriz M2 reforçados com fibras discretas de 51 mm de polipropileno, com dosagem de 3, 6 e 10 kg/m³, respectivamente; d) comparativo das curvas típicas de diferentes dosagens com a matriz de referência.

Para concretos reforçados com 3 kg/m³ de polipropileno, a tensão se manteve num mesmo nível com a abertura da fissura na região pós-fissuração, sendo em torno de 0,7 MPa para concretos com matriz M1 e 0,85 MPa com matriz M2 (Figuras 4.13 e 4.14). Entretanto, para maiores dosagens houve um acréscimo da tensão residual conforme o desenvolvimento da abertura da fissura, de forma mais acentuada para a dosagem de 10 kg/m³. Para o concreto M1 PP 6, por exemplo, a carga residual em 4 mm de CMOD representou 38% de acréscimo em relação à carga em 1 mm, enquanto que, para o concreto M1 PP 10, esse aumento foi de 45%. Para a matriz M2, obteve-se 11% de acréscimo para o caso M2 PP 6 e 46% para 10kg/m³.

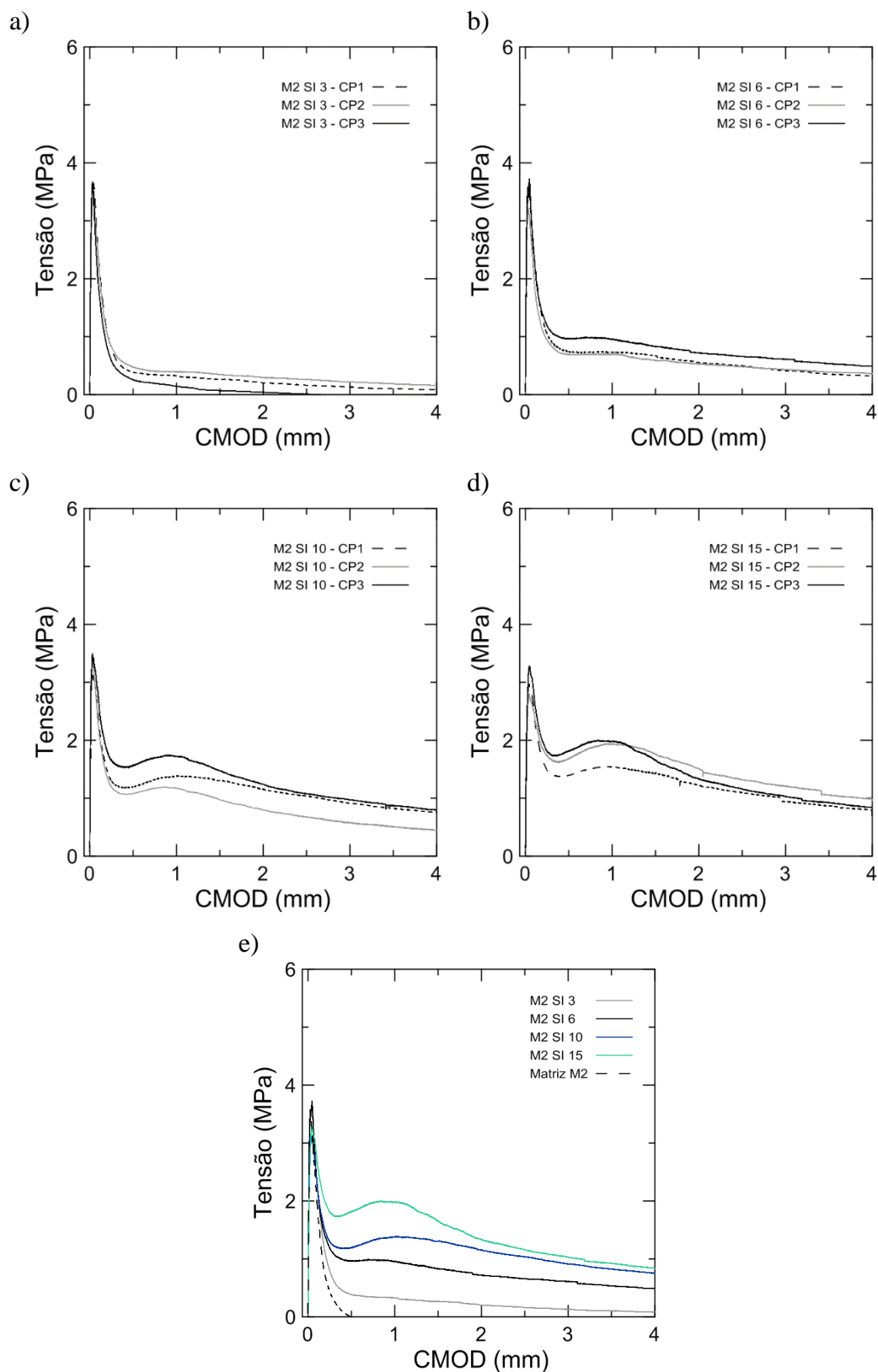


Figura 4.15 – Gráfico a-d) tensão-CMOD à flexão de concretos de matriz M2 reforçados com fibras discretas de 50 mm de sisal, com dosagem de 3, 6, 10 e 15 kg/m³, respectivamente; e) comparativo das curvas típicas de diferentes dosagens com a matriz de referência.

Por outro lado, concretos reforçados com 3 kg/m^3 de fibra de sisal apresentaram curvas tensão *versus* CMOD com considerável redução na tensão residual conforme o aumento da abertura da fissura, chegando a valores próximos de zero ao fim do ensaio (Figura 4.15). Para dosagens superiores, observou-se um aumento da tensão residual até valores de abertura de fissura de aproximadamente 1 mm, seguido de posterior redução em CMOD superiores. O concreto M2 SI 6 apresentou 0,8 MPa de tensão residual em 1 mm de CMOD e uma redução na tensão para 0,42 MPa em 4 mm (vide Tabela 4.4). Para o concreto M2 SI 10, a variação foi de 1,28 MPa em 1 mm para 0,73 MPa em 4 mm e, para o concreto M2 SI 15, de 1,63 MPa para 0,95 MPa.

A Figura 4.16 apresenta a relação entre a tensão residual equivalente ao valor de abertura de fissura de 1 mm e a tensão última do compósito ($\sigma_{\text{CMOD}=1\text{mm}}/\sigma_{\text{LOP}}$), definida como resistência residual relativa. Considera-se que, quanto maior é o valor dessa relação, maior é a capacidade do compósito em manter a sua resistência após o aparecimento da primeira fissura. A avaliação desses valores permite caracterizar a eficiência do reforço em absorver os esforços a que estão submetidos após a fissuração da matriz. Observou-se que, de maneira geral, todos os tipos de concretos apresentaram um incremento de resistência residual seguindo uma relação linear com o aumento de dosagem de fibra.

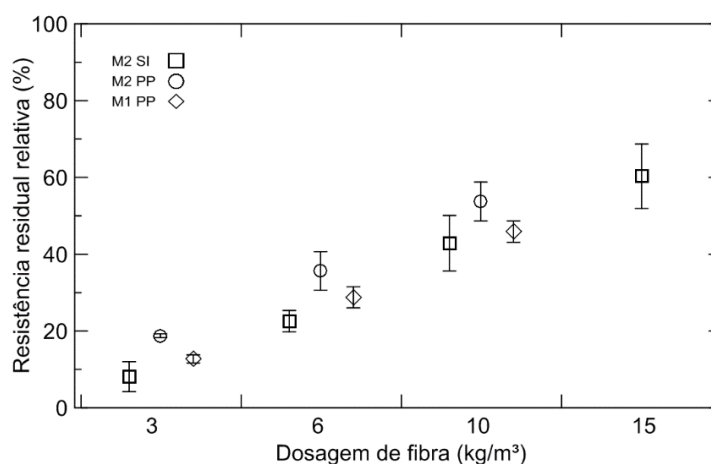


Figura 4.16 – Gráfico de resistências residuais relativas correspondente ao CMOD de 1 mm, com relação à resistência de primeira fissura.

Outra forma de se avaliar a influência do incremento na dosagem de fibra nos concretos é pela avaliação da tenacidade, que reflete a capacidade de absorção de energia pelo material. Para todos os casos foi observado um acréscimo na

tenacidade com o aumento da dosagem de fibra no concreto, tanto para a fibra de polipropileno, quanto para a fibra de sisal. Apesar dessa relação de acréscimo na tenacidade com o aumento no teor de fibras, não foi observada uma relação de proporcionalidade entre eles.

Na avaliação da interface da fibra de polipropileno na matriz M1 foi observado que a aderência era 95% maior do que quando comparada à aderência na matriz M2. Entretanto, observou-se a partir da avaliação da resistência residual relativa (Figura 4.16) que a fibra de polipropileno apresentou uma eficiência do reforço semelhante em concretos formados pela matriz M1 e M2. Diferente do que se era esperado, a eficiência do reforço na matriz M2 foi maior em todas as dosagens utilizadas, sendo 48% maior no caso de 3 kg/m³, 24% para 6 kg/m³ e 17% para 10 kg/m³. Por outro lado, a fibra de sisal apresentou uma tensão de aderência 37,2% menor em relação à fibra de polipropileno na matriz M2. Entretanto, a eficiência foi 57%, 37% e 20% menor em relação ao concreto de mesma matriz reforçado com fibra de polipropileno com dosagens de 3, 6 e 10 kg/m³, respectivamente.

Na avaliação da interface a partir de ensaios de arrancamento, tem-se como resposta apenas como ocorre a interação de uma única fibra com a matriz. Entretanto, ao avaliar o compósito, na seção fissurada existe um conjunto de fibras atuando simultaneamente. Além disso, apesar das fibras apresentarem densidades equivalentes, o fator de forma é diferente, devido a seção reduzida da fibra de sisal ($l/d = 60$ para fibra de polipropileno e 262 para fibra de sisal). Dessa forma, para uma mesma dosagem de fibra, há maior quantidade de fibras de sisal do que de polipropileno. Apesar disso, a sua interface tem comportamento muito inferior quanto comparada à fibra de polipropileno. Portanto, apesar da maior quantidade de fibras na seção fissurada ter sido suficiente para garantir aos concretos reforçados com sisal eficiência elevada, não foi suficiente para se igualar aos concretos reforçados com a mesma dosagem de fibra de polipropileno.

Observa-se na Figura 4.17 que, quando são comparadas as curvas de tensão *versus* CMOD obtidas para concretos de matriz M2 reforçados com dosagens sucessivas de polipropileno e sisal, elas apresentam níveis de tensão comparáveis, principalmente até abertura de fissura de 1 mm. Ou seja, concretos com a dosagem de 3 kg/m³ de polipropileno têm comportamento comparável ao concreto reforçado com 6 kg/m³ de sisal, 6 kg/m³ de polipropileno comparável a 10 kg/m³

de sisal e assim sucessivamente. Com dosagens superiores de fibras de sisal, a quantidade de fibras em uma seção fissurada aumentou suficientemente para compensar a menor eficiência da sua interface fibra-matriz.

A partir de 1 mm de abertura de fissura, os níveis de tensão variam de forma diferente para cada fibra. Essa diferença está associada à eficiência da fibra como reforço pois trata-se do comportamento pós-fissuração, região onde o comportamento do composto é dependente das características da fibra e da interface entra a fibra e a matriz. Dessa forma, até abertura de fissura de 1 mm, a utilização de fibras de sisal em maiores dosagens pode ser uma alternativa à utilização de fibras de polipropileno em concretos reforçados com fibras discretas.

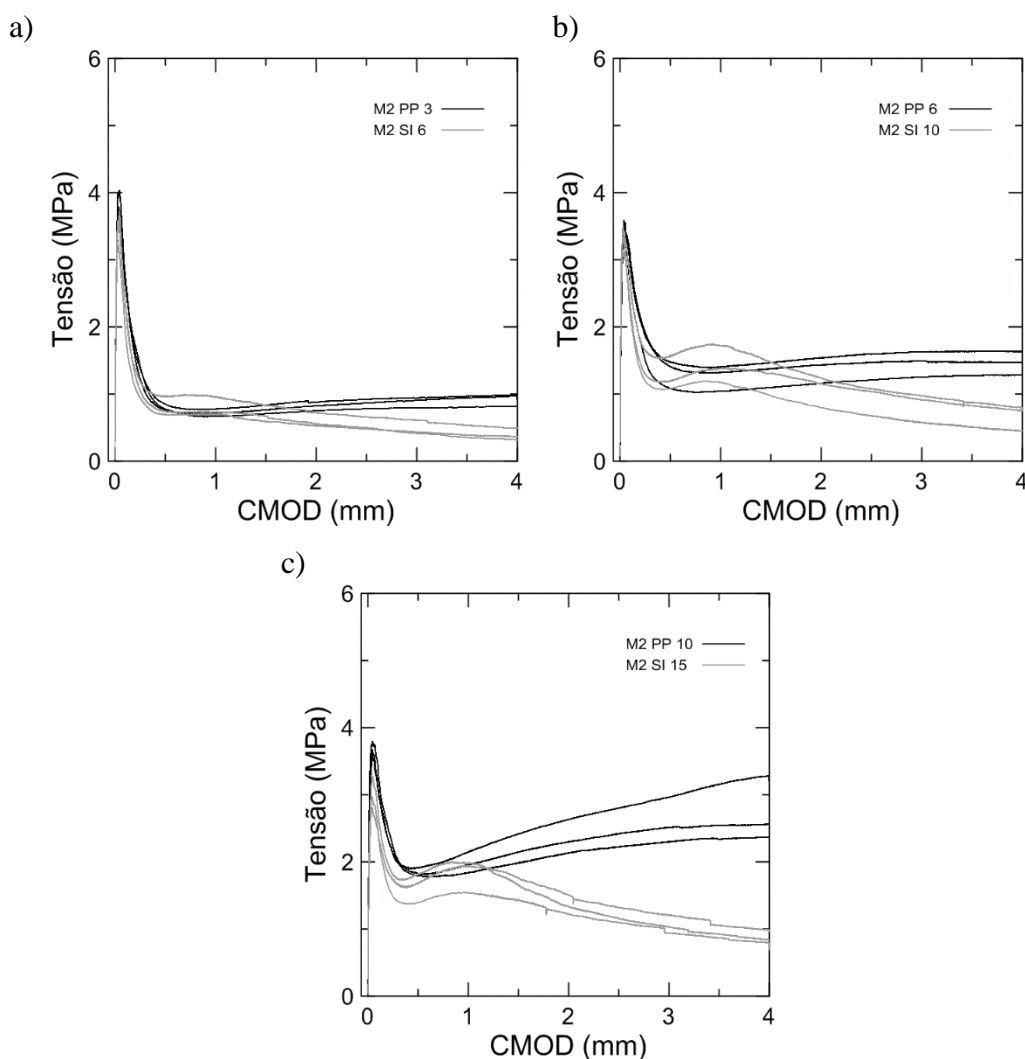


Figura 4.17 – Gráficos comparativos de tensão-CMOD à flexão de concretos de matriz M2 reforçados com fibras discretas de 50 mm com dosagem de a) 3 kg/m³ de polipropileno e 6 kg/m³ de sisal; b) 6 kg/m³ de polipropileno e 10 kg/m³ de sisal; c) 10 kg/m³ de polipropileno e 15 kg/m³ de sisal.

