

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CÁSSIA ÉSTER ROMÃO SARTORI

ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
ARGAMASSAS COM FIBRAS DE SISAL E MICROCELULOSE

MARINGÁ

2017

CÁSSIA ÉSTER ROMÃO SARTORI

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ARGAMASSAS
COM FIBRAS DE SISAL E MICROCELULOSE**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá.

Orientador: Prof^o Dr. Generoso De Angelis Neto

Maringá

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

Sartori, Cassia Éster Romão

S251e Estudo do comportamento mecânico de argamassa com
fibras de sisal e microcelulose/ . -- Maringá, 2017.
96 f. il. color, figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Generoso De Angelis Neto.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de
Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, 2017.

1. Argamassa - Fibra de sisal - Microcelulose. 2.
Engenharia de estruturas. 3. Argamassa reforçada. I.
De Angelis Neto, Generoso, orient. II. Universidade
Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil. III Título.

CDD 22. 660.2842
JLM001937

CASSIA ÉSTER ROMÃO SARTORI

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
ARGAMASSA COM FIBRAS DE SISAL E MICROCELULOSE.**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá,
como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, na área de concentração Estruturas, para obten-
ção do título de Mestre.

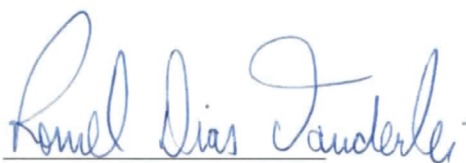
Aprovada em 29 de agosto de 2017



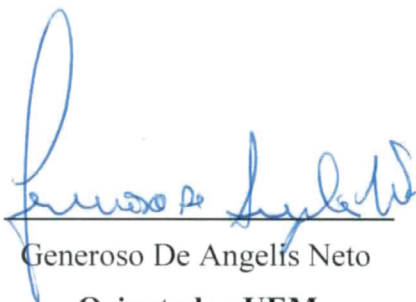
Prof. Dr. Carlos Humberto Martins
Membro UEM



Prof.^a. Dr.^a. Berenice Martins Toralles
Membro UEL



Romal Dias Vanderlei
Membro UEM



Generoso De Angelis Neto
Orientador UEM

Aos meus pais, João e Helena.

AGRADECIMENTOS

À Deus por muitas vezes mostrar o verdadeiro caminho do aprendizado, por ser amor, fé e presença.

Aos meus pais, João e Helena, por sempre estarem certos, por ser minha fonte de inspiração, eternos guias, pelo desvelo, desmedida preocupação, apoio, e principalmente amor.

À minha irmã Elen, pelo carinho, dedicação para com a irmã mais nova, a preocupação em busca do meu aprendizado, cada mérito, vitória e superação obtidas, são para ela.

Ao meu namorado, Gustavo, pela atenção, amor, carinho, amizade e principalmente paciência para estar comigo nesta caminhada. Seu incentivo foi determinante para esta conquista ser possível, logo, ela é sua também.

Ao meu irmão e sua família, Adriana, Carlos Eduardo e Maria Clara, por me trazerem alegria, felicidade e paz em tempos difíceis.

Aos meus orientadores, professor Generoso de Angelis Neto e professor Romel Dias Vanderlei, pela excelente orientação durante todo o trabalho, pela pronta disponibilidade, paciência e incentivo nos estudos deste trabalho.

Ao meu co-orientador, professor Raul Emanuel Fangueiro, por aceitar fazer parte deste trabalho.

As amigas e parceiras de pesquisa, Luana Capelin e Katherine Kaneda Moraes, pelas trocas de experiências, conversas e ajuda em laboratório e a pesquisa em geral.

Aos meus amigos de trabalho e profissão Ana Pachemshi, Cláudio Nuernberg Junior, Hugo EijiImai, Maria Gabriela Costa Lazaretti e Victor Ken-ItiIamada que apesar de não fazerem parte da pesquisa, estiveram comigo durante a caminhada de estudos e desenvolvimento desta pesquisa. A paciência, auxílio, amizade e ainda as palavras amigas e acolhedoras nos momentos mais difíceis, foram essenciais.

Aos técnicos de laboratório Valter e Celso, pela amizade e dedicação excepcional, além da ajuda para a concepção dos experimentos deste trabalho, em todas as etapas do laboratório, principalmente nos finais de semana.

A secretária Marli Silveira (PCV-UEM) pela amizade, carinho, conselhos, auxílio em todo o período de mestrado. Certamente sentirei saudades das conversas construtivas ao longo desta caminhada.

Ao Eduardo Barbosa, pela grande ajuda, atenção, sendo sempre solícito com minhas dúvidas, e pela captura das imagens com microscópio eletrônico de varredura e os ensaios de termogravimetria no Instituto de Química da Universidade de São Paulo.

Ao professor Pedro Henrique Cury Camargo por ceder o espaço e equipamentos do Instituto de Química para realização das análises de microscopia e termogravimetria.

Ao laboratório de Materiais de Construção, pelos materiais e espaço cedido, primordial para que fosse possível a realização deste trabalho.

Ao Centro Analítico de Instrumentação da Universidade de São Paulo – Instituto de Química, pelas imagens e análise microscópica das amostras.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) de São Paulo, pela doação de areia normatizada para a realização dos experimentos necessários à esta pesquisa.

A todos os professores do departamento de Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PCV), pelas experiências e conhecimentos compartilhados.

Muito obrigada!!

“Descobrir consiste em olhar para o que todo mundo
está vendo e pensar em uma coisa diferente”.

Roger Von Oech

RESUMO

Os crescentes estudos pela obtenção de materiais ou compostos renováveis que priorizem a sustentabilidade se intensificaram nos dias atuais, uma vez que o foco principal é a preocupação com o meio ambiente e sua poluição com níveis cada vez mais alarmantes. O uso de matérias primas renováveis permite ao homem que estes sejam repostos, tendo-o a disposição quando necessário. Visando contribuir com a redução do uso de materiais não renováveis e a expansão da tecnologia para inserção de materiais em misturas cimentícias, o presente trabalho tem como proposta a adição de fibras de sisal e microcelulose na argamassa de cimento, para analisar o comportamento das propriedades mecânicas frente a essa incorporação. Os ensaios foram desenvolvidos no estado fresco e no estado endurecido, em três fases, sendo a primeira fase, elaborada argamassa com adição de fibras de sisal nos teores de 0,5%, 1,0% e 1,5% em massa de cimento, sendo a argamassa com 1,0% de sisal a que apresentou melhor ganho de resistência à compressão e resistência à tração na flexão. Na segunda fase, estudou-se a influência da adição de 0,2%, 0,4% e 0,6% de microcelulose, também em massa de cimento, obtendo-se os melhores resultados de resistência à compressão e resistência à tração na flexão com o teor de 0,2% de microcelulose. Na terceira fase, elaborou-se argamassas com adição conjunta de fibras de sisal e microcelulose, sendo que para a composição das taxas de fibras e microcelulose, os melhores resultados obtidos nas duas primeiras fases foram usados para avaliação das propriedades mecânicas. Portanto, para as argamassas com teor fixo de 1,0% de fibras de sisal, foram inseridos os teores de 0,2% e 0,4% de microcelulose, obtendo-se a melhor resistência à compressão sem adições de microcelulose, ou seja, com apenas 1,0% de sisal, além disto, para a resistência à flexão, o comportamento mais considerável ocorreu com a adição de 0,4% de microcelulose. Para o teor fixo de 0,2% variou-se o teor de fibras de sisal em 0,5%, 1,0% e 1,5%, sendo neste caso, o ganho considerável de resistência à compressão ocorreu com a adição de 0,5% de sisal e a resistência à tração na flexão com o teor de 1,0% de sisal. Por meio da microscopia eletrônica de varredura, foi possível observar a interface matriz com as fibras de sisal e a microcelulose, sendo que as fibras sem tratamento não foram completamente aderidas à argamassa, sendo talvez um dos determinantes para a diminuição das resistências quando inseridas em maior quantidade.

Palavras chave: fibras de sisal, microcelulose, argamassa reforçada.

ABSTRACT

The growing studies aiming to obtain renewable materials or composites that prioritize the sustainability have intensified in the present days, once the main focus is the concern about the environment and its pollution on increasingly alarming levels. The usage of renewable raw materials allows their restitution, so that they are available whenever needed. Aiming to contribute with the decrease in the usage of non-renewable materials and the expansion of the technology for the insertion of materials in cement mixes, this paper has the proposal of adding sisal fibers and microcellulose in the cement mortar to analyze the behavior of the mechanical properties with this incorporation. The tests were performed in both wet and hardened states, in three phases, the first one using mortar samples with sisal fibers added in the proportion of 0,5%, 1,0% and 1,5% of the cement weight, with the best increase of compressive and flexural strength observed in the mortar with 1,0% of sisal fibers. In the second phase, the addition of microcellulose in the proportion of 0,2%, 0,4% and 0,6% of the cement weight was studied, with the best results of compressive and flexural strength observed in the mortar with 0,2% of microcellulose. In the third phase both sisal fibers and microcellulose were added to the mortar. Their proportion was defined by fixing the proportion of one of the materials based on the best result in the previous phases and changing the proportion of the other material to evaluate their mechanical properties, a procedure that was later repeated for the other material. In the mortar samples with a fixed proportion of 1,0% of sisal fibers were added 0,0%, 0,2% and 0,4% of microcellulose, with the best results of compressive strength obtained without the addition of microcellulose, with just 1,0% of sisal fibers, and the highest flexural strength was obtained with the addition of 0,4% of microcellulose. In the mortar samples with a fixed proportion of 0,2% of microcellulose were added 0,5%, 1,0% and 1,5% of sisal fibers, with the best results of compressive strength obtained with 0,5% of sisal fibers and the highest flexural strength with 1,0% of sisal fibers. By means of a Scanning Electron Microscopy it was possible to observe the interface of the matrix with the sisal fibers and the microcellulose, and it was noticed that the sisal fibers without treatment were not completely adhered to the mortar, which can be one of the reasons of the decrease in the strength when they are added in greater quantity.

Keywords: sisal fibers, microcellulose, reinforced mortars.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Classificação das Fibras.	5
Figura 2. A planta sisal e sua conformação em roseta.	12
Figura 3. Estrutura interna do sisal e suas fibras.	14
Figura 4. Desfibramento do sisal.....	15
Figura 5. Secagem do sisal após desfibramento.	16
Figura 6. Comportamento mecânico a tração (a) argamassa e (b) argamassa com fibras vegetais.	20
Figura 7. Concentração de tensões na frente de propagação de fissuras.	21
Figura 8. Fibras atuando como ponte de transferência de tensões no compósito.....	21
Figura 9. Fibras no interior da argamassa.....	21
Figura 10. Início das primeiras fissuras (a) e arrancamento das fibras (b).....	22
Figura 11. Arrancamento das fibras do corpo de prova	22
Figura 12. Configuração do sistema “yoke” acoplado ao corpo de prova.	74
Figura 13. Configuração da instalação do <i>clip-gauge</i> na base do corpo de prova.	74
Figura 14. Fibras curtas de sisal	29
Figura 15. Microcelulose em pó.	30
Figura 16. Areia normal fornecida pelo IPT.....	31
Figura 17. Agitação da microcelulose imersa em água.	34
Figura 18. Procedimentos para a confecção das argamassas com adição de fibras de sisal – fase I.	36
Figura 19. Procedimentos para a confecção das argamassas com adição de microcelulose – fase II.	38
Figura 20. Procedimentos para a confecção das argamassas com adição de fibras de sisal e microcelulose – fase III.	40
Figura 21. Equipamento para ensaio de resistência a compressão e flexão.	42
Figura 22. Gráfico de índice de consistência das argamassas com diferentes taxas de sisal. ..	45
Figura 23. Gráfico comparativo de resistência a compressão em função dos teores de fibras de sisal	47
Figura 24. Gráfico de resistência a flexão das argamassas em função do teor de fibras de sisal.	49
Figura 25. Gráfico de índice de consistência das argamassas com diferentes teores de microcelulose.....	50

Figura 26. Gráfico comparativo de resistências a compressão em função do teor de microcelulose.....	52
Figura 27. Gráfico de resistência a tração em função dos teores de microcelulose.	54
Figura 28. Gráficos de índice de consistência das argamassas com diferentes teores de adições (a) sisal com teor fixo e microcelulose variável e (b) microcelulose fixa e fibras de sisal variável.	56
Figura 29. Gráfico de resistência a compressão em função dos teores fixos de sisal e variável de microcelulose.	58
Figura 30. Gráfico de resistência a compressão em função dos teores fixos de microcelulose e variável de sisal.	60
Figura 31. Gráfico de resistência a flexão em função dos teores fixos de sisal e variável de microcelulose.....	62
Figura 32. Gráfico de resistência a flexão em função dos teores fixos de microcelulose e variável de sisal.	63
Figura 33. Superfície das fibras de sisal “in natura”, (a) vista lateral aumentada 50 vezes e (b) vista lateral do topo da fibra, aumentada em 250 vezes.	65
Figura 34. Análise microscópica da microcelulose (a) em pó e “in natura”, (b) microcelulose com aumento de 50 vezes, (c) aumento de 250 vezes, (d) aumento de 500 vezes e (e) aumento de 1000 vezes.	66
Figura 35. Análise microscópica da amostra contendo 0,2% de microcelulose e 0,5 % de sisal.	67
Figura 36. Análise microscópica da amostra com 1,0% de sisal e 0,4% de microcelulose.	68
Figura 37. Análise microscópica da amostra com 0,2% de microcelulose e 1% de sisal.	68
Figura 38. Fibras de sisal (a) no interior da argamassa, (b) aumento de 100 vezes e (c) interface da matriz com as fibras.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades físicas e mecânicas de alguns tipos de fibras.....	10
Tabela 2. Propriedades físicas e mecânicas do sisal estudadas por pesquisadores.	17
Tabela 3. Composição de celulose e lignina das fibras vegetais.	17
Tabela 4. Propriedades físicas e mecânicas das fibras de sisal.	30
Tabela 5. Frações granulométricas da areia normal	31
Tabela 6. Quantidades das granulometrias da areia para argamassas	32
Tabela 7. Valores do índice de consistência das argamassas com diferentes teores de fibras de sisal.	44
Tabela 8. Valores de resistência a compressão das argamassas com diferentes teores de fibras de sisal.	46
Tabela 9. Valores de resistência à tração na flexão com diferentes teores de fibras de sisal...48	
Tabela 10. Valores do índice de consistência das argamassas com diferentes teores de microcelulose.....	50
Tabela 11. Valores de resistência a compressão com diferentes teores de microcelulose.	52
Tabela 12. Valores de resistência à tração na flexão das argamassas com diferentes teores de microcelulose.....	53
Tabela 13. Valores de índice de consistência das argamassas com diferentes teores de sisal e microcelulose.....	56
Tabela 14. Valores de resistência a compressão do teor fixo de sisal e variável de microcelulose.....	57
Tabela 15. Valores de resistência a compressão do teor fixo de microcelulose e variável de sisal.	58
Tabela 16. Valores de resistência a flexão das argamassas com teor fixo de sisal e variável de microcelulose.....	61
Tabela 17. Valores de resistência à flexão das argamassas com teor fixo de microcelulose e variável de sisal.	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS	4
2.1	Objetivo geral	4
2.2	Objetivos específicos	4
3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	Erro! Indicador não definido.
4	REVISÃO DE LITERATURA	5
4.1	FIBRAS	5
4.1.1	Histórico e uso das fibras na construção civil	9
4.1.2	Fibras de Sisal.....	11
4.1.3	Estrutura Interna	13
4.1.4	Extração das fibras.....	14
4.1.5	Propriedades Mecânicas	16
4.1.6	Compósito de argamassa com fibras de sisal	18
4.2	MICROCELULOSE.....	24
4.2.1	Obtenção da Microcelulose	24
4.2.2	Propriedades Mecânicas da Microcelulose.....	25
4.3	PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO	26
4.3.1	Propriedades no Estado Fresco.....	26
4.3.2	Propriedades no Estado Endurecido	27
4.3.2.1	Resistência à Compressão	28
4.3.2.2	Resistência à Tração na Flexão	28
4.3.2.3	Medidas de Deflexão e Abertura de Fissuras Erro! Indicador não definido.	
5	METODOLOGIA.....	29
5.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	29
5.1.1	Fibras de Sisal.....	29
5.1.2	Microcelulose	30
5.1.3	Cimento Portland.....	30
5.1.4	Areia Normal	31
5.1.5	Água	32

5.1.6	Corpos de prova.....	32
5.2	MÉTODOS	33
5.2.1	Corte e preparo das fibras de sisal	33
5.2.2	Preparo da Microcelulose	33
5.2.3	Preparo da Argamassa	34
5.2.3.1	Argamassa de Referência	34
5.2.3.2	FASE I – Argamassa com Adição de Fibras de Sisal	34
5.2.3.3	FASEII – Argamassa com Adição de Microcelulose.....	37
5.2.3.4	FASEIII – Argamassa com Adição de Fibras de Sisal e Microcelulose	39
5.2.4	Índice de Consistência	41
5.2.5	Moldagem e cura dos Corpos de Prova.....	41
5.2.6	Ensaio de Resistência à Compressão.....	41
5.2.7	Ensaio de Resistência à Tração na Flexão.....	42
5.2.8	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	43
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
6.1	FASE I – ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE SISAL	44
6.1.1	Propriedades no Estado Fresco.....	44
6.1.1.1	Índice de Consistência	44
6.1.2	Propriedades no Estado Endurecido	46
6.1.2.1	Resistência a Compressão	46
6.1.2.2	Resistência à Tração na Flexão	48
6.2	FASE II – ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE MICROCELULOSE	50
6.2.1	Propriedades no Estado Fresco.....	50
6.2.2	Propriedades no Estado Endurecido	51
6.2.2.1	Resistência a Compressão	51
6.2.2.2	Resistência à Tração na Flexão	53
6.3	FASE III – ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE SISAL E MICROCELULOSE.....	55
6.3.1	Propriedades no Estado Fresco.....	55
6.3.2	Propriedades no Estado Endurecido	57
6.3.2.1	Resistência a Compressão	57
6.3.2.2	Resistência a Tração na Flexão	61

6.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	64
6.4.1	Fibras de Sisal.....	64
6.4.2	Microcelulose	65
6.4.3	Argamassas com Adição de Fibras de Sisal e Microcelulose	66
7	CONCLUSÃO.....	71
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
9	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

Atualmente os crescentes estudos pela obtenção de materiais ou compostos renováveis que priorizem a sustentabilidade se intensificaram, visto que o foco principal é a preocupação com o meio ambiente e sua poluição com níveis cada vez mais alarmantes. A utilização de matérias primas renováveis permite ao homem que estes sejam repostos, tendo-o sempre a disposição quando necessário. O petróleo e seus derivados causam problemas desde o seu refino até o seu destino final, visto que sua decomposição leva milhares de anos para ocorrer por completo.

As argamassas são frequentemente aplicadas na construção civil como material para revestimento de paredes e fachadas, sendo elas internas ou externas, além de possuírem diversos tipos, como por exemplo, as argamassas de cimento, cal, resíduos da construção civil etc. Neste cenário e buscando a melhora do material no que diz respeito a fissuração, estudou-se a incorporação de materiais que permitissem a diminuição das manifestações patológicas e o aumento da resistência e durabilidade das argamassas. Com a evolução dos estudos e pesquisas, as argamassas já receberam incorporações de fibras de coco, sisal, polietileno, carbono, aramida e vidro, entre outras.

A celulose, componente principal das fibras vegetais, é um composto orgânico detentor de uma longa cadeia de moléculas ligadas entre si. Encontrado como componente celular de plantas, a mesma pode ser utilizada para filmes fotográficos, cosméticos, revestimentos, produtos farmacêuticos, indústria automobilística, construção civil entre outras possibilidades (MOUNIKA; RAVINDRA, 2015).

Segundo Torgal e Jalali (2010), as fibras vegetais são compostos naturais com estrutura celular formada por diferentes proporções de celulose, lignina e hemicelulose. Apesar destas várias proporções John et al. (2005) afirmam que a lignina é a maior responsável por fornecer resistência à tração para as fibras, objeto de estudo do presente trabalho. Ainda quanto a sua composição, Beraldo e Vieira (2003) apontam que numerosas e pequenas células individualizadas, se conectam entre si devido à pectina, formando as fibras naturais que são extraídas das plantas vegetais popularmente conhecidas.

De acordo com Martin et al. (2009), no Brasil, as fibras são extraídas do sisal provenientes da região nordeste, sendo responsável por 70% da produção e exportação mundial deste material para o mercado europeu e asiático. São utilizadas em vários segmentos, desde reforços de plástico, indústria automobilística, na construção civil e até

mesmo para substituição de fibras sintéticas. Além disto, Claramunt et al. (2011), estas fibras tem sido estudadas como alternativa para a substituição do amianto, prejudicial a saúde do homem.

O principal objetivo da utilização de fibras nos compósitos como sistema de reforço é aumentar a resistência ao impacto e aumentar a deformação de ruptura, ou seja, contribuir para a melhora da ductilidade do material à compressão, flexão e torção, apontam Lima et al. (2013). Os mesmos autores explicam ainda que, utilizando-se os materiais de reforço, a característica básica dos mesmos é que após o aparecimento da primeira fissura, as fibras possam garantir a manutenção de um valor residual de tensão a grandes deformações. Além disto, a deformação máxima nesses compósitos é atingida quando as fibras são arrancadas da matriz.

As fibras apresentam diversas vantagens como baixa densidade, material bio-renovável, formas, morfologia e proporções variadas, além de ser encontrada em abundância nos locais em que há predominância de clima tropical e subtropical. Em contrapartida, estudos apontam que ocorre degradação destas fibras devido a alcalinidade do sistema e ainda como desvantagem, a compatibilidade ainda não estudada entre as fases, sendo elas a areia, o cimento e as fibras propriamente ditas (TONOLI FILHO, SAVASTANO JUNIOR, BRAS, BELGACEM, LAHR, 2009). Uma forma de conter ou diminuir o ataque corrosivo do cimento às fibras estaria, segundo Torgal e Jalali (2010), na substituição parcial do cimento por compostos de baixa alcalinidade como cinzas de casca de arroz, metacaulim, cinzas volante e pozolanas, entre outros. Ou ainda, promover uma modificação das fibras propriamente ditas, utilizando-se processos de tratamentos químicos, repelentes de água e pasta de sílica antes de sua introdução na matriz cimentícia.

Segundo Raki et al. (2010), o uso das fibras como reforço de matrizes cimentícias, concretos e argamassas se deve ao fato de uma melhora na tenacidade do sistema, ou seja, ocorre a interrupção da propagação de fissuras de forma mais rápida; desta forma, podem-se ultrapassar limitações, suportando cargas com elevada flexão.

A microcelulose é obtida por meio de tratamento mecânico ou processos químicos a partir de fibras ou da celulose propriamente dita, porém, mesmo assim continua sendo um produto de origem natural. De acordo com Hoyos, Cristia e Vásquez (2013), a microcelulose é altamente hidrofílica, ou seja, possui alta capacidade de retenção de água. Possui ainda, excelentes propriedades mecânicas como alto módulo de elasticidade, 150 GPa, sendo este de valor superior às fibras de vidro, de 80 GPa e fibras de aramida, com valores de 90 a 100 GPa.

Cao et al. (2015) apontam que não se faz necessário a utilização de produtos que favoreçam a dispersão da microcelulose na matriz, já que a mesma possui uma afinidade com os produtos de hidratação do cimento, tornando-se um material favorável ao seu uso. Estes mesmos autores afirmam ainda que, quanto mais se diminui as dimensões da celulose, maiores são as propriedades mecânicas e as vantagens que esta pode oferecer.

O processo de mistura da argamassa com as fibras de sisal em conjunto com a microcelulose não é apontado pela literatura até o presente momento, caracterizando o ineditismo do trabalho, fato este que motivou a realização deste estudo. As pesquisas apontam apenas o uso de um dos materiais incorporados na argamassa, e mesmo assim com excelentes resultados mecânicos e comportamentais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar o comportamento de argamassas com diferentes proporções de fibras de sisal (*Agave sisalana*) e microcelulose.

2.2 Objetivos específicos

Avaliar a estrutura interna das fibras de sisal e da microcelulose, além da sua conformação, dimensões e imagens por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV);

Estudar o comportamento das argamassas no estado fresco, utilizando o ensaio de consistência, quando adicionados os diferentes teores de fibras de sisal e microcelulose, determinando-se o traço do material compósito. Estudar ainda, o comportamento mecânico das argamassas de cimento com diferentes proporções de fibras de sisal e microcelulose, quando submetidas ao esforço de compressão aos 3, 7 e 28 dias;

Estudar o comportamento das argamassas contendo microcelulose e fibras de sisal em diferentes taxas previamente definidas, sendo solicitada a flexão aos 28 dias;

Investigar a estrutura interna e a disposição de fibras de sisal e microcelulose nas amostras rompidas por meio do microscópio eletrônico de varredura, utilizando-se a superfície da amostra polida.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção são apresentadas as descrições, características, tipicidades da microcelulose e fibras vegetais, e suas respectivas vantagens e desvantagens. Serão abordados ainda aspectos como módulos de elasticidade, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e seu comportamento quando incorporadas em argamassas de cimento.

