

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EFEITO DA ADIÇÃO DE FIBRAS SINTÉTICAS E NATURAIS NAS PROPRIEDADES  
FÍSICAS E MECÂNICAS DE ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM  
METACAULINITA

ANA PAULA DE LIMA MENDES

MANAUS

2019

ANA PAULA DE LIMA MENDES

EFEITO DA ADIÇÃO DE FIBRAS SINTÉTICAS E NATURAIS NAS PROPRIEDADES  
FÍSICAS E MECÂNICAS DE ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM  
METACAULINITA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais Regionais e Não Convencionais para Estruturas e Pavimentos.

Orientador: Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho

MANAUS

2019

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

M538e Mendes, Ana Paula de Lima  
Efeito da adição de fibras sintéticas e naturais nas propriedades físicas e mecânicas de argamassas autonivelantes com metacaulinita / Ana Paula de Lima Mendes. 2019  
130 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: João de Almeida Melo Filho  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.

1. argamassa autonivelante. 2. retração por secagem. 3. metacaulinita. 4. fibra de malva. 5. fibra de juta. I. Melo Filho, João de Almeida II. Universidade Federal do Amazonas III. Título



**ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº. 010/2019**

**ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO AO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL**

**DATA DO EXAME:** 19/072019

**DISCENTE:** Ana Paula de Lima Mendes

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho

**BANCA EXAMINADORA: (Nome Completo)**

Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho (Presidente)

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos (Membro Interno)

Profa. Dra. Luciane Farias Ribas (Membro Externo)

**TITULO DA PROPOSTA DE DISSERTAÇÃO: EFEITO DA ADIÇÃO DE FIBRAS SINTÉTICAS E NATURAIS NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE ARGAMASSAS AUTONIVELANTES COM METACAUULINITA**

**LOCAL:** Sala Multiuso I da Faculdade de Tecnologia

**HORA DE INÍCIO:** 14h00

De acordo com o Regimento Interno do **Programa Pós – Graduação em Engenharia Civil**, aprovados pelo Conselho de Ensino e Pesquisa/CONSEP/UFAM e CAPES, o (a) aluno (a) submeteu sua dissertação em forma escrita e oral, sendo após exposição de cerca de 40 minutos arguido oralmente pelos membros da banca, tendo tido como resultado:

**Aprovação por unanimidade de sua dissertação.** O (A) aluno (a) foi considerado aprovado, podendo pleitear o título de Mestre.

**Reprovação de sua Dissertação.** O (A) aluno (a) não foi considerado aprovado (a) na sua Defesa de Dissertação. Não podendo pleitear o título de Mestre.

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que será assinada pelos membros da banca e pelo (a) aluno (a).

**Observações** \_\_\_\_\_

Manaus, 19 de julho de 2019

Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho (Presidente)

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos (Membro Interno)

Profa. Dra. Luciane Farias Ribas (Membro Externo)

Ana Paula de Lima Mendes (Discente)

*Dedico este trabalho aos meus pais Ana Lucia e Paulo Augusto, ao meu amado Stéfano pela paciência, compreensão e apoio em todos os momentos e em especial a minha avó Maria Helena (em memória), que me ensinou a sempre persistir nos meus sonhos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus por me conceder a vida, a família e a oportunidade de realização pessoal, com saúde e plenitude e por nunca me desamparar nos momentos mais difíceis da minha vida, sendo a minha verdadeira fonte de força e perseverança.

Por conseguinte, agradeço aos meus pais Ana Lucia e Paulo Augusto pelo amor e apoio incondicional, que apesar das dificuldades e desafios impostos, mantiveram-se resistentes, favorecendo, incentivando e apoiando a continuidade de meus estudos. Agradeço ao meu irmão e a todos familiares que de suas formas se fizeram presentes nessa conquista.

Agradeço ao meu amado Stéfano Campos pela compreensão, pelo apoio, pelo carinho, pelas palavras de incentivo diário, por estar presente em todos os momentos durante o processo desta pesquisa, mesmo que a distância, por assumir e viver as minhas escolhas como se fossem as dele.