A partir dos ensaios de flexão realizados conforme recomendação da norma EN 14651, é possível classificar os concretos reforçados com fibras de acordo com o *fib Model Code* [66]. Essa classificação é baseada em dois parâmetros principais, a tensão $f_{R,1}$ e a relação $f_{R,3}/f_{R,1}$, assim como apresentado no item 4.4.2. A Tabela 4.5 apresenta a classificação para os compósitos avaliados. Observa-se que apenas o compósito M2 SI 3 não atende ao critério $f_{R,3}/f_{R,1} \geq 0,5$. Todos os outros compósitos atenderam a esse critério, o que configura que a resistência residual no estado limite último ($f_{R,3}$) é pelo menos a metade da resistência residual no estado limite de serviço ($f_{R,1}$). Dessa forma, considera-se adequada a utilização de fibras de polipropileno e fibras de sisal como reforço com fins estruturais, considerando que para o caso da fibra de sisal devem ser utilizadas dosagens maiores que 3 kg/m³.

Tabela 4.5 – Resumo da classificação dos concretos reforçados com fibras de acordo com recomendações do *fib Model Code*.

Compósito	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,3}/f_{R,1}$	$f_{R,3}/f_{R,1} \geq 0,5$	Classificação
M1 PP 3kg/m ³	0,67 (0,04)	0,70 (0,08)	1,04 (0,05)	✓	1c
M1 PP 6kg/m ³	1,23 (0,01)	1,67 (0,10)	1,36 (0,07)	✓	1e
M1 PP 10kg/m ³	2,07 (0,12)	2,57 (0,19)	1,38 (0,07)	✓	2e
M2 PP 3kg/m ³	0,79 (0,05)	0,85 (0,07)	1,08 (0,06)	✓	1c
M2 PP 6kg/m ³	1,32 (0,21)	1,42 (0,20)	1,08 (0,03)	✓	1c
M2 PP 10kg/m ³	1,84 (0,06)	2,48 (0,29)	1,35 (0,11)	✓	2e
M2 SI 3kg/m ³	0,37 (0,11)	0,14 (0,13)	0,33 (0,27)	✗	-
M2 SI 6kg/m ³	0,80 (0,14)	0,54 (0,10)	0,68 (0,01)	✓	1a
M2 SI 10kg/m ³	1,28 (0,25)	0,93 (0,22)	0,73 (0,13)	✓	1b
M2SI 15kg/m ³	1,63 (0,22)	1,19 (0,11)	0,74 (0,09)	✓	2b

4.5.2.2. Carregamento cíclico

Similarmente aos ensaios monotônicos, prismas com entalhes foram submetidos a ensaios de flexão em três pontos, com implementação de carregamentos cíclicos. Ensaios cíclicos são apropriados para avaliar a capacidade de transferência de cargas pelo reforço na região da fissura. A mudança na conformidade e deformação inelástica em cada ciclo de carga e descarga são indicadores do aumento da fissura e utilizados para calcular parâmetros da mecânica da fratura [71].

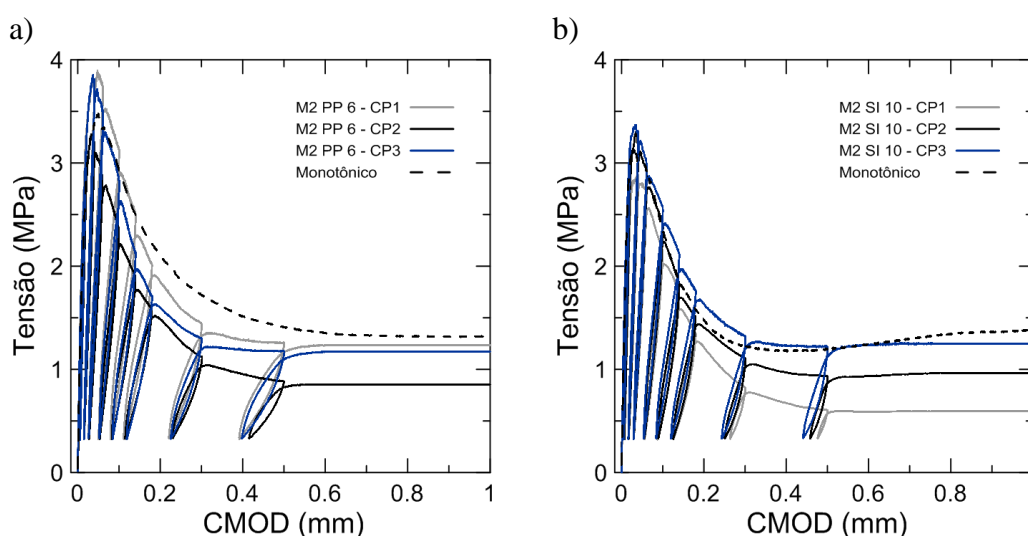


Figura 4.18 – Gráficos tensão-CMOD à flexão de concretos submetidos a carregamentos de flexão cíclicos reforçados com fibras discretas de polipropileno (a) e sisal (b) e curvas típicas obtidas nos ensaios monotônicos.

A Figura 4.18 apresenta as curvas tensão *versus* CMOD resultantes dos ensaios cíclicos de concretos com matriz M2 reforçados com 6 kg/m³ de polipropileno e 10 kg/m³ de sisal. Esses concretos foram escolhidos para análise sob carregamento cíclico pois apresentaram comportamento mecânico semelhante quando submetidos à flexão sob carregamento monotônico. Observa-se que, as curvas de carregamento e descarregamento de todos os concretos ensaiados não coincidem e não são paralelas ao carregamento inicial. A inclinação média dos ciclos é inversamente proporcional à abertura da fissura, ou seja, quanto maior foi o CMOD, menor foi essa inclinação [54,55,70–72]. Esse fato indica que há uma degradação da rigidez, que está relacionada com uma dissipação de energia durante o processo de carregamento e descarregamento [54,55]. Com o

desenvolvimento do carregamento, as fissuras se desenvolvem e os danos nos corpos de prova são gradualmente sendo acumulados, enquanto a rigidez diminui [31].

A Tabela 4.6 apresenta os parâmetros da fratura calculados para os compósitos analisados. Observa-se que, assim como no ensaio monotônico, os dois tipos de compósitos apresentaram comportamento semelhante. Os parâmetros como módulo de elasticidade, comprimento efetivo crítico da fissura, K_{IC} , $CTOD_C$ e taxa crítica de liberação de energia, não apresentaram grande discrepância entre os dois compósitos avaliados.

Tabela 4.6 – Resumo dos parâmetros da mecânica da fratura.

Parâmetros	M2 PP 6	M2 SI 10
Número de ciclos	8	8
Módulo de ruptura aparente MOR (MPa)	3,6 (0,3)	3,2 (0,3)
Módulo de elasticidade (GPa)	19,0 (1,6)	20,2 (1,1)
Comprimento efetivo crítico da fissura a_c (mm)	38,3 (0,8)	41,0 (2,2)
Fator de intensidade de tensão crítico K_{IC} (MPa.mm ^{0,5})	27,6 (1,9)	25,9 (1,1)
CTOD crítico (μm)	17,3 (0,8)	17,0 (1,1)
Taxa crítica de liberação de energia (N/m)	39,9 (2,2)	33,2 (4,6)

A resistência ao desenvolvimento da fissura, G_R , pode ser expressa em termos da taxa de liberação de energia, calculada a partir da Equação 12 [70,71]. O termo P refere-se à carga de flexão correspondente ao ciclo e a é o comprimento efetivo da fissura. Para que se considere a energia inelástica absorvida pelo reforço no processo de ponte da fissura e arrancamento, uma fração não linear de dissipação de energia também é considerada, representada pelo segundo termo da Equação 12. A irreversibilidade dos deslocamentos na região de interface entre a fibra e a matriz durante o carregamento é atribuída ao termo δ_{in} , que é equivalente à irreversibilidade do CMOD.

$$G_R = \frac{P^2}{2t} \frac{dC_U}{da} + \frac{P}{2t} \frac{d\delta_{in}}{da} \quad (\text{Eq. 12})$$

A Figura 4.19 apresenta as curvas de resistência ao desenvolvimento da fissura (Curva R) de todos os compósitos avaliados, obtidas analiticamente a

partir dos ciclos de carregamento e descarregamento. Os pontos obtidos dos três corpos de prova de cada compósito foram utilizados para plotagem da Curva R. Essa curva representa a capacidade das fibras em absorver a energia conforme o desenvolvimento e a propagação de microfissuras. Observa-se que, até comprimentos de fissura de aproximadamente 60 mm, os concretos reforçados com os dois tipos de fibras apresentaram comportamento semelhante, com resistência ao desenvolvimento da fissura relativamente menor para o concreto reforçado com fibras de sisal. Entretanto, para comprimentos de fissuras maiores, compósitos com fibras de sisal apresentaram um valor médio de resistência ao desenvolvimento da fissura maior do que o apresentado pelos concretos reforçados com polipropileno, demandando maior nível de energia para propagação da fissura.

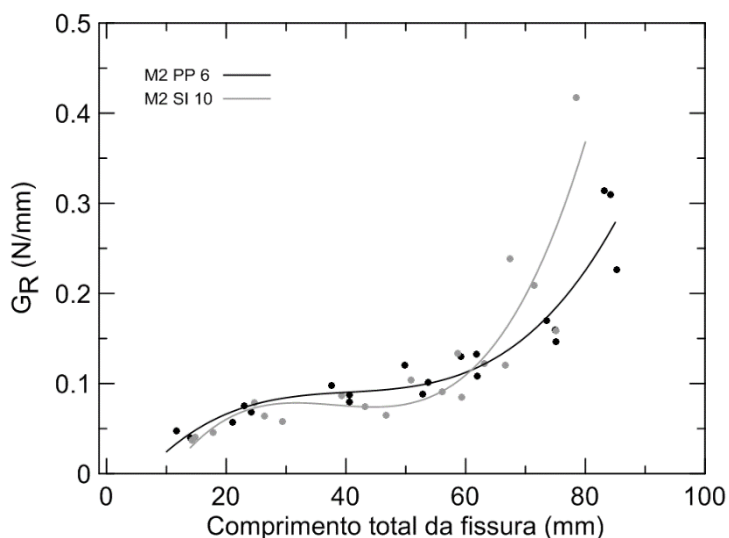


Figura 4.19 – Curva R dos concretos de matriz M2 reforçados com 6 kg/m³ de polipropileno e 10 kg/m³ de sisal submetidos a carregamento cíclico.

4.6. Conclusão

A avaliação da interface a partir de ensaios de arrancamento permitiu concluir que, para todas as combinações de fibra e matriz, houve o completo descolamento e posterior deslizamento da fibra em todos os comprimentos de embebedimento avaliados (15, 25 e 30 mm). Esse fato é um indicador de que a aderência entre a fibra e a matriz na interface é mais fraca em relação à resistência da matriz ou da fibra. A fibra de polipropileno apresentou cargas de arrancamento sempre superiores na matriz M1 em detrimento à matriz M2. Além disso, a carga

máxima aumentou conforme o aumento do comprimento de embebimento. Por outro lado, a fibra de sisal apresentou a menor carga de arrancamento em todos os casos, sem acréscimo considerável com o aumento do comprimento de embebimento. Entretanto, quando se analisa a tensão de aderência máxima, os valores obtidos para a fibra de polipropileno e sisal são próximos, pois a seção transversal da fibra de sisal é muito menor.

Os ensaios de flexão em três pontos mostraram uma diferença de comportamento mecânico considerável entre a matriz sem reforço e o compósito reforçado com as fibras. Em todos os casos a presença de fibra proporcionou ao concreto um comportamento dúctil, com tensão residual após o aparecimento da primeira fissura, denominado *deflection softening*. Como a carga máxima corresponde à resistência a fissuração da matriz, compósitos de mesma matriz apresentaram resistência máxima com valores semelhantes. Entretanto, o valor da carga residual variou tanto com o tipo de fibra quanto com a dosagem, sendo que quanto maior foi a dosagem, maior foi o valor da tensão residual. A partir da avaliação de acordo com o *fib Model Code* [66], observou-se que concretos reforçados com fibras de polipropileno e sisal foram considerados adequados para utilização com fins estruturais, sendo que pro caso da fibra de sisal devem ser utilizadas dosagens maiores que 3 kg/m³.

De maneira geral foi observada compatibilidade entre os resultados obtidos pelos ensaios de arrancamento e flexão. A exceção foi na avaliação do comportamento da fibra de polipropileno na matriz M1 e M2 pois, apesar da aderência com a matriz M1 ter sido maior na avaliação da interface, nos ensaios de flexão o nível de tensão residual obtido na região pós-fissuração dos dois compósitos foi semelhante. Em outras palavras, houve uma maior queda de tensão após a fissuração da matriz M1, que apresentava resistência superior à matriz M2.

Após a execução dos ensaios de flexão sob carregamento cíclico, obtiveram-se parâmetros da mecânica da fratura dos compósitos analisados. O comportamento mecânico foi semelhante àquele observado nos ensaios monotônicos. A partir da curva R concluiu-se que compósitos reforçados com fibra de sisal apresentaram um valor médio de resistência ao desenvolvimento da fissura maior do que o apresentado pelos concretos reforçados com polipropileno, para comprimentos de fissura maiores que 60 mm. Até 60 mm, os concretos reforçados com os dois tipos de fibras apresentaram comportamento semelhante.

5

Durabilidade de compósitos submetidos ao envelhecimento acelerado

5.1.

Introdução

Neste capítulo apresenta-se a avaliação da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de sisal e polipropileno, a partir de ensaios de envelhecimento acelerado. O procedimento de envelhecimento foi por meio de ciclos de molhagem e secagem, os quais simulam o comportamento dos compósitos quando submetidos a sol e chuva. A avaliação da durabilidade é de suma importância principalmente em compósitos reforçados com fibras naturais, devido ao processo de degradação dessas fibras em meio alcalino.

O estudo da durabilidade da interface foi realizado por meio de ensaios de arrancamento. Foram avaliadas as fibras de sisal e polipropileno embebidas na matriz M1 e M2, com comprimento de embebedimento de 25 mm. Os corpos de prova foram submetidos a 24 horas de molhagem e 24 horas de secagem em câmara de ventilação forçada. A avaliação da degradação da interface foi realizada após 10, 25 e 35 ciclos de molhagem e secagem.

O estudo de durabilidade do compósito foi realizado por meio de ensaios de flexão. Foram avaliados compósitos reforçados com 6 kg/m³ de polipropileno e 10 kg/m³ de sisal. Para facilitar a manipulação dos corpos de prova para execução dos ciclos de molhagem e secagem, uma redução na escala dos prismas foi proposta e validada, assim como apresentado no item 5.2.1. Previamente ao início do processo de envelhecimento acelerado, definiu-se o período de duração de cada ciclo, resultando em 24 horas de molhagem e 72 horas de secagem em câmara de ventilação forçada. Ensaios de flexão foram realizados após a execução de 10 e 25 ciclos de molhagem e secagem. A Figura 5.1 apresenta os ensaios realizados para estudo da durabilidade dos compósitos.