3.1 FIBRAS

As fibras são classificadas quanto a sua origem e composição, segundo a norma brasileira ABNT NBR 12744:1992 – Fibras Têxteis, sendo as fibras divididas em diversos subtipos, conforme o diagrama esquemático apresentado na Figura 1 acompanhado de alguns exemplos de cada um dos grupos.

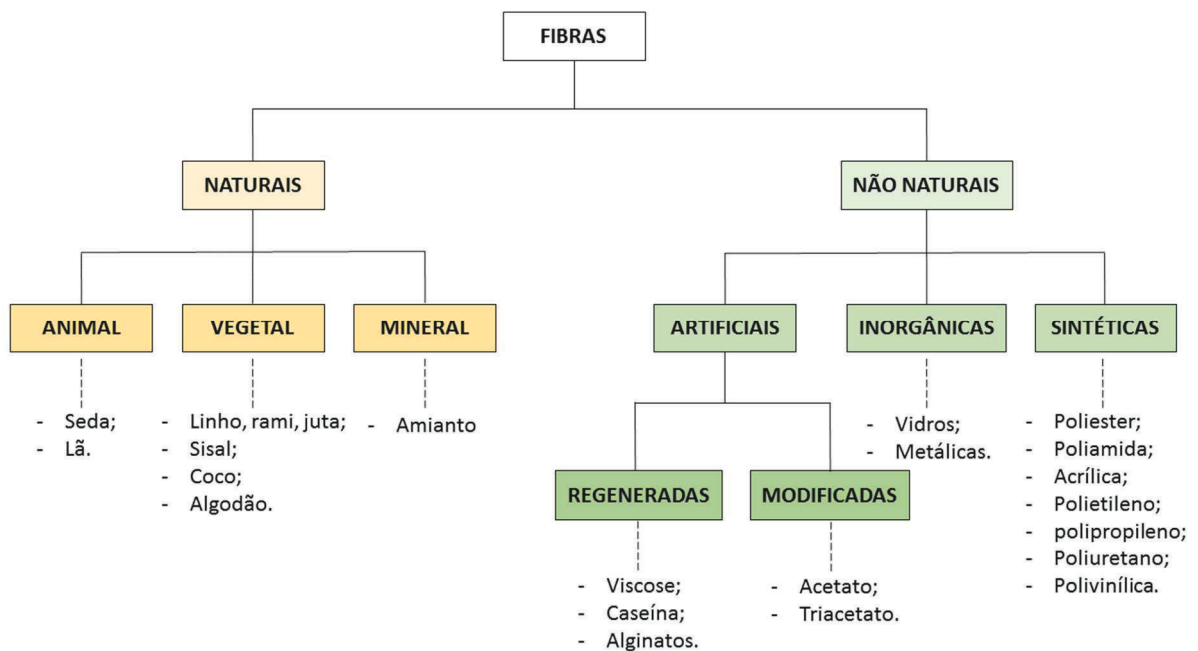


Figura 1. Classificação das Fibras.

Fonte: NBR 12744:92 – Fibras Têxteis, adaptado.

Marinelli et al. (2008) apontam que as fibras **naturais** são provenientes da natureza, sendo utilizadas na forma “in natura”, ou seja, no estado em que se encontram na natureza ou após tratamento. Este tipo de fibra se divide em 3 categorias:

- Animais, advinda de pelos que contenham proteínas em sua composição, emprestando suas características resistentes para os compósitos e materiais que o receberão (IZQUIERDO, 2011), sendo alguns exemplos a seda e a lã;
- Vegetais, presentes em todas as plantas que contenham celulose em sua composição, sendo o caule, as folhas, sementes e frutos (IZQUIERDO, 2011), como é o caso do sisal, algodão, coco, linho, rami, juta, cânhamo etc;
- Minerais, sendo provenientes da recristalização de rochas metamórficas eruptivas (CASTRO, GIANNASI e NOVELLO, 2003), sendo o amianto um exemplo para este tipo de fibra.

As fibras **artificiais** são obtidas mediante a transformação química ou mecânica de moléculas ou macromoléculas existentes na natureza, como madeira e a celulose, segundo a NBR 12.744 (ABNT 1992). Dividem-se em duas vertentes, as **regeneradas** com fibras de viscose, caseína e alginatos, bem como as **fibras modificadas**, sendo exemplos os acetatos e os triacetatos.

As fibras **sintéticas** são obtidas por processos pesquisados e estudados pelo homem, obtendo o produto final a partir de cadeias carbônicas derivadas de petróleo, ou ainda, mediante a manufatura têxtil. Neste caso, tem-se o poliéster, poliamida, acrílico, polietileno, polipropileno, poliuretano e polivinílico (IZQUIERDO, 2011).

As fibras **inorgânicas** possuem compostos químicos inorgânicos em sua composição, como carbono, silício, boro, formados a partir de elementos naturais, sendo transformados em fibras sob altas temperaturas. Sua obtenção pelas técnicas convencionais é bastante complexa devido a sua fragilidade na flexão e baixo índice de alongamento quando solicitada à ruptura. São chamadas também de fibras de alto-desempenho, apresentando elevada resistência mecânica e térmica, resistência a agentes químicos e uma relação entre seu peso e suas propriedades mecânicas (FIBRENAMICS, 2017).

Devido à grande oferta de plantas na biodiversidade presente em todo o planeta Terra, Marinelli et al. (2008) afirmam que deve ser dado destaque o uso de fibras vegetais naturais, já que as mesmas são biodegradáveis e caracteriza-se como um recurso renovável. As fibras naturais são produzidas em grande parte dos países, entretanto o Brasil detém a maior variedade delas, com diferentes propriedades químicas, físicas e mecânicas. Sisal, coco, rami, curauá, juta, fibra de bagaço de cana e soja são alguns dos exemplos de fibras nativas existentes atualmente no Brasil. No exterior, têm-se alguns exemplos como kenaf e outras formas de obtenção de fibras a partir de amido, resíduos de madeira, casca de arroz, trigo etc.

Silva (2011) aponta que as fibras naturais do tipo vegetal são estruturas complexas, formadas por fibrilas, que nada mais são que um conjunto organizado de filamentos individuais, sendo estes unidos por espécies químicas orgânicas não cristalinas. Ilston (1994) citado por Silva (2011) afirma que as fibras vegetais contêm em sua composição frações de celulose, lignina e hemicelulose. Estes três compósitos são responsáveis por diferentes propriedades na planta e de acordo com John et al. (2005), a lignina é a maior responsável por fornecer a resistência à tração das fibras. Nos casos em que há predominância da fração de celulose, Marinelli et al. (2008) afirmam que as fibras vegetais podem ser denominadas de fibras celulósicas.

Há uma grande importância em entender a estrutura química das fibras e sua microestrutura, já que estas características influenciarão na matriz a qual for adicionada. Hoyos e colaboradores (2013) citam que as cadeias de celulose constituintes das fibras possuem dois tipos de conformação polimérica, amorfa, caracterizada pela flexibilidade, bem como o estado cristalino, estando organizadas na matriz na forma de cristais.

Segundo Savastano Junior (1992), as fibras vegetais possuem um grande número de poros permeáveis, o que acarreta no aumento de absorção de água e massa específica aparente bastante inferior ao seu valor real.

McKENZIE *apud* SILVA (2011) pesquisou a relação entre as dimensões, formas e ângulos de orientação das fibras, chegando a conclusão que a resistência à tração bem como a resistência à flexão do compósito se tornará mais elevada, devido a relação comprimento/altura e a melhor ancoragem das fibras na matriz que a envolve. Em contrapartida, essas propriedades mecânicas são inversamente proporcionais ao ângulo de orientação das microfibrilas.

Em suma, Marinelli et al. (2008) apontam vantagens em relação ao uso de fibras naturais em comparação das fibras sintéticas, sendo elas:

- Sua disponibilidade pode ser caracterizada como ilimitada, já que poderá ser reposta para uso futuro;
- A grande variedade de plantas lenhosas e fibrosas na natureza permite a procura daquela que possua as propriedades específicas desejadas, como resistência à compressão, resistência ao cisalhamento, à tração, módulo de elasticidade e estabilidade química, entre outras características;
- Em comparação com as fibras sintéticas, as fibras naturais são menos abrasivas, ou seja, geram menor desgaste abrasivo dos equipamentos durante sua produção;

- São materiais biodegradáveis sendo, portanto, absorvidos pela natureza após sua deterioração, sem prejuízo de poluição ao meio ambiente;
- Apresentam-se como uma nova fonte de renda para os moradores do campo que utilizam de sua produção para a sobrevivência da família;
- Possuem baixa densidade e valores altos de deformabilidade;
- Verifica-se o baixo custo para sua produção, quando comparada aos vários números de processos empregados para a produção de fibras sintéticas por exemplo.

Por outro lado, há ainda as desvantagens da utilização das fibras de sisal, onde Silva et al. (2008) apontam que as utilizações das fibras naturais são limitadas, além de possuírem alta absorção de umidade e baixo desempenho mecânico quando comparado com as fibras sintéticas.

O cimento possui em sua composição os produtos de hidratação que, quando em contato com as fibras ocasionam sua degradação. Isso se deve pela sua constituição, em suma pela lignina e hemicelulose que se dissociam e se decompõem em presença de ataque alcalino, acarretando na quebra das ligações entre as microfibras individuais. A redução da hemicelulose e da lignina possam diminuir a deterioração das fibras quando em presença do cimento (JOHNSTON, 2001).

Segundo Siqueira (2006) quando há a inserção de fibras nos compósitos cimentícios, ocorre a petrificação ou mineralização dos componentes de hidratação do cimento. Esse processo atinge as fibras e as tornam rígidas, frágeis e de difícil deformação, levando então a uma redução na tenacidade do compósito.

Outra desvantagem é a diminuição da resistência e da aderência das fibras na matriz devido a sua alta capacidade de absorção de água e conseqüentemente o inchamento das mesmas. Desta forma, próximas a estas fibras surgem uma zona de transição e a alta concentração de macrocristais de portlandita e principalmente as fissuras, como apontado por Savastano Junior (1998).

Existem técnicas que possam reduzir a sensibilidade, impedindo ou ainda diminuindo os efeitos das fibras no meio alcalino, como por exemplo, utilizando-se de matrizes com baixa alcalinidade, como é o caso do metacaulim (LEAL et al., 2004; SAVASTANO JUNIOR et al., 2000; MARIKUNTE e SOROUSHIAN, 1994) ou ainda simples lavagem, tratamentos químicos com hidróxido de sódio (NaOH) em porcentagens adequadas, bem como os processos de polpação das fibras (JOHNSTON, 2001). Além disto, podem-se proteger as

fibras com polímeros e hidro-repelentes, ou seja, materiais que possuem baixa afinidade com a água (DELVASTO et al., 2004; RAMAKRISHNA et al., 2004).

3.1.1 Histórico e uso das fibras na construção civil

O cultivo do sisal na África foi introduzido em 1892 com mudas trazidas dos Estados Unidos. Em 1903, foram então plantadas no Brasil, na região do estado da Bahia, sendo hoje o maior produtor e exportador mundial de sisal, abastecendo diversos países europeus e asiáticos conforme pesquisado por Martin et al. (2009).

O uso das fibras como material de reforço ou incorporado à matriz de cimento não é algo atualmente descoberto, entretanto, Mehta e Monteiro *apud* Siqueira (2006) afirmam que existem registros de 5.000 anos atrás, quando as fibras de asbesto eram utilizadas para reforço de postes de argila. Segundo Bentur e Mindess (2007), o primeiro uso datado se encontra em uma passagem da Bíblia (Êxodo 5, 6-7), na qual a mesma cita as palhas como reforço para tijolos de barro. Os autores citam ainda que a imponente escultura AqarQuf de 57 metros de altura presente na cidade de Bagdá há aproximadamente 3.500 anos atrás, foi toda executada com o mesmo princípio, com tijolos reforçados com palhas secas ao sol.

Com o surgimento das fibras sintéticas e o avanço tecnológico para desenvolvimento de novos materiais, as fibras vegetais tiveram seu uso reduzido. Entretanto, com as questões ambientais em alta, os problemas de uso das fibras sintéticas e o reduzido processo para obtenção das fibras vegetais, estas tem despertado novamente o interesse dos pesquisadores em obter novos materiais (DOS SANTOS, 2006).

De acordo com Castro et. al (2003) o amianto, também chamado de asbesto, constitui-se de um material mineral, originado a partir da recristalização de rochas metamórficas eruptivas. Devido aos seus componentes possuírem compostos pertencentes aos grupos de serpentinas e anfibólios, o mesmo se torna prejudicial à saúde em qualquer estágio, tanto de utilização quanto de produção. Atualmente é utilizado em telhas, caixas d'água, painéis acústicos, forros, pisos, tintas, revestimentos, no setor automotivo, têxtil entre tantos outros (CASTRO; GIANNASI; NOVELLO, 2003).

Em função das características perigosas e nocivas ao homem, houve intensos estudos para a descoberta de um material que o substituísse sem perda de suas propriedades, e que quando incorporada a argamassas, obtivessem o mesmo resultado comportamental. Bentur e

Mindess (2007) citam o uso de fibras de aço por volta dos anos de 1950 e 1960, sendo ainda amplamente difundido como reforço de materiais na construção civil.

Os produtos descartados depois de consumidos ou utilizados podem se tornar matérias primas para a reciclagem e uma nova reutilização, com um destino diferente. Esta atenção tem sido dada de maneira ainda mais intensa devido ao aumento das fontes poluidoras, sendo um possível mecanismo de redução de impacto global e aumento de riquezas dos centros produtores. Os resíduos de fibras provenientes de agroindústrias, em especial de países tropicais, são reciclados e após receberem tratamento, estão sendo reutilizadas em peças e acessórios de automóveis, pois diminuem seu peso e substituem materiais mais onerosos (SIQUEIRA, 2006).

Conforme as necessidades surgiam, houve novas pesquisas e estudos para a descoberta de novos materiais com propriedades mecânicas que se destacavam quando incorporadas a matriz cimentícia. E desta forma, surgiram os diversos tipos de fibras atualmente comercializadas, como as fibras poliméricas, nylon, aço, carbono, vidro e de origem vegetal, entre outras. Bentur e Mindess (2007) ressaltam que a escolha do tipo de fibra a incorporar à matriz dependerá das características as quais se deseja alcançar com sua adição.

A

Tabela 1 apresenta resumidamente algumas das fibras utilizadas como reforço de matrizes, suas características e propriedades mecânicas.

Tabela 1. Propriedades físicas e mecânicas de alguns tipos de fibras.

Fibra	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm ³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à Tração (GPa)	Deformação na Ruptura (%)
Aço	5 a 500	7,84	200	0,5 a 2,0	0,5 a 3,5
Vidro	9 a 15	2,60	70 a 80	2 a 4	2 a 3,5
Amianto	0,02 a 0,4	2,60	164	3,1	2 a 3
Polipropileno	20 a 200	0,9	5 a 77	0,5 a 0,75	8,0
Carbono	9	1,90	230	2,6	1,0
Celulose	-	1,20	10	0,3 a 0,5	-
Acrílico	18	1,18	14 a 9,5	0,4 a 1,0	3,0
Polietileno	-	0,95	0,3	0,7x10 ⁻³	10,0
Sisal	10 a 50	1,50	-	0,8	3,0
Matriz cimentícia (referência)	-	2,50	10 a 45	3,7x10 ⁻³	0,02

Fonte: Siqueira (2006), adaptado.

Pelos valores da Tabela 1, observa-se que há diferentes extremos para o módulo de elasticidade, variando de 0,3 a 200 GPa. Siqueira (2006) aponta que, para fibras com elevado módulo de elasticidade, serão obtidos compostos com maior resistência à tração, rigidez, e absorção de cargas. Em contrapartida, as fibras de polipropileno e polietileno que possuem baixo módulo de elasticidade, mas alto valor de deformação, estes compostos serão absorvedores de energia, com resistência ao impacto e tenacidade.

De forma geral, as fibras possuem suas propriedades mecânicas variáveis, uma vez que as mesmas estão atreladas às condições de cultura e crescimento, além disso, são classificadas como fontes de energia renováveis, tornando-as vantajosas em relação às fibras de origem tradicional, como o carvão, petróleo e gás. Por outro lado, são limitadas quanto a algumas características, já que nem sempre são compatíveis com as matrizes poliméricas e possui ainda, alta absorção de umidade, segundo aponta Wambua, Ivens e Verpoest (2003).

Segundo Rodrigues e Montardo (2002), é necessário que haja parâmetros para inserção das fibras nas matrizes e compósitos cimentícios, uma vez que as fibras que possuem maior capacidade de absorção de água, causarão a diminuição na trabalhabilidade do compósito ou das argamassas. Além disto, a perda de trabalhabilidade é proporcional à quantidade de teor de fibras incorporada ao compósito.

Para obter uma argamassa com propriedades de consistência e fluidez adequadas é necessário conhecer o teor máximo de fibras a incorporar, o volume da pasta de cimento, o tamanho dos agregados e da relação diâmetro e comprimento das fibras, segundo Johnston (2001).

A absorção de água pelas fibras pode ser diminuída com a utilização de polímeros, segundo Ramakrishna (2004), além disso, para argamassas de revestimento a perda de água excessiva pode ocasionar o fenômeno da retração e conseqüentemente o surgimento de fissuras (BASTOS, 2001).

3.1.2 Fibras de Sisal

Sisal é uma planta de origem Mexicana, proveniente da península de Yucatan, na cidade de Maya, com o nome recebido de uma erva nativa da região, o zizal-xiu de acordo com Martin et al. (2009), que possui o nome científico de *Agave sisalana perrine*. Rosário et. al (2010) apontam que a planta se constitui de folhas pontiagudas, com formas lanceoladas e disposta em conformação de roseta, como apresentado na Figura 2. Os autores citam também

que as folhas desta planta podem ter dimensões variadas, dependendo da sua idade e formas de cultivo, entretanto, possuem de 8 a 10 centímetros de comprimento e podem atingir o comprimento de 150 a 250 centímetros.



Figura 2. A planta sisal e sua conformação em roseta.

Fonte: <http://www.geografia.seed.pr.gov.br/modules/galeria> (2015).

As folhas do sisal são compostas de um grande número de microfibras, e segundo Rosário et al. (2010) este valor é próximo de 1.100 unidades de microfibras por folha, sendo que cada uma destas possui dimensões individuais com variação de 1,5 a 4,0 mm e 10 a 30 μm de largura. Em porcentagens, Martin et al. (2009) apontam que são aproveitados de 3 a 5% do peso em fibras das folhas, o restante (95 a 97% do peso) é caracterizado como resíduo, entretanto, de grande utilidade como adubo orgânico, ração animal e indústrias farmacêuticas. As folhas do sisal produzem de 700 a 1.400 feixes de fibras, além disto, aproximadamente 4% de sua composição correspondem às fibras, 1% de cutículas, 8% de matéria seca e os outros 87% são água, segundo Silva, Chawla e Toledo Filho (2008).

Em suma, as fibras de sisal são utilizadas para diversos fins, como artesanato, fios e cordas marítimas além de cordas para confecção de estofamento de cadeiras, sacarias, jóias, tapetes, sem contar na indústria automobilística, construção civil que estão incorporando suas propriedades mecânicas como um material promissor para estes setores.

Após o beneficiamento das fibras, Rosário et al. (2010) apontam que as mesmas se classificam em classe longa, com comprimentos acima de 0,90 m; classe média com comprimento variando entre 0,71 e 0,90 m; e em classe curta, com 0,60 e 0,70 m de comprimento. As fibras de sisal caracterizam-se ainda quanto ao seu tipo, sendo elas:

- Tipo superior, com fibras soltas e desembaraçadas, secas e bem batidas. Possui cor amarelada ou creme-clara, com maciez e brilho, isenta de impurezas, substâncias pécticas, entrançamentos, nós e quaisquer outros defeitos. Possuem umidade máxima da ordem de 13,5% e resistências acentuadas;
- As fibras do Tipo 1, são caracterizadas por apresentarem coloração amarelada ou creme-clara, com algumas manchas avermelhadas em algumas partes ao longo de seu comprimento. Assim como o tipo anterior, são secas, escovadas e bem batidas, além da maciez, brilho e resistências normais. Sua umidade é da ordem de 13,5% e são isentas de impurezas, substâncias pécticas, entrançamentos, nós e outros defeitos;
- O Tipo 2 possui coloração amarelada ou pardacenta, com alguns pontos extensos na cor esverdeado. São secas, escovadas e batidas, ligeiramente ásperas. Possuem brilho e resistências normais com umidade próxima de 13,5%. São isentas de entrançamentos, nós e cascas;
- Finalmente, o Tipo 3 possui coloração amarelada, esverdeada e com alguns pontos avermelhados. Possui brilho, bom estado de maturação, resistências normais, ásperas, umidade relativa da ordem de 13,5%, soltas e desembaraçadas. São isentas de nós, entrançamentos, cascas e outros defeitos.

Neste caso, para cada tipo de finalidade pode ser escolhido um tipo diferente de fibra, para que se possa retirar delas a melhor qualidade e ressaltar aspectos que se deseje no material ou na estrutura em questão.

3.1.3 Estrutura Interna

A estrutura interna das fibras de sisal é composta por frações de fibras, cutículas, água e partes secas, além disso, estudar sua conformação e características possibilitam entender qual a interação deste material com os demais elementos da argamassa ou matriz cimentícia.

Segundo Silva, Chawla e Toledo Filho (2008) a folha do sisal constitui-se de três componentes básicos, o xilema, fibras em arco e fibras estruturais. As fibras estruturais proporcionam a rigidez para as folhas e são encontradas com em maior número na periferia das mesmas. No interior das folhas são comumente encontradas as fibras em arco, que possuem resistência mecânica relevante e vão desde sua base até o topo das folhas. Por fim, as

fibras do xilema que transportam o alimento para a planta e estão ligadas por meio dos tecidos condutores, contudo estas fibras são perdidas durante o processo de extração das fibras.

Picanço (2005) também afirma que a seção transversal das folhas é constituída por fibras mecânicas e fibras em arco, como mostra a Figura 6. Estas fibras possuem comprimento mais longo que as demais fibras, sendo que as mesmas durante o processo acabam se separando facilmente. Observa-se também a presença de fibras no xilema da planta, sendo estas fibras quebráveis durante o processo de desfibramento, perdendo-se as mesmas durante a sua extração.

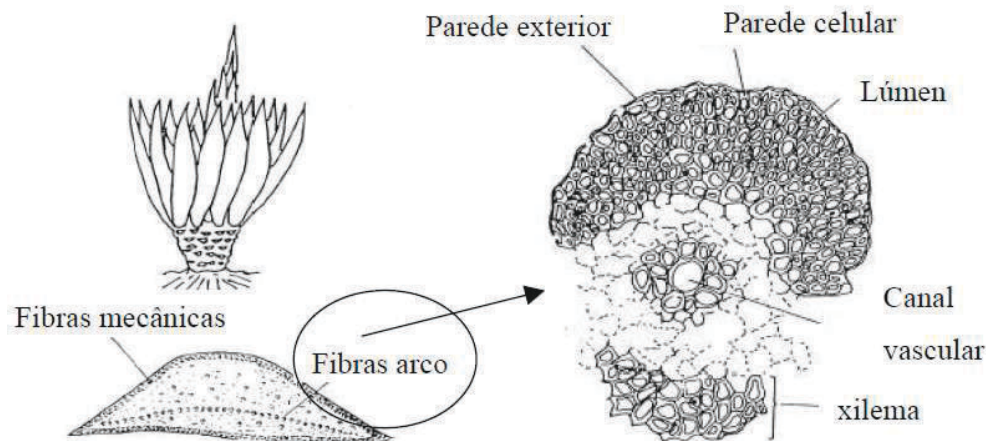


Figura 3. Estrutura interna do sisal e suas fibras.

Fonte: Picanço (2005), adaptado.

As fibras de sisal são constituídas por quatro partes principais: a parede primária, secundária grossa, parede terciária e o lúmen. A parede primária tem sua estrutura reticulada, e na parede secundária as fibrilas encontram-se em espirais. A parede terciária, por sua vez, tem a estrutura fibrilar disposta paralelamente entre si, e envolve o lúmen que varia em tamanho. Todas as células das fibras são ligadas pelas lamelas, que contém a hemicelulose e a lignina, de acordo com Silva, Chawla e Toledo Filho (2008).

3.1.4 Extração das fibras

Para a extração das fibras, Picanço (2005) aponta que desde os primeiros cultivos até os dias atuais, a sua produção é executada da mesma maneira, sem nenhuma técnica ou tecnologia nova agregada ao processo. Izquierdo (2011) afirma que as plantas do sisal têm sua

vida útil restrita a 7 anos, porém o corte das folhas inicia-se aos 3 anos de idade da planta, e a cada 6 meses, quando suas folhas atingem o comprimento de aproximadamente 140 centímetros. Neste caso, terão potencial para produção de fibras de 90 até 120 centímetros de comprimento.

O processo de beneficiamento das fibras é apontado por Rosário et al. (2010) como sendo um processo de fácil produção, sendo este compreendido pelo desfibramento, lavagem, secagem, batimento, prensagem e enfardamento do material.

Segundo Alves e Santiago (2006) o processo de desfibramento é uma etapa realizada logo após a colheita, com retirada da polpa ou mucilagem que envolve a fibra, por uma raspagem com equipamento mecânico, mediante Figura 4.



Figura 4. Desfibramento do sisal

Fonte: <http://g1.globo.com/bahia/noticia/2014/12/motor-de-sisal-da-decada-de-40-resiste-na-ba-mutilados-passam-de-dois-mil.html> (2014), adaptado.