Agradeço a minha amiga e colega de mestrado, Daniela Lima, pelo companheirismo, seriedade, confiança e ajuda mútua durante toda essa importante jornada, pela proeza de chegarmos ao fim de uma árdua etapa e já estarmos engajadas em outra, pela amizade que continuará nos favorecendo.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. João de Almeida, pelos ensinamentos, pela resolução das dúvidas, pela amizade, pela confiança depositada, por todo apoio prestado para o desenvolvimento dessa dissertação.

Aos estimados professores Drs. Raimundo Vasconcelos, Virgínia Giacon, Nilton Campelo, Lizandro Manzato, Genilson Pereira e Raimundo Kennedy, pelos ensinamentos transmitidos que possibilitaram a realização deste trabalho.

Às amigas de Armirys, Ewerton e Michell conquistadas ao longo do mestrado, pelos momentos de descontração e ajuda mútua nas disciplinas e ensaios.

Agradeço de um modo especial a todos os técnicos dos laboratórios da UFAM Zeca, Diogo, Alfredo, Patrick, Jorge, Nilson, Reinaldo, Jorge da laminação, Glauco, Ana Lucia, que me ajudaram nas realizações dos ensaios, com muita paciência e dedicação.

Ao Mitsuo Takeno técnico do Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais (LSCN) do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia Do Amazonas (IFAM), por me ajudar com os ensaios de DRX.

Aos técnicos Lucas Castanhola e Jackeline do Laboratório Temático de Microscopia Ótica e Eletrônica (LTMOE) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) pelo ensaio de MEV.

Aos Prof. Drs. Otávio Paiva e Samantha Pinheiro por disponibilizarem a utilização do Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade do Estado do Amazonas e aos técnicos Rodrigo e Daniel.

À Annelise Alves, responsável pelo Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pela ajuda na execução do ensaio de granulometria a laser.

Aos funcionários da secretária do programa Ivandson Kallen e Beatriz Mar, pela atenção e dedicação prestadas.

À FAPEAM, pelo auxílio financeiro no desenvolvimento da pesquisa.

À UFAM, pelos recursos disponibilizados para a conclusão desta pesquisa.

Em especial, agradeço aos meus animais de estimação que, presentes no meu dia-a-dia, conseguiram propiciar-me momentos de sossego, conforto, descontração, e sobretudo companheirismo nos momentos difíceis e solitários, de estudos noturno, além dos finais de semana.

Por fim, agradeço a todos que de uma forma ou de outra contribuíram para que eu chegasse até aqui. Muito obrigada!

*“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.*

**Albert Einstein**



## RESUMO

A presente pesquisa apresenta o desenvolvimento e caracterização físico-mecânica de compósitos cimentícios reforçados com fibras de polipropileno, de juta e de malva. Com o objetivo de aumentar a durabilidade das fibras vegetais nos compósitos, foi desenvolvida uma matriz com substituição parcial do cimento Portland por 50% de metacaulinita, a fim de diminuir os níveis de hidróxido de cálcio, que degradam essas fibras. As fibras foram caracterizadas quanto a sua composição mineralógica e sua morfologia por difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG), microscopia eletrônica de varredura (MEV), sendo que as fibras vegetais receberam tratamento alcalino e em seguida passaram por ensaio de absorção de água. A matriz foi caracterizada por ensaios físicos (TG/DTG e reologia) e os compósitos caracterizados passaram por ensaios mecânicos (compressão e tração na flexão) e físicos (variação dimensional e absorção de água). Foi verificado a partir dos ensaios de MEV que a fibra de polipropileno apresenta uma morfologia padrão, enquanto as fibras naturais apresentaram uma estrutura de fibrocélulas, lúmens e lamelas médias. Os resultados de TG/DTG comprovaram que a substituição parcial do cimento diminuiu em 100% o teor de hidróxido de cálcio. As matrizes com metacaulinita tiveram ganhos de até 47,61% na resistência a tração na flexão em relação a matriz referência (R). Quanto ao comportamento a tração na flexão, as matrizes com fibras tiveram aumento de até 22,03%, em relação a R. Os ensaios de variação dimensional confirmaram a viabilidade do uso de fibras vegetais e da metacaulinita como uma solução ao combate a problemas de retração em argamassas autonivelantes para piso.