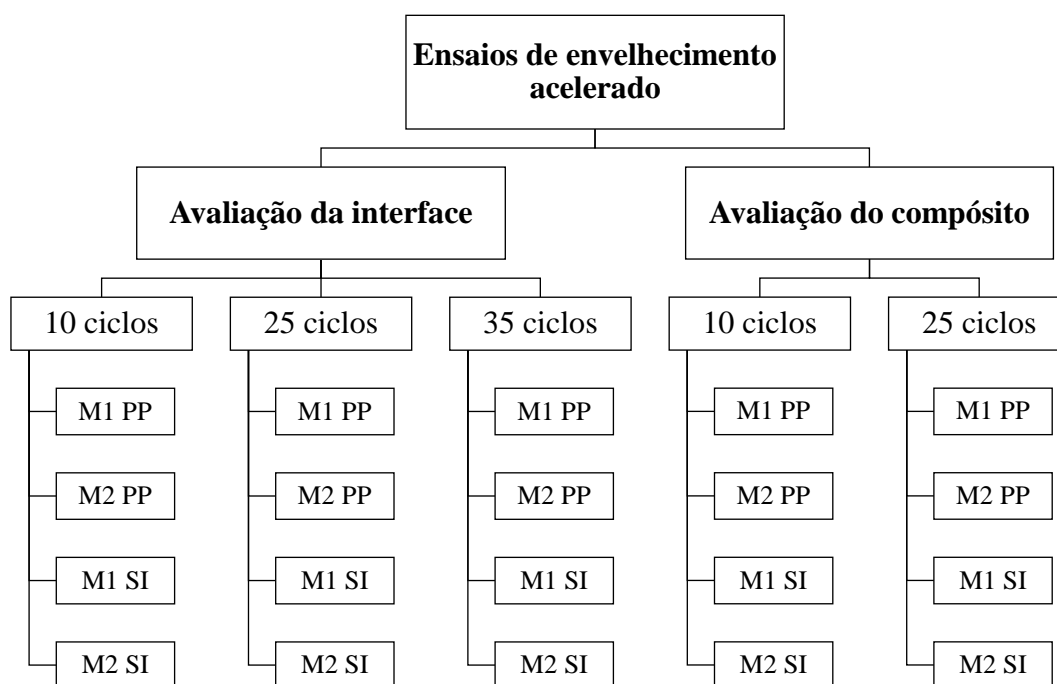


Figura 5.1 – Programa experimental do estudo de durabilidade por meio do procedimento de envelhecimento acelerado.

5.2. Procedimento experimental

5.2.1. Compatibilização de escala do corpo de prova

Para os ensaios de flexão realizados para caracterização mecânica, descritos no item 4.4.2.1, foi adotada geometria prismática com dimensões de 550 x 150 x 150 mm e entalhe de 25 mm, recomendado pela norma EN 14651 [64]. Entretanto, para os ensaios de envelhecimento acelerado, optou-se pela redução das dimensões dos corpos de prova, de tal forma que facilitasse o manuseio para a realização dos ciclos de molhagem e secagem. Portanto, foram adotadas novas medidas para os prismas, sendo elas 400 mm de comprimento e seção transversal quadrada de 100 mm de largura. O comprimento do entalhe no centro do vão passou a ser 15 mm.

Com a mudança da escala dos prismas, foi necessária a realização dos mesmos ensaios nos novos prismas de forma a compatibilizar os resultados e observar se há alguma alteração do comportamento com a mudança de escala. As moldagens dos corpos de prova seguiram o procedimento estabelecido no item

4.3, realizado em um misturador planetário com capacidade de 30 l. A desmoldagem era realizada após 24 horas, e os prismas eram então curados em câmara úmida (umidade de 100% e temperatura de $21 \pm 2^\circ\text{C}$) por 28 dias. Posteriormente, ensaios de flexão foram realizados da mesma forma como descrito no item 4.4.2.1, com alteração no vão de ensaio, que passou a ser de 350 mm. A Figura 5.2 apresenta o arranjo experimental dos ensaios de flexão para os prismas com dimensões alteradas.

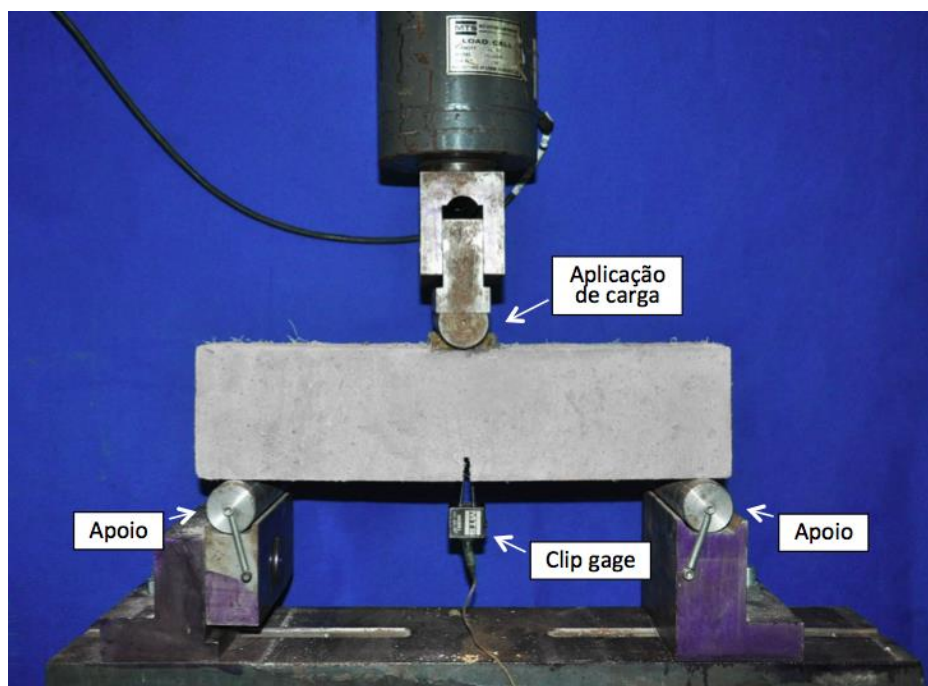


Figura 5.2 – Arranjo do ensaio de flexão em 3 pontos dos prismas com dimensões 400 x 100 x 100 mm.

A Figura 5.3 apresenta as curvas de tensão *versus* CMOD dos prismas ensaiados à flexão para cada tipo de compósito avaliado, sendo eles M1 PP 6 kg/m³, M2 PP 6 kg/m³, M1 SI 10 kg/m³ e M2 SI 10 kg/m³. Para cada combinação de fibra e matriz, três corpos de prova foram ensaiados. Além disso, as curvas obtidas pelos compósitos de dimensões originais estão representadas pelas linhas tracejadas. A Tabela 5.1 traz um resumo comparativo dos resultados obtidos para os compósitos com dimensão original e modificada.

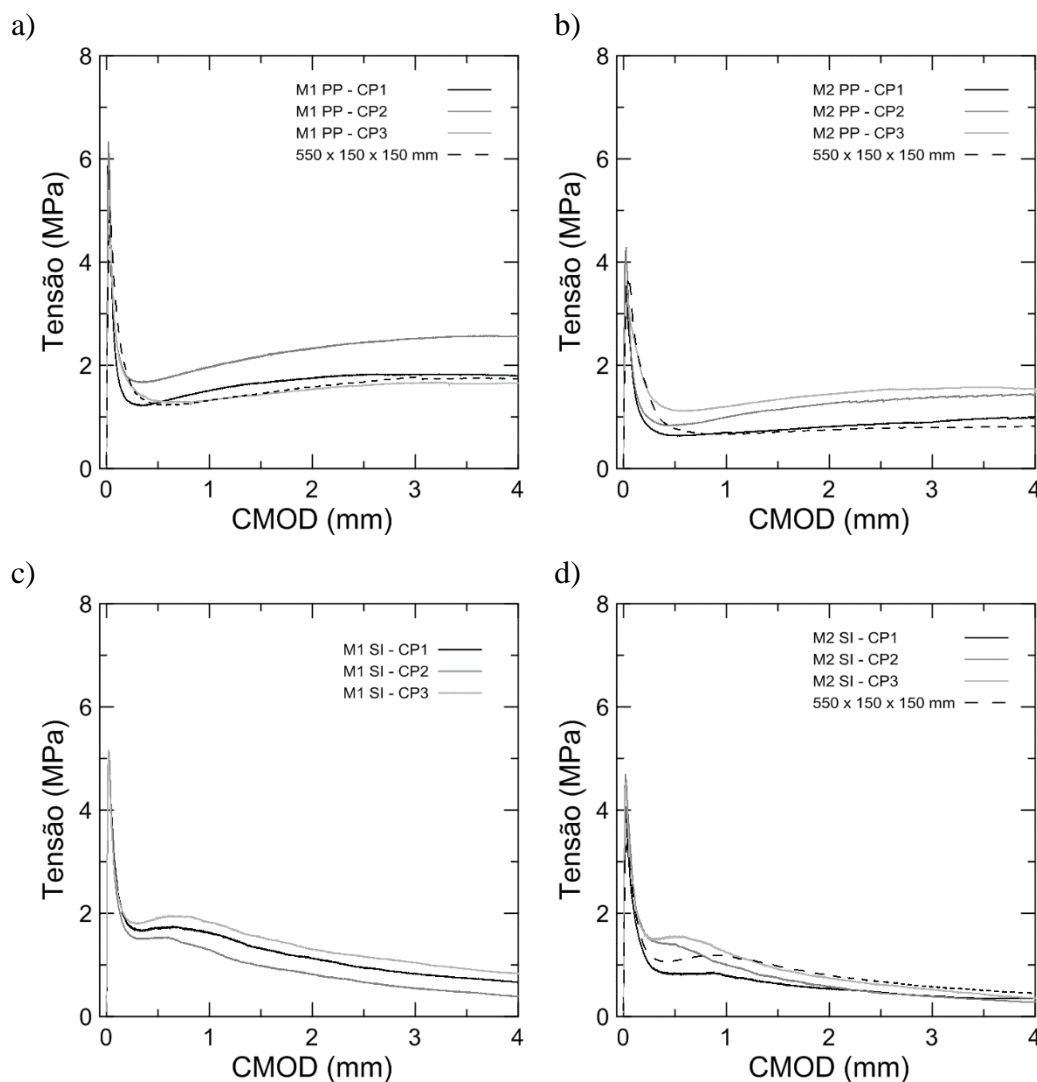


Figura 5.3 – Gráficos comparativos de tensão-CMOD à flexão de concretos reforçados com fibras discretas com dimensão de 400 x 100 x 100 mm e 550 x 150 x 150 mm.

Observou-se que, nos casos dos compósitos M1 PP, M2 PP e M2 SI as curvas obtidas seguiram o mesmo padrão, indicando que a mudança de escala não interferiu no comportamento à flexão do compósito. Além disso, os valores de tensão no limite de proporcionalidade (σ_{LOP}) e as tensões residuais à flexão ($f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ e $f_{R,4}$) não apresentaram diferenças consideráveis com a mudança de escala. É importante ressaltar que, para o compósito M1 SI, não há referência nas dimensões originais pois, esse tipo de composição não foi considerado na fase de avaliação mecânica, devido a elevada degradação das fibras de sisal em uma matriz altamente alcalina, previamente indicada por pesquisas [12,27,76,78–80,116,117]. Entretanto, para avaliação da durabilidade, optou-se por também incluir a avaliação de comportamento desse compósito.

Tabela 5.1 – Resumo dos parâmetros de flexão dos corpos de prova com dimensão original (500x150x150 mm) e modificada (400x100x100 mm).

Compósito	σ_{LOP} (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)
M1 PP – 500x150x150	4,59 (0,34)	1,23 (0,01)	1,46 (0,06)	1,67 (0,10)	1,70 (0,12)
M1 PP – 400x100x100	6,49 (1,03)	1,62 (0,28)	1,97 (0,43)	2,21 (0,49)	2,27 (0,55)
M2 PP – 500x150x150	3,52 (0,06)	1,32 (0,21)	1,31 (0,19)	1,42 (0,20)	1,46 (0,18)
M2 PP – 400x100x100	3,73 (0,49)	0,87 (0,25)	1,07 (0,30)	1,24 (0,34)	1,32 (0,31)
M1 SI – 500x150x150*	- -	- -	- -	- -	- -
M1 SI – 400x100x100	5,09 (0,09)	1,71 (0,20)	1,28 (0,28)	0,92 (0,25)	0,71 (0,23)
M2 SI – 500x150x150	3,32 (0,19)	1,28 (0,25)	1,25 (0,26)	0,93 (0,22)	0,73 (0,20)
M2 SI – 400x100x100	4,43 (0,33)	1,26 (0,38)	0,77 (0,14)	0,51 (0,09)	0,37 (0,05)

σ_{LOP} = tensão correspondente ao limite de proporcionalidade;

$f_{R,1}$ = resistência residual à flexão correspondente a CMOD de 0,5 mm;

$f_{R,2}$ = resistência residual à flexão correspondente a CMOD de 1,5 mm;

$f_{R,3}$ = resistência residual à flexão correspondente a CMOD de 2,5 mm;

$f_{R,4}$ = resistência residual à flexão correspondente a CMOD de 3,5 mm.

*Compósito não avaliado para as dimensões 500x150x150 mm.

5.2.2.

Definição dos ciclos de molhagem e secagem

Com o objetivo de definir a duração de cada ciclo de molhagem e secagem, três corpos de prova prismáticos de compósitos reforçados com 10 kg/m³ de sisal com matriz M2, foram submetidos a ensaios de molhagem e secagem. Inicialmente, os corpos de prova foram secos em estufa, a 35 ± 5°C, até a constância de massa, acompanhada por medições a cada uma hora. Em seguida, os corpos de prova foram submersos em água e, assim como no procedimento de secagem em estufa, leituras de massa foram feitas até constância de massa, indicando estarem completamente saturados. Finalmente, foi realizado novamente o procedimento de secagem. Entretanto, nessa fase, utilizou-se uma câmara de ventilação forçada (Figura 5.4), com temperatura de aproximadamente 33°C. A

câmara de ventilação forçada foi projetada de tal forma a simular condições ambientais as quais os materiais podem estar submetidos.

A variação da massa (VM) foi obtida pela seguinte relação:

$$VM (\%) = \frac{m_t - m_i}{m_i} \times 100 \quad (\text{Eq. 13})$$

onde m_t é a massa correspondente ao instante t e m_i a massa do corpo de prova completamente seco, sendo a massa de referência.

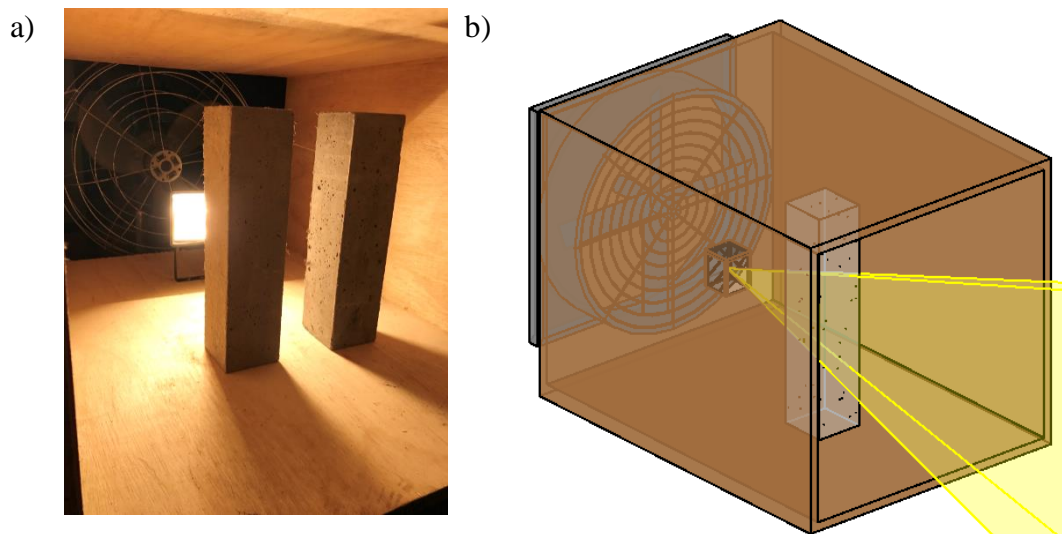


Figura 5.4 – Foto (a) e desenho esquemático (b) da câmara de ventilação forçada.