Por conseguinte, é realizada a lavagem com imersão das fibras de 8 a 12 horas, sendo na manhã seguinte colocadas em varais para serem secas ao sol, como apresenta a Figura 5.



Figura 5. Secagem do sisal após desfibramento.
Fonte: <http://noticiasdesantaluz.com.br> (2011), adaptado.

O batimento, processo posterior a secagem das fibras, consiste em remover o pó que envolve a fibra do sisal, sendo este realizado em um galpão fechado com maquinário denominado de bateadeiras. Este último e os demais processos são geralmente realizados pelas empresas exportadoras, que utilizam a mão de obra local para diminuição dos custos de produção do produto.

Entretanto, apesar deste produto ser de grande utilidade para diversos fins, a sua produção ainda carece de processos otimizados, com poucas perdas e mais segurança para os trabalhadores, já que há relatos de diversos acidentes com os trabalhadores que manejam o maquinário que promove o desfibramento do sisal. Neste caso, dedos, mãos e até mesmo braços podem ser perdidos em decorrência do precário sistema de segurança oferecido aos trabalhadores.

3.1.5 Propriedades Mecânicas

As fibras de sisal bem como as fibras vegetais em geral, apresentam grande variabilidade em suas propriedades mecânicas, devido ao local do cultivo, técnicas de manejo, condições climáticas, idade da planta e entre outros fatores (PICANÇO, 2005). Ao longo do tempo os estudos com relação às propriedades mecânicas foram sendo investigadas, para que pudessem ser retiradas das fibras de sisal as melhores qualidades para emprego em diversos polímeros, compósitos e outros materiais de reforço. A Tabela 2 apresenta as propriedades físicas e mecânicas estudadas por diversos pesquisadores.

Tabela 2. Propriedades físicas e mecânicas do sisal estudadas por pesquisadores.

Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas			Pesquisador	Ano
Densidade (kg/m ³)	Diâm. (µm)	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongam. na ruptura (%)		
-	-	176	14,9	29,2	Guimarães	1987
1.450	50 – 300	530 – 640	9,4 – 22	3 – 7	Chand et al	1988
-	-	1.000 – 2.000	13 – 26	3 – 5	Beaudoin	1990
750 - 1070	80 – 300	227,8 - 230	10,94 – 26,70	2,08 – 4,18	Toledo Filho	1997
-	-	347 - 378	15,2	4,9 – 5,4	Savastano Jr	1992

Fonte: Picanço (2005), adaptado.

Algumas das propriedades mecânicas desta fibra são explicadas pela presença de microfibrilas e seus ângulos de orientação. Como já citado anteriormente, o potencial de resistência à tração das fibras é dito pela porção de celulose e lignina que a mesma possui em sua composição, conforme apresentado na Tabela 3.

Mediante os valores da Tabela 3, verifica-se que o alongamento máximo de ruptura aumenta com o ângulo θ , pois é maior o trabalho de fratura necessário para o estiramento das microfibrilas. Este fato justifica porque as fibras de sisal apresentam maior resistência quando comparada com as de coco (SAVASTANO JUNIOR, 1992).

Tabela 3. Composição de celulose e lignina das fibras vegetais.

Fibra	Celulose (% massa)	Lignina (% massa)	Ângulo das microfibrilas θ (graus)
Malva	76,0	10,0	8
Sisal	78,6	9,9	10 – 22
Coco	53,0	40,8	30 – 49

Fonte: Resende (2003), adaptado.

Devido aos seus valores elevados de resistência à tração, as fibras de sisal são excelentes materiais empregados para reforço de estruturas, argamassas, polímeros, resinas, entre outros compósitos. Segundo Savastano Junior (1992), a água presente nos vazios da argamassa ou compósitos de cimento Portland, denominada de água de capilaridade, possui elevada alcalinidade, levando a uma dissolução dos componentes responsáveis pela resistência das fibras, a celulose e a lignina. A elevada alcalinidade descrita anteriormente deve-se aos produtos de hidratação do cimento, conhecidos como silicato hidratado de cálcio (CSH).

As fissuras de retração são comumente observadas em peças estruturais ou argamassas que estão em fase de secagem. A utilização das fibras de sisal pode controlar esta retração plástica bem como prevenir o aparecimento de fissuras individuais de grandes dimensões ao longo da fase de endurecimento. As fibras de sisal podem ainda, direcionar o fluxo de umidade por meio de sua estrutura celular, já que as mesmas possuem alto grau de absorção de água, podendo iniciar um processo de cicatrização de fissuras que ocorrem na retração em geral (TOLEDO FILHO, 1997).

A fibra de sisal é um material de grandes propriedades mecânicas, que além de ser leve, ainda possui um baixo custo de produção quando comparado com as demais fibras sintetizadas pelo homem, ou seja, um material de grande valor a ser explorado.

3.1.6 Compósito de argamassa com fibras de sisal

O compósito se refere a um material que possui duas fases que quando unidas, tornam-se um composto diferente. Em suma, são constituídos de um reforço (fibras vegetais, sintéticas) e uma matriz a qual envolverá e promoverá a união entre essas duas fases (SOUZA, 2010). Deve-se atentar para as dimensões das fibras que fazem parte da matriz, pois abaixo do comprimento mínimo, as mesmas deixam de atuar como reforço e acabam fazendo papel de apenas enchimento ou carregando ainda mais o sistema.

As matrizes cimentícias são classificadas em três tipos: pasta de cimento, argamassa e concreto. As diferenças residem no tamanho e no tipo de agregados inseridos na mistura, porém em todos os casos, verifica-se a baixa resistência à tração que inviabiliza sua utilização como único meio de resistência a solicitações que produzem tensões de tração (RESENDE 2003).

A argamassa de cimento, por sua vez, pode ser considerada um compósito, visto que a mesma irá envolver as fibras para se tornar apenas um material, na maior parte do tempo como material de reforço. As fibras de grandes comprimentos são utilizadas como experimentos em peças estruturais como vigas e placas, visto que sua resistência e propriedades mecânicas estarão atreladas a orientação final das fibras. Em contrapartida para uma matriz com fibras mais curtas ocorrem problemas de distribuição e orientação das tensões no interior da estrutura.

Leão et al. (2005) citado por Souza (2010) afirmam que a adesão das fibras à matriz, caracteriza-se como um importante estudo, afim de buscar um compósito mais resistente e

eficaz. Savastano Junior (1992) cita em seus trabalhos que as fibras têm uma elevada absorção e acarretando o inchamento das mesmas. Neste caso, ocorre o deslizamento das fases (matriz e fibras) com a perda da adesão das mesmas e a redução de sua resistência.

Para combater o problema exposto acima, Coutts e Warden (1990) citados por Savastano Junior (1992) pesquisaram uma maneira de reverter a situação, propondo então que a argamassa ou compósito seja moldado sob pressão, ou seja, reduzindo-se a quantidade da relação água/cimento. Quando se retira parte desta água, a estrutura se torna mais densa uma vez que as fibras porosas devolvem à matriz parte da água absorvida por ela durante o processo de endurecimento nas primeiras idades.

Em seu trabalho, Peres (2010) cita Savastano Junior (1994) e aponta o estudo do comportamento da interface entre a matriz de argamassa e o composto vegetal, podendo ocorrer eventuais descontinuidades entre as fases, como poros e fissuras, interferindo no comportamento mecânico e em sua durabilidade. Mais tarde, Savastano Junior (2000) relata que a melhor adesão é atingida diminuindo-se a porosidade e a concentração de produtos de hidratação do cimento nas proximidades da fibra. Ou seja, que os produtos de hidratação estejam afastados das fibras, já que os mesmos absorvem água das fibras para se hidratarem e aquelas acabam tendo uma variação dimensional pronunciada.

Ao atingir a resistência máxima no carregamento, caso haja fibras em quantidades suficientes, as mesmas poderão suportar as cargas, conferindo ao compósito um comportamento dúctil. Neste caso, as propriedades seriam melhoradas aumentando-se sua tenacidade e ductibilidade.

Savastano Junior (1992) relata o processo de aparecimento das fissuras nas amostras ensaiadas e o que ocorre com seu comportamento mecânico. A tensão de aparecimento da primeira fissura terá valor mais elevado se houver boa aderência, diâmetro das fibras adequado, comprimento e quantidade de fibras adicionadas à argamassa. Portanto, haverá acréscimo da resistência à tração na fase elástica do gráfico. O autor ressalta que não só as fibras proporcionam aumento e ganho de resistências, deve-se verificar as quantidades dos agregados e a relação água cimento, uma vez que estes fatores proporcionam a resistência de aderência na zona de transição das fases.

O principal objetivo da utilização de fibras nos compósitos como sistema de reforço é aumentar a resistência ao impacto e aumentar a deformação de ruptura, ou seja, contribuir para a melhora da ductilidade à compressão, tração na flexão e torção, apontam Lima et al. (2013). Os mesmos autores explicam ainda que, utilizando-se os materiais de reforço, a

característica básica dos mesmos é que após o aparecimento da primeira fissura, as fibras possam garantir a manutenção de um valor residual de tensão a grandes deformações. Além disto, a deformação máxima nesses compósitos é atingida quando as fibras são arrancadas da matriz.

Os gráficos apresentados na Figura 6 demonstram a diferença do comportamento mecânico quando se utiliza as fibras como reforço para a matriz. Na figura (a), a argamassa não contém nenhum tipo de adição, portanto sua ruptura, de acordo com a mecânica da fratura é dita como sendo abrupta. Entretanto, na figura (b) observa-se um comportamento diferente quando se atinge a tensão de abertura da primeira fissura. As fibras trabalham no interior da matriz agindo como suporte para o carregamento, caracterizando-se a tensão residual após o rompimento do compósito.

De acordo com Resende (2003), quanto maior a quantidade de fibras adicionadas a mistura, maior é a resposta mecânica ao carregamento, ou seja, maior será a tensão até atingir a primeira fissura. Em contrapartida, a alta concentração de fibras dificulta a trabalhabilidade do compósito, levando ao aumento da relação água/cimento, e como já visto anteriormente, desfavorecendo o ganho de resistência.

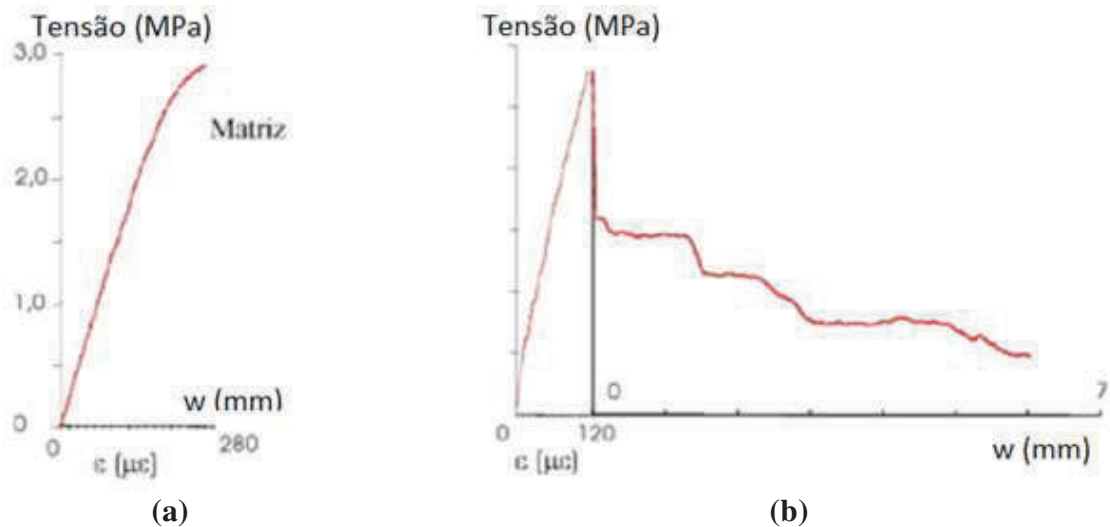


Figura 6. Comportamento mecânico a tração (a) argamassa e (b) argamassa com fibras vegetais.
Fonte: Lima (2013), adaptado.

Um dos intuitos de se adicionar as fibras na argamassa é de aumentar a capacidade de absorver energia na tração, possibilitando ao material um melhor desempenho durante a flexão da mesma. No estado de pós-fissuração, também é observado uma melhora, já que as fibras sofrem o processo de arrancamento da matriz (*pull-out*), segundo Hasaba et al. (1984).

Figueiredo (2000) aponta o comportamento das fissuras diante da ausência e da presença de fibras no interior do compósito, quando solicitado aos carregamentos, conforme a Figura 7.

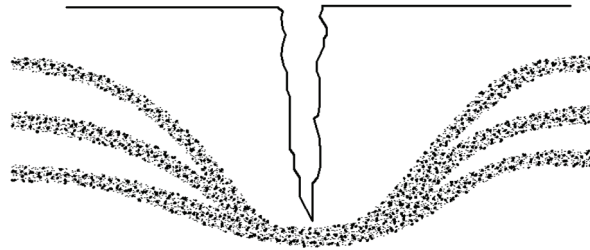


Figura 7. Concentração de tensões na frente de propagação de fissuras.
Fonte: Figueiredo (2000), adaptado.

Em outro caso, quando há a presença de fibras estas atuam como pontes de transferência, ou seja, promovem o aumento da deformação para o aparecimento das primeiras fissuras bem como da deformação até a ruptura do compósito, já que o compósito continua suportando o carregamento e se deformando durante os processos de deslocamento e arrancamento de fibras, conforme a Figura 8 (TANESI; FIGUEIREDO, 1999).

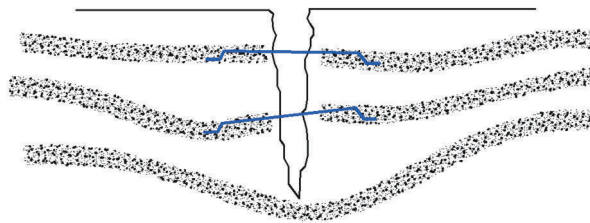


Figura 8. Fibras atuando como ponte de transferência de tensões no compósito.
Fonte: Figueiredo (2000), adaptado.

A sequência de figuras apresenta a evolução do processo de aplicação de carga na argamassa com a presença de fibras e sua resposta a estes carregamentos.

Na Figura 9 observa-se que as fibras estão presentes na matriz de argamassa, nos primeiros instantes do carregamento.

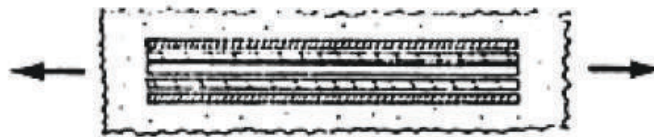


Figura 9. Fibras no interior da argamassa
Fonte: Bartos (1987)

Com o aumento do carregamento, iniciam-se as primeiras fissuras na argamassa como apresentado na Figura 10 (a). Com o aumento das dimensões das fissuras, ocorre o rompimento das fibras presentes nas extremidades da zona tracionada da Figura 10 (b).

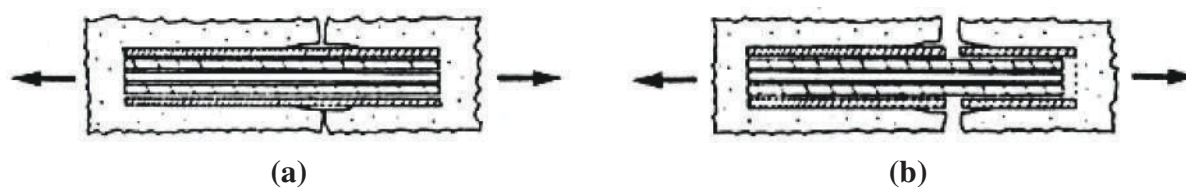


Figura 10. Início das primeiras fissuras (a) e arrancamento das fibras (b)

Fonte: Bartos (1987)

Por fim, o carregamento imposto já não pode mais ser suportado nem pela matriz quanto pelas fibras, ocorrendo o arrancamento das mesmas do corpo de prova, como na Figura 11.

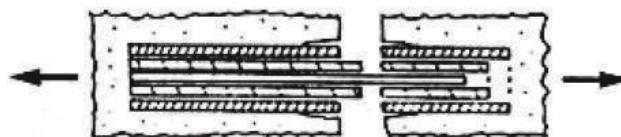


Figura 11. Arrancamento das fibras do corpo de prova

Fonte: Bartos (1987)

Segundo Resende (2003), a adição das fibras de sisal em matrizes a base de cimento aumenta a sua resistência à tração indireta em 20%, quando utilizados a proporção de 2% de fibras (em relação ao peso de cimento) na mistura, utilizando-se comprimentos de 25 mm. Quando analisado a presença de fibras em relação à compressão, a incorporação das mesmas na mistura leva a um decréscimo de resistência do compósito, segundo Toledo Filho (1997).

Foram realizados estudos por Lima et al. (2013) utilizando-se fibras curtas de sisal, cortadas com 25 mm de comprimento e teores de adição variando de 1,0% a 3,0%. As fibras receberam prévio tratamento com lavagem em água a temperatura de 50°C, para retirada de impurezas superficiais. Para a resistência à compressão dos moldes em placas, houve um aumento com a taxa de 1,0% e para a resistência à flexão, o aumento ocorreu utilizando-se 3,0% de adição de fibras de sisal em relação ao peso de cimento.

Beraldo e Vieira (2003) também estudaram a adição de fibras de sisal em argamassas, sendo as fibras com comprimento de 15 mm e adição de 1,80%, 3,60% e 10,80%. Observou-se que para as fibras sem tratamento, a resistência à compressão os valores diminuíram com o aumento das taxas.

Ainda, segundo Toledo Filho (1997), quando analisado o comportamento à flexão, o compósito se apresenta dividido em duas fases: a zona elástica, até o surgimento da primeira fissura, e a zona inelástica, até a fratura do corpo de prova.

Na zona elástica as fibras possuem módulo de elasticidade inferior ao da matriz e, portanto, não são eficientes para conter o surgimento e o aumento das fissuras, sendo que somente a matriz resiste aos carregamentos. Entretanto, na zona inelástica, as fibras auxiliam a matriz no suporte ao carregamento de tração imposto (RESENDE, 2003).

Em sua pesquisa, Rodrigues e Montardo (2002), apresentam um apanhado geral das propriedades e características adquiridas pela argamassa quando reforçadas com as fibras naturais, sendo elas:

- O alto teor de fibras confere maior resistência pós fissuração bem como, menor dimensão de fissuras;
- Quanto maior o módulo de elasticidade da fibra, maior a probabilidade de haver o seu arrancamento;
- A aderência entre as fibras e a matriz reduz a dimensão das fissuras bem como amplia sua distribuição pela argamassa;
- Quanto menor o comprimento das fibras, maior a probabilidade de serem arrancadas da mistura no momento da imposição dos carregamentos.

Existem inconvenientes e problemas relacionados ao uso das fibras, uma delas trata-se de sua durabilidade quando inserida na matriz de cimento. O principal mecanismo de ataque do meio alcalino nas fibras de sisal é resultante da dissolução e decomposição da hemicelulose e lignina presentes na lamela média, fazendo com que haja a quebra da ligação das microfibras individuais (SIQUEIRA, 2006). A celulose é a porção mais resistente ao ataque alcalino, sendo interessante o uso de algum tipo de tratamento para inibição ou diminuição dessas reações de decomposição da lignina. Podem-se utilizar procedimentos simples como lavagem com água, imersão em soluções químicas, polpação das fibras, entre outros tratamentos.

Algumas dificuldades também foram correlatadas por Coutts e Wardem (1992) e citados por Silva (2002). A presença de contaminantes nas fibras pode interferir na hidratação dos aglomerantes e também os processos de mistura da argamassa e a inserção das fibras, causando má distribuição na matriz.

Pesquisadores como Sarmiento e Freire (1996) relataram o uso de tratamentos físicos do tipo, lavagem, torrefação, pulverização e impregnação. Estes processos evitam a incompatibilidade química entre as fibras vegetais e o cimento, criando uma proteção ao meio alcalino, imobilizando a matéria orgânica para que não haja absorção de água em demasia. Visa ainda à proteção contra ataque de microrganismos, resistência ao fogo e durabilidade.

As fibras naturais, como no caso do sisal, podem sofrer descascamento e hidrólise alcalina devido à degradação das fibras no meio alcalino. O mecanismo de descascamento é razoavelmente inofensivo, graças ao seu alto grau de polimerização da celulose, intensificando-se às temperaturas superiores a 75° C.

Ainda com relação aos problemas relacionados à utilização de fibras vegetais na argamassa, Savastano Junior. (2000), relata o retardamento da pega de cimento devido à presença de açúcares e substâncias ácidas liberadas pelas mesmas em solução aquosa. As substâncias descritas não fazem parte da estrutura da fibra, porém são genericamente chamadas de extrativos e incluem resinas, polifenóis, graxas e óleos.

3.2 MICROCELULOSE

A microcelulose é um produto derivado da celulose natural por meio de processos químicos de hidrólise, purificação e outros. No caso da hidrólise, esta libera os microcristais celulósicos por meio da diluição de um ácido mineral diluído a sua temperatura ambiente, compostos de feixes firmes de cadeias de celulose em um arranjo linear rígido, segundo Hoyos et al. (2013).

Atualmente a microcelulose tem sido utilizada em diversos segmentos da indústria, como a farmacêutica, alimentícia, médica, cosmética e na construção civil como reforço de argamassas e concretos.

3.2.1 Obtenção da Microcelulose

A microcelulose é comumente obtida por meio do processo de hidrólise ácida, uma vez que este procedimento remove a maior parte da fração amorfa e inibe a morfologia das fibrilas de celulose, sendo as etapas como segue, segundo Hoyos et. al (2013):

- O material vegetal é selecionado e separado, aplicando-se a este o ácido desejado;
- Em seguida, a hidrólise transforma os hidróxidos insolúveis em óxidos e sulfatos, sendo posteriormente sujeitos ao processo de filtração;
- Este material filtrado é suspenso em água e em seguida seco mediante pulverização, obtendo-se a microcelulose em pó;

Os autores ainda ressaltam que o tamanho da microcelulose dependerá do teor de umidade aplicado e dos dois últimos estágios empregados.

Segundo Ketabchi et al. (2016), o método mais comumente utilizado para extração da microcelulose é a mercerização, uma vez que o mesmo reduz a possibilidade de haver efeitos que diminuam a densidade linear e o encolhimento das fibras na menor direção. Além disso, possibilita a visualização da estrutura fibrilar da microcelulose, contudo a melhoria nas propriedades mecânicas dependerá do tratamento em solução alcalina e sua concentração. Ressalta-se que a alcalinidade afeta a estrutura interna das fibras e que são responsáveis pelas propriedades mecânicas, a hemicelulose e a lignina. Como forma de extração, utilizaram-se como metodologia um processo otimizado com tratamentos das fibras mergulhadas em solução de álcalis e acetilação, obtendo-se uma produção de microcelulose com a menor quantidade de produtos químicos e, portanto, não interferindo nas propriedades mecânicas das mesmas.

3.2.2 Propriedades Mecânicas da Microcelulose

As propriedades de resistência e interação da microcelulose e as argamassas e concretos ainda são pouco investigadas na literatura. Mohamed et al. (2010) em suas pesquisas estudaram o efeito da adição de 2,1% de peso em massa de microcelulose ao concreto, obtendo-se um aumento nas resistências de compressão e de flexão dos corpos de prova logo após o sétimo dia de cura do mesmo.

Segundo Claramunt et al. (2011) as argamassas elaboradas com 3% de microcelulose tiveram um aumento significativo na resistência à flexão aos 28 dias de cura. Nas pesquisas apontadas por Nilson e Sargenius (2011), a incorporação de microcelulose às taxas de 0,11%, 0,22% e 0,33% modifica a reologia da mistura, diminui as propriedades mecânicas e não possuem efeito significativo em relação a retração por secagem do concreto. Entretanto, os referidos autores apontam a melhora nas propriedades de absorção da água, uma vez que a mesma modifica a estrutura dos poros da argamassa de cimento.

O aumento ou a diminuição da resistência apontada pelos autores é devido à quantidade de microcelulose inserida na mistura, uma vez que, partindo do mesmo princípio das fibras, o alto teor de materiais de reforço não implica sempre em aumento de resistência, tendo estes valores uma faixa ótima de incorporação.

A microcelulose tem um caráter altamente hidrofílico, ou seja, apresenta afinidade com a água e, portanto, retém grandes quantidades de água. Desta forma, os compostos de hidratação do cimento (CSH) se deslocam para próximo dos cristais de microcelulose, já que os grupos OH livres da água interagem por meio das ligações de hidrogênio com outros compostos contendo átomos de hidrogênio em sua estrutura, como os CSH e os CH propriamente ditos (HOYOS et. al., 2013). Desta forma, esta interação favorece a dispersão da microcelulose na matriz, não sendo necessário o uso de dispersantes na argamassa.

A utilização de microcelulose na mistura de argamassa proporcionou aumento significativo na resistência à tração na flexão e quanto a propriedade da tenacidade, segundo Savastano Junior et al. (2002).

3.3 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO E ENDURECIDO

A argamassa possui propriedades e comportamentos diferentes quando no estado fresco e endurecido. No estado fresco, logo após sua moldagem, apresenta a consistência ou a trabalhabilidade como característica e no estado endurecido, a resistência à compressão, resistência a flexão e demais propriedades mecânicas, que serão explanadas nos tópicos a seguir.