**Palavras-Chave:** Argamassa autonivelante, retração por secagem, metacaulinita, fibra de malva, fibra de juta.

## **ABSTRACT**

This research presents the development and physical-mechanical characterization of cement-based composites reinforced with polypropylene, jute and mallow fibers. In order to increase the durability of plant fibers in composites, a matrix was developed with partial replacement of Portland cement by 50% of metakaolin to decrease calcium hydroxide levels, which degrade these fibers. The fibers were characterized in terms of their mineralogical composition and morphology by X-ray diffraction (XRD), thermogravimetry (TG / DTG), scanning electron microscopy (SEM), water absorption test. The matrix was characterized by physical tests (TG / DTG and rheology) and the characterized composites passed mechanical (compression and flexural tensile) and physical (dimensional variation and water absorption) tests. It was verified from the SEM tests that the polypropylene fiber has a standard morphology, while the natural fibers presented a structure of fibrocells, lumens and medium lamella. TG / DTG results showed that partial cement replacement decreased calcium hydroxide content by 100%. Metakaolin matrices had gains of up to 47,61% in flexural tensile strength in relation to the reference matrix (R). As for the flexural tensile behavior, the fiber matrices had an increase of up to 22.03%, compared to R. The dimensional variation tests confirmed the viability of the use of plant fibers and metakaolin as a solution to combat the problems of shrinkage in self-leveling floor mortars.

**Key words:** Self-leveling mortar, drying shrinkage, metakaolin, mauve fiber, jute fiber.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Alta fluidez da argamassa autonivelante. ....	22
Figura 2.2 - Microestrutura da pasta autonivelante. ....	23
Figura 2.3 - Esquematização da ação da molécula de superplastificante. ....	27
Figura 2.4 - Mecanismo de reforço da fibra atuando como ponte de transferência de tensões. .....	33
Figura 2.5 - Descrição esquemática da curva de tensão-deformação, com base no modelo ACK. ....	33
Figura 2.6 - Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto. ....	35
Figura 2.7 - Classificação das fibras. ....	38
Figura 2.8 - Fibra de polipropileno. ....	39
Figura 2.9 - Constituição estrutural de uma fibra vegetal. ....	43
Figura 2.10 - Fibra de juta na forma de fio. ....	45
Figura 2.11 - Fibra de malva. ....	47
Figura 3.1 - Visão geral da pesquisa. ....	55
Figura 3.2 - Cimento Portland Composto CPII E 32. ....	56
Figura 3.3 - Local da extração do caulim. ....	57
Figura 3.4 - Areia usada para fabricação do compósito. ....	58
Figura 3.5 - Fibras de polipropileno FibroMac® 12. ....	59
Figura 3.6 - Fibras naturais vegetais: a) juta e b) malva. ....	60
Figura 3.7 - Etapas das produção da metacaulinita: a) Peneiramento do caulim por via úmida; b) Decantação do caulim. ....	61
Figura 3.8 - Caulim no interior da mufla para calcinação. ....	61
Figura 3.9 - Tratamento alcalino nas fibras naturais: a) Fibras de juta e malva imersas em solução alcalina; b) Lavagem das fibras. ....	62
Figura 3.10 - Analisador de Tamanho de Partícula CILAS 1180. ....	63
Figura 3.11 - Ensaio de FRX: a) Espectrômetro de fluorescência de raios-X modelo Epsilon 3 XL da Panalytical.; b) Amostras. ....	63
Figura 3.12 -Difratômetro Bruker D2 Phaser do Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais do IFAM. ....	64
Figura 3.13 - Ensaio de termogravimetria: a) Equipamento de termogravimetria; b) Detalhe da amostra no cadinho. ....	65