A Figura 5.5 mostra a curva de variação de massa *versus* tempo dos três corpos de prova avaliados. Observou-se que 85% da saturação total dos corpos de prova foi obtida após 24 horas de molhagem. Além disso, após 72 horas de secagem nas condições da câmara de ventilação forçada, os corpos de prova estavam 93% secos. Portanto, definiu-se os ciclos de envelhecimento acelerado dos corpos de prova prismáticos como sendo 1 dia de molhagem e 3 dias de secagem, totalizando em um ciclo total de 4 dias. Os corpos de prova prismáticos foram submetidos a 10 e 25 ciclos de molhagem e secagem, após 28 dias de cura em câmara úmida.

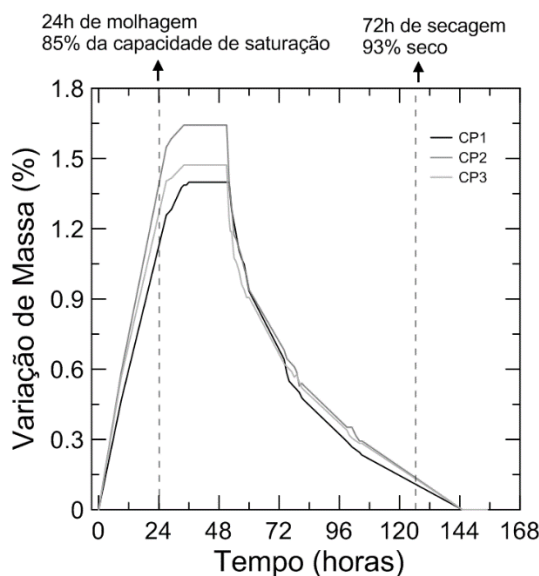


Figura 5.5 – Curvas da variação de massa *versus* tempo para definição do ciclo de molhagem e secagem dos corpos de prova prismáticos.

5.3. Avaliação da durabilidade da interface

A adesão das fibras com as matrizes foi avaliada por meio de ensaios de arrancamento aos 28 dias. Entretanto, de forma a avaliar o comportamento da interface após ensaio de envelhecimento acelerado, os corpos de prova referentes a cada compósito (M1 PP, M2 PP, M1 SI e M2 SI) foram submetidos a 10, 25 e 35 ciclos de molhagem e secagem. Devido ao volume reduzido dos corpos de prova em relação aos prismas, definiu-se os ciclos como sendo de 24 horas de molhagem e apenas 24 horas de secagem.

O procedimento de moldagem e execução de ensaio de arrancamento foi realizado de acordo com o descrito nos itens 4.3 e 4.4.1, respectivamente. Após a desmoldagem, os corpos de prova foram armazenados em câmara úmida por 28 dias. Após o tempo de cura, foram submetidos à molhagem, com submersão em água, seguido de secagem em câmara de ventilação forçada. Após o término de cada período de envelhecimento, foram realizados ensaios de arrancamento. Para cada compósito e cada ciclo, 10 corpos de prova foram ensaiados. Na Figura 5.6 e Tabela 5.2 são apresentados os resultados da avaliação da interface dos compósitos após envelhecimento acelerado. As curvas de todos os corpos de prova ensaiados estão apresentadas no Apêndice B.

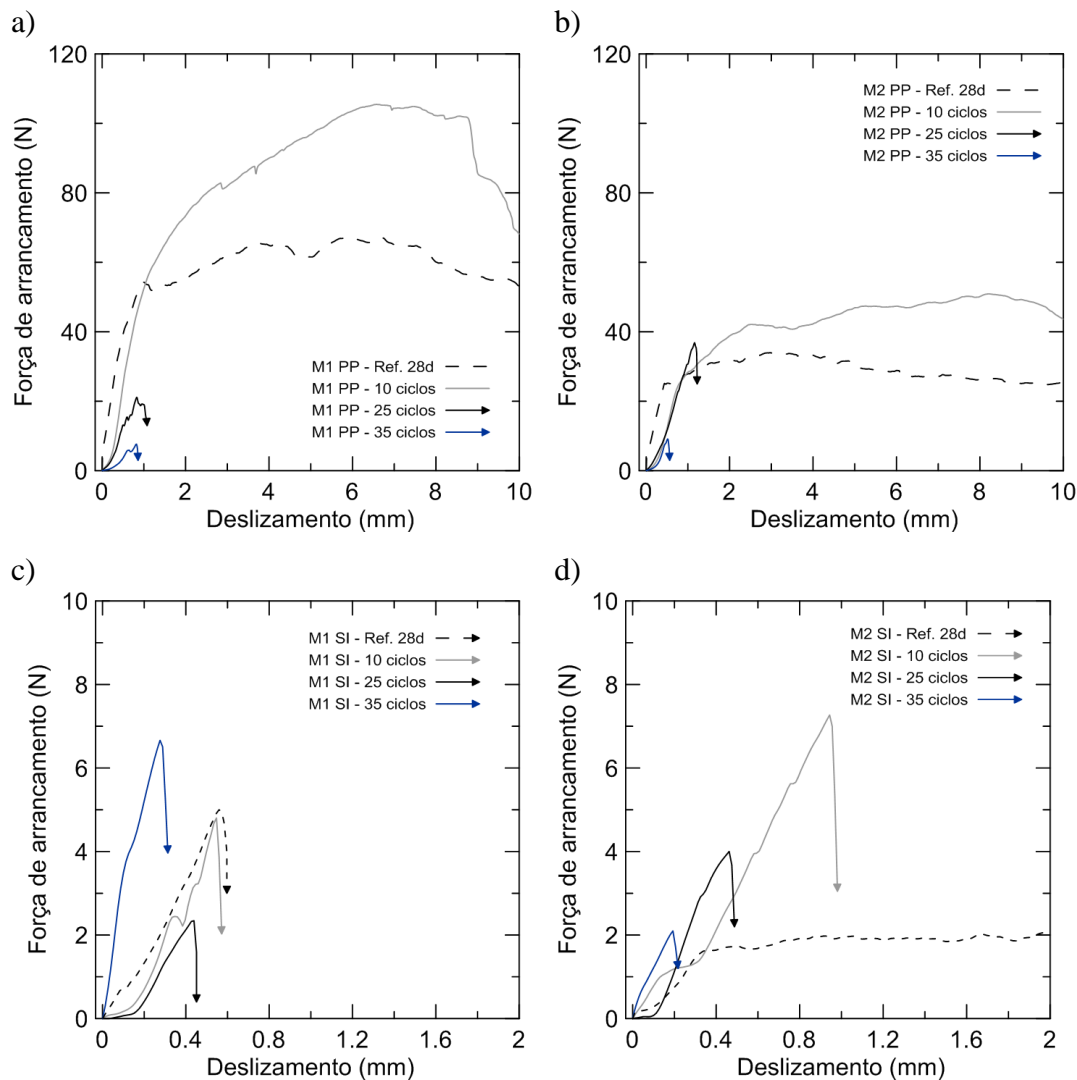


Figura 5.6 – Gráfico força de arrancamento *versus* deslizamento de compósitos submetidos a envelhecimento acelerado correspondente a 10, 25 e 35 ciclos de molhagem e secagem.

Para os corpos de prova com fibras de polipropileno, até 10 ciclos observou-se apenas um aumento na tensão de aderência máxima, seguido do deslizamento da fibra até o completo arrancamento. Essa melhoria na aderência pode ser atribuída à formação de novos produtos de hidratação na região de interface. Entretanto, para maior quantidade de ciclos (25 e 35 ciclos), observou-se a ruptura da fibra. Essa ruptura ocorreu na região acima da matriz, ou seja, na região onde a fibra passa a estar completamente exposta (Figura 5.7). Acredita-se, portanto, que o rompimento da fibra ocorreu por degradação durante o procedimento de molhagem e secagem, fragilizando a fibra nessa região. Em alguns casos, a fibra já estava rompida previamente à execução do ensaio (Figura 5.7-b). O

comportamento aos esforços de arrancamento obtido em 25 e 35 ciclos, portanto, não retratou o que de fato ocorreu na região de interface da fibra com as matrizes estudadas.

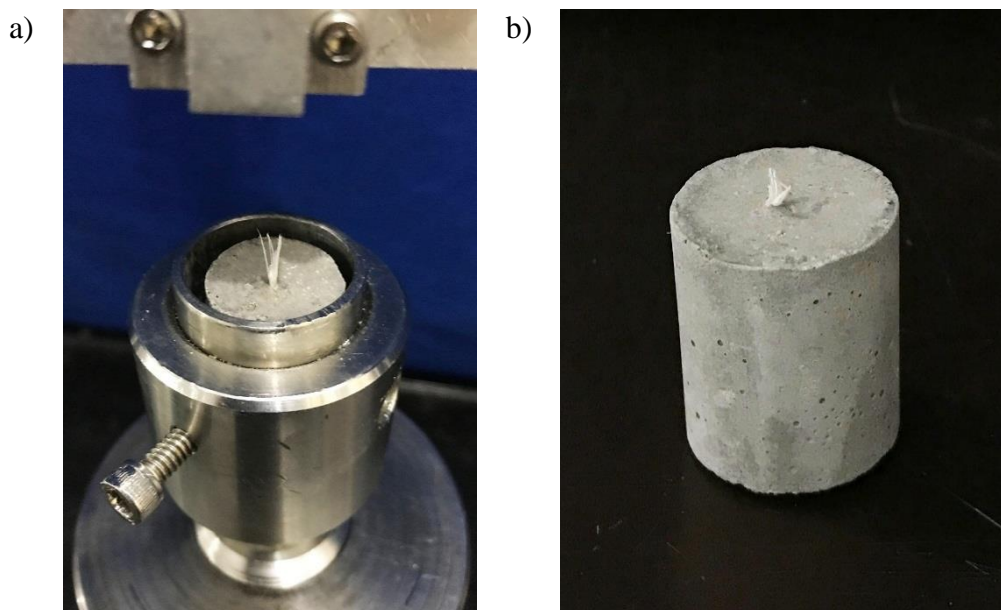


Figura 5.7 – Fibra de polipropileno rompida durante a execução do ensaio (a) e previamente à execução do ensaio (b).

Aos 28 dias, os corpos de prova com fibra de sisal embebida na matriz M2, apresentaram deslizamento total da fibra até o arrancamento. Já no caso da matriz M1, devido à elevada aderência com a fibra de sisal, ocorreu o rompimento da fibra anteriormente à iniciação do descolamento. Entretanto, após a execução dos ciclos de envelhecimento acelerado, ocorreu o rompimento da fibra, em todos os casos, apenas com variação na tensão máxima. Assim como no caso da fibra de polipropileno, essa ruptura da fibra foi associada à degradação na região exposta (região acima da parte embebida pela matriz). Em alguns casos, a fibra já estava rompida previamente a execução do ensaio. A fragilização da fibra pelo processo de molhagem e secagem refletiu na ruptura da fibra, o que não permitiu observar a degradação que ocorreu na região da interface.

Tabela 5.2 – Resultados dos ensaios de arrancamento de compósitos submetidos a envelhecimento acelerado correspondente a 10, 25 e 35 ciclos de molhagem e secagem.

Compósito		$P_{m\acute{a}x}$ (N)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	Modo de falha
M1 PP	Ref. 28d	41,23 (5,99)	0,59 (0,12)	1,62 (0,51)	Arrancamento
	10 ciclos	70,51 (11,71)	1,00 (0,21)	4,03 (0,97)	Arrancamento
	25 ciclos	23,48 (4,19)	0,33 (0,06)	0,96 (0,09)	Fratura da fibra
	35 ciclos	8,95 (3,93)	0,13 (0,06)	0,83 (0,21)	Fratura da fibra
M2 PP	Ref. 28d	21,16 (3,91)	0,30 (0,06)	1,03 (0,18)	Arrancamento
	10 ciclos	38,16 (9,91)	0,54 (0,14)	1,96 (1,04)	Arrancamento
	25 ciclos	34,11 (5,15)	0,49 (0,07)	1,09 (0,32)	Fratura da fibra
	35 ciclos	9,66 (2,69)	0,14 (0,04)	0,71 (0,20)	Fratura da fibra
M1 SI	Ref. 28d	6,83 (2,08)	0,44 (0,14)	0,60 (0,21)	Fratura da fibra
	10 ciclos	5,17 (1,39)	0,34 (0,09)	0,45 (0,09)	Fratura da fibra
	25 ciclos	2,55 (0,29)	0,17 (0,02)	0,44 (0,01)	Fratura da fibra
	35 ciclos*	6,66 -	0,43 -	0,28 -	Fratura da fibra
M2 SI	Ref. 28d	3,85 (1,27)	0,25 (0,08)	1,06 (0,47)	Arrancamento
	10 ciclos	6,08 (2,39)	0,40 (0,16)	1,04 (0,29)	Fratura da fibra
	25 ciclos	3,97 (1,08)	0,26 (0,07)	0,61 (0,21)	Fratura da fibra
	35 ciclos	2,56 (0,65)	0,17 (0,04)	0,28 (0,13)	Fratura da fibra

*Resultados referentes a apenas um corpo de prova.

5.4. Avaliação da durabilidade do compósito

Foram produzidos compósitos com fibras discretas de polipropileno (6 kg/m³) e sisal (10 kg/m³), com matrizes M1 e M2. Após 28 dias de cura, os compósitos foram submetidos a 24 horas de molhagem e 72 horas de secagem em câmara de ventilação forçada. Foram realizados, ao total, 10 e 25 ciclos de molhagem e secagem. Após o término de cada período de envelhecimento, foram realizados ensaios de flexão conforme descritos no item 4.4.2.1. Para cada compósito e cada ciclo, três corpos de prova foram ensaiados. As curvas de tensão *versus* CMOD dos compósitos submetidos ao envelhecimento acelerado são apresentadas na Figura 5.8. Os parâmetros obtidos a partir dos ensaios de flexão, assim como seus respectivos desvios padrões, são sumarizados na Tabela 5.3.

Observa-se que, para os compósitos reforçados com polipropileno (Figura 5.8-a,b), não houve alteração no comportamento a flexão após o procedimento de envelhecimento acelerado. Isso indica que a fibra de polipropileno se comporta de forma eficiente em matrizes cimentícias alcalinas (matriz M1) e com alcalinidade baixa (matriz M2), sem degradação da interface entre a fibra e a matriz em decorrência do processo de molhagem e secagem. O mesmo foi observado para a fibra de sisal em uma matriz com baixa alcalinidade (Figura 5.8-d). Nesse caso, a variação de comportamento na região entre os valores de CMOD de 0 e 1 mm pode ser atribuído a variabilidade da própria fibra natural e/ou a variação da distribuição das fibras na seção transversal durante o processo de moldagem. Pode-se concluir que o envelhecimento acelerado teve efeito limitado na degradação da interface na matriz de baixa alcalinidade.