3.3.1 Propriedades no Estado Fresco

A argamassa no estado fresco tem suas características alteradas devido à variação na proporção dos materiais constituintes, areia, cimento e água e, além disso, com a sua qualidade. Este comportamento influencia em suas propriedades mecânicas e também em sua capacidade de aderência com o substrato, segundo Silva et al. (2005).

A adição de fibras pode causar diminuição na fluidez da mistura, principalmente aquelas em que absorvem quantidades satisfatórias de água.

O estudo da trabalhabilidade caracteriza-se por ser algo complexo, pois nem sempre é possível mensurar o comportamento da argamassa. Neste caso, descreve-se de maneira geral a capacidade da argamassa em ser manuseada, possuindo a quantidade ideal de materiais para proporcionar um bom acabamento das superfícies a serem revestidas bem como resistir à segregação.

A reologia da argamassa é medida indiretamente através da correlação com a consistência da argamassa, sendo esta medida normalmente por meio do ensaio de espalhamento na mesa ou penetração de uma esfera padrão. Estudar o fluxo e a deformação da argamassa quando submetida a uma tensão externa ou indireta é chamado de reologia.

A diminuição e o processo de absorção de água ocasionam o fenômeno de retração plástica. Além disto, a perda de água por sucção pela base poderá acarretar o aparecimento de fissuras (BASTOS, 2001). A mesma afirmativa foi apresentada também por Neville (1997) que estudou a fissuração das argamassas por retração plástica.

Toledo Filho e Sanjuán (1999) demonstraram que as fibras de sisal são eficazes na redução da retração plástica de argamassas bem como na redução do tempo de aparecimento da primeira fissura e no controle da fissuração, em detrimento do uso de fibras de polipropileno. Isto se deve ao fato de que o módulo de elasticidade dessas fibras é maior que o da matriz cimentícia nas primeiras idades.

De acordo com Sanjuán et. al (1997) e Soroushian e Ravanbakhsh (1999) houve a diminuição do aparecimento de fissuras provenientes da retração plástica em argamassas com fibras de polipropileno e em concretos para reparos com fibras de celulose, respectivamente. Vale ressaltar que a incorporação de fibras de celulose, inclusive, aumentou a resistência inicial do concreto, possibilitando uma redução de 10 a 20% no teor de cimento e aditivo acelerador.

3.3.2 Propriedades no Estado Endurecido

As fibras na pasta de cimento, concretos ou argamassas influenciam em três comportamentos de relevância significativa no estado endurecido. Primeiramente, o aumento na tensão de fissuração, sendo mais evidente em carregamentos que gerem esforços de tração direta, flexão e cisalhamento. O segundo efeito ocorre mesmo quando o acréscimo de resistência é mínimo, referindo-se a melhora na capacidade de absorção de energia ou tenacidade. Por fim, o terceiro efeito diz respeito à capacidade de inibição ou modificação no desenvolvimento de fissuras, devido à redução da abertura e o espaçamento entre as mesmas. Este efeito depende da quantidade de fissuras bem como o tipo e o tratamento a ser utilizado para a incorporação nas argamassas, pastas e no concreto (JOHNSTON, 2001).

O estudo do comportamento no estado endurecido favorece a análise e o estudo dos materiais empregados na composição das argamassas, pois utiliza e aproveita o melhor de cada um dos insumos, inclusive das fibras e da microcelulose a ser incorporada nas mesmas.

3.3.2.1 Resistência à Compressão

A resistência à compressão ainda que não se configure como uma propriedade de extrema importância para argamassas é interessante quando relacionada aos efeitos de movimentação térmica, como a expansão ou contração, podendo levar ao aparecimento de fissuras na mesma, segundo Cincotto et al. (1995).

Segundo Johnston (2001), o ensaio de compressão uniaxial produz combinações de ruptura por cisalhamento nas proximidades do corpo de prova com inchamento lateral da seção não confinada. Além disto, as fibras podem afetar as facetas do comportamento à compressão que envolvem forças de cisalhamento e deformações à tração. O autor ainda cita que em presença de terremotos ou abalos sísmicos, a presença das fibras na argamassa reduz à desintegração e perda de integridade estrutural associadas a grandes deformações na compressão.

Pesquisadores como Fujjyama et al. (1999) e Modler et al. (2002) verificaram que as incorporações de fibras de sisal na argamassa diminuíram o valor de resistência à compressão dos compósitos.

3.3.2.2 Resistência à Tração na Flexão

Em pesquisas e estudos a respeito da incorporação de fibras em argamassas, Mehta e Monteiro (1994) afirmam que os compósitos cimentícios com fibras não demonstram melhoras relevantes na resistência à tração na flexão em comparação com compósitos sem adição de fibras. Entretanto, Coutts e Warden (1992) afirmam em sua pesquisa que a incorporação de 8% em massa de fibras de sisal em relação a massa de cimento, pode dobrar a resistência à tração na flexão do compósito quando comparado com as amostras de referência, ou seja, sem adição das fibras.

O aumento na resistência à tração na flexão é influenciado pela quantidade de fibras, suas formas, tamanho e dispersão na argamassa.

4 METODOLOGIA

O desenvolvimento da pesquisa realizou-se com a utilização de materiais adquiridos e por meio de doação, no laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil do Campus da Universidade Estadual de Maringá.

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram utilizados os seguintes materiais: cimento, areia normal, água, microcelulose e fibras de sisal.

4.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Os materiais utilizados no presente trabalho foram previamente estudados para que se pudesse obter a melhor característica de cada um deles.

4.1.1 Fibras de Sisal

As fibras de Sisal (*Agave sisalana*) utilizadas neste estudo foram adquiridas na empresa A. Foram disponibilizadas em maços de dois quilogramas e com 1,50 metros de comprimento.

As fibras são classificadas pela empresa como tipo 1, “in natura”, ou seja, não foi realizado nenhum tipo de tratamento químico para produção das mesmas, apenas extraída da planta e seca ao sol. Contudo, as mesmas são de cor amarelo claro, secas, batidas e desembaraçadas, com presença de alguns pequenos defeitos. Para a utilização das fibras nos ensaios, as mesmas foram cortadas com 20 mm de comprimento.



Figura 12.Fibras curtas de sisal

Fonte: O autor (2017).

As propriedades físicas e mecânicas foram estudadas por Silva et al. (2012) para determinação de características presentes nas fibras de sisal, conforme os valores apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Propriedades físicas e mecânicas das fibras de sisal.

Umidade (%)	Cinzas (%)	Lignina (%)	Hemicelulose (%)
9,9 ± 0,1	0,49 ± 0,04	9,3 ± 0,1	21,1 ± 0,9
Celulose (%)	Diâmetro Médio (µm)	Alongamento (%)	Tensão de Tração (MPa)
64,2 ± 1,0	316 ± 49	1,7 ± 0,2	175 ± 15

Fonte: Silva (2012), adaptado.

4.1.2 Microcelulose

A microcelulose utilizada foi comprada do fornecedor B, com sede nos Estados Unidos. A mesma foi fornecida em pó, conforme a Figura 13, de coloração branca, com pH variando entre 4,5 e 7,5 e densidade de 0,6 g/mL.



Figura 13. Microcelulose em pó.

Fonte: O autor (2017).

4.1.3 Cimento Portland

O cimento utilizado na realização dos ensaios foi o CP V-ARI, cimento Portland de alta resistência inicial, da marca C. O cimento foi comprado em número de três sacos com a

quantidade de 50 quilogramas cada. Nos ensaios para a fabricação das argamassas foi utilizado a quantidade de 624 gramas de cimento para cada traço utilizado.

O cimento Portland de alta resistência inicial foi escolhido para que possibilitasse analisar o comportamento da argamassa ao atingir resistências satisfatórias nas primeiras idades, bem como aos 28 dias, para simular as condições reais das mesmas.

4.1.4 Areia Normal

A areia normal foi adquirida por doação pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT). Esta areia é padronizada conforme a norma ABNT NBR 7214:2015, sendo as granulometrias das areias utilizadas apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Frações granulométricas da areia normal

Material retido entre as peneiras de abertura nominal	Denominação de fração (ABNT)	Denominação
2,4 mm e 1,2 mm	16	Grossa
1,2 mm e 0,6 mm	30	Média Grossa
0,6 mm e 0,3 mm	50	Média Fina
0,3 mm e 0,15 mm	100	Fina

Fonte: ABNT NBR 7214:2015

A areia foi fornecida em sacos de 25 kg, e separada conforme sua granulometria, com apresenta a Figura 14.



Figura 14. Areia normal fornecida pelo IPT.

Fonte: O autor (2017).

Para a realização dos ensaios foram utilizadas quatro partes de 468 gramas cada, para cada uma das frações apresentadas na Tabela 4. Mediante a norma NBR 7215:2006 têm-se as quantidades a serem utilizadas para a moldagem das argamassas, conforme a Tabela 6.

Tabela 6. Quantidades das granulometrias da areia para argamassas

Material retido entre as peneiras de abertura nominal	Denominação de fração (ABNT)	Denominação	Quantidade para mistura (g)
2,4 mm e 1,2 mm	16	Grossa	468 ± 0,3
1,2 mm e 0,6 mm	30	Média grossa	468 ± 0,3
0,6 mm e 0,3 mm	50	Média fina	468 ± 0,3
0,3 mm e 0,15 mm	100	Fina	468 ± 0,3

Fonte: NBR 7215 (ABNT, 1996), adaptado.

4.1.5 Água

Para o amassamento da mistura foi utilizada água da rede pública, advinda do sistema de abastecimento urbano, fornecido pela SANEPAR, sendo a quantidade da mesma definida pela NBR 7215:2006, ou seja, $300 \pm 0,2$ mL para cada traço.

4.1.6 Corpos de prova

Os corpos de prova utilizados foram de dois tipos, circulares para medida de resistência a compressão, e prismáticos para a resistência a flexão.

Os corpos de prova cilíndricos têm como medidas, 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, sendo compostos de uma base rosqueável.

Os corpos de prova prismáticos foram moldados em fôrmas de 4 cm de largura, 4 cm de altura e 16 cm de comprimento.

4.2 MÉTODOS

Esta seção remete aos métodos utilizados para a obtenção dos resultados posteriormente discutidos. Além disto, explicita como foram elaboradas as argamassas, as quantidades de insumos e o modo como foram realizados os ensaios de consistência, resistência à compressão e à tração.

4.2.1 Corte e preparo das fibras de sisal

As fibras a serem utilizadas no presente estudo não serão submetidas a qualquer tipo de tratamento químico, sendo apenas utilizadas de forma *in natura* na mistura.

Para que estas fiquem com aproximadamente o mesmo comprimento, as mesmas serão amarradas em um grande chumaço, marcadas com uma caneta azul o local correspondente a 20 mm e em seguida serão cortadas com a tesoura. A escolha do tamanho das fibras refere-se às pesquisas de Toledo Filho (1997) e Savastano Junior (2002) que utilizaram fibras próximas a estes valores e obtiveram resultados satisfatórios.

Foram pesadas, portanto, as taxas de 0,5%, 1,0% e 1,5% de fibras de sisal para serem incorporadas à argamassa.

4.2.2 Preparo da Microcelulose

Anteriormente a sua utilização no traço a ser executado, a microcelulose foi pesada nos teores de 0,2%, 0,4% e 0,6% em relação à massa de cimento, estas foram então imersas em 225 mL de água, em béqueres respectivamente identificados com as diferentes alíquotas. A microcelulose permaneceu imersa em água durante 48 horas, para assegurar a sua completa saturação e diminuir a absorção de água de amassamento durante e depois da moldagem dos corpos de prova.

As amostras foram agitadas por meio de um agitador magnético, Marconi MA 089, durante 40 minutos antes da execução do traço, para que a solução ficasse totalmente suspensa, conforme apresenta a Figura 15.



Figura 15. Agitação da microcelulose imersa em água.
Fonte: O autor (2017).

4.2.3 Preparo da Argamassa

Para o preparo da argamassa foi utilizado misturador mecânico, sendo o traço desenvolvido para a composição da argamassa, de 1:3 conforme as exigências da NBR 7215 (ABNT, 2006).

4.2.3.1 Argamassa de Referência

O traço de referência, ou seja, sem adição de fibras de sisal e/ou microcelulose foi utilizado para a comparação dos resultados dos demais ensaios. Neste caso, não houve a adição de nenhum dos materiais, sendo, portanto, apenas cimento Portland, areia normal e água, nas proporções exigidas pela NBR 7215 (ABNT, 2006).

A execução do traço foi semelhante as demais argamassas, que serão abordadas e esplanadas nos itens que seguem.

4.2.3.2 FASE I – Argamassa com Adição de Fibras de Sisal

O traço de 1:3 executado conforme a NBR 7215:2006 seguiram-se os procedimentos descritos nos tópicos abaixo e conforme o esquema da Figura 16:

- Primeiramente pesou-se 624 gramas de cimento Portland;
- Em seguida, pesou-se a quantidade de 468 gramas de cada uma das frações de areia normal, totalizando-se a massa de 1.872 gramas;
- Em uma cuba, misturou-se o cimento e a areia normal, previamente pesados e adicionou-se a esta as fibras de sisal, tomando-se o cuidado para que as mesmas ficassem distribuídas em todo o volume da mistura. As fibras de sisal foram distribuídas de forma randômica, ou seja, sem uma direção definida;
- Por conseguinte, colocou-se a mistura no recipiente do misturador mecânico e ligou-se o mesmo em velocidade baixa durante 30 segundos;
- Sem desligar o misturador mecânico e após os primeiros 30 segundos, adicionou-se 300 mL de água e deixou-se agitar por mais 30 segundos, perfazendo o total de 60 segundos;
- Ao final dos 60 segundos, a mistura foi agitada por mais 30 segundos em velocidade alta;
- Desligou-se o misturador mecânico e deixou-se a mistura descansar por 1 minuto e 30 segundos, sendo retirados os excessos de argamassa das pás e bordas do recipiente com uma espátula;
- Ao final dos 180 segundos, a mistura foi agitada em velocidade alta por mais 60 segundos, sendo no total o tempo gasto de 240 segundos.

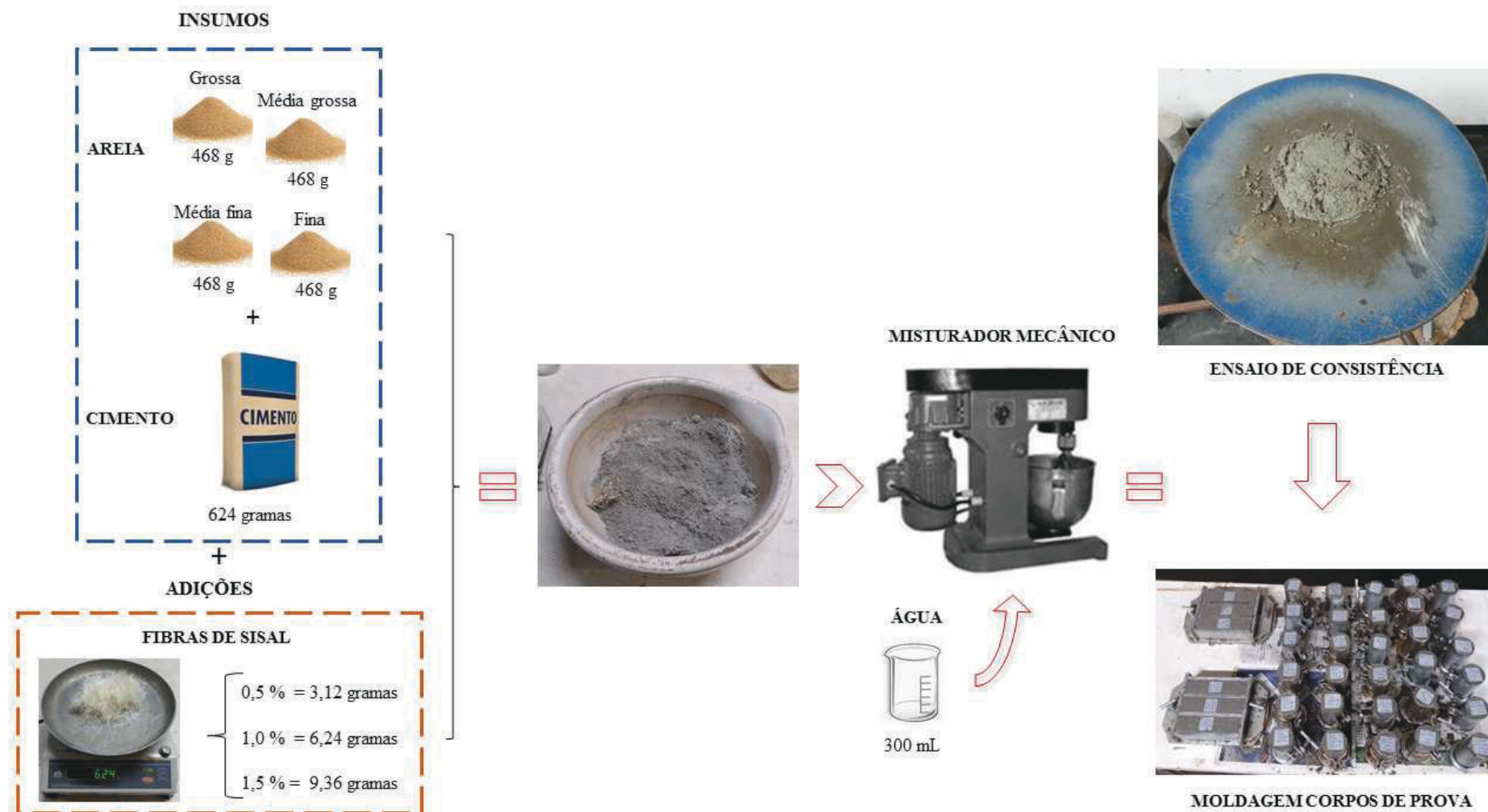


Figura 16. Procedimentos para a confecção das argamassas com adição de fibras de sisal – fase I.

Fonte: O autor (2017).

4.2.3.3 FASEII – Argamassa com Adição de Microcelulose

De forma análoga a Fase I, para a argamassa com adição de microcelulose foram realizados os seguintes procedimentos:

- Primeiramente pesou-se 624 gramas de cimento Portland;
- Em seguida, pesou-se a quantidade de 468 gramas de cada uma das frações de areia normal, totalizando-se a massa de 1.872 gramas;
- Em uma cuba, misturou-se o cimento e a areia normal, pesados previamente;
- Por conseguinte, colocou-se a mistura no recipiente do misturador mecânico e ligou-se o mesmo em velocidade baixa durante 30 segundos;
- Sem desligar o misturador mecânico e após os primeiros 30 segundos, adicionou-se os 225mL de água com microcelulose que haviam sido agitados, e o restante de 75 mL previamente dosados em um béquer. Deixou-se a mistura agitar por mais 30 segundos, perfazendo o total de 60 segundos;
- Ao final dos 60 segundos, a mistura foi agitada por mais 30 segundos em velocidade alta;
- Desligou-se o misturador mecânico e deixou-se a mistura descansar por 1 minuto e 30 segundos, sendo retirados os excessos de argamassa das pás e bordas do recipiente com uma espátula;
- Ao final dos 180 segundos, a mistura foi agitada em velocidade alta por mais 60 segundos, sendo no total o tempo gasto de 240 segundos.

A Figura 17 apresenta resumidamente os procedimentos utilizados para a realização da Fase II.

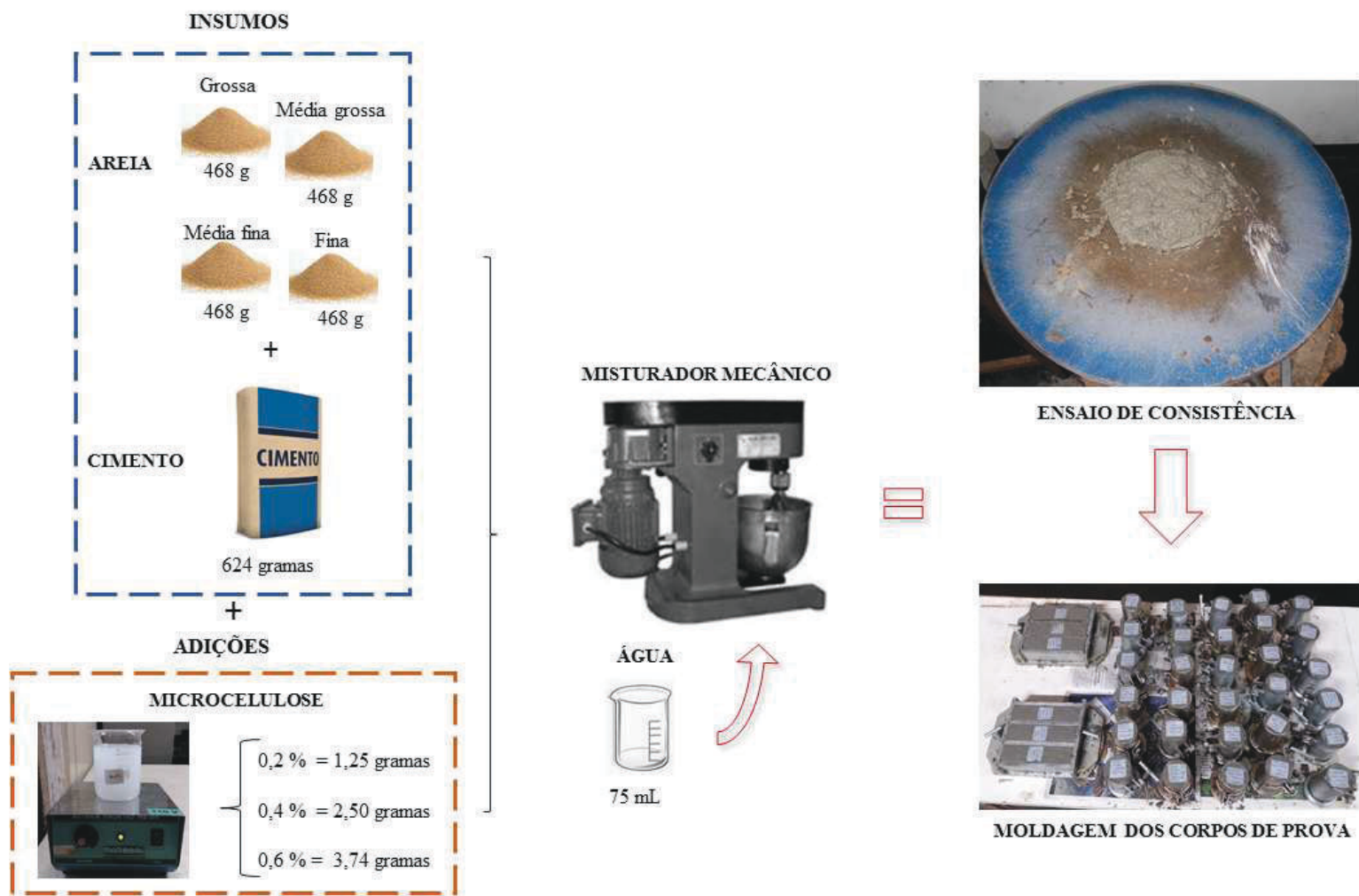


Figura 17. Procedimentos para a confecção das argamassas com adição de microcelulose – fase II.

Fonte: O autor (2017).

4.2.3.4 FASEIII – Argamassa com Adição de Fibras de Sisal e Microcelulose

A Fase III contempla a mistura das fibras de sisal e da microcelulose, para estudar seu comportamento, bem como observar a interação entre os dois materiais quando inseridos na matriz cimentícia.

Na Fase III as argamassas foram confeccionadas em duas partes, a primeira considerando-se que o teor de fibras de sisal permanecesse fixo e variou-se apenas a quantidade de microcelulose incorporada. A segunda parte foi executada a argamassa com teores de microcelulose fixa e as fibras de sisal foram variadas, conforme os teores já estabelecidos.

Portanto, seguiu-se os seguintes procedimentos conforme o esquema da Figura 18:

- Primeiramente pesou-se 624 gramas de cimento Portland;
- Em seguida, pesou-se a quantidade de 468 gramas de cada uma das frações de areia normal, totalizando-se a massa de 1.872 gramas;
- Em uma cuba, misturou-se o cimento e a areia normal, previamente pesados e adicionou-se a esta as fibras de sisal, tomando-se o cuidado para que as mesmas ficassem distribuídas em todo o volume da mistura. De forma análoga a fase I, as fibras de sisal foram distribuídas de forma randômica, ou seja, sem uma direção definida;
- Por conseguinte, colocou-se a mistura no recipiente do misturador mecânico e ligou-se o mesmo em velocidade baixa durante 30 segundos;
- Sem desligar o misturador mecânico e após os primeiros 30 segundos, adicionou-se os 225 mL de água com microcelulose que haviam sido agitados, e o restante de 75 mL previamente dosados em um béquer. Deixou-se a mistura agitar por mais 30 segundos, perfazendo o total de 60 segundos;
- Ao final dos 60 segundos, a mistura foi agitada por mais 30 segundos em velocidade alta;
- Desligou-se o misturador mecânico e deixou-se a mistura descansar por 1 minuto e 30 segundos, sendo retirados os excessos de argamassa das pás e bordas do recipiente com uma espátula;
- Ao final dos 180 segundos, a mistura foi agitada em velocidade alta por mais 60 segundos, sendo no total o tempo gasto de 240 segundos.