Figura 3.14 - Ensaio de MEV : a) Microscópio eletrônico de varredura modelo Quanta 250 da Fei CoMPany; b) Detalhe das amostra. ....	67
Figura 3.15 - Ensaio de absorção de água das fibras naturais: a) Fibras imersas em água destilada; b) Secagem das fibras; c) Pesagem das Fibras. ....	67
Figura 3.16 - Procedimento de mistura. ....	70
Figura 3.17 - Esquematização do procedimento de mistura. ....	70
Figura 3.18 - Cone de Kantro (medidas em mm). ....	71
Figura 3.19 - Ensaio de cone de Kantro: a) Enchimento do cone de Kantro; b) Retirada do cone; c) Medição do diâmetro. ....	72
Figura 3.20 - Condições de uniformidade visual da borda da argamassa escoada. ....	73
Figura 3.21 - Análise visual da argamassa escoada quanto à segregação. ....	73
Figura 3.22 - Argamassa autonivelante com segregação. ....	73
Figura 3.23 - Argamassa autonivelante com exsudação. ....	74
Figura 3.24 - Ensaio de variação dimensional e de massa: a) Aferição da variação dimensional; b) Pesagem de corpo de prova. ....	75
Figura 3.25 - Ensaio de variação dimensional por imersão e secagem: a) Placa cimentícia; b) Amostras. ....	76
Figura 3.26 - Ensaio de absorção de água em placas: a) Amostras; b) Pesagem das amostras. ....	77
Figura 3.27 - Ensaio de resistência à compressão: a) Corpos de prova; b) Capeamento dos corpos de prova; c) Equipamento. ....	78
Figura 3.28 - Esquema do ensaio de flexão de três pontos. ....	80
Figura 3.29 - Ensaio de tração na flexão: a) Equipamento; b) Execução do ensaio. ....	80
Figura 3.30 - Representação esquemática das variáveis de estudo. ....	81
Figura 4.1 - Curva granulométrica metacaulinita, cimento CP II E-32 e da areia. ....	83
Figura 4.2 - Difratoograma do cimento CP II E-32. ....	84
Figura 4.3 - Difratoograma do caulim e da metacaulinita. ....	85
Figura 4.4 - Difratoogramas de raios-X da fibra de polipropileno. ....	85
Figura 4.5- Difratoogramas de raios-X das fibras de malva e juta. ....	86
Figura 4.6 - Curvas de TG e DTG da fibra de polipropileno. ....	87
Figura 4.7 - Curvas de TG e DTG da fibra de malva e juta. ....	87
Figura 4.8 - MEV da fibra de polipropileno: a) Fibras de PP; b) Seção transversal; c) Seção longitudinal. ....	89

Figura 4.9 - MEV da fibra de malva sem tratamento: a)Fibras de malva; b) Seção transversal; c) Seção longitudinal. ....	90
Figura 4.10 - MEV da fibra de malva com tratamento : a)Fibras de malva; b) Seção transversal; c) Seção longitudinal. ....	91
Figura 4.11 - MEV da fibra de juta sem tratamento: a)Fibras de juta; b) Seção transversal; c) Seção longitudinal. ....	92
Figura 4.12 - MEV da fibra de juta com tratamento: a)Fibras de juta; b) Seção transversal; c) Seção longitudinal. ....	93
Figura 4.13 - Absorção de água das fibras juta e malva, naturais e tratadas. ....	94
Figura 4.14 - Diâmetro médio de espalhamento.....	96
Figura 4.15 - Curvas de TG e DTG das pastas. ....	98
Figura 4.16 - Variação dimensional das matrizes.....	100
Figura 4.17 - Variação de massa das matrizes.....	102
Figura 4.18 - Variação dimensional por imersão e secagem. ....	104
Figura 4.19 - Absorção de água do compósito. ....	105
Figura 4.20 - Dados de resistência à compressão. ....	107
Figura 4.21 - Dados de resistência à tração na flexão. ....	109