Por outro lado, a fibra de sisal em uma matriz com alcalinidade elevada (Figura 5.8-c) resultou em uma grande variação no comportamento à flexão do compósito. Observa-se que, a tensão máxima foi mantida e está relacionada com as características a flexão da matriz. Entretanto, na região pós-fissuração, houve a perda da ductilidade obtida com a utilização de fibras, caracterizando um compósito de comportamento frágil. Aos 28 dias, esse compósito apresentou uma tensão residual média de 1,26 MPa. Entretanto, com 10 ciclos o compósito apresentou uma queda brusca de valor de tensão após primeira fissura, chegando a zero no valor de CMOD de 1,5 mm. Melo Filho *et al.* [80] também observaram

processo de degradação ocorrendo em compósitos reforçados com sisal com apenas 10 ciclos.

Uma queda ainda mais acentuada foi observada após 25 ciclos, com valor de tensão de zero em CMOD de apenas 0,5 mm. O mesmo comportamento de degradação avançada foi encontrado por outros pesquisadores [80][79][78], onde 25 ciclos resultaram na completa perda de ductilidade do compósito. Considera-se, portanto, que a fibra de sisal foi degradada pela presença de alto teor de hidróxido de cálcio na matriz, o qual migra para os vazios das fibras naturais, causando a mineralização da mesma [12,73,79,116,122].

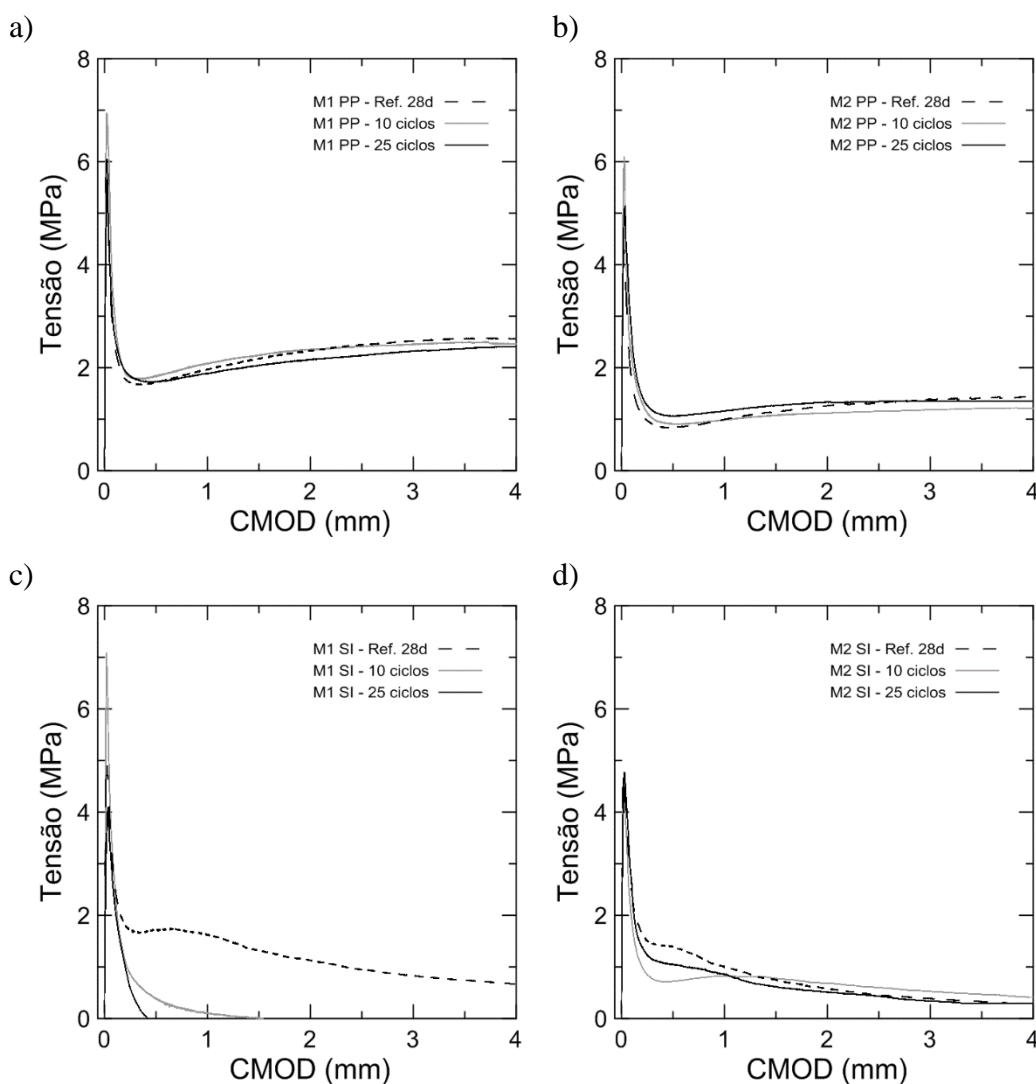


Figura 5.8 – Gráfico tensão-CMOD à flexão de concretos submetidos a envelhecimento acelerado correspondente a 10 e 25 ciclos de molhagem e secagem.

Tabela 5.3 – Resumo dos parâmetros de flexão dos compósitos submetidos a envelhecimento acelerado correspondente a 10 e 25 ciclos de molhagem e secagem.

Compósito	P_{LOP} (kN)	σ_{LOP} (MPa)	P_U (kN)	$f_{R,0}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)
M1 PP – Ref. 28d	9,91 (1,26)	6,49 (1,03)	9,91 (1,26)	1,71 (0,26)	1,62 (0,28)	1,97 (0,43)	2,21 (0,49)	2,27 (0,55)
M1 PP – 10 ciclos	10,23 (0,73)	7,14 (0,28)	10,23 (0,73)	1,69 (0,17)	1,68 (0,17)	1,01 (0,21)	2,24 (0,17)	2,27 (0,19)
M1 PP – 25 ciclos	10,23 (0,73)	7,09 (0,18)	10,23 (0,73)	1,68 (0,16)	1,67 (0,17)	2,05 (0,20)	2,22 (0,18)	2,26 (0,21)
M2 PP – Ref. 28d	5,13 (0,68)	3,73 (0,49)	5,13 (0,68)	1,07 (0,33)	0,87 (0,25)	1,07 (0,30)	1,24 (0,34)	1,32 (0,31)
M2 PP – 10 ciclos	7,77 (0,54)	5,65 (0,39)	7,77 (0,54)	0,95 (0,19)	0,75 (0,15)	0,87 (0,18)	0,94 (0,18)	0,98 (0,20)
M2 PP – 25 ciclos	6,98 (0,71)	5,22 (0,16)	6,98 (0,71)	1,44 (0,14)	1,23 (0,23)	1,47 (0,40)	1,57 (0,46)	1,56 (0,42)
M1 SI – Ref. 28d	7,00 (0,12)	5,09 (0,09)	7,00 (0,12)	1,69 (0,14)	1,71 (0,20)	1,28 (0,28)	0,92 (0,25)	0,71 (0,23)
M1 SI – 10 ciclos	8,39 (1,39)	6,23 (0,80)	8,39 (1,39)	0,86 (0,18)	0,37 (0,14)	0,03 (0,05)	0,00 (0,00)	0,00 (0,00)
M1 SI – 25 ciclos	6,90 (1,32)	5,32 (1,10)	6,90 (1,32)	0,48 (0,29)	0,04 (0,07)	0,00 (0,00)	0,00 (0,00)	0,00 (0,00)
M2 SI – Ref. 28d	5,40 (0,40)	4,43 (0,33)	5,40 (0,40)	1,35 (0,29)	1,26 (0,38)	0,77 (0,14)	0,51 (0,09)	0,37 (0,05)
M2 SI – 10 ciclos	6,27 (0,27)	4,55 (0,20)	6,27 (0,27)	0,93 (0,10)	0,88 (0,17)	0,92 (0,13)	0,73 (0,12)	0,59 (0,11)
M2 SI – 25 ciclos	6,64 (0,48)	5,18 (0,36)	6,64 (0,48)	1,46 (0,20)	1,18 (0,13)	0,64 (0,05)	0,47 (0,04)	0,42 (0,12)

P_{LOP} = carga correspondente ao limite de proporcionalidade;

σ_{LOP} = tensão correspondente ao limite de proporcionalidade;

P_U = carga última;

$f_{R,0}$ = resistência residual à flexão correspondente a CMOD de 0,25 mm;

$f_{R,1}$ = resistência residual à flexão correspondente a CMOD de 0,5 mm;

$f_{R,2}$ = resistência residual à flexão correspondente a CMOD de 1,5 mm;

$f_{R,3}$ = resistência residual à flexão correspondente a CMOD de 2,5 mm;

$f_{R,4}$ = resistência residual à flexão correspondente a CMOD de 3,5 mm.

5.4.1.

Análise microestrutural

Após a realização do processo de envelhecimento acelerado, fibras foram extraídas dos compósitos formados pela matriz M1 e observadas por meio de

técnicas de microscopia. Para as fibras de polipropileno, a análise foi realizada em microscópio estereoscópio da marca *Nikon*, modelo SMZ800N. Para as fibras de sisal, foi utilizado microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo Jeol JSM 6510LV, operando de 10 a 20 kV, assim como descrito no item 3.2.4.1. Na Figura 5.9 são apresentadas as superfícies longitudinais das fibras de polipropileno de referência, após 10 ciclos e 25 ciclos de molhagem e secagem, extraídas do compósito. A principal degradação observada foi a mecânica, evidenciada pelo desfibrilamento. Essa degradação pode ser proveniente do próprio procedimento de mistura, assim como demonstrado por Cáceres *et al.* [19]. Entretanto, a presença de materiais cimentícios aderidos à interface da fibra mostra que esse processo de abrasão da superfície durante a mistura pode ser vantajoso em relação à melhoria da aderência da interface fibra-matriz.

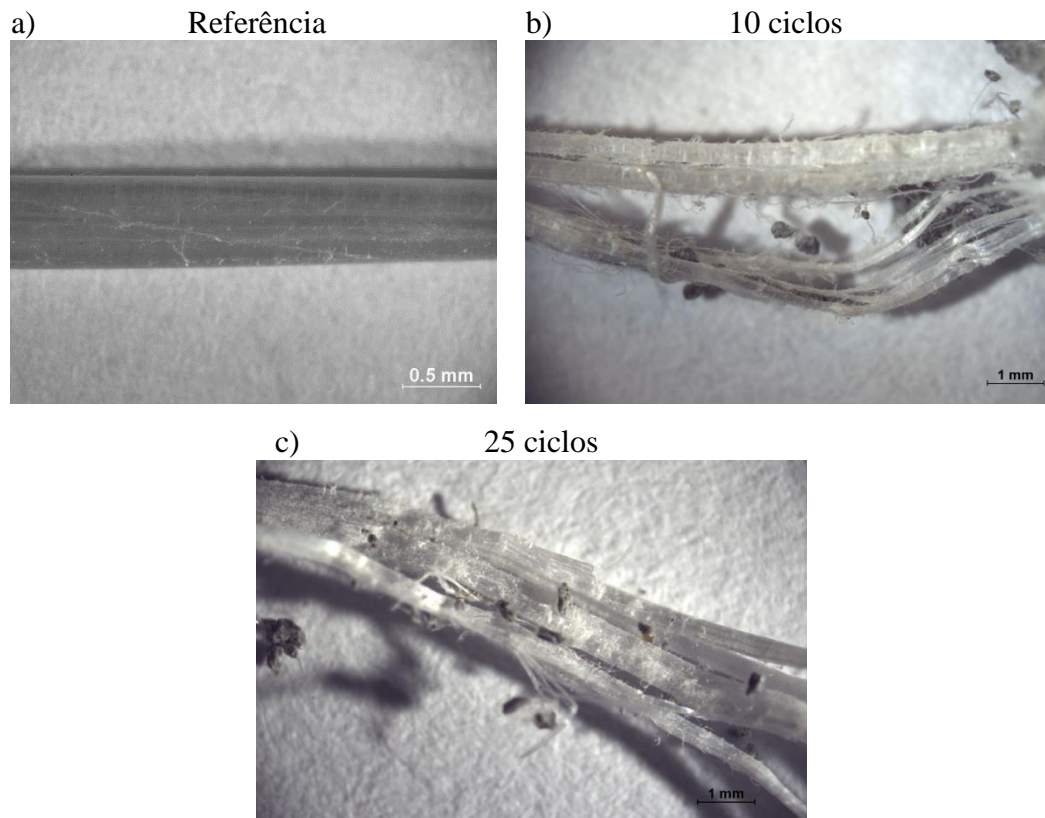


Figura 5.9 – Micrografia da superfície longitudinal de fibras de polipropileno de referência (a) e extraídas de compósitos de matriz M1 após 10 ciclos (b) e 25 ciclos (c) de molhagem e secagem.

As fibras de sisal foram extraídas dos compósitos após 10 e 28 ciclos de molhagem e secagem. Para análise no MEV, as fibras foram imersas em água por 48 horas e cortadas com lâmina perpendicularmente ao seu eixo longitudinal.

Além disso, foi realizada a metalização das fibras com ouro. As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam a configuração da superfície longitudinal e seção transversal da fibra de sisal, respectivamente. Após 10 ciclos já foi possível observar a fragilização e desagregação das fibrilas dessas fibras (Figura 5.10-b), além de apresentarem superfície com aspecto mais rugoso em relação à fibra de referência, evidenciando a degradação superficial. Após 25 ciclos, essa mudança no aspecto superficial também é observada. Na avaliação da seção transversal (Figura 5.11) é possível observar a desagregação dos lumens. Essa desagregação pode ser proveniente da decomposição e dissolução da lamela média devido a alcalinidade de água dos poros da matriz, quebrando as ligações entre as células individuais [5]. Além disso, é possível observar a diminuição da área dos lumens. Esse processo pode estar relacionado com a migração dos novos produtos de hidratação formados para as paredes desses vazios, resultando na mineralização da fibra [5,12,27,75,77,79].

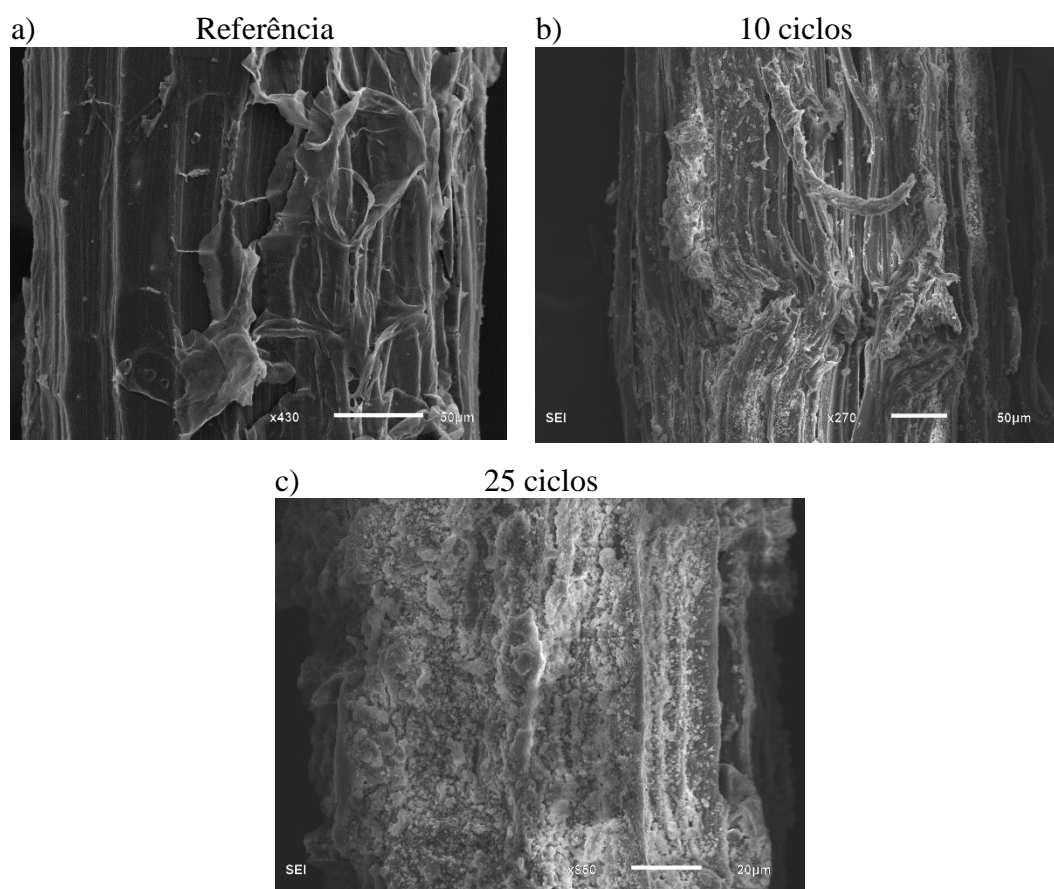


Figura 5.10 – Micrografia da superfície longitudinal de fibras de sisal de referência (a) e extraídas de compósitos de matriz M1 após 10 ciclos (b) e 25 ciclos (c) de molhagem e secagem.