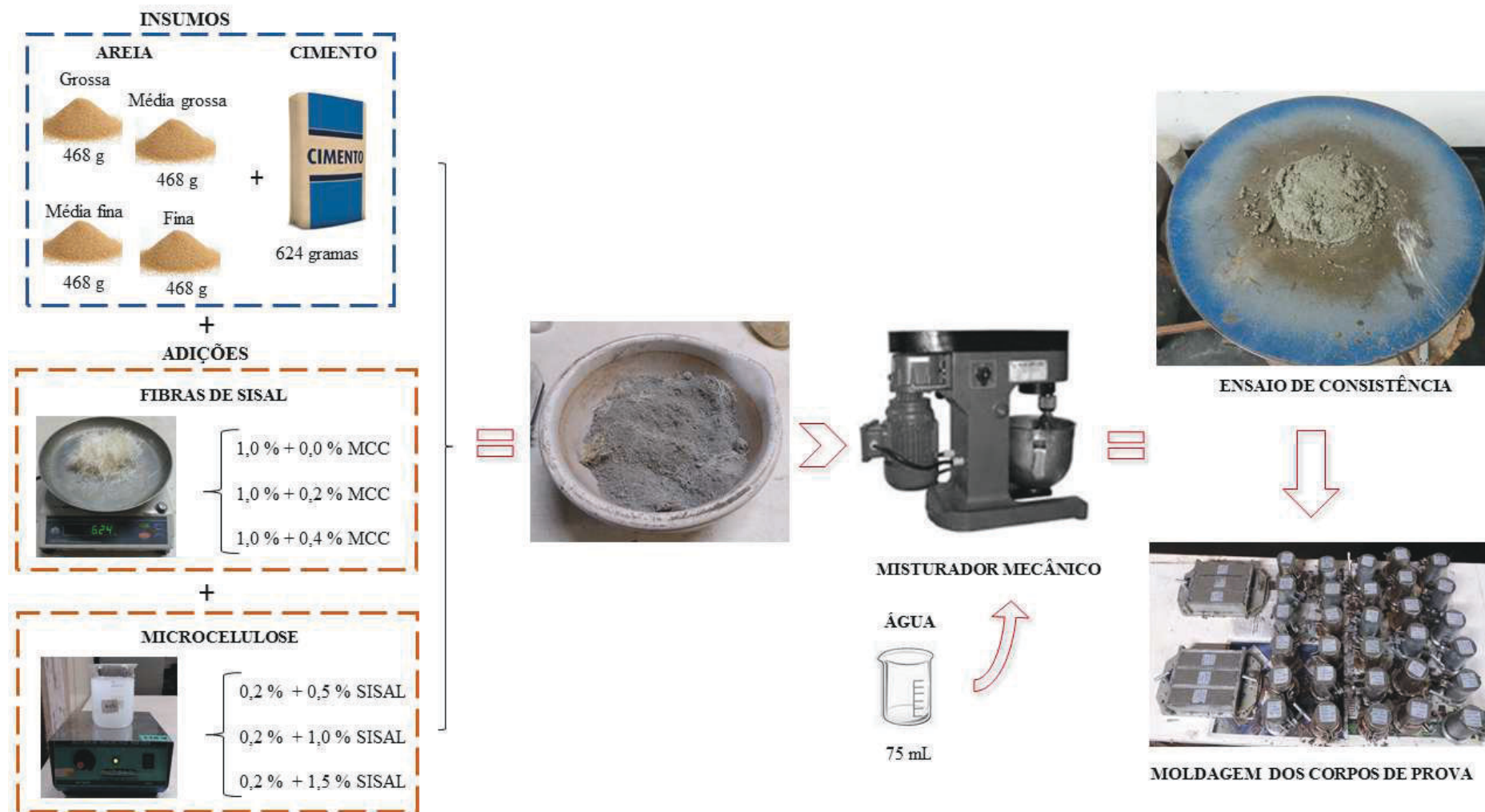


Figura 18. Procedimentos para a confecção das argamassas com adição de fibras de sisal e microcelulose – fase III.
Fonte: O autor (2017).

4.2.4 Índice de Consistência

Para a determinação da consistência da argamassa, utilizou-se as exigências observadas na NBR 7215 (ABNT 2006).

Após a preparação da argamassa, limpou-se a mesa circular e colocou-se sobre ela o molde tronco cônico, para logo em seguida enchê-lo com argamassa em três camadas de alturas aproximadamente iguais, sendo a primeira compactada com 15 golpes, a segunda com 10 golpes e finalmente a terceira com 5 golpes. A argamassa foi compactada com soquete para que a mesma se distribuisse uniformemente no molde.

Por conseguinte, girou-se a manivela da mesa para que a mesma caísse 30 vezes distribuídos em 30 segundos, e logo após a última queda, mediu-se o espalhamento com o auxílio de um paquímetro.

As medidas foram retiradas mediante três diâmetros tomados em pares de pontos uniformemente distribuídos ao longo da argamassa espalhada.

4.2.5 Moldagem e cura dos Corpos de Prova

Imediatamente após a retirada das medidas no ensaio do índice de consistência, a argamassa foi inserida nos moldes cilíndricos em 4 camadas de altura aproximadamente iguais, e compactadas com soquete em 30 golpes cada. Para os corpos de prova prismáticos foram utilizadas 3 camadas de altura aproximadamente iguais e compactadas com soquete em 30 golpes para cada camada.

Os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas e conservados em câmara úmida para as idades de 3, 7 e 28 dias. Após este período, os corpos de prova foram capeados com enxofre líquido para regularizar as superfícies, a fim de melhorar a distribuição de cargas no momento do ensaio.

4.2.6 Ensaio de Resistência à Compressão

Para o ensaio de resistência a compressão utilizou-se as exigências da norma NBR 5739:2007 – Ensaio de Compressão de Corpo de Prova Cilíndrico.

A resistência a compressão dos corpos de prova foi avaliada para as idades de 3, 7 e 28 dias, sendo confeccionadas 4 amostras por idade de cada uma das argamassas, com fibras de sisal, microcelulose e as argamassas com combinação dos dois materiais. Para este ensaio utilizou-se o equipamento apresentado na Figura 19.

Os corpos de prova foram colocados no equipamento individualmente e aplicado a carga a uma velocidade constante até o mesmo atingir sua ruptura, sendo este valor anotado para cada um dos moldes ensaiados.



Figura 19. Equipamento para ensaio de resistência a compressão e tração na flexão.
Fonte: O autor (2017).

4.2.7 Ensaio de Resistência à Tração na Flexão

A resistência à tração das argamassas contendo fibras de sisal, microcelulose e a combinação dos dois materiais respectivamente, foi avaliada aos 28 dias, utilizando-se os corpos de prova prismáticos, com dimensões de 4 cm x 4 cm x 16 cm. Para ensaio, os corpos de prova foram rompidos em três pontos, conforme as exigências da NBR 12142:2010 e portanto, utilizou-se o mesmo equipamento apresentado na Figura 19.

Os resultados foram anotados após o equipamento cessar a aplicação de cargas no corpo de prova, indicativo de que o mesmo já havia atingido sua ruptura.

4.2.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A análise microscópica foi realizada na Universidade de São Paulo por um microscópio eletrônico de varredura JEOL Neoscope JCM-5000, utilizando-se tensões de aceleração fixas de 5 kV, sendo que neste caso, não foi necessário o preparo da superfície das amostras com ouro.

Verificou-se o comportamento da microcelulose e sua interação com as fibras de sisal, observando-se a sua dispersão na matriz cimentícia bem como o que ocorre na periferia das fibras de sisal e da microcelulose.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados e as discussões dos ensaios para cada uma das argamassas confeccionadas.

5.1 FASE I – ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE SISAL

Realizou-se o estudo das argamassas com adição de fibras de sisal obtendo-se os resultados de índice de consistência, resistência à compressão e resistência à tração na flexão.

5.1.1 Propriedades no Estado Fresco

A medida qualitativa das argamassas foi realizada mediante o ensaio do índice de consistência.

5.1.1.1 Índice de Consistência

A adição das fibras de sisal na argamassa possibilitou observar a variação da consistência da mesma com o aumento das taxas de fibras curtas de 2,0 cm cada.

A consistência das argamassas foi medida e anotada em três pontos médios, obtendo-se os valores trazidos na Tabela 7, sendo possível, com este comportamento, confeccionar o gráfico da Figura 20.

Tabela 7. Valores do índice de consistência das argamassas com diferentes teores de fibras de sisal.

Índice de Consistência (cm)	Teores de Fibras de Sisal (%)			
	0,00	0,50	1,00	1,50
	20,94	20,24	17,95	17,20

Fonte: O autor (2017).

Para o traço de 1:3 de argamassa sem adições, a consistência atingida foi próxima a 21,0 cm, porém, observa-se que com a adição das fibras de sisal houve um decréscimo dos valores de consistência com o aumento das taxas de fibras.

Para o teor incorporado de 0,5 % de fibras de sisal houve a perda de consistência em 3,34% em relação à argamassa sem adições, contudo, para o teor de 1,5 % de fibras de sisal,

houve um decaimento significativo na consistência, sendo este valor de 17,86% em relação à argamassa de referência.

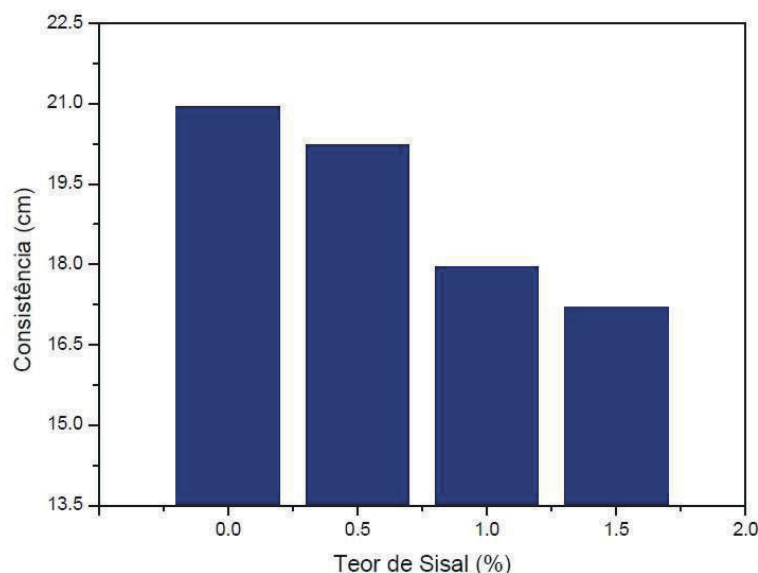


Figura 20. Gráfico de índice de consistência das argamassas com diferentes taxas de sisal.
Fonte: O autor (2017).

Por ser um material de origem natural, as fibras de sisal contêm elevado número de poros em sua estrutura, o que propicia o aumento da absorção de água da argamassa, necessária para a hidratação do cimento, levando a um decréscimo de sua consistência, conforme observado durante a realização dos ensaios. Este aumento na absorção de água foi agravado pela sua utilização “in natura”, ou seja, sem qualquer tratamento para a prévia saturação das fibras de sisal.

Em seus estudos, Rodrigues e Montardo (2002), observaram que a inserção de fibras de sisal diminuiu a trabalhabilidade proporcionalmente ao aumento do teor de fibras incorporadas a argamassa.

A absorção de água pelas fibras pode ser diminuída com a utilização de polímeros, segundo Ramakrishna e colaboradores (2004), além disso, Beraldo e Vieira (2003) indicaram que o sisal natural absorve grande quantidade de água, sendo necessária a utilização de tratamentos antes de sua inserção nas argamassas. Em seus estudos adotaram-se a lavagem em água fria, com imersão por 24 horas e lavagem com água quente, durante 2 horas a 80° C, sendo posteriormente secas ao sol. Esse tratamento garantiu a melhora nos valores de

consistência das argamassas, pois as fibras antes de serem utilizadas já se encontravam saturadas e, portanto, absorveram menos quantidade de água da argamassa.

5.1.2 Propriedades no Estado Endurecido

Realizaram-se os ensaios de rompimento dos corpos de prova para a verificação da resistência à compressão e resistência à tração na flexão das argamassas com adição de fibras de sisal.

5.1.2.1 Resistência a Compressão

A resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos foi analisada para as idades de 3, 7 e 28 dias, conservados por este período em câmara úmida para a sua cura, conforme exigências da NBR 5739 (ABNT, 2007).

Os corpos de prova, foram submetidos à carga de compressão, sendo o valor de sua ruptura registrado conforme os dados da Tabela 8.

Tabela 8. Valores de resistência a compressão das argamassas com diferentes teores de fibras de sisal.

Idade (dias)	Teor de Fibras de Sisal (%)			
	0,00	0,50	1,00	1,50
	Resistência a Compressão (MPa)			
3	22,38	20,49	21,24	21,45
7	25,30	24,75	26,22	23,72
28	30,60	31,80	37,63	29,93

Fonte: O autor, 2017.

Para cada argamassa com adição de fibras, foram moldados 4 corpos de prova, portanto, o valor apresentado é resultado da média dos mesmos. Mediante os valores destacados na Tabela 8, pode-se confeccionar o gráfico de resistência a compressão pelas idades de rompimento dos corpos de prova, conforme a Figura 21.

Aos 3 dias de idade os valores de resistência foram inferiores aos da argamassa sem adição de fibras de sisal. Entretanto, a argamassa com 0,5% e 1,0% de sisal tiveram aumento de resistência aos 28 dias, atingindo valores de resistência superiores aos da argamassa de referência, da ordem de 3,92% e 22,97% respectivamente. Contudo, observa-se que para a

adição de 1,5% de fibras de sisal, a resistência a compressão foi inferior em 2,19% em relação à argamassa sem adições.

Este comportamento pode estar relacionado à quantidade de fibras inseridas na argamassa, uma vez que as mesmas foram dispersas de forma randômica e no momento da mistura, percebeu-se a dificuldade da agitação da mistura. Isto pode ter ocasionado uma mistura com características pobres em relação às demais realizadas.

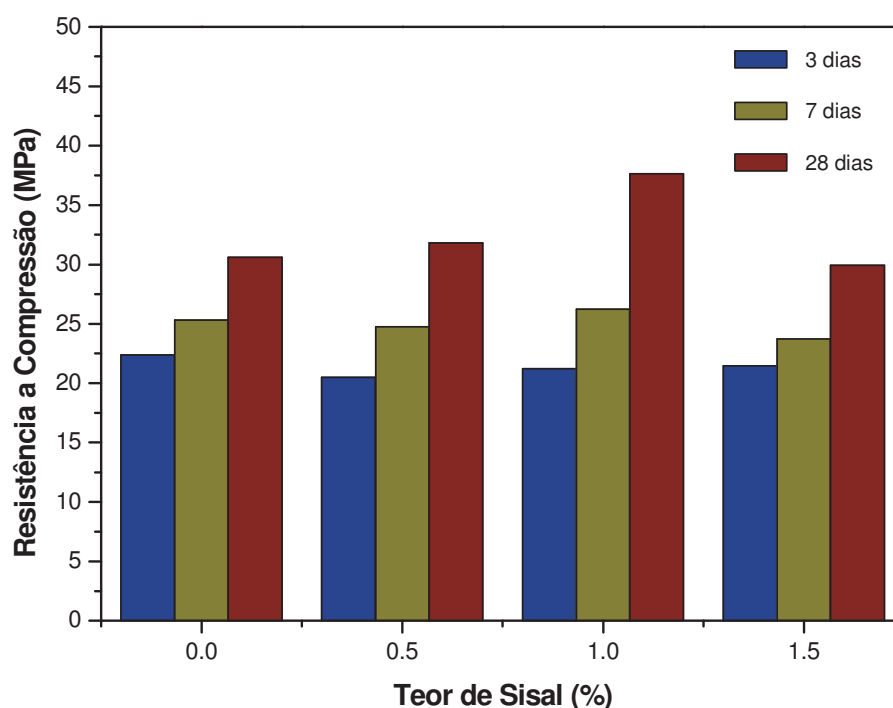


Figura 21. Gráfico comparativo de resistência a compressão em função dos teores de fibras de sisal
Fonte: O autor (2017).

Toledo Filho et al. (1997) afirma que utilizando os procedimentos convencionais de fabricação e moldagem das argamassas, as altas frações adicionadas a matriz inserem também, um número elevado de defeitos em razão de uma compactação ineficiente da mistura ainda fresca. Por sua vez, estes efeitos aumentam com o aumento da quantidade de fibras, sendo que a mistura se torna mais seca e menos trabalhável. De acordo com Agopyan e Savastano Junior (1998), a porosidade ocasionada pela má compactação da mistura, contribui para a diminuição da resistência a compressão.

A diminuição da resistência a compressão com o aumento das taxas também foi observada por Beraldo e Vieira (2003), onde foram realizados estudos com argamassa contendo sisal, na forma “in natura”, nas proporções de 1,80%, 3,60% e 10,80%. Para o teor

de 1,80% a resistência foi inferior a argamassa de referência, e com o aumento dos teores, o comportamento da resistência foi de queda.

Lima et al. (2013) desenvolveram trabalhos com a inserção de fibras de sisal com 25 mm de comprimento e adições de 1,0%, 2,0% e 3,0%. No ensaio de resistência a compressão, as argamassas tiveram um comportamento semelhante ao presente estudo, ou seja, com a adição de 1,0% de fibras de sisal, o valor de resistência foi próximo ao da argamassa de referência, já para os teores de 2,0% e 3,0% houve queda na resistência.

As argamassas com adições de fibras com características similares às fibras de sisal tiveram comportamento semelhante aos explanados pelos pesquisadores anteriormente mencionados. Silva, Silva e Marques (2014) verificaram que a adição de 0,3% de fibras de coco, resultou em argamassas com resistências próximas à argamassa de referência. Além disto, concluíram também que o comprimento com melhores características mecânicas foi de 25 mm.

5.1.2.2 Resistência à Tração na Flexão

A resistência à tração na flexão dos corpos de prova cilíndricos foi analisada para a idade de 28 dias, conservados por este período em câmara úmida para a sua cura, conforme exigências da NBR 5739 (ABNT, 2007).

Os corpos de prova foram submetidos à carga de flexão, sendo o valor de sua ruptura registrado conforme os dados da Tabela 9.

Tabela 9. Valores de resistência à tração na flexão com diferentes teores de fibras de sisal.

Resistência a Flexão (28 dias)	Teor de Fibras de Sisal (%)			
	0,00	0,50	1,00	1,50
	5,70	5,97	7,29	6,16

Fonte: O autor (2017).

Para cada argamassa com adição de fibras, foram moldados 4 corpos de prova, portanto, o valor apresentado é resultado da média dos mesmos. Mediante os valores destacados na Tabela 9 pode-se confeccionar o gráfico de resistência a compressão pelas idades de rompimento dos corpos de prova, conforme a Figura 22.

Em suma, as argamassas com os teores utilizados apresentaram aumento na resistência a tração, tendo o seu maior valor com a adição de 1,0% de fibras de sisal. Após este pico,

houve uma queda no gráfico da Figura 22, quando inserido 1,50% de fibras, ou seja, o mesmo comportamento quando comparado com a resistência à compressão. Isto pode ter ocorrido devido à má mistura no momento de sua agitação, além de as fibras não se soltarem com facilidade, formando um emaranhado de fibras no interior da mistura.

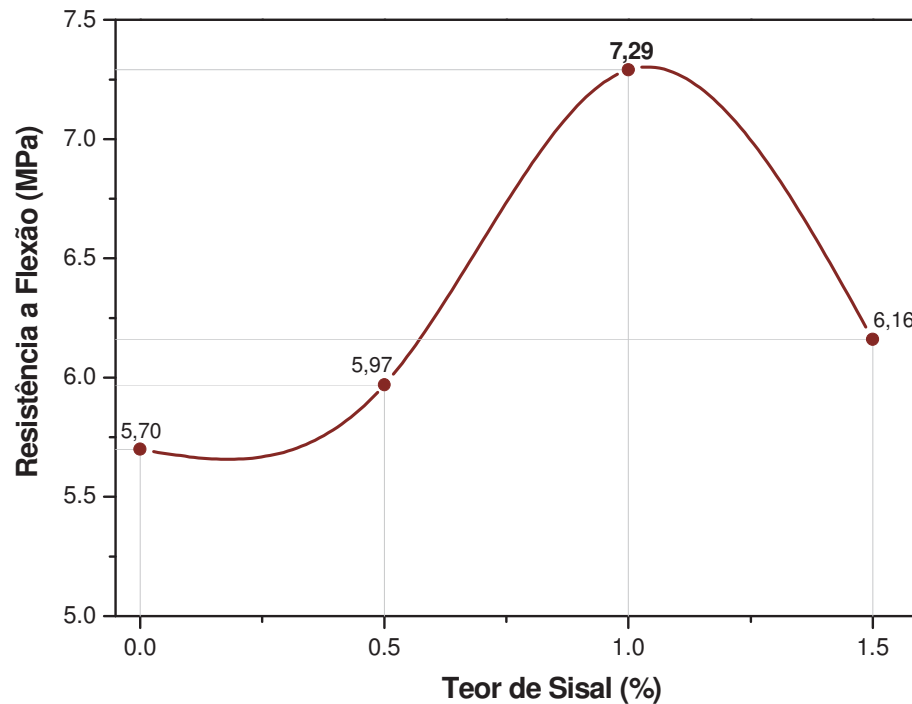


Figura 22. Gráfico de resistência a flexão das argamassas em função do teor de fibras de sisal.
Fonte: O autor (2017).

A diminuição da trabalhabilidade apresentado na Figura 20 aliado à mistura mal agitada pode ter levado a problemas de compactação, formando falhas no interior do corpo de prova que podem ter comprometido a resistência do material.

Outro fator a ser comentado pode advir da distribuição das fibras no interior do corpo de prova, pois as fibras dispostas de forma randômica (sem direção definida) possuem comportamento inferior às fibras dispostas na dimensão a conter a abertura de fissuras.

Resende (2003) estudou a adição de fibras de sisal sem tratamento em concretos de diferentes resistências. Nestes casos obteve resultados de resistências maiores com adições de 1,0% de sisal e resistências menores com adições de 2,0% em relação a argamassa de referência. O autor afirma que o fato pode ter ocorrido devido à trabalhabilidade estar comprometida devido à má vibração do corpo de prova no momento do ensaio.

5.2 FASE II – ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE MICROCELULOSE

Realizou-se o estudo das argamassas com adição de microcelulose obtendo-se os resultados de índice de consistência, resistência à compressão e resistência à flexão.

5.2.1 Propriedades no Estado Fresco

Com os diferentes teores de microcelulose incorporados a argamassa, observou-se sua variação com relação à consistência, obtendo-se os valores apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Valores do índice de consistência das argamassas com diferentes teores de microcelulose.

Índice de Consistência (cm)	Teores de Microcelulose (%)			
	0,00	0,20	0,40	0,60
	20,94	18,10	15,86	15,38

Fonte: O autor (2017).

Mediante o comportamento apresentado na Tabela 10, confeccionou-se o gráfico de consistência pelos teores de microcelulose adicionados a argamassa, conforme a Figura 23.

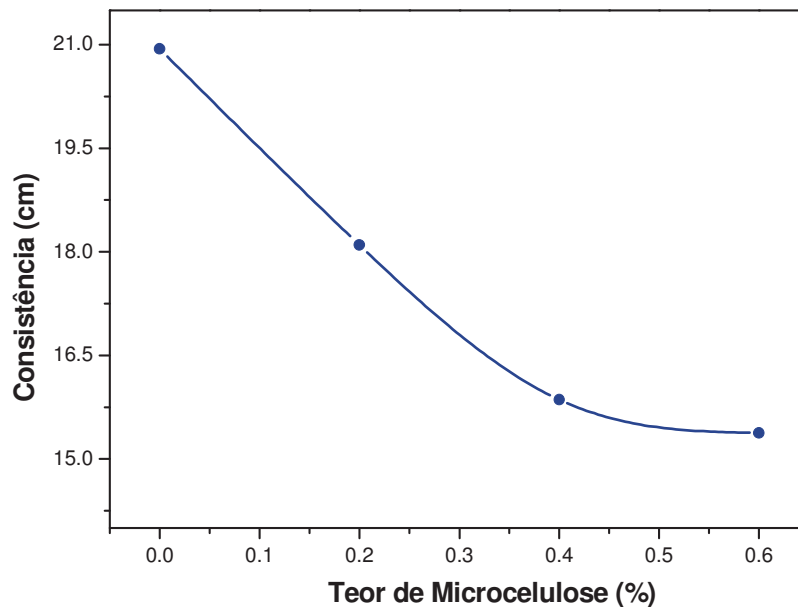


Figura 23. Gráfico de índice de consistência das argamassas com diferentes teores de microcelulose.
Fonte: O autor (2017).

Para a microcelulose também se observou a diminuição da trabalhabilidade da argamassa, sendo esta de 13,56% e 26,55% para as adições de 0,2% e 0,6% respectivamente, em relação a argamassa de referência.

A diminuição da consistência pode ter ocorrido devido à absorção de água pela microcelulose, mesmo após ter sido submetida ao tratamento com imersão em água durante 48 horas. Sua característica vegetal ainda a torna um material com grande capacidade de absorção de água.