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química das fibras de juta e malva. ....	44
Tabela 2.2 - Faixa de decomposição térmica de produtos de hidratação do cimento Portland. .....	52
Tabela 3.1 - Análise Física do Cimento Portland CII E 32. ....	57
Tabela 3.2 - Dados Técnicos do MC-PowerFlow 1160 ®. ....	58
Tabela 3.3 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras de polipropileno.....	59
Tabela 3.4 - Ensaio empregados na caracterização física. ....	62
Tabela 3.5 - Códigos e descrições das formulações de argamassas. ....	69
Tabela 3.6 - Traço das misturas (kg/ m <sup>3</sup> ). ....	69
Tabela 3.7 - Consumo de material durante a dosagem, em gramas. ....	72
Tabela 4.1 - Índices físicos da areia. ....	82
Tabela 4.2 - Análise Química do Cimento Portland CII E 32 e da Metacaulinita. ....	83
Tabela 4.3 - Índices de cristalinidade. ....	86
Tabela 4.4 - Análise térmica das fibras. ....	88
Tabela 4.5 - Dosagens das matrizes.....	95
Tabela 4.6 – Análise de variância dos resultados do espalhamento das argamassas R, RS, RFJ, RFM, RSFJ e RSFM.....	97
Tabela 4.7 - Perdas de massa aos 28 dias de idade.....	99
Tabela 4.8 - Retração por secagem aos 28 dias das argamassas formuladas. ....	103
Tabela 4.9 - Análise de variância dos resultados da variação dimensional aos 28 dias das argamassas R, RS, RFJ, RFM, RSFJ e RSFM. ....	103
Tabela 4.10 – Análise de variância dos resultados da variação de massa aos 28 dias das argamassas R, RS, RFJ, RFM, RSFJ e RSFM. ....	104
Tabela 4.11 – Análise de variância dos resultados variação dimensional por imersão e secagem das argamassas R, RS, RFJ, RFM, RSFJ e RSFM. ....	105
Tabela 4.12 – Análise de variância dos resultados de absorção de água das argamassas R, RS, RFJ, RFM, RSFJ e RSFM. ....	106
Tabela 4.13 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão das argamassas R, RS, RFJ, RFM, RSFJ e RSFM.....	108
Tabela 4.14 – Análise de variância dos resultados de resistência à tração na flexão das argamassas R, RS, RFJ, RFM, RSFJ e RSFM. ....	110

# SUMÁRIO

<b>Capítulo 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1 Justificativa .....	20
1.2 Objetivo Geral .....	20
1.3 Objetivos Específicos .....	20
1.4 Estrutura do Trabalho .....	21
<b>Capítulo 2 – REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>22</b>
2.1 Argamassa autonivelante .....	22
2.1.1 Cimento.....	25
2.1.2 Agregados .....	26
2.1.3 Adições minerais.....	26
2.1.4 Aditivos químicos .....	27
2.2 Fenômeno da retração em argamassas autonivelantes.....	28
2.2.1 Retração autógena .....	29
2.2.2 Retração por secagem .....	29
2.3 Fibras aplicadas a compósitos cimentícios .....	31
2.4 Classificação das fibras.....	37
2.4.1 Fibras de Polipropileno .....	39
2.4.2 Fibras orgânicas naturais vegetais.....	42
<b>2.4.2.1 Fibras de Juta</b> .....	<b>44</b>
<b>2.4.2.2 Fibras de Malva</b> .....	<b>45</b>
2.5 Tratamento alcalino .....	48
2.6 Uso da metacaulinita como pozolana .....	49
<b>Capítulo 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>55</b>
3.1 Materiais .....	56
3.1.1 Cimento Portland .....	56
3.1.2 Caulim.....	57