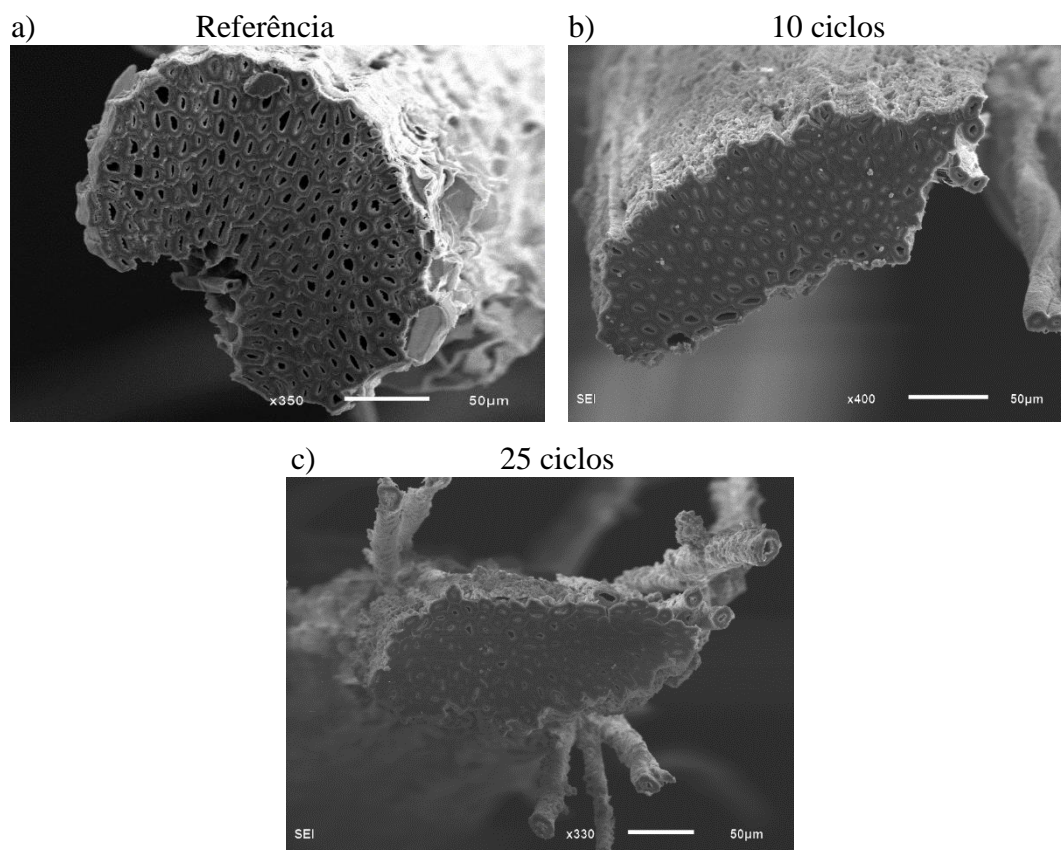


Figura 5.11 – Micrografia da superfície longitudinal de fibras de sisal de referência (a) e extraídas de compósitos de matriz M1 após 10 ciclos (b) e 25 ciclos (c) de molhagem e secagem.

5.5. Conclusão

O estudo da durabilidade da interface foi realizado por meio de ensaios de arrancamento em corpos de prova produzidos com fibra de polipropileno e sisal, embebidas nas matrizes M1 e M2. Os corpos de prova foram submetidos a 10, 25 e 35 ciclos de molhagem e secagem, sendo que a molhagem tinha duração de 24 horas, assim como a secagem em câmara de ventilação forçada. Observou-se que, até 10 ciclos de molhagem e secagem, a fibra de polipropileno foi completamente arrancada de ambas as matrizes, sem fratura da fibra. Para maiores quantidades de ciclos (25 e 35 ciclos), ocorreu o rompimento da fibra. A fibra de sisal, por sua vez, rompeu em todos os ciclos avaliados. A única diferença de comportamento entre as matrizes, foi aos 28 dias, com o deslizamento completo da fibra quando embebida na matriz M2 e rompimento quando na matriz M1, devido a elevada aderência na interface nesse último caso. Entretanto, para ambas as fibras a fratura após execução dos ciclos foi atribuída à fragilização mecânica quando exposta ao

processo de envelhecimento, não necessariamente refletindo o que ocorre quando estão no interior do compósito.

A durabilidade dos compósitos foi avaliada por meio de ensaios de flexão após execução do processo de envelhecimento acelerado, também com ciclos de molhagem e secagem. Nesse caso, o ciclo foi previamente definido como sendo 24 horas de molhagem e 72 horas de secagem em câmara de ventilação forçada. Os corpos de prova foram submetidos a 10 e 25 ciclos. As consequências do processo de envelhecimento foram observadas apenas para o compósito com matriz M1 reforçada com fibras de sisal. Nesse caso, o compósito apresentou ruptura frágil após 10 e 25 ciclos de molhagem e secagem. Para os outros compósitos, M1 PP, M2 PP e M2 SI, obteve-se um comportamento dúctil, evidenciando que não houve degradação das fibras. Esses resultados já eram esperados pois, em meio alcalino como no caso da matriz M1, fibras naturais sofrem o processo de mineralização devido a presença do alto teor de hidróxido de cálcio.

6

Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

6.1.

Conclusões

No presente trabalho, concretos reforçados com fibras discretas de sisal e polipropileno, com 51 mm de comprimento foram avaliados quanto ao seu desempenho mecânico. Duas matrizes (M1 e M2) foram escolhidas, sendo a M2 com maior quantidade de materiais pozolânicos adicionados e, portanto, com maior consumo de hidróxido de cálcio aos 28 dias, constatado a partir da realização de análise termogravimétrica. A menor quantidade de hidróxido de cálcio é favorável à durabilidade das fibras de sisal, as quais podem sofrer degradação em ambiente alcalino. As matrizes foram caracterizadas quanto ao seu comportamento mecânico, por meio de ensaios de compressão uniaxial. Aos 28 dias, a matriz M1 apresentou resistência 60% maior do que a matriz M2. Entretanto, observou-se que a matriz M2 apresentou maior ganho de resistência após 168 dias, devido ao desenvolvimento da atividade pozolânica em maiores idades. As fibras escolhidas para reforço dos concretos também foram caracterizadas. A resistência à tração média para a fibra de polipropileno foi de $260,72 \pm 13,15$ MPa e $383,88 \pm 49,88$ MPa para a fibra de sisal.

Para caracterização da interface das fibras com as matrizes escolhidas, foram realizados ensaios de arrancamento. Para todos os comprimentos de embebimento avaliados, 15, 25 e 35 mm, houve o completo arrancamento das fibras. Além disso, observou-se um aumento progressivo da carga de arrancamento na medida em que se aumentou o comprimento de arrancamento. A fibra de sisal apresentou menores cargas do que as fibras de polipropileno, entretanto, devido sua menor seção transversal, a tensão de aderência obtida por ambas foi comparável. Para 25 mm, a tensão de aderência da fibra de polipropileno embebida na matriz M1 foi $0,59 \pm 0,12$ MPa e na matriz M2, $0,30 \pm 0,06$ MPa. Por outro lado, a fibra de sisal embebida na matriz M2 obteve $0,25 \pm 0,08$ MPa de tensão de aderência máxima.

A caracterização mecânica dos compósitos foi realizada por meio de ensaios de flexão em três pontos, em corpos de prova prismáticos com entalhe (EN 14651). Os concretos sem reforço apresentaram comportamento frágil, enquanto que, para todas as dosagens de fibra, a presença de reforço proporcionou ductilidade ao concreto. Após a fissuração da matriz, a presença de fibras garantiu ao concreto comportamento denominado *deflection softening*. A tensão residual, após a fissuração da matriz, foi maior na medida em que se aumentou a dosagem de fibras, para todos os compósitos avaliados. Da mesma forma, o incremento na quantidade de fibras resultou no aumento da tenacidade do concreto. Além disso, observou-se que, quando são comparados o desempenho dos concretos de matriz M2 reforçados com dosagens superiores de sisal em relação às do polipropileno, eles apresentam níveis de tensão similares, principalmente até abertura de fissura de 1 mm. Ou seja, concretos com a dosagem de 3 kg/m³ de polipropileno tem desempenho similar ao concreto reforçado com 6 kg/m³ de sisal, 6 kg/m³ de polipropileno similar ao com 10 kg/m³ de sisal e assim sucessivamente.

Os concretos foram avaliados quanto a possibilidade de aplicação para fins estruturais de acordo com recomendações do *fib Model Code*. Foi observado que, com exceção do concreto reforçado com 3 kg/m³ de fibra de sisal, todos os outros compósitos atenderam ao critério de que a resistência residual no estado limite último ($f_{R,3}$) de ser no mínimo a metade da resistência residual no estado limite de serviço ($f_{R,1}$). Dessa forma, foi considerada adequada a utilização de fibras de polipropileno e fibras de sisal como reforço com fins estruturais, considerando que para o caso da fibra de sisal devem ser utilizadas dosagens maiores que 3 kg/m³.

Ensaio de flexão sob carregamentos cíclicos também foram realizados e observou-se uma pequena degradação da rigidez com a execução dos ciclos. Foi observado que compósitos reforçados com fibra de sisal apresentaram valor médio de resistência ao desenvolvimento da fissura maior do que o apresentado pelos concretos reforçados com polipropileno, para comprimentos de fissura maiores que 60 mm. Até esse tamanho de fissura, os concretos reforçados com os dois tipos de fibras apresentaram comportamento semelhante.

Além do comportamento mecânico, a durabilidade dos compósitos também foi avaliada por meio de ciclos de molhagem e secagem. A durabilidade interface foi analisada por meio de ensaios de arrancamento. Esses ensaios foram realizados

após o período de envelhecimento acelerado, correspondente a 10, 25 e 35 ciclos de molhagem e secagem. Até 10 ciclos, a fibra de polipropileno foi completamente arrancada de ambas as matrizes, sem fratura da fibra. Para maiores quantidades de ciclos, ocorreu o rompimento da fibra. Por outro lado, a fibra de sisal rompeu em todos os ciclos avaliados. Entretanto, atribuiu-se a fratura das fibras à fragilização mecânica quando exposta ao processo de envelhecimento, não necessariamente refletindo o que ocorre quando estão no interior do compósito. Em alguns casos, as fibras já estavam rompidas após os ciclos, antes da execução do ensaio, o que não permitiu avaliar a influência da degradação na interface.

A durabilidade dos compósitos também foi avaliada por meio de ensaios de flexão após execução dos ciclos de molhagem e secagem. Os corpos de prova foram submetidos a 10 e 25 ciclos. Para os concretos reforçados com fibra de polipropileno, pouca ou nenhuma degradação foi observada. O mesmo ocorreu para os compósitos formados pela matriz com substituição parcial de cimento reforçado com fibra de sisal. Por outro lado, a degradação das fibras de sisal em ambiente alcalino ficou evidente a partir do comportamento do compósito formado pela matriz M1. Após 10 ciclos já foi observada perda da ductilidade do concreto fibroso, comportamento ainda mais evidente com o aumento da quantidade de ciclos.

6.2.

Sugestões para futuros trabalhos

Sugerem-se alguns tópicos a fim de serem avaliados para fundamentar e justificar os efeitos conclusivos deste trabalho. Essas sugestões incluem:

- melhoria da aderência das fibras de sisal, a partir da realização de algum tratamento prévio à utilização em matriz cimentícia;
- produção de compósitos para avaliação do comportamento à esforços de tração direta;
- realização de ensaios em escala estrutural para verificação da influência da escala no comportamento dos concretos reforçados com fibras;

- avaliação da durabilidade dos compósitos a partir de procedimento de envelhecimento natural, de forma a relacionar o envelhecimento acelerado através de ciclos de molhagem e secagem;
- avaliação da resistência dos compósitos à ação de agentes químicos externos, como sulfato por exemplo.

- [1] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials**. 3.ed. McGraw-Hill, 2006.
- [2] FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com Fibras de Aço**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2000, Boletim Técnico.
- [3] SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. São Paulo, 2013. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [4] PEREIRA, E. V. **Influência de Fibras de Aço no Comportamento Mecânico e nos Mecanismos de Fissuração de Concretos Autoadensáveis**. Rio de Janeiro, 2017. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica.
- [5] BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2.ed. Taylor & Francis, 2007.
- [6] FIGUEIREDO, A. D. **Concreto Reforçado Com Fibras**. São Paulo, 2011. Livre Docência - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [7] NAAMAN, A. E.; REINHARDT, H. W. Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response. **Materials and Structures**, vol. 39, no. 289, pp. 547–555, 2006.
- [8] JOHNSTON, C. D. **Fiber-Reinforced Cements and Concretes**. 3.vol. New York: Taylor & Francis, 2010.
- [9] FIGUEIREDO, A. D. Os desafios para o uso do concreto reforçado com fibras como material estrutural. **Anais do 56º Congresso Brasileiro do Concreto - Ibracon**, no. 1, pp. 1–19, 2014.
- [10] BRIBIÁN, I. Z.; CAPILLA, A. V.; USÓN, A. A. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential.