Silva (2016) estudou a adição de 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8% e 1,0% de microcelulose em argamassa de cimento e areia, sob as mesmas condições de traço, e para estes constatou-se que houve uma diminuição do índice de consistência com o aumento dos teores de microcelulose incorporados.

Estudos com adição de 0,3% de microcelulose cristalina demonstraram uma queda na consistência das argamassas em 30 mm quando comparado com a argamassa de referência, Hoyos et al. (2013). Os autores apontaram que a argamassa no estado fresco possui em sua constituição um elevado número de partículas em suspensão, interagindo através das forças coloidais, de contato direto e entre, assim como de Van der Waals. Os grupos OH livres presentes na microcelulose conferem a capacidade de interagir através de ligações de hidrogênio com os produtos de hidratação do cimento (CSH).

5.2.2 Propriedades no Estado Endurecido

Realizaram-se os ensaios de rompimento dos corpos de prova para a verificação da resistência à compressão e resistência à flexão das argamassas com adição de microcelulose.

5.2.2.1 Resistência a Compressão

A resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos foi analisada para as idades de 3, 7 e 28 dias, conservados por este período em câmara úmida para a sua cura, conforme exigências da NBR 5739 (ABNT, 2007).

Os corpos de prova foram submetidos à carga de compressão, sendo o valor de sua ruptura registrado conforme os dados da Tabela 11.

Tabela 11. Valores de resistência a compressão com diferentes teores de microcelulose.

Idade (dias)	Teor de Microcelulose (%)			
	0,00	0,20	0,40	0,60
	Resistência a Compressão (MPa)			
3	22,38	22,13	20,99	21,54
7	25,30	27,36	25,34	24,94
28	30,60	36,27	35,06	32,88

Fonte: O autor (2017).

Para cada argamassa com adição de microcelulose, foram moldados 4 corpos de prova, portanto, o valor apresentado é resultado da média dos mesmos. Mediante os valores destacados na Tabela 8, pode-se confeccionar o gráfico de resistência a compressão em função dos teores de adição nas argamassas, conforme a Figura 24.

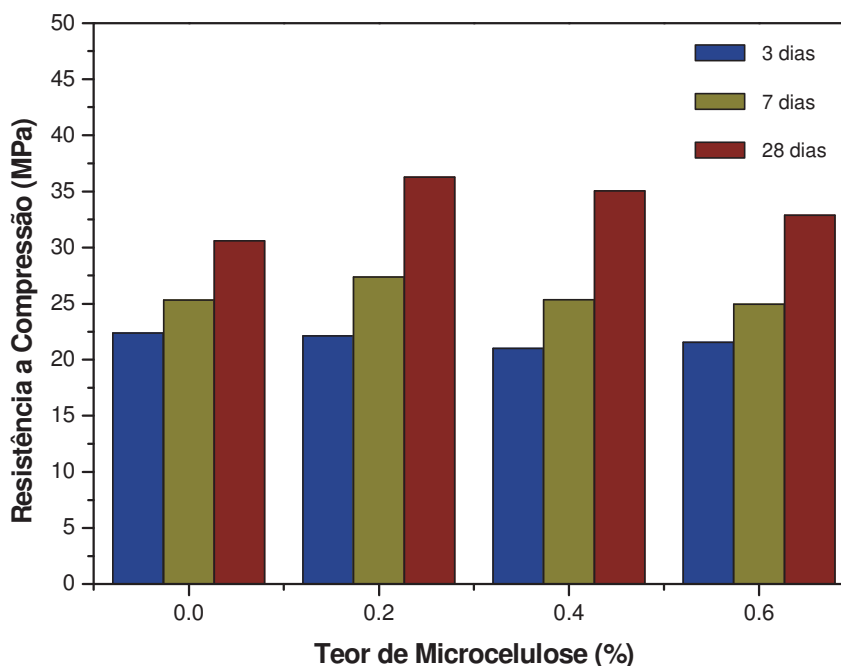


Figura 24. Gráfico comparativo de resistências a compressão em função do teor de microcelulose.
Fonte: O autor (2017).

Mediante as barras do gráfico da Figura 24, observa-se que aos 3 dias de idade os valores de resistência foram semelhantes aos da argamassa sem adição de microcelulose, com exceção da argamassa com 0,2%, a qual nas primeiras idades já demonstrou ganhos significativos de resistência. Aos 28 dias houve aumento de resistência para todas as argamassas, sendo que para as adições de 0,2%, 0,4% e 0,6% a resistência a compressão foi superior em 18,52%, 12,72% e 7,45% quando comparadas com a argamassa de referência, respectivamente.

Mohamed et al. (2010) estudaram a adição de microcelulose em argamassas contendo os teores de 14%, 21%, 28%, 41%, 83% e 138% em volume de cimento. Os autores obtiveram ganhos de resistência na faixa variando entre 14% e 28% de adição. Para os demais valores, observou-se a diminuição da resistência, fato este associado ao aumento da porosidade da argamassa por conta da impossibilidade de uma boa compactação.

Silva (2016) analisou a inserção de microcelulose na argamassa sob os teores de 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8% e 1,0%, e seus resultados apontaram para uma resistência superior em 30% utilizando-se o teor de 0,2% de microcelulose quando comparada com a argamassa de referência. Para os demais valores a resistência sofreu queda com o aumento das porcentagens de microcelulose.

5.2.2.2 Resistência à Tração na Flexão

A resistência à tração na flexão foi medida nos corpos de prova prismáticos, moldados para serem rompidos com 28 dias de idade, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007), sendo os valores obtidos e apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Valores de resistência à tração na flexão das argamassas com diferentes teores de microcelulose.

Resistência a Flexão (28 dias)	Teor de Microcelulose (%)			
	0,00	0,20	0,40	0,60
	5,70	7,65	6,87	6,64

Fonte: O autor (2017).

Com os respectivos valores obtidos, possibilitou-se a elaboração da curva de resistência a tração das argamassas em função dos teores de adições incorporados a mesma, conforme apresenta a Figura 25.

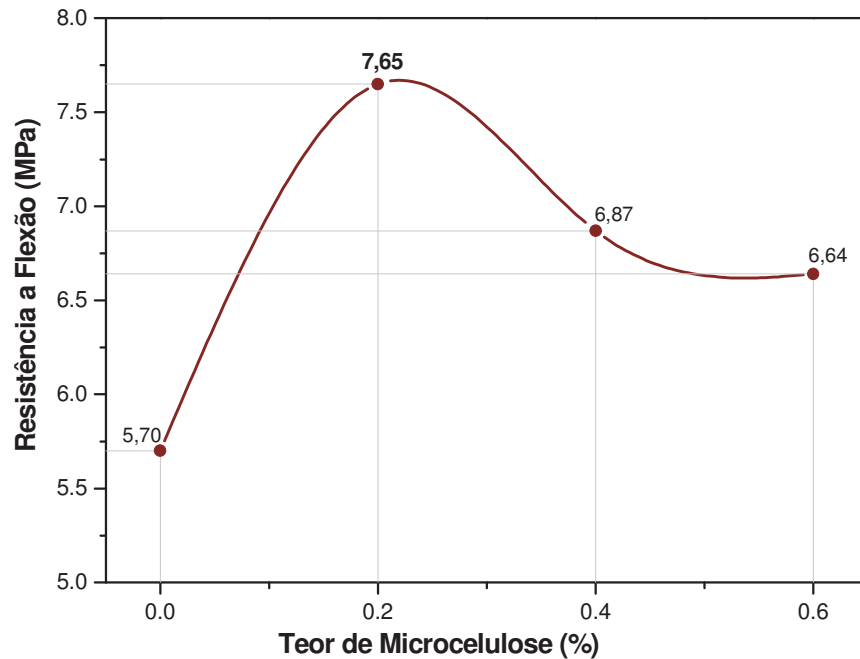


Figura 25. Gráfico de resistência a tração em função dos teores de microcelulose.
Fonte: O autor (2017).

Após análise do gráfico da Figura 25, observa-se que com a adição de 0,2% de microcelulose a argamassa apresentou um ganho de resistência maior do que para os demais teores de microcelulose. O valor do aumento de resistência foi de 34,21% em relação a argamassa de referência. Com o aumento das porcentagens de microcelulose houve o declínio da curva, e isto pode estar associado a aglomeração das partículas em locais pontuais da mistura, devido a dispersão não ter sido eficiente. Outro fator pode estar associado com a absorção de água pela microcelulose, deixando a argamassa com a resistência comprometida.

Em seus estudos Hoyos et al. (2013) estudaram a adição de microcelulose em argamassa com o teor de 0,3%. Os autores obtiveram diminuição das propriedades mecânicas, que segundo estes, devem-se ao grau de hidratação da argamassa, e consequentemente aumentando a presença de produtos de hidratação (CSH) os quais proporcionam resistência ao material.

Foram desenvolvidas pastas de cimento com adição de 0,04%, 0,1%, 0,2%, 0,5%, 1,0% e 1,5% de nanocelulose em pasta de cimento. Neste estudo observou-se que a maior resistência aos 28 dias de idade ocorreu com a adição de 0,2% de nanocelulose quando comparada com a argamassa de referência, em seguida, ocorre o decaimento com o aumento dos teores de nanocelulose. Esta diminuição na resistência a flexão pode ter ocorrido devido a aglomeração das partículas de nanocelulose nas concentrações mais altas, atuando como

corpos estranhos no interior da mistura e diminuindo a resistência em outros locais do corpo de prova, segundo Cao, Zavaterri, Youngblood, Moon e Weiss (2015).

Onuaguluchi e colaboradores (2014) desenvolveram argamassas com adição de 0,05%, 0,1%, 0,2% e 0,4% de nanofibras, observando-se que as maiores propriedades mecânicas ocorreram pelas misturas contendo 0,1% de nanofibras. Entretanto, as demais porcentagens ainda tiveram resistências a flexão maiores que a argamassa de referência. Os autores apontam três possibilidades para o aumento da resistência, sendo a primeira o fato de que nesta porcentagem de 0,2% o grau de hidratação aumenta em um valor ótimo, o que não ocorre nas demais porcentagens, podendo ocorrer aglutinação do material no interior da mistura. O segundo fator está relacionado a área de superfície específica elevada das nanofibras, melhorando a interação entre as nanofibras e a pasta de cimento. E por fim, devido à nanofibras serem de caráter hidrofílico, intensificou-se a adesão da pasta de cimento.

5.3 FASE III – ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE SISAL E MICROCELULOSE

Realizou-se o estudo das argamassas com adição conjunta de fibras de sisal e microcelulose obtendo-se os resultados de índice de consistência, resistência à compressão e resistência à flexão.

5.3.1 Propriedades no Estado Fresco

De acordo com a metodologia estabelecida no presente trabalho, verificou-se que para a fase I o teor de 1,0% de fibras de sisal apresentou as melhores respostas para as propriedades mecânicas. Na fase II por sua vez, o teor de 0,2% de microcelulose remeteu aos melhores valores de resistência a compressão e tração na flexão das argamassas.

Desta forma, os teores ótimos foram combinados entre si e verificados o comportamento com a variação das porcentagens de cada material. Ou seja, no primeiro

momento avaliaram-se as fibras de sisal mantendo o teor de 1,0% de fibras de sisal fixo e variando a quantidade do teor ótimo de microcelulose. Em um segundo momento, avaliou-se a microcelulose com o teor ótimo de 0,2% fixo e variando as taxas de fibras de sisal, conforme apresenta a Tabela 13.

Tabela 13. Valores de índice de consistência das argamassas com diferentes teores de sisal e microcelulose.

Índice de Consistência (cm)	Teores de Sisal (fixo) e Microcelulose (variável) (%)			
	0,00	1,00 + 0,00	1,00 + 0,20	1,00 + 0,40
20,94	17,95	15,80	15,38	
	Teores de Microcelulose (fixa) e Sisal (variável) (%)			
	0,00	0,20 + 0,50	0,20 + 1,00	0,20 + 1,50
20,94	16,08	15,80	14,06	

Fonte: O autor, 2017.

Mediante os dados apresentados anteriormente, confeccionaram-se os gráficos para as estas argamassas com diferentes teores de sisal e microcelulose, conforme a Figura 26.

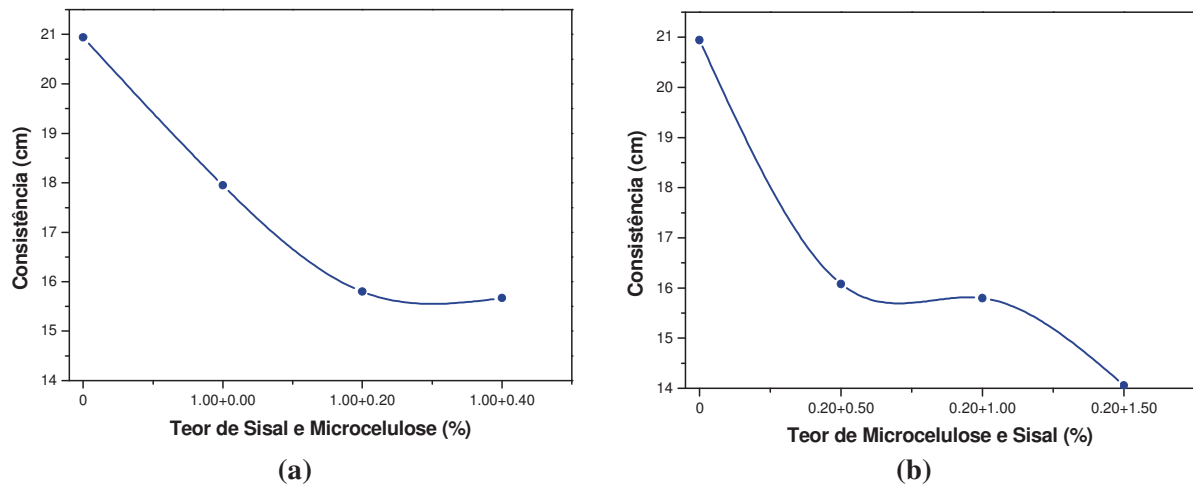


Figura 26. Gráficos de índice de consistência das argamassas com diferentes teores de adições (a) sisal com teor fixo e microcelulose variável e (b) microcelulose fixa e fibras de sisal variável.

Fonte: O autor (2017).

Para as argamassas com inserção conjunta das fibras de sisal e microcelulose, observou-se que o comportamento da trabalhabilidade foi similar aos resultados obtidos anteriormente, havendo uma diminuição da consistência com o aumento do teor de adição.

Quando houve a adição de 1,00% de fibras de sisal com 0,2% de microcelulose, houve um decréscimo acentuado na consistência de 32,53% em relação à argamassa sem adições. Contudo, com a variação de 0,4% de microcelulose, a argamassa permaneceu com o valor de

consistência muito próximo ao teor de 0,2% (Figura 23 (a)). Isto pode ter ocorrido devido a microcelulose já estar previamente saturada antes de ser adicionada a argamassa, sendo a água de amassamento absorvida em maior quantidade pela estrutura interna das fibras, preenchendo-se seus vazios.

Observa-se, porém, que o maior decréscimo da consistência ocorreu quando houve a variação dos teores de fibras de sisal, apresentado na Figura 26 (b). Para a adição de 0,2% de microcelulose com os teores de 0,5%, 1,0% e 1,5% de sisal, a consistência diminuiu em 23,20%, 24,54% e 32,86% respectivamente, em relação à argamassa de referência. Este comportamento pode ter ocorrido devido à inserção das fibras sem prévio tratamento, ou seja, sem qualquer procedimento que diminuísse a capacidade de absorção de água na argamassa.

De um modo geral, percebe-se que a adição conjunta dos dois materiais, o sisal e a microcelulose, potencializou a absorção de águas das argamassas, uma vez que os dois produtos são de origem vegetal e como já dita anteriormente, possuem caráter altamente hidrofílico.

5.3.2 Propriedades no Estado Endurecido

5.3.2.1 Resistência a Compressão

Para a inserção dos teores fixos de fibras de sisal e variáveis de microcelulose, a resistência a compressão dos corpos de prova cilíndricos foram analisados para as idades de 3, 7 e 28 dias, conservados por este período em câmara úmida para a sua cura, conforme exigências da NBR 5739 (ABNT, 2007). As resistências a compressão obtidas nos ensaios encontram-se descritas na Tabela 14.

Tabela 14. Valores de resistência a compressão do teor fixo de sisal e variável de microcelulose.

Idade (dias)	Teor de Sisal e Microcelulose (%)			
	0,00	1,00 + 0,00	1,00 + 0,20	1,00 + 0,40
	Resistência a Compressão (MPa)			
3	22,38	21,24	21,23	20,16
7	25,30	26,22	30,08	27,23
28	30,60	37,63	32,81	31,03

Fonte: O autor (2017).

De acordo com os dados obtidos, confeccionou-se o gráfico para a resistência a compressão em função dos teores adicionados na argamassa, conforme a Figura 27.

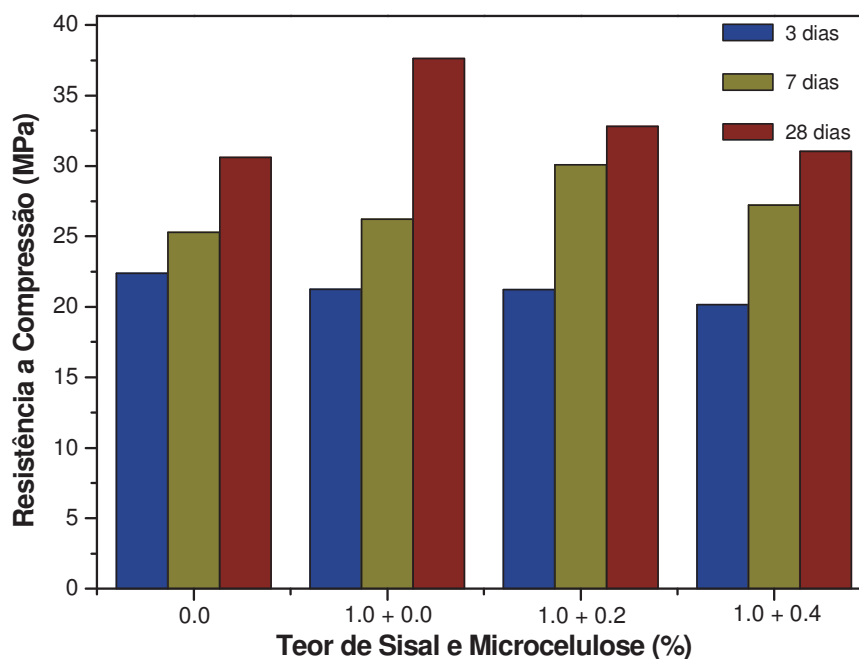


Figura 27. Gráfico de resistência a compressão em função dos teores fixos de sisal e variável de microcelulose.

Fonte: O autor (2017).

Observa-se mediante o gráfico da Figura 27 que a resistência a compressão com melhores respostas, aos 28 dias, foi a argamassa sem adição de microcelulose, contudo, a inserção conjunta de 0,2% de microcelulose e 1,0% de sisal elevou a resistência em 7,22% em relação a argamassa de referência. Para a adição de 0,4% de microcelulose, a resistência teve um decréscimo, com apenas 1,41% em relação a argamassa sem adições. Verifica-se ainda, que o para as idades de 3 dias a resistência caiu com o aumento da inserção de microcelulose e sisal, já para as idades de 7 dias, o gráfico teve seu comportamento ascendente até a inserção dos teores ótimos, ou seja, com 1,0% de sisal e 0,2% de microcelulose, e em seguida, voltou a diminuição da resistência.

Para os teores variáveis de sisal e fixos de microcelulose obtiveram-se as resistências a compressão listadas na Tabela 15.

Tabela 15. Valores de resistência a compressão do teor fixo de microcelulose e variável de sisal.

Idade (dias)	Teor de Microcelulose e Sisal (%)			
	0,00	0,20 + 0,50	0,20 + 1,00	0,20 + 1,50
	Resistência a Compressão (MPa)			
3	22,38	19,95	21,23	20,69

7	25,30	26,29	30,08	26,49
28	30,60	34,53	32,81	28,42

Fonte: O autor (2017).

Para estes dados, confeccionou-se o gráfico para a resistência a compressão em função dos teores adicionados na argamassa, conforme a Figura 28.

Mediante a elaboração do gráfico da Figura 28, verifica-se que, para os teores fixos de microcelulose, a incorporação de sisal com teor de 0,5% teve sua resistência aumentada, aos 28 dias, no valor de 12,84% em relação à argamassa de referência. Com o aumento dos teores de fibras de sisal a resistência a compressão teve queda, chegando a resistência de 28,42 MPa sendo esta menor que a resistência da argamassa de referência, de 30,60 MPa. Assim como no gráfico da Figura 27, o comportamento da resistência a compressão aos 3 dias se manteve menor do que a referência, e aos 7 dias as argamassas tiveram aumento de resistência.

Diante do exposto, tanto para a Figura 27 e Figura 28, as resistências, aos 28 dias, diminuíram com o aumento dos teores de microcelulose e sisal. Relacionam-se a esse comportamento três possíveis ocorridos, sendo o primeiro deles a zona de transição entre as fibras de sisal, microcelulose e a matriz cimentícia. É sabido que as fibras de sisal e a microcelulose apresentam elevada capacidade de absorção de água e inchamento, isso faz com que haja redução da resistência dos materiais com a matriz, permitindo-se que haja o deslizamento entre as fases e conseqüentemente o seu enfraquecimento quando aplicado as cargas para verificação de sua ruptura (SAVASTANO JUNIOR, 2012). Com o aumento do volume de microcelulose inserida na mistura, aumenta também a retirada de água da mistura, sendo potencializada pelas fibras de sisal que foram inseridas sem qualquer tratamento, levando então aos valores reduzidos de resistência a compressão.

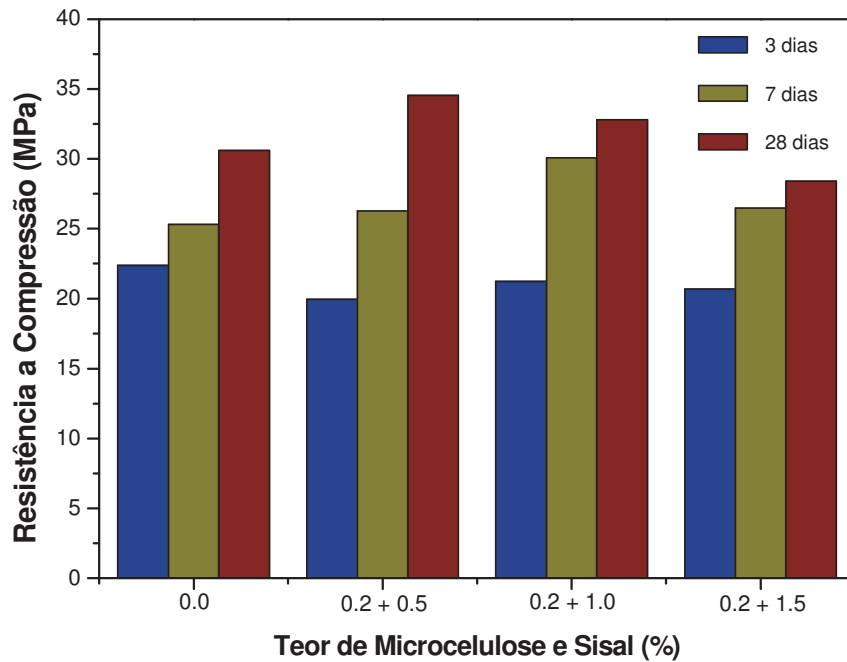


Figura 28. Gráfico de resistência a compressão em função dos teores fixos de microcelulose e variável de sisal.

Fonte: O autor (2017).

A perda de água citada anteriormente pode ser comprovada ainda no momento do ensaio de consistência das argamassas, uma vez que a Figura 26 (a) e Figura 26 (b) evidenciam a diminuição da consistência com o aumento dos teores de fibras de sisal e microcelulose respectivamente.

Outro fator está atrelado à porosidade das fibras de sisal, sendo as mesmas no momento da mistura e moldagem impregnadas com acúmulo de cristais de portlandita, ou seja, os produtos de hidratação do cimento, levando a formação de cristais no interior destas fibras, e conseqüentemente aumentando o potencial de quebra das mesmas e reduzindo-se a resistência a compressão do compósito em geral.

Ressalta-se ainda a necessidade de tratamento das fibras diante do exposto, uma vez que a literatura remete a bons resultados de resistências com utilização de polímeros, tratamentos com saturação em água fria e água quente, ciclos de molhagem, soluções com hidróxido de sódio para modificar a superfície das fibras e entre outros.

Cita-se ainda, a variabilidade dos ensaios, possíveis problemas no momento da mistura das argamassas, problemas na compactação e condições climáticas dos dias das moldagens dos corpos de prova como possíveis impactos na diminuição das resistências do material.

5.3.2.2 Resistência a Tração na Flexão

Com os diferentes teores de microcelulose incorporados à argamassa com a porcentagem fixa de fibras de sisal, observou-se sua variação com relação à resistência, obtendo-se os valores apresentados na Tabela 16.

Tabela 16. Valores de resistência a flexão das argamassas com teor fixo de sisal e variável de microcelulose.

Resistência a Flexão (28 dias)	Teor de Sisal e Microcelulose (%)			
	0,00	1,00 + 0,00	1,00 + 0,20	1,00 + 0,40
	5,70	7,29	7,86	8,00

Fonte: O autor (2017).