3.1.3 Areia.....	58
3.1.4 Superplastificante.....	58
3.1.5 Água.....	58
3.1.6 Fibra de Polipropileno.....	59
3.1.7 Fibra de Malva e Juta.....	59
3.2 Métodos .....	60
3.2.1 Produção da metacaulinita .....	60
3.2.2 Tratamento alcalino nas fibras naturais .....	61
3.2.2 Caracterização dos materiais.....	62
3.2.2.1 <i>Caracterização física</i> .....	62
3.2.2.2 <i>Ensaio de granulometria a laser</i> .....	62
3.2.2.3 <i>Espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX)</i> .....	63
3.2.2.4 <i>Difração de raios-X (DRX)</i> .....	63
3.2.2.5 <i>Análise Termogravimétrica e Termogravimetria Derivada (TG/DTG)</i> .....	65
3.2.2.6 <i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i> .....	66
3.2.2.7 <i>Absorção de água das fibras naturais</i> .....	67
3.2.4 Caracterização das matrizes .....	68
3.2.4.1 <i>Dosagem das matrizes</i> .....	68
3.2.4.2 <i>Procedimento de mistura das matrizes</i> .....	69
3.2.4.3 <i>Determinação do teor de superplastificante</i> .....	70
3.2.5 Caracterização físico-mecânica da argamassa autonivelante.....	74
3.2.5.1 <i>Ensaio de variação dimensional</i> .....	74
3.2.5.2 <i>Ensaio de variação dimensional por imersão e secagem</i> .....	76
3.2.5.3 <i>Ensaio de absorção de água do compósito</i> .....	77
3.2.5.4 <i>Ensaio de resistência à compressão</i> .....	78
3.2.5.5 <i>Ensaio de resistência à tração na flexão</i> .....	79



3.2.6 Avaliação estatística dos dados experimentais .....	80
<b>Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>82</b>
4.1 Caracterização dos materiais .....	82
4.1.1 Caracterização Física .....	82
4.1.2 Ensaio de granulometria a laser .....	82
4.1.3 Espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) .....	83
4.1.4 Difração de raios-X (DRX).....	84
4.1.5 Análise Termogravimétrica e Termogravimetria Derivada (TG/DTG) das fibras .....	86
4.1.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	89
4.1.7 Absorção de água das fibras naturais.....	93
4.2 Caracterização das matrizes.....	94
4.2.1 Determinação do teor de superplastificante .....	94
4.2.2 Análise Termogravimétrica e Termogravimetria Derivada (TG/DTG) das pastas.....	97
4.3 Caracterização físico-mecânica das argamassas autonivelantes.....	100
4.3.1 Ensaio de variação dimensional.....	100
4.3.2 Ensaio de variação dimensional por imersão e secagem .....	104
4.3.3 Ensaio de absorção de água do compósito.....	105
4.3.4 Ensaio de resistência à compressão .....	106
4.3.5 Ensaio de resistência à tração na flexão.....	108
<b>Capítulo 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>111</b>
5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....	112
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>114</b>

## Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

A argamassa autonivelante é um material relativamente novo e pouco estudado no Brasil, diferentemente do concreto auto adensável. Apresenta como principais características a sua fluidez, moderada viscosidade e coesão entre as partículas constituintes. É originada da argamassa auto adensável, porém deve apresentar uma superfície lisa e regular, sendo aceito apenas um desnível de 1 mm a cada 4m de comprimento do elemento estrutural (MARTINS, 2009).

Em virtude de possuir alto índice de fluidez, de se auto nivelar sem necessitar de esforços externos, o processo para a execução de piso e contrapiso com argamassa autonivelante, conseqüentemente é mais simples e eficaz, porque pode ser transportada até a obra por caminhão betoneira e lançada sobre a laje por bombeamento. A sua aplicação geralmente é realizada por uma mangueira, permitindo o espalhamento sobre a superfície, contribuindo para a redução de mão de obra (FREITAS *et al.*, 2010).

Tanto as argamassas autonivelantes, quanto os concretos auto adensáveis são compósitos cimentícios que apresentam a propriedade de auto consolidação, sem precisar de uma intervenção manual como a vibração, permitindo a minimização de problemas com execução, como por exemplo, falhas de concretagem e segregação dos agregados.

Em sua pesquisa Souza *et al.* (2013), baseados em aplicações em campo, constataram que devido ao rápido início de pega e apesar de usar o processo de cura úmida, o material pode apresentar fissuras ocasionadas pelo processo de retração total (retração química, plástica, de secagem, entre outros) após transcorridas as primeiras idades. Isso se justifica pela sua grande área, em relação ao seu volume, em contato com o ar, permitindo que ocorra uma perda de água muito mais severa, quer em velocidade como um resultado global, do que o concreto convencional (RODRIGUES e MONTARDO, 2002).