- Building and Environment**, vol. 46, no. 5, pp. 1133–1140, 2011.
- [11] MOTTA, L. A.; AGOPYAN, V. **Caracterização de Fibras Curtas Empregadas na Construção Civil**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2007, p. 23, Boletim Técnico.
 - [12] BERGSTROM, S. G.; GRAM, H. Durability of alkali-sensitive fibres in concrete. **The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, vol. 6, no. 2, pp. 75–80, 1984.
 - [13] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 544.1R**: State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete. United States, 2002.
 - [14] SALVADOR, R. P.; FIGUEIREDO, A. D. Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. **Revista Matéria**, vol. 18, no. 2, pp. 1273–1285, 2013.
 - [15] FIGUEIREDO, A. D.; CECCATO, M. R. Workability Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Slump and Ve-Be Test. **Materials Research**, vol. 18, no. 6, pp. 1284–1290, 2015.
 - [16] LI, J. J.; NIU, J. G.; WAN, C. J.; JIN, B.; YIN, Y. L. Investigation on mechanical properties and microstructure of high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 118, pp. 27–35, 2016.
 - [17] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14889-2**: Fibres for concrete - Part 2: Polymer fibres - Definition, specification and conformity. Brussels, 2006.
 - [18] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 10002-1**: Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at ambient temperature. Brussels, 2001.
 - [19] CÁCERES, A. R. E.; GALO BARDES, I.; FIGUEIREDO, A. D. Mechanical Characterization of Synthetic Macrofibres. **Materials Research**, vol. 19, no. 3, pp. 711–720, 2016.
 - [20] KALIFA, P.; CHÉNÉ, G.; GALLÉ, C. High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibers from spalling to microstructure. **Cement and Concrete Research**, vol. 31, no. 10, pp. 1487–1499, 2001.
 - [21] LÓPEZ-BUENDÍA, A. M.; ROMERO-SÁNCHEZ, M. D.; CLIMENT, V.; GUILLEM, C. Surface treated polypropylene (PP) fibres for reinforced

- concrete. **Cement and Concrete Research**, vol. 54, pp. 29–35, 2013.
- [22] ZHENG, Z.; FELDMAN, D. Synthetic fibre-reinforced concrete. **Progress in Polymer Science**, vol. 20, no. 2, pp. 185–210, 1995.
- [23] OZAWA, M.; MORIMOTO, H. Effects of various fibres on high-temperature spalling in high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 71, pp. 83–92, 2014.
- [24] NEOMATEX: **Catálogo de fibras - Neomatex**. Disponível em: <http://www.neomatex.com.br>. Acesso em: 11 de jan. 2018.
- [25] MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; HINRICHSSEN, G. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. **Macromolecular Materials and Engineering**, vol. 276–277, pp. 1–24, 2000.
- [26] JOHN, M. J.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate Polymers**, vol. 71, no. 3, pp. 343–364, 2008.
- [27] SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D.; MELO FILHO, J. A.; FAIRBAIRN, E. M. R. Physical and mechanical properties of durable sisal fiber-cement composites. **Construction and Building Materials**, vol. 24, no. 5, pp. 777–785, 2010.
- [28] SILVA, F. A.; MOBASHER, B.; TOLEDO FILHO, R. D. Cracking mechanisms in durable sisal fiber reinforced cement composites. **Cement & Concrete Composites**, vol. 31, no. 10, pp. 721–730, 2009.
- [29] BISANDA, E. T. N.; ANSELL, M. P. Properties of sisal-CNSL composites. **Journal of Materials Science**, vol. 27, no. 6, pp. 1690–1700, 1992.
- [30] LI, Y.; MAI, Y. W. Mai; YE, L. Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. **Composites Science and Technology**, vol. 60, no. 11, pp. 2037–2055, 2000.
- [31] MUKHERJEE, P. S.; SATYANARAYANA, K. G. Structure and properties of some vegetable fibres. Part 1: Sisal fibre. **Journal of Materials Science**, vol. 19, pp. 3925–3934, 1984.
- [32] SINGH, S.; SHUKLA, A.; BROWN, R. Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix. **Cement and Concrete Research**, vol. 34, no. 10, pp. 1919–1925, 2004.
- [33] ZOLLO, R. F. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of

- development. **Cement & Concrete Composites**, vol. 19, no. 2, pp. 107–122, 1997.
- [34] CIFUENTES, H.; GARCÍA, F.; MAESO, O.; MEDINA, F. Influence of the properties of polypropylene fibres on the fracture behaviour of low-, normal- and high-strength FRC. **Construction and Building Materials**, vol. 45, pp. 130–137, 2013.
- [35] DI MAIDA, P.; RADİ, E.; SCIANCALEPORE, C.; BONDIOLI, F. Pullout behavior of polypropylene macro-synthetic fibers treated with nano-silica. **Construction and Building Materials**, vol. 82, pp. 39–44, 2015.
- [36] SILVA, F. A.; MOBASHER, B.; SORANAKOM, C.; TOLEDO FILHO, R. D. Effect of fiber shape and morphology on interfacial bond and cracking behaviors of sisal fiber cement based composites. **Cement & Concrete Composites**, vol. 33, no. 8, pp. 814–823, 2011.
- [37] FERREIRA, S. R. SILVA, F. A.; LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D. Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber-matrix bond in cement based systems. **Construction and Building Materials**, vol. 101, pp. 730–740, 2015.
- [38] BABAFEMI, A. J.; BOSHOFF, W. P. Pull-out response of macro synthetic fibre from concrete matrix: Effect of loading rate and embedment length. **Construction and Building Materials**, vol. 135, pp. 590–599, 2017.
- [39] FANELLA, D. A.; NAAMAN, A. E. Stress-strain Properties of Fiber Reinforced Mortar in Compression. **ACI Journal**, vol. 82, no. 4, pp. 475–483, 1985.
- [40] SANT'ANA, M. V. P. **Modelo Numérico Para Concreto Reforçado Com Fibras**. Rio de Janeiro, 2005. Dissertação de Mestrado - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense.
- [41] MAZAHARIPOUR, H.; GHANBARPOUR, S.; MIRMORADI, S. H.; HOSSEINPOUR, I. The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 25, no. 1, pp. 351–358, 2011.
- [42] YIN, S.; TULADHAR, R.; COLLISTER, T.; COMBE, M.; SIVAKUGAN, N.; DENG, Z. Post-cracking performance of recycled polypropylene fibre in concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 101, pp. 1069–1077, 2015.

- [43] KIM, Y.-J.; HU, J.; LEE, S.-J.; YOU, B.-H. Mechanical Properties of Fiber Reinforced Lightweight Concrete Containing Surfactant. **Advances in Civil Engineering**, vol. 2010, pp. 1–8, 2010.
- [44] FUJIYAMA, R.; DARWISH, F.; PEREIRA, M. V. Mechanical characterization of sisal reinforced cement mortar. **Theoretical & Applied Mechanics Letters**, vol. 4, no. 6, 2014.
- [45] LI, V. C.; MISHRA, D. K.; WU, H. C. Matrix design for pseudo-strain-hardening fibre reinforced cementitious composites. **Materials and Structures**, vol. 28, no. 10, pp. 586–595, 1995.
- [46] LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D.; LIMA, J. M. F. Mecanismo de fissuração sob tração direta de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal. **Engevista**, vol. 15, no. 1, pp. 95–103, 2013.
- [47] FARIAS, L. A.; LOPES, A. N. M.; STIVAL, M. L.; ANDRADE, M. A. S.; BITTENCOURT, R. M. Ensaios de Tração Direta em Corpos de Prova de Concreto. **MFAP**, no. 1, p. 9, 2001.
- [48] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI Committee 544.2R**: Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete. United States, 1999.
- [49] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C469-02**: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. United States, 2002.
- [50] MOLINS, C.; AGUADO, A.; SALUDES, S. Double punch test to control the energy dissipation in tension of FRC (Barcelona test). **Materials and Structures**, vol. 42, no. 4, pp. 415–425, 2009.
- [51] CHEN, F. W. Double Punch Test for Tensile Strength of Concrete. **ACI Materials Journal**, vol. 67, no. July, pp. 993–995, 1973.
- [52] DI PRISCO, M.; LAMPERTI, M. G. L.; LAPOLLA, S. Lapolla. Double-edge wedge splitting test: preliminary results. **Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures**, pp. 1579–1586, 2010.
- [53] DI PRISCO, M.; FERRARA, L.; LAMPERTI, M. G. L. Double edge wedge splitting (DEWS): An indirect tension test to identify post-cracking behaviour of fibre reinforced cementitious composites. **Materials and Structures**, vol. 46, no. 11, pp. 1893–1918, 2013.
- [54] BOULEKBACHE, B.; HAMRAT, M.; CHEMROUK, M.; AMZIANE, S.

- Flexural behaviour of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading. **Construction and Building Materials**, vol. 126, pp. 253–262, 2016.
- [55] BOULEKBACHE, B.; HAMRAT, M.; CHEMROUK, M.; AMZIANE, S. Comportement en flexion des bétons fibrés sous chargement cyclique. **MATEC Web of Conferences**, 2014.
- [56] GOPALARATNAM, V. S.; GETTU, R. On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes. **Cement & Concrete Composites**, vol. 17, no. 3, pp. 239–254, 1995.
- [57] DI PRISCO, M.; PLIZZARI, G.; VANDEWALLE, L. Fibre reinforced concrete: new design perspectives. **Materials and Structures**, vol. 42, no. 9, pp. 1261–1281, 2009.
- [58] GETTU, R.; MOBASHER, B.; CARMONA, S.; JANSEN, D. C. Testing of concrete under closed-loop control. **Advanced Cement Based Materials**, vol. 3, no. 2, pp. 54–71, 1996.
- [59] BANTHIA, N.; DUBEY, A. Measurement of Flexural Toughness of Fiber-Reinforced Concrete Using a Novel Technique - Part 1: Assessment and Calibration. **ACI Materials Journal**, no. 96, pp. 651–657, 2000.
- [60] JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **JSCE-SF4**: Method of test for flexural strength and flexural toughness of steel fibre reinforced concrete. Japan, 1984.
- [61] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1609/C1609M**: Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). United States, 2005.
- [62] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1018**: Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). United States, 1997.
- [63] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1399/C1399M**: Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced. United States, 2010.
- [64] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14651**: Test method for metallic fibred concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). Brussels, 2005.

- [65] RILEM TECHNICAL COMMITTEES. **RILEM TC 162-TDF**: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Belgium, 2000.
- [66] INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. **fib Model Code**. Switzerland, 2010.
- [67] LEE, J. H.; CHO, B.; CHOI, E.; KIM, Y. H. Experimental study of the reinforcement effect of macro-type high strength polypropylene on the flexural capacity of concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 126, pp. 967–975, 2016.
- [68] SANTOS, F. M. R.; SOUZA, T. F.; BARQUETE, D. M.; AMADO, F. D. R. Comparative analysis of the sisal and piassava fibers as reinforcements in lightweight cementitious composites with EVA waste. **Construction and Building Materials**, vol. 128, pp. 315–323, 2016.
- [69] RILEM TECHNICAL COMMITTEES. **RILEM TC 89-FMT**: Fracture mechanics of concrete - Determination of fracture parameters of plain concrete using three-point bend tests. United States, 1991.
- [70] MOBASHER, B.; BONAKDAR, A.; BAKHSHI, M. Back-calculation procedure for cyclic flexural fracture tests in fiber reinforced concrete. **Fracture Mechanics Applications in Concrete - ACI Technical Publication**, SP-300. January, 2015.
- [71] DEY, V.; KACHALA, R.; BONAKDARR, A.; MOBASHER, B. Mechanical properties of micro and sub-micron wollastonite fibers in cementitious composites. **Construction and Building Materials**, vol. 82, no. April, pp. 351–359, 2015.
- [72] HAMAD, W. I.; OWEN, J. S.; HUSSEIN, M. F. M. An efficient approach of modelling the flexural cracking behaviour of un-notched plain concrete prisms subject to monotonic and cyclic loading. **Engineering Structures**, vol. 51, pp. 36–50, 2013.
- [73] SILVA, F. A.; PELED, A.; ZUKOWSKI, B.; TOLEDO FILHO, R. D. Fiber Durability. In: **A Framework for Durability Design with Strain-Hardening Cement-Based Composites (SHCC)**, 2017, pp. 59–78.
- [74] 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**, vol. 82, no. 4, pp. 1090–1096, 2010.

- [75] AGOPYAN, V.; SAVASTANO, H.; JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: An overview. **Cement & Concrete Composites**, vol. 27, no. 5, pp. 527–536, 2005.
- [76] TOLEDO FILHO, R. D.; GHAVAMI, K.; ENGLAND, G. L.; SCRIVENER, K. Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability. **Cement & Concrete Composites**, vol. 25, no. 2, pp. 185–196, 2003.
- [77] SAVASTANO, H.; SANTOS, S. F.; RADONJIC, M.; SOBOYEJO, W. O. Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites. **Cement & Concrete Composites**, vol. 31, no. 4, pp. 232–243, 2009.
- [78] TOLEDO FILHO, R. D.; SCRIVENER, K.; ENGLAND, G. L.; GHAVAMI, K. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. **Cement & Concrete Composites**, vol. 22, pp. 127–143, 2000.
- [79] TOLEDO FILHO, R. D.; SILVA, F. A.; FAIRBAIRN, E. M. R.; MELO FILHO, J. A. Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. **Construction and Building Materials**, vol. 23, no. 6, pp. 2409–2420, 2009.
- [80] MELO FILHO, J. A.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems. **Cement & Concrete Composites**, vol. 40, pp. 30–39, 2013.
- [81] FIDELIS, M. E. A.; TOLEDO FILHO, R. D.; SILVA, F. A.; MECHTCHERINE, V.; BUTLER, M.; HEMPEL, S. The effect of accelerated aging on the interface of jute textile reinforced concrete. **Cement & Concrete Composites**, vol. 74, pp. 7–15, 2016.
- [82] HANNANT, D. J.; ZONSVELD, J. J. Polyolefin fibrous networks in cement matrices for low cost sheeting. **Phil. Trans. R. Soc. Lond.**, pp. 591–597, 1980.
- [83] SOUZA, L.; SOUZA, L.; SILVA, F. A. Autogenous healing capability of natural curauá textile reinforced concrete. **Procedia Engineering**, vol. 200, pp. 290–294, 2017.
- [84] RAMEZANIANPOUR, A. A.; ESMAEILI, M.; GHAHARI, S. A.; NAJAFI, M. H. Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on

- durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers. **Construction and Building Materials**, vol. 44, pp. 411–418, 2013.
- [85] ONUAGULUCHI, O.; BANTHIA, N. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. **Cement & Concrete Composites**, vol. 68, pp. 96–108, 2016.
- [86] SAVASTANO, H.; AGOPYAN, V.; NOLASCO, A. M.; PIMENTEL, L. Plant fibre reinforced cement components for roofing. **Construction and Building Materials**, vol. 13, no. 8, pp. 433–438, 1999.
- [87] SINGH, S. K. Polypropylene Fiber Reinforced Concrete: An Overview. **NBM&CW**, 2016.
- [88] SOUZA, L. O. **Mecanismos de fissuração e autocicatrização de compósitos cimentícios reforçados com tecido de curauá**. Rio de Janeiro, 2017. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica.
- [89] MARANGON, E. **Desenvolvimento e caracterização de concretos auto-adensáveis reforçados com fibras de aço**. Rio de Janeiro, 2006. Dissertação de Mestrado - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [90] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.
- [91] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.
- [92] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- [93] SIDDIQUE, R. Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash. **Materials and Design**, vol. 32, no. 3, pp. 1501–1507, 2011.
- [94] THE EUROPEAN PROJECT GROUP. **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete**. p. 63, 2005.
- [95] TURK, K.; KARATAS, M.; ULUCAN, Z. C. Effect of the use of different types and dosages of mineral additions on the bond strength of lap-spliced bars in self-compacting concrete. **Materials and Structures**, vol. 43, no. 4, pp. 557–570, 2010.