Mediante os dados apresentados na Tabela 16, confeccionou-se o gráfico de resistência a tração na flexão em função dos teores de sisal fixos e de microcelulose variáveis, apresentado na Figura 29.

Observa-se que os valores de resistência à flexão aumentaram com o aumento dos teores de microcelulose. Os maiores valores esperados seriam para a argamassa com o teor de 1,0% de sisal e 0,2% de microcelulose, uma vez que nos ensaios anteriores, estas taxas demonstraram resultados superiores de resistência a compressão e flexão.

O teor de 1,0% de sisal e 0,4% de microcelulose apresentou um aumento na resistência à flexão de aproximadamente 40,35% em relação à argamassa de referência, e ainda 1,75% em relação ao traço definido com os teores ótimos, ou seja, contendo 1,0% de sisal e 0,2% de microcelulose.

Apesar do índice de consistência ter apontado uma perda de água brusca para os teores ensaiados, a argamassa teve um comportamento satisfatório, uma vez que comparado com a argamassa de referência, todos os valores foram superiores.

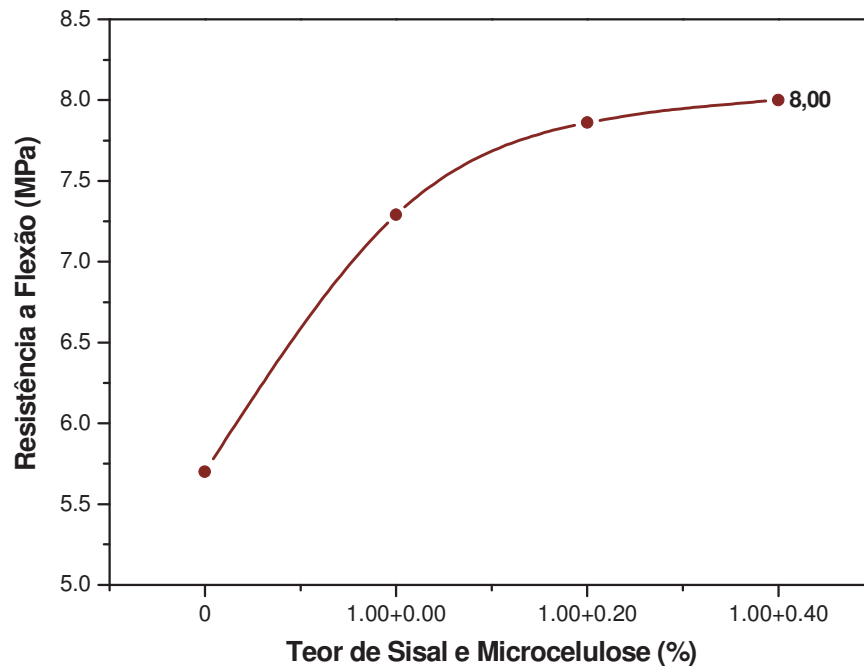


Figura 29. Gráfico de resistência a flexão em função dos teores fixos de sisal e variável de microcelulose.

Fonte: O autor (2017).

O aumento de resistência pode estar relacionado com o reforço da zona de transição, uma vez que as suas aglomerações levaram a contenção do aparecimento e reforço das microfissuras, sendo suportadas e resistidas exclusivamente pelas fibras de sisal.

Em um segundo momento, utilizando-se o teor fixo de microcelulose e variando-se a quantidade de fibras de sisal, obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Valores de resistência à flexão das argamassas com teor fixo de microcelulose e variável de sisal.

Resistência a Flexão (28 dias)	Teor de Microcelulose e Sisal (%)			
	0,00	0,20 + 0,50	0,20 + 1,00	0,20 + 1,50
	5,70	7,34	7,86	6,78

Fonte: O autor (2017).

Mediante os dados apresentados na Tabela 17, confeccionou-se o gráfico de resistência a tração na flexão em função dos teores de sisal fixos e de microcelulose variáveis, apresentado na Figura 30.

Após a elaboração do gráfico com os valores obtidos nos ensaios, verificou-se que, com o aumento dos teores de fibras de sisal, o comportamento da resistência a flexão aumenta com a adição de 0,5% de sisal e ganha ainda mais resistência, até o valor de 7,86 MPa, cerca de 37,89% em relação a argamassa de referência. Entretanto, com o aumento de 1,5% de sisal,

a resistência diminui para o valor de 6,78 MPa. O valor continua acima da argamassa de referência, contudo é preciso observar que o decaimento da resistência ocorreu com um nível alto de inserção de fibras de sisal.

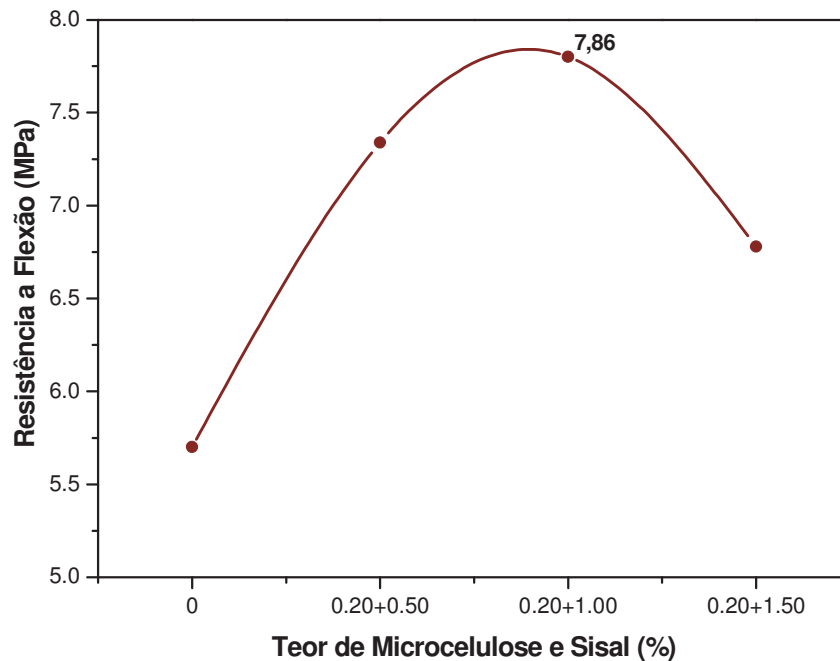


Figura 30. Gráfico de resistência a flexão em função dos teores fixos de microcelulose e variável de sisal.

Fonte: O autor (2017).

A perda de resistência da argamassa com 1,5% de sisal pode ter ocorrido devido a alta absorção de água da mistura, fazendo com que não houvesse produção suficiente de produtos de hidratação do cimento no interior da matriz cimentícia, enfraquecendo o sistema da zona de transição.

Outro possível fator, atrelado ao explanado acima, advém da falta de tratamento das fibras de sisal, sendo necessários processos que permitam a modificação da superfície para que a mesma não absorva água em quantidades que prejudiquem a mistura.

Além disto, cita-se ainda o fato de que, sendo este teor de 0,2% e 1,5% de fibras o que mais absorveu água nos ensaios, segundo a Figura 26 (b), poderia ter ocorrido a formação de cristais de portlandita, ou dos produtos de hidratação do cimento, fazendo com que as mesmas ficassem rígidas e quebradiças, enfraquecendo-se a argamassa no momento da aplicação das cargas no ensaio de tração na flexão.

A forma como foram distribuídas as fibras no interior da mistura podem ter sido determinantes para o decaimento da resistência ou ainda, valores reduzidos de resistência a

flexão. As fibras distribuídas randomicamente têm comportamento diferenciado em relação as fibras distribuídas transversalmente na direção do surgimento das fissuras. Os locais onde ocorreu a ruptura podem ter sido pontos onde as fibras estavam dispersas em direções alheias as fissuras, não sendo eficientes para conter a abertura das mesmas.

Devido ao fato de que as fibras foram utilizadas “in natura”, estas podem ter sido inseridas com pequenos corpos estranhos e resquícios de sujeiras, que acabaram por interferir nas medidas de resistência a flexão. Podem ter ocorrido ainda, falhas advindas de sua formação orgânica ainda na natureza ou então, fibras que não foram suficientemente separadas no momento da elaboração da argamassa fresca, criando acúmulo de fibras em apenas um local e em outro ponto ficando com quantidades insuficientes.

Acredita-se que o sistema mais favorável apresentado, é aquele em que o teor de fibras de sisal permanece constante e o volume de microcelulose se torna variável. Devido a microcelulose estar saturada antes de sua inserção na mistura, esta apresentou melhores comportamentos quando comparado as fibras de sisal com diferentes teores. Acredita-se também que o tratamento das fibras de sisal, ou o aumento da relação água cimento melhore o comportamento das argamassas, uma vez que as fibras absorveram menos água ou ainda que a quantidade de água permaneça satisfatória para atingir boas resistências.

5.4 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

5.4.1 Fibras de Sisal

As fibras de sisal foram submetidas ao MEV, microscopia eletrônica de varredura, para verificação da morfologia da fibra “in natura”.

A Figura 31(a) e (b) representa as fibras “in natura”, ou seja, sem qualquer tipo de tratamento. Observa-se que nesta situação a superfície da fibra é bastante rugosa e apresenta sua parede externa em forma de retículas de aproximadamente 10 μm de comprimento. Segundo Silva, Chawla e Toledo Filho (2008) na parede externa se encontram as fibras estruturais que promovem a resistência às plantas.

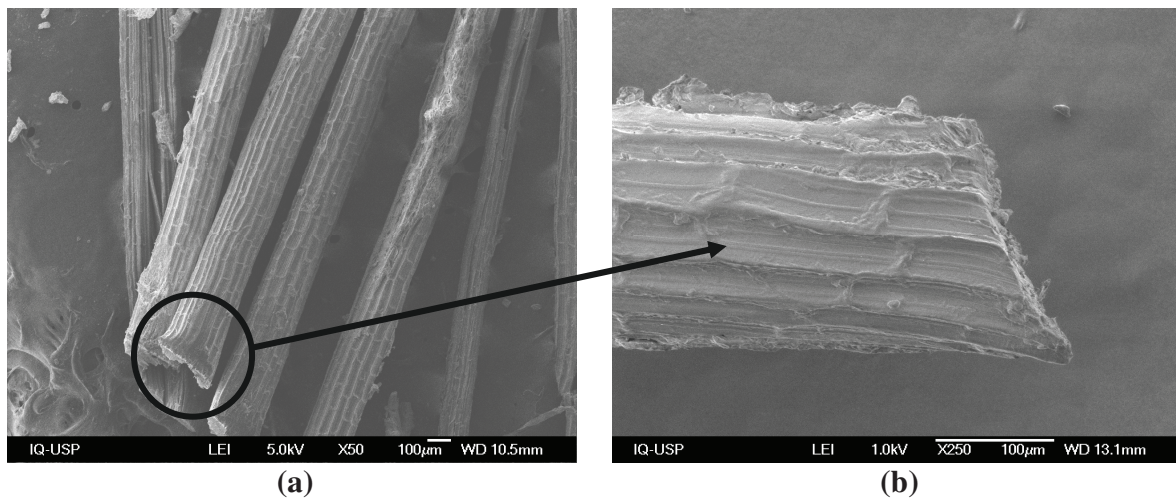
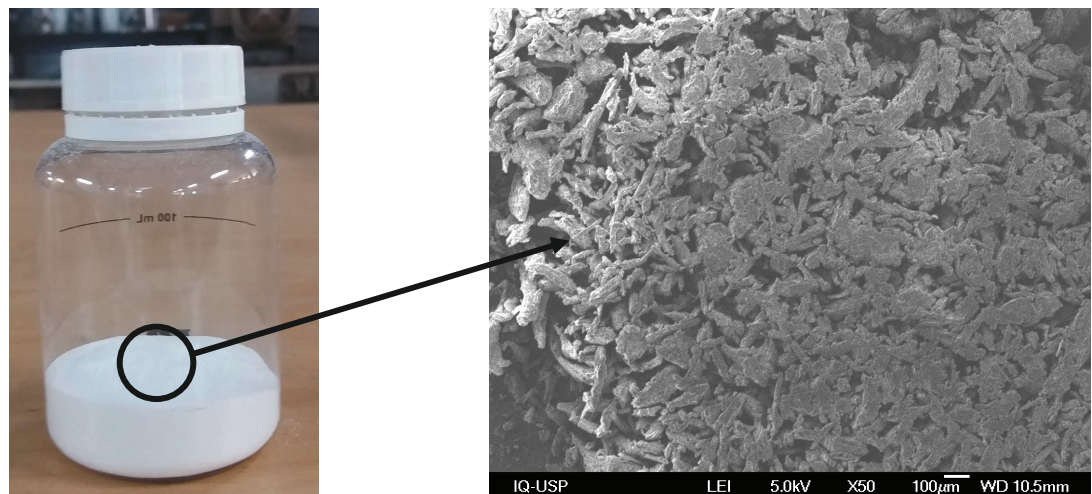


Figura 31. Superfície das fibras de sisal “in natura”, (a) vista lateral aumentada 50 vezes e (b) vista lateral do topo da fibra, aumentada em 250 vezes.
O autor (2017).

Verifica-se que não há variabilidade relevante quanto ao diâmetro das fibras, sendo as mesmas de mesma dimensão aproximadamente. É possível observar ainda, corpos incrustados na superfície das fibras, que podem ser removidos com um tratamento de lavagem de água fria.

5.4.2 Microcelulose

Por meio da análise microscópica foi possível obter as características qualitativas da microcelulose “in natura”, ou seja, sem tratamento de imersão em água para a realização do ensaio. A Figura 32 apresenta a característica das partículas de microcelulose, conforme os aumentos em (b), (c), (d) e finalmente em (e).



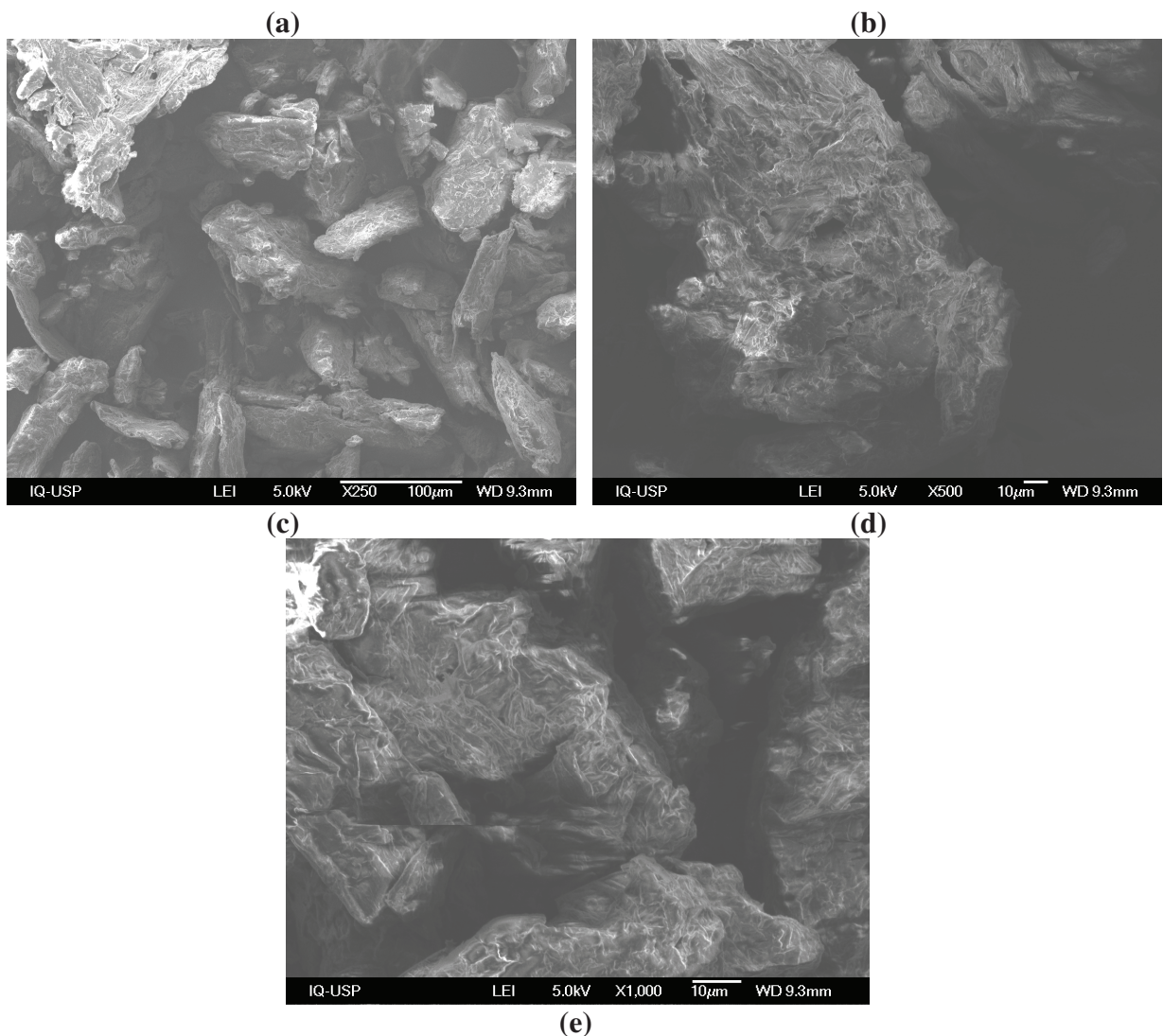


Figura 32. Análise microscópica da microcelulose (a) em pó e “in natura”, (b) microcelulose com aumento de 50 vezes, (c) aumento de 250 vezes, (d) aumento de 500 vezes e (e) aumento de 1000 vezes.

Fonte: O autor (2017).

Observa-se a morfologia das partículas de microcelulose, onde sua superfície apresenta relevante rugosidade e certa variabilidade dimensional, verificado a partir do aumento das imagens na microscopia. Verifica-se que algumas de suas formas são alongadas e achatadas, enquanto outras se apresentam com conformação arredondada.

5.4.3 Argamassas com Adição de Fibras de Sisal e Microcelulose

Analisaram-se as argamassas com adições conjuntas de microcelulose e fibras de sisal, possibilitando observar o comportamento das amostras quanto a sua disposição na mistura. As

imagens capturadas com o microscópio eletrônico estão apresentadas nas Figura 33 e Figura 34.

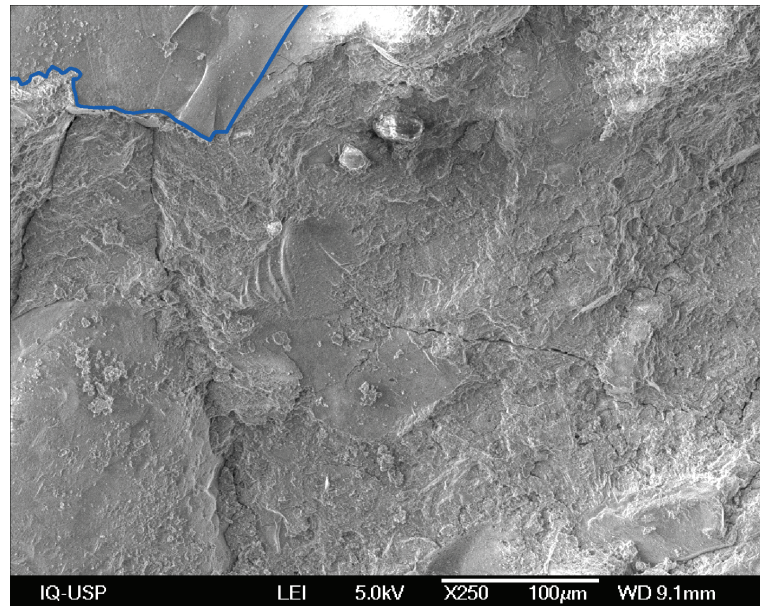


Figura 33. Análise microscópica da amostra contendo 0,2% de microcelulose e 0,5 % de sisal.
Fonte: O autor (2017).

A Figura 33 apresenta a argamassa com adição de 0,2% de microcelulose e 0,5% de fibras de sisal. Observa-se por meio do contorno em cor azul, a presença de uma partícula de microcelulose, estando uma parte à mostra na superfície e a restante coberta pela mistura de cimento e areia. Verifica-se também em sua borda a concentração de produtos de hidratação do cimento, sendo estes localizados em pontos onde há maior presença de água, já que este é o produto essencial para sua formação na matriz cimentícia.

A Figura 34 contempla a amostra de argamassa com adição de 1% de sisal e 0,4% de microcelulose, e verifica-se pelo contorno em azul a presença da microcelulose em conjunto com os produtos de hidratação do cimento em suas adjacências.

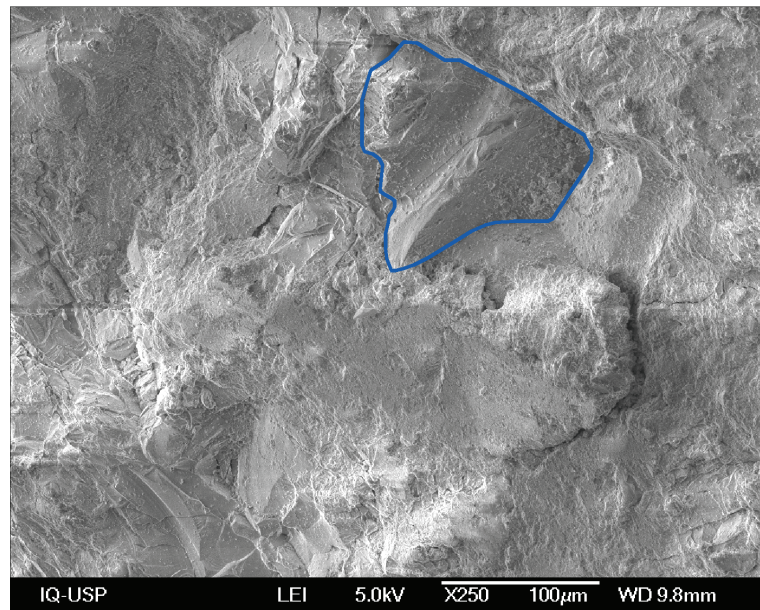


Figura 34. Análise microscópica da amostra com 1,0% de sisal e 0,4% de microcelulose.
Fonte: O autor (2017).

Mediante as imagens de microscopia eletrônica, verificou-se também a presença de maior quantidade de poros nas argamassas com maiores teores de fibras de sisal, isso pode ter ocorrido devido à evaporação da água livre ou devido as fibras de sisal terem absorvido maior quantidade de água em comparação a microcelulose. A Figura 35 mostra a argamassa contendo maior quantidade de poros quando adicionado maior teores de fibras de sisal.

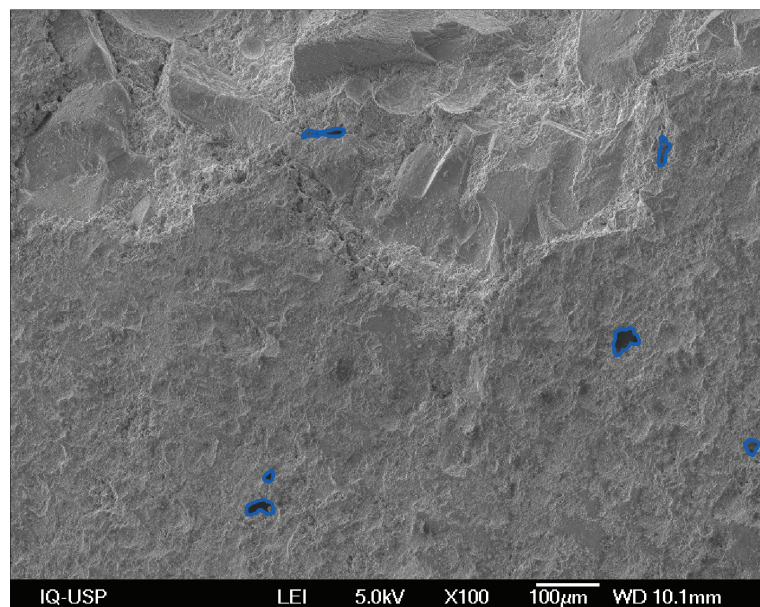


Figura 35. Análise microscópica da amostra com 0,2% de microcelulose e 1% de sisal.
Fonte: O autor (2017).

Com relação às fibras de sisal presente na argamassa, a mesma foi capturada separadamente, conforme a Figura 36 (a), visando a captura da interface fibra de sisal e matriz cimentícia, Figura 36 (b) e (c).