- [96] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768:** Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 1992.
- [97] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2:** Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017.
- [98] HELENE, P.; MEDEIROS, M. H. F. **Estudo da influência do Metacaulim HP como adição de alta eficiência em concretos de cimento portland.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2004. Boletim Técnico.
- [99] NITA, C.; JOHN, V. M. **Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa.** São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2007. Boletim Técnico.
- [100] JUNIOR, A. N.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R.; DWECK, J. Early stages hydration of high initial strength Portland cement: Part I. thermogravimetric analysis on calcined mass basis. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, vol. 108, no. 2, pp. 725–731, 2012.
- [101] DWECK, J.; BUCHLER, P. M.; COELHO, A. C. V.; CARTLEDGE, F. K. Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate. **Thermochimica Acta**, vol. 346, no. 1–2, pp. 105–113, 2000.
- [102] ROJAS, M. F.; SÁNCHEZ DE ROJAS, M. I. The effect of high curing temperature on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement matrices at 60 °C. **Cement and Concrete Research**, vol. 33, no. 5, pp. 643–649, 2003.
- [103] RAMACHANDRAN, V. S.; PAROLI, R. M.; BEAUDOIN, J. J.; DELGADO, A. H. **Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials**, vol. 406, no. 1–2. William Andrew, 2003.
- [104] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- [105] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522:** Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.
- [106] ZAVRSNIK, L.; SUPUT, J. S.; KRAMAR, S. Long-Term Durability Properties of Pozzolan Cement Mortars. **Materials and Technology**, vol. 48, no. 4, pp. 509–513, 2014.

- [107] LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtures in mortars. **Cement and Concrete Research**, vol. 33, no. 12, pp. 1939–1947, 2003.
- [108] MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. Rio de Janeiro, 2012. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica.
- [109] SILVA, F. A.; CHAWLA, N.; TOLEDO FILHO, R. D. An experimental investigation of the fatigue behavior of sisal fibers. **Materials Science and Engineering A**, vol. 516, no. 1–2, pp. 90–95, 2009.
- [110] SILVA, F. A.; MOBASHER, B.; TOLEDO FILHO, R. D. Fatigue behavior of sisal fiber reinforced cement composites. **Materials Science and Engineering A**, vol. 527, no. 21–22, pp. 5507–5513, 2010.
- [111] SILVA, F. A.; CHAWLA, N.; TOLEDO FILHO, R. D. Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers. **Composites Science and Technology**, vol. 68, no. 15–16, pp. 3438–3443, 2008.
- [112] YEHIA, S.; DOUBA, A. E.; ABDULLAHI, O.; FARRAG, S. Mechanical and durability evaluation of fiber-reinforced self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 121, pp. 120–133, 2016.
- [113] YAZICI, Ş.; INAN, G.; TABAK, V. Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. **Construction and Building Materials**, vol. 21, no. 6, pp. 1250–1253, 2007.
- [114] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1557**: Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers. United States, 2014.
- [115] LIMA, P. R. L.; FERREIRA, S. R.; TOLEDO FILHO, R. D. Effect of sisal fiber hornification on the adhesion with portland cement matrices. **Revista Matéria**, vol. 17, no. 2, pp. 1024–1034, 2012.
- [116] ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; GARCÍA-HORTAL, J. A.; BARRA, M. Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers. **Cellulose**, vol. 18, no. 2, pp. 281–289, 2011.
- [117] MACVICAR, R.; MATUANA, L. M.; BALATINECZ, J. J. Aging mechanisms in cellulose fiber reinforced cement composites. **Cement & Concrete Composites**, vol. 21, no. 3, pp. 189–196, 1999.
- [118] TRINDADE, A. C. C. **Desenvolvimento e comportamento mecânico de**

compósitos geopoliméricos têxteis reforçados com fibra de juta. Rio de Janeiro, 2017. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

- [119] GIACCIO, G.; TOBES, J. M.; ZERBINO, R. Use of small beams to obtain design parameters of fibre reinforced concrete. **Cement & Concrete Composites**, vol. 30, no. 4, pp. 297–306, 2008.
- [120] SHAH, S. P.; KUDER, K. G.; MU, B. Fiber-Reinfoced cement-based composites: A forty year odyssey. **6th RILEM Symposium on Fibre-Reinfoced Concretes**. September, 2004.
- [121] HALVAEI, M.; JAMSHIDI, M.; LATIFI, M. Investigation on pullout behavior of different polymeric fibers from fine aggregates concrete. **Journal of Industrial Textiles**, vol. 45, no. 5, pp. 995–1008, 2014.
- [122] ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R. D. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. **Construction and Building Materials**, vol. 79, pp. 115–128, 2015.

APÊNDICE A

Resultado dos ensaios de arrancamento aos 28 dias

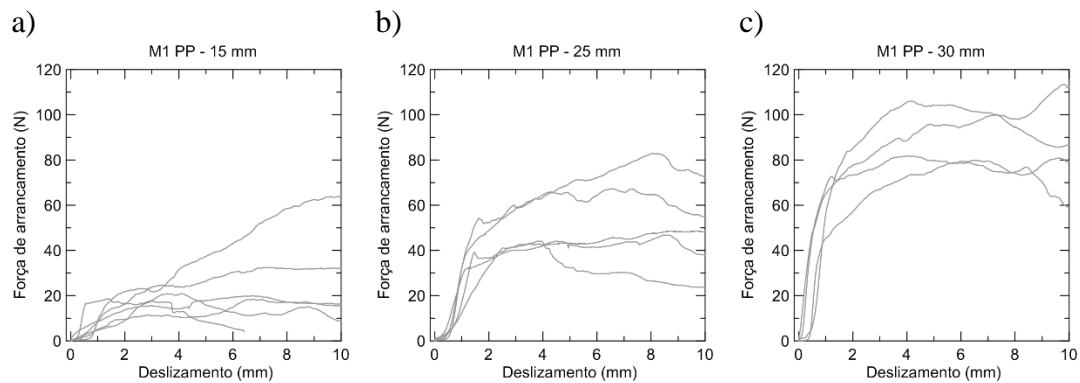


Figura A.1 – Curvas de força de arrancamento *versus* deslocamento do compósito M1 PP com comprimento de embestimento de 15 (a), 25 (b) e 30 mm (c).

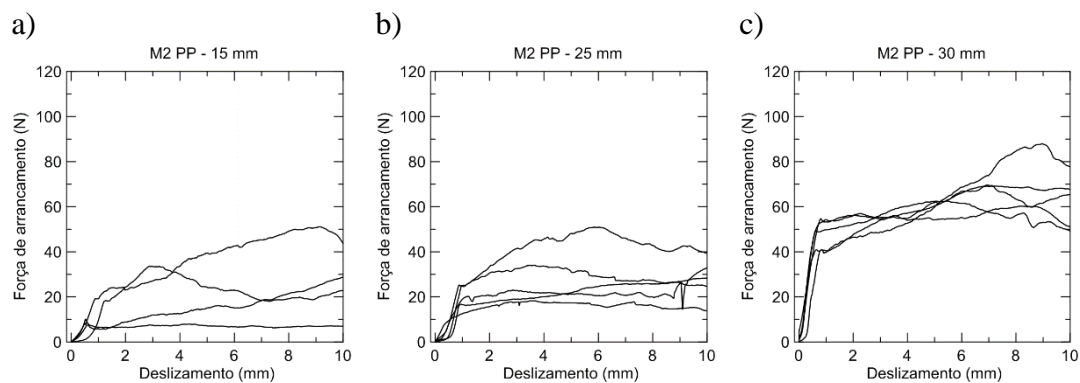


Figura A.2 – Curvas de força de arrancamento *versus* deslocamento do compósito M2 PP com comprimento de embestimento de 15 (a), 25 (b) e 30 mm (c).

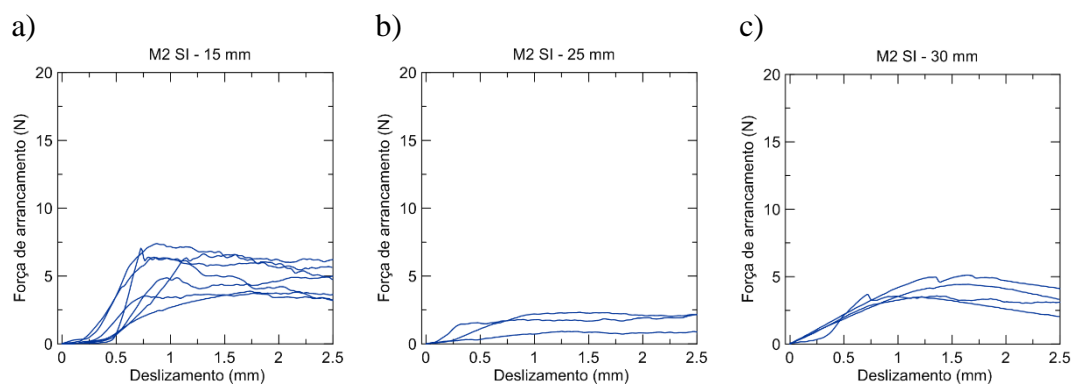


Figura A.3 – Curvas de força de arrancamento *versus* deslocamento do compósito M2 SI com comprimento de embestimento de 15 (a), 25 (b) e 30 mm (c).

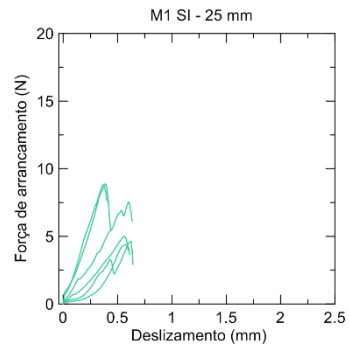


Figura A.4 – Curvas de força de arrancamento *versus* deslizamento do compósito M1 SI com comprimento de embebimento de 25 mm.

APÊNDICE B

Resultado dos ensaios de arrancamento após envelhecimento acelerado

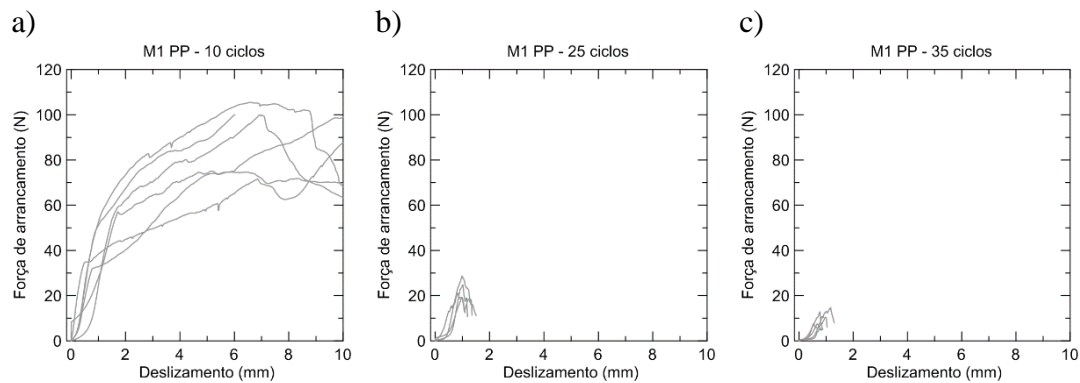


Figura B.1 – Curvas de força de arrancamento *versus* deslizamento do compósito M1 PP após 10 (a), 25 (b) e 35 (c) ciclos de molhagem e secagem.

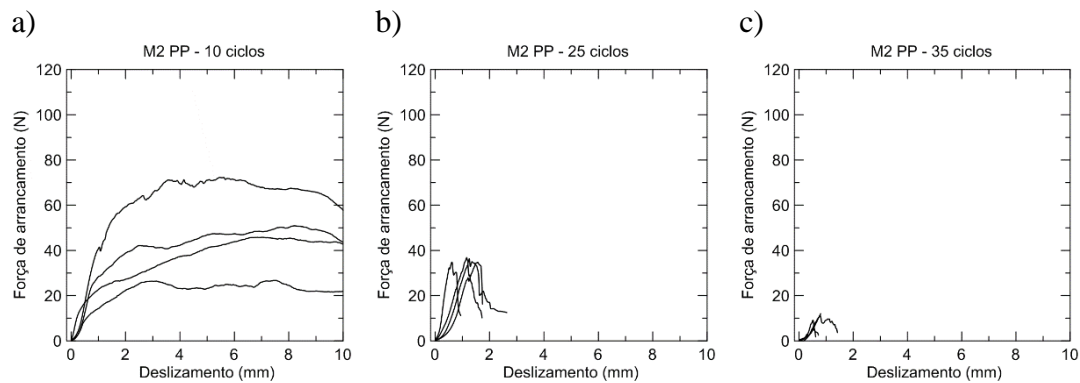


Figura B.2 – Curvas de força de arrancamento *versus* deslizamento do compósito M2 PP após 10 (a), 25 (b) e 35 (c) ciclos de molhagem e secagem.

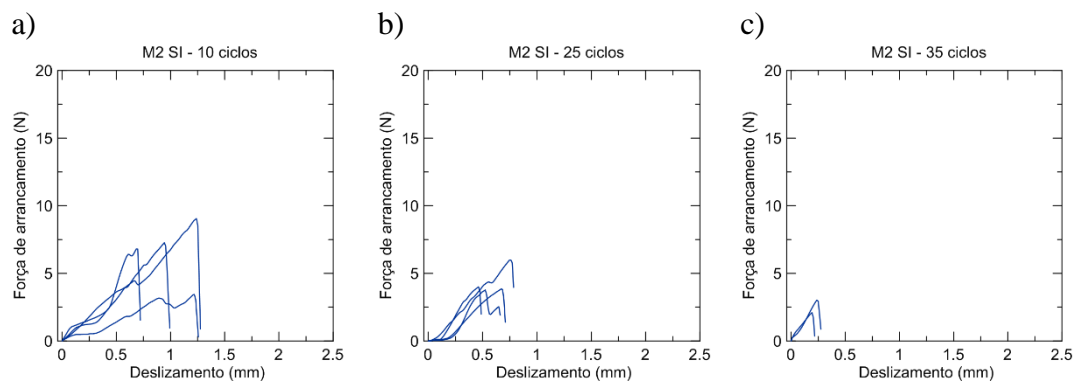


Figura B.3 – Curvas de força de arrancamento *versus* deslizamento do compósito M2 SI após 10 (a), 25 (b) e 35 (c) ciclos de molhagem e secagem.

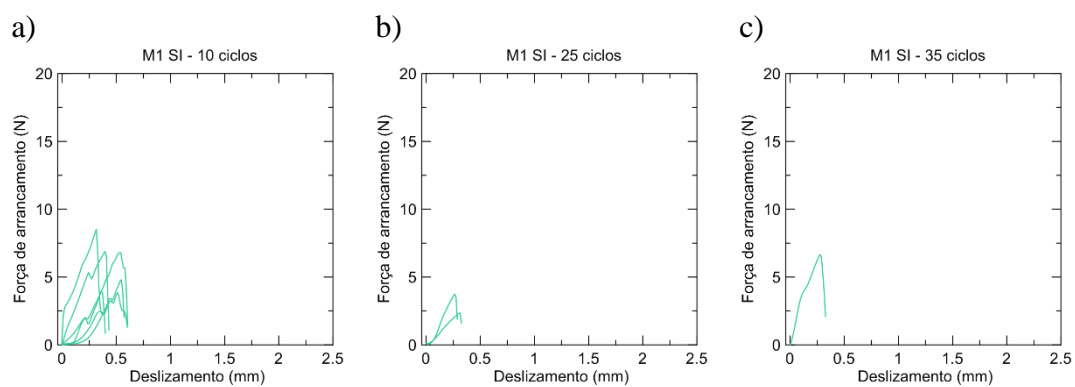


Figura B.4 – Curvas de força de arrancamento *versus* deslizamento do compósito M1 SI após 10 (a), 25 (b) e 35 (c) ciclos de molhagem e secagem.