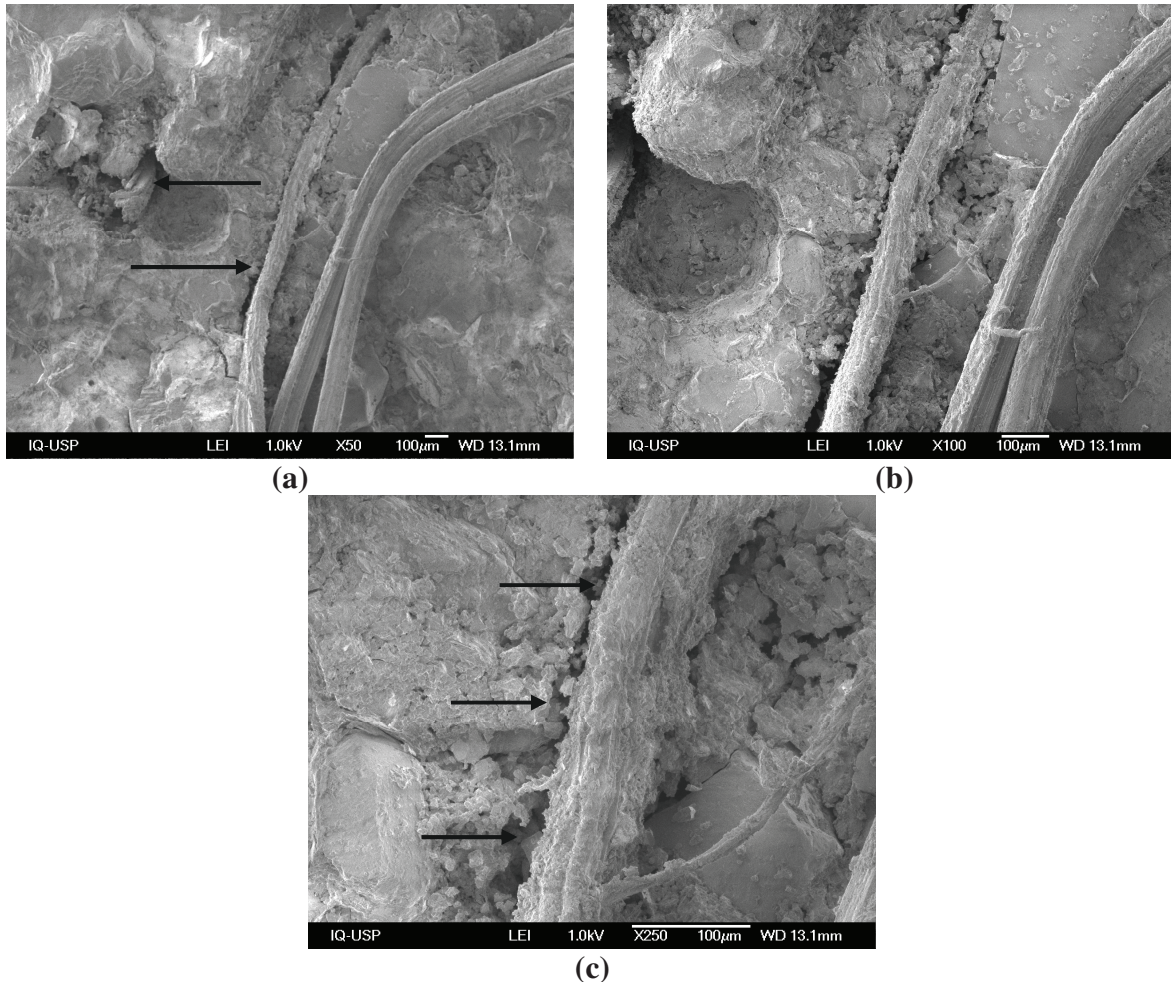


Figura 36. Fibras de sisal (a) no interior da argamassa, (b) aumento de 100 vezes e (c) interface da matriz com as fibras.

Observa-se mediante a Figura 36 (c) que não houve a adesão completa das fibras de sisal em relação a argamassa, pois verifica-se que nestes locais ocorre vazios e discontinuidades que podem ter levado a diminuição das resistências com o aumento da quantidade de volume de fibras inserido na mistura. Além disto, observa-se também a presença de várias fibras juntas em apenas um local, indicando que não houve boa dispersão das mesmas no momento da mistura.

Esta adesão pode ser melhorada com a inserção de polímeros ou tratamentos iniciais que promovam a modificação da superfície e garantam a adesão das fibras na matriz cimentícia.

Como a captura das imagens foi realizada com pouco aumento, não foi possível visualizar a presença da microcelulose dispersa sobre a argamassa ou sobre as fibras de sisal.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho possibilitou a verificação do comportamento das argamassas quando houve a inserção das fibras de sisal e microcelulose.

A inserção das fibras de sisal sem tratamento causou uma diminuição considerável na consistência das argamassas, sendo maior para os maiores teores de sisal incorporados, da ordem de 17,86% quando comparados com a argamassa de referência.

Para as argamassas com microcelulose, a inserção do teor de 0,6% provocou a queda em 26,55% na trabalhabilidade da argamassa, quando comparado a mistura sem adições. Esta queda se deve a absorção da água livre pelos materiais inseridos, já que os mesmos possuem grande capacidade de absorção de água.

As argamassas com adições fixas de sisal e variáveis de microcelulose ou vice-versa, tiveram sua trabalhabilidade diminuída, pois a inserção conjunta dos materiais potencializou a absorção de água livre da mistura de argamassa, sendo esta visível ainda no estado fresco.

A resistência a compressão das argamassas com adição de fibras de sisal se elevou com a adição de 0,5% e obteve ganhos de resistência máximos com 1,0% de sisal. Logo em seguida, diminuiu com a inserção de 1,5% de fibras, ficando com resistência abaixo do valor para a argamassa de referência. O comportamento da resistência a tração na flexão foi semelhante à compressão, uma vez que a argamassa obteve ganhos significativos de resistência com a inserção de 1,0% de sisal e declínio com adição do teor de 1,5%. Contudo, para o valor referente a adição de 1,5% de sisal, a resistência a tração na flexão foi maior em relação a argamassa de referência.

Para a microcelulose adicionada às argamassas, o teor de 0,2% apresentou ganhos significativos de resistência à compressão e resistência a tração na flexão. Com o aumento dos teores de microcelulose, a argamassa apresentou declínio em suas resistências, porém, neste caso, ambas foram maiores que a resistência da argamassa sem adições.

Para a inserção conjunta de fibras de sisal e microcelulose, a argamassa se comportou diferente para a variação promovida nos teores. Para as misturas com teor fixo de sisal e variável de microcelulose, a resistência a compressão aumentou com o traço contendo apenas sisal e houve logo em seguida, uma diminuição da resistência com a adição da microcelulose. Para a resistência a flexão, o melhor comportamento foi obtido com a adição de 0,4% de microcelulose, retornando um valor de resistência a flexão de 8,0 MPa.

Para a adição fixa de microcelulose e variável de sisal, a resistência a compressão teve seu melhor comportamento com a inserção de 0,5% de sisal, pois com o aumento do volume de fibras, a resistência apresentou queda. Quanto a resistência a flexão, houveram ganhos de resistência com adição de 0,5% e 1,0% de sisal, porém com a inserção de 1,5% de fibras, houve a queda da resistência.

Mediante as análises de microscopia eletrônica de varredura, observa-se que as fibras de sisal não tiveram um bom comportamento na interface com a argamassa, ocorrendo descontinuidades nos locais de contato com os produtos de hidratação do cimento, uma vez que a absorção de água pelas fibras influenciou a não formação destes produtos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em decorrência dos estudos apresentados, verifica-se a necessidade de modificações nos ensaios para verificar o comportamento das argamassas com adição com fibras de sisal e microcelulose, sendo elas:

O tratamento das fibras é utilizado para retirada de impurezas das paredes das fibras e também para que a mesma já esteja saturada antes de ser inserida na mistura cimentícia, isto garante que as fibras não absorvam água demasiadamente da mistura, promovendo uma melhora no comportamento mecânico das argamassas.

Este tratamento, além de manter a fibra saturada antes de sua adição na argamassa, garante sua adesão com a matriz, permitindo que não haja o deslizamento das mesmas no momento da aplicação do carregamento.

A correção do fator água cimento pode ser uma saída para a não utilização do prévio tratamento das fibras de sisal, uma vez que a absorção de água não afetará a consistência e conseqüentemente a resistência da argamassa.

Além disto, é importante verificar o comportamento da abertura de fissuras, ou seja, como será o comportamento das fibras de sisal e da microcelulose, se haverá aumento de resistência, a forma de ruptura das fibras e outras características observadas por meio do ensaio de resistência a tração na flexão com controle de abertura de fissuras.

A medida de deflexão e abertura de fissuras configura-se como uma das mais relevantes para o presente estudo, uma vez que, por meio destas é possível identificar a natureza do material e sua ruptura, além dos ganhos de resistência quando da inserção das fibras e da microcelulose.

De acordo com Figueiredo (2000), para garantir a acuidade no levantamento da curva de carga por deflexão, utiliza-se o controle eletrônico de deslocamento, por meio de um transdutor do tipo LVDT (*Linear Voltage Differential Transducer*). Para isto, o transdutor será apoiado em um sistema denominado de “yoke”, sendo que em diversas pesquisas o mesmo tem sido apontado como de maior confiabilidade. A esquematização geral deste sistema pode ser observada na Figura 37.

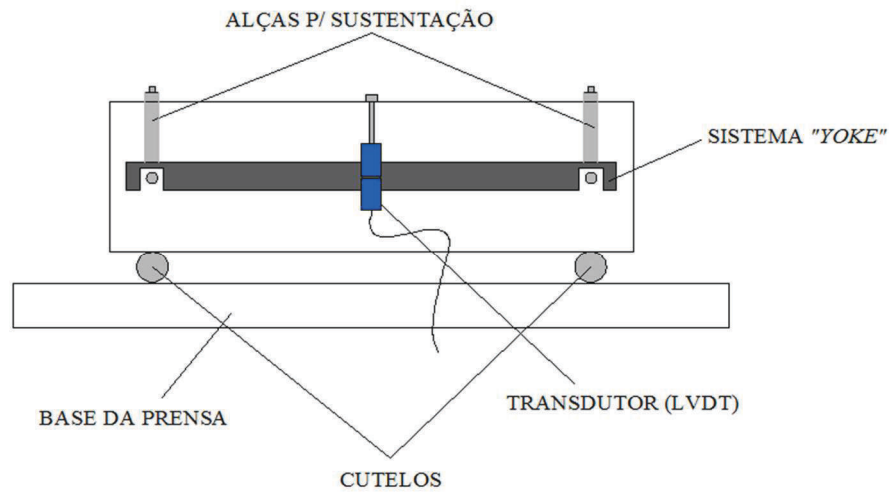


Figura 37. Configuração do sistema "yoke" acoplado ao corpo de prova.
Fonte: O autor (2017).

O controle de abertura de fissuras do corpo de prova deve ser monitorado por meio de um aparelho denominado "clip-gauge", onde este se encontra acoplado ao entalhe feito na base do corpo de prova, conforme a Figura 38.

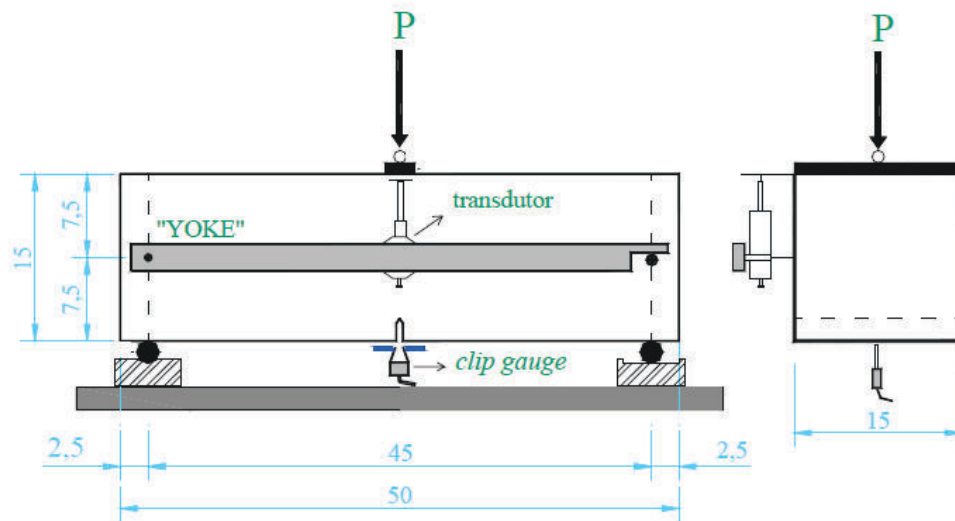


Figura 38. Configuração da instalação do *clip-gauge* na base do corpo de prova.
Fonte: Ferrari e Hanai (2009), adaptado.

O entalhe na base do corpo de prova é realizado anteriormente ao ensaio de tração na flexão, conforme prescreve a norma europeia RILEM TC 162-TDF – Procedimentos (2002).

8 REFERÊNCIAS

- AGOPYAN, V.; SAVASTANO JR. H. **A experiência brasileira com as fibras vegetais.** Revista Techné, São Paulo, ed. 32, 1998.
- AGOPYAN, V.; JONH, V. M.; DEROLLE, A. **Construindo com fibras vegetais.** A construção, São Paulo, p. 21-24, 1991.
- ALVES M. O.; SANTIAGO E. G. **Tecnologia e relações sociais de produção no setor sisaleiro nordestino.** Banco do Nordeste Brasileiro, Fortaleza, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Ensaio de Compressão de Corpo de Prova Cilíndrico. Rio de Janeiro, 2007
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214: Areia Normal para Ensaio de Cimento. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland–Determinação de Resistência à Compressão. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7217: Agregados – Composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.744: Fibras Têxteis. Rio de Janeiro, 1992.
- BARTOS P.; **Brittle-matrix composites reinforced with bundles fibres.**In: Materials Science to Construction Materials, ed. J. C. Maso, v. 2, Chapman and Hall, p. 539 – 546, 1987.
- BASTOS, P. K. X. **Propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento.** 2001. 190f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- BENTUR A.; MINDESS S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites.** Second edition, Taylor & Francis, Nova York, 2007.
- BERALDO A. L.; VIEIRA F. F. **Argamassa com adição de fibras.** V Simpósio Brasileiro de Tecnologia, São Paulo, 2003.
- CAO Y.; ZAVATERRI P.; YOUNGBLOOD J.; MOON R.; WEISS J. **The Influence of cellulose nanocrystal additions on the performance of cement paste.** Cement and Concrete Composites, v. 56, p. 73 – 83, 2015.

CASTRO H.; GIANNASI F.; NOVELLO C. **A luta pelo banimento do amianto nas Américas: uma questão de saúde pública**. Ciência & Saúde Coletiva, Rio de Janeiro, 2003.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C.; CARASEK, H. **Argamassas de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio**. SãoPaulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1995. 118 p. (Boletim 68 IPT).

CLARAMUNT J.; ARDANUY M.; AREVALO R.; PARES F.; TOLÊDO FILHO R. D. **Mechanical performance of ductile cement mortar composites reinforced with nanofibrillated cellulose**. In: 2nd international RILEM conference. Strain hardening cementitious, composites; 2011.

COUTTS, R. S. P.; WARDEN, P. G. **Sisal pulp reinforced cement mortar**. Cement and Concrete Composites. V. 14, n. 1, p. 17-21. 1992.

DA SILVA R. V.; AQUINO E. M. F.; RODRIGUES, L. P. S.; BARROS A. R. F. **Desenvolvimento de um compósito laminado híbrido com fibras natural e sintética**. Revista Matéria, vol. 13, n. 1, 2008.

DELVASTO, S.; BOTACHE, C. A.; ALBÁN, F.; GUTIÉRREZ, R. M.; PERDOMO, F.; SEGOVIA, F.; AMIGÓ, V. **Effect of fique fiber surface chemical treatments on the physical and mechanical properties of the fiber subjected to aggressive mediums**. In: Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitações e Infraestrutura de Interesse Social – NOCMAT2004. Pirassununga, 2004.

DOS SANTOS A. M.; **Estudo de compósitos híbridos polipropileno/ fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

FERREIRA S. R.; LIMA P. R. L.; SIVA F. A.; TOLEDO FILHO R. D. **Influência dos ciclos de molhagem - secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland**. Revista Matéria, pp. 1024-1034, 2012.

FERREIRA V. J.; HANAI J. B. **Desenvolvimento e análise de compósitos cimentícios híbridos de alto desempenho**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 2, nº 3, São Paulo, 2009.

FIBRENAMICS – Fibre the future. Disponível em: <https://www.web.fibrenamics.com/pt/>. Acesso em 03/07/2017.

FIGUEIREDO A. D. **Concreto com fibras de aço**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

FUJYAMA, R. T.; DARWISH, F. A.; GHAVAMI, K. **Caracterização do comportamento em compressão uniaxial de argamassa de cimento reforçada por fibras de sisal**. In: SEMENGE 99, Niteroi, 1999.

HASABA, S., KAWAMURA, M., KOIZUMI, T. **Resistibility Against Impact Load and Deformation Characteristics Under Bending Load in Polymer and Hybrid (Polymer and Steel) Fiber Reinforced Concrete**. In: Fiber Reinforced Concrete, ed. G. C. Hoff. ACI SP-81, American Concrete Institute, Detroit, p. 187-196, 1984.

HOYOS G. C.; CRISTIA E.; VÁSQUEZ A. **Effect of cellulose microcrystalline particles on properties of cement based composites**. Materials & Design, 2013.

IZQUIERDO I. S. **Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo, 2011.

JOHN V. M.; CINCOTTO M. A.; SJOSTROM C.; AGOPYAN V. OLIVEIRA C. T. A.; **Durability of slag mortar reinforced with coconut fibre**. Cement & Concrete Composites, 2005.

JOHNSTON, C. D. **Fiber-reinforced cements and concretes**. Canada: V. M. Malhotra, vol. 3, p. 364, 2001.

KETABCHI M. R.; KHALID M.; RATNAM C. T.; WALVEKAR R.; ABDULLAH L. C. **Sonosynthesis of microcellulose from kenaf fiber: optmization process parameters**. Journal of Natural Fibers, 2016.

LEAL A. F.; NASCIMENTO, J. W.; BARBOSA, N. P. **Telhas longas à base de argamassa de cimento Portland reforçadas com fibras de sisal**. In: Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitações e Infraestrutura de Interesse Social – NOCMAT 2004. Pirassununga, 2004.

LIMA P. R. L.; TOLEDO FILHO R. D.; LIMA F. M. J. **Mecanismo de fissuração sobre tração direta de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal**. Engevista, V.15, n.1, p. 95-103, abril 2013.

MARINELLI A. L.; MONTEIRO M. R.; AMBRÓSIO J. D.; BRANCIFORTI M. C.; KOBAYASHI M.; NOBRE A. D. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras**

vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. Poliméricos: Ciência e Tecnologia, vol. 18, nº 2, p. 92-99, 2008.

MARTIN A. R.; MARTINS, M. A.; MATTOSO L. H. C.; SILVA, O. R. R. F. **Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade *Agave sisalana*.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 19, nº1, p. 40-46, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estruturas, Propriedades e Materiais.** 1ª ed. São Paulo: Pini, 1994. 573p.

MODLER, L. E.; SPECHT, L. P.; CORÓ, A. G.; BECK, J. J. **Investigação das propriedades mecânicas de concretos reforçados com fibras.** Congresso de Engenharia Civil, Juiz de Fora, 2000.

MOHAMED M. A. S.; GHORBEL E.; WARDEH G. **Valorization of micro-cellulose fibers in self-compacting concrete.** Construction and Building Materials, 2010.

MOUNIKA M.; RAVINDRA K. **Characterization of nanocomposites reinforced with cellulose whiskers: A review.** Materials Today: Proceedings, 2015.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** 2 ed. São Paulo: Pini, 1997, 828 p.

NILSSON J.; SARGENIUS P. **Effect of microfibrillar cellulose on concrete equivalent mortar fresh and hardened properties.** Swedish Cement and Concrete Research Institute; 2011.

ONUAGULUCHI O.; PANESAR D. K.; SAIN M. **Properties of nanofibre reinforced cement composites.** Construction and Building Materials, p. 119 – 124, 2014.

PERES M. N. P. B. **Compósito de argamassa de cimento reforçada por fibra de sisal com entalhe definidos: caracterização mecânica e mecanismo de falha.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará. Belém, 2010.

PICANÇO, M. S. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PIMENTEL L. L. **Durabilidade de argamassas modificadas por polímeros e reforçadas com fibras vegetais.** Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.

RAMAKRISHNA G.; SUNDARARAJAN, T.; MANIKANDAN, P. **Polymer modified sisal fibre mortar composites: workability strength and durability.** In: Conferência Brasileira de Materiais e Tecnologias Não-Convencionais: Habitações e Infraestrutura de Interesse Social – NOCMAT 2004. Pirassununga, 2004.

RAKI L.; BEAUDOIN J.; ALIZADEH R.; MAKAR J.; SATO T. **Cement and concrete nanoscience and nanotechnology.** Materials, vol. 3, pp. 918-942, 2010.

RESENDE F. M. **Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de concretos de resistência normal e de alto desempenho.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

RILEM TC 162-TDF. **Test and design methods for steel fibre reinforced concrete.** Bending test. Materials and Structures/Matériaux et Constructions, v. 35, p. 579-582, Nov., 2002a.

RILEM TC 162-TDF. **Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Design of steel fibre reinforced concrete using the σ -w method: principles and applications.** Materials and Structures/Matériaux et Constructions, v. 35, p. 262-278, June, 2002b.

RODRIGUES P. P. F.; MONTARDO, J. P. **A influência da adição de fibras de polipropileno nas propriedades dos concretos para pisos e pavimentos.** 44º Congresso Brasileiro do Concreto. Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. Belo Horizonte, 2002.

ROSÁRIO F.; PACHEKOSKI W. M.; SILVEIRA A. P. J.; SAVASTANO JR. H.; SANTOS, S. F.; CASARIN S. A. **Resíduos de sisal como reforço em compósitos de polipropileno virgem e reciclado.** Revista Polímeros, 2010.

SANJUÁN M. A.; ANDRADE, C.; BENTUR, A. **Effect of crack control in mortars containing polypropylene fibers on the corrosion of steel in a cementitious matrix.** ACI Materials Journal, v. 94, n. 2. 1997.

SARMIENTO C. R.; FREIRE, W. J. **Tratamentos aplicados ao bagaço de cana-de-açúcar visando sua utilização para fins de material de construção.** In: Workshop reciclagem e reutilização de resíduos como material de construção civil. p. 132-137, 1996.

SAVASTANO Jr., H. **Materiais a base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo.** Tese (Livre docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

SAVASTANO JR. H. **Zona de Transição entre fibras e pasta de cimento portland: caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas do compósito.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1992.

SAVASTANO JR. H.; WARDEN P. G.;COUTTS R. P. S. **Mechanically pulped sisal as reinforcement in cementitious matrices.** Cement& Concrete Composites, 2002.

SAVASTANO JÚNIOR, H. **Materiais reforçados com fibras – Correlação entre a zona de transição fibra matriz e as propriedades mecânicas.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. – IPT. Editora PINI. São Paulo, 1998.

SILVA A. C. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.

SILVA A. C.; KOENDERS E. A. B.; FAIRBAIN E.M. R. **Strain hardening cementitious composites.** 2º International RILEM Conference, Rio de Janeiro, 2011.

SILVA F. A.; CHAWLA N.; TOLEDO FILHO R. D. **Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers.** Composite Science and Technology, p. 3438 – 3443, 2008.

SILVA R. P.; BARROS M. M. S. B.; PILEGGI R. G.; VANDERLEY J. M. **Avaliação do comportamento da argamassa no estado fresco através dos métodos de mesa de consistência, droppingball e squeeze-flow.** VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Argamassa. Florianópolis, 2005.

SILVA E. J.; SILVA P. D.; MARQUES M. L.; FORNARI Jr. C. C. M.; GARCIA F. C.; LUZARDO F. H. M. **Resistência à compressão de argamassas em função da adição de fibra de coco.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, n. 12, p. 1268 – 1273, 2014.

SILVA L. F. **Estudo da microcelulose em compósitos cimentícios.** Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Maringá, 2016.

SIQUEIRA J. E. L. **Utilização de fibras naturais e sintéticas em argamassas de revestimento de alvenaria: estudo comparativo de desempenho.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

SOROUSHAN P.; MARIKUNTE S. **Durability characteristics of cellulose fiber reinforced cement composites.** ACI Materials and Journal, v. 142, p. 73-90, 1994.

SOROUSHIAN, P.; RAVANBAKHSH, S. **High-early-strength concrete: mixture proportioning with processed cellulose fibers for durability.** *ACI Materials Journal*, v. 96, n. 5. 1999

SOUZA S. F. **Obtenção de nanofibras de curauá e aplicação como reforço em compósitos baseados em PVA.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP. Botucatu, 2010.

TANESI, J. & FIGUEIREDO, A. **Materiais com fibras de polipropileno para construção civil.** Congresso Internacional de não tecidos e tecidos técnicos. *Anais*. 1999.

TOLÊDO FILHO, R. D., **Materiais Compósitos Reforçados com Fibras Naturais.** Tese DSc., Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 1997.

TOLÊDO FILHO, R. D., **Utilização da Fibra de Sisal na Construção Civil.** In: SILVA, O. R. R. F., BELTRÃO, N. E. M., *O Agronegócio do Sisal no Brasil*, Capítulo 11, Brasília, DF, Serviço de Produção de Informação – SPI.

TOLÊDO FILHO, R. D. e SANJUÁN, M. A. **Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age.** *Cement and Concrete Research*. v. 29, p. 1597-1604, 1999.

TONOLI, G. H. D.; RODRIGUES FILHO, U. P.; SAVASTANO Jr, H.; BRAS, J.; BELGACEM, M. N.; LAHR, F. A. R. **Cellulose modified fibres in cement based composites.** *Composites: Part A*, p. 2046 – 2053, 2009.

TORGAL F. P.; JALALI S. **Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: a review.** *Construction and Building Materials*, 2010.

WAMBUA P.; IVENS J.; VERPOEST I. **Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?.** *Composites Science and Technology*, 2003.