Uma possível solução é a adição de fibras que podem reduzir as fissuras causadas pela retração. Há milênios, os egípcios já misturavam palhas em tijolos de argila e crina de cavalo com o intuito de reforçar materiais cimentados. Com o passar dos anos surgiram outros tipos de materiais com o mesmo princípio de reforço, e até pouco tempo atrás, o compósito fibroso predominante no mercado eram as fibras de amianto. No entanto, com o avanço de estudos e pesquisas decorrentes de vários casos de trabalhadores gravemente doentes, descobriu-se que o

amianto é altamente cancerígeno e, portanto, surgiu a necessidade de criar alternativas para o uso como elemento de reforço (MELO FILHO, 2012).

Atualmente, é notável a crescente utilização de concreto e argamassas reforçadas, na confecção de pisos com fibra no Brasil. A adição de fibras com módulo de elasticidade baixa ou alta (ou ambos), melhoram as características técnicas em comparação ao compósito cimentício simples (MAGALHÃES e REAL, 2011). Porém, nos primórdios da introdução das fibras plásticas no Brasil, aconteceram alguns equívocos considerados graves com relação à sua aplicação, em razão de acreditar que com a sua inclusão, seria possível dispensar outros tipos de reforços, como as telas soldadas ou fibras metálicas, sem que houvesse problemas no combate e controle da retração hidráulica, o que levou a ocorrência de inúmeros insucessos em obras importantes (RODRIGUES e MONTARDO, 2002).

As fibras sintéticas são usadas como reforço de compósitos, desde o século XX, quando foi criado o fenol polímero, o primeiro polímero (VENTURA, 2009). A fibra de polipropileno é a principal fibra sintética comercializada hoje em dia no mercado, esta é uma fibra sintética de origem petroquímica, com baixo módulo de elasticidade, fabricada industrialmente pelo processo de extrusão. O polipropileno é um material quimicamente inerte, que não absorve água, é imputrescível e não enferruja. Tais características o enquadram satisfatoriamente no conceito de compósitos fibrosos. Em comparação com outros polímeros, o uso da fibra é economicamente viável devido ao seu baixo custo de fabricação. Soma-se a isto o fato de que o seu manuseio, tanto na fábrica como na obra, não oferece qualquer dano a saúde dos operários (RODRIGUES e MONTARDO, 2002).

Por outro lado, as fibras sintéticas por serem oriundas de uma fonte de energia não renovável as torna pouco atraentes atualmente, em virtude da grande poluição ocasionada pelas altas emissões de dióxido de carbono na atmosfera, decorrentes do seu processo de produção (AWWAD *et al.*, 2010). Uma maior rigidez de leis ambientais está forçando os setores acadêmico e industrial a desenvolverem novos materiais de construção, fabricados com métodos de geração de energia mais limpas e eficiente, permitindo uma maior sustentabilidade ambiental (GRUBEŠA *et al.*, 2018).

Uma opção ao uso das fibras sintéticas é o desenvolvimento de materiais com propriedades semelhantes e adequadas ao uso como reforço estrutural. As fibras naturais vegetais aparecem como uma solução sustentável de reforço fibroso, justamente por serem recursos renováveis, apresentarem grande disponibilidade e custo baixo em comparação com

as fibras sintéticas, que por sua vez exigem um maior consumo de energia e conseqüentemente, um maior custo de produção (TORGAL e JALALI, 2011). A floresta Amazônica possui uma grande biodiversidade, composta pela sua vasta biomassa, onde a exploração sustentável de seus recursos naturais oferece uma possibilidade versátil na obtenção de novos materiais (CAVALCANTE, 2017). Devido a crescente degradação no meio ambiente, o emprego de fibras naturais vegetais como matéria-prima, vem se consolidando como importante material de reforço, contribuindo para a minimização do impacto ambiental, sendo estudada com pesquisas científicas direcionadas para indústria da construção civil e têxtil, entre outras (OLIVEIRA, 2017).

Porém, para se confeccionar um compósito que apresente uma excelente durabilidade, é preciso que a fibra não se deteriore e a metacaulinita quando adicionada a matrizes cimentícias, melhora o desempenho de compósitos reforçados com fibras, preservando as fibras da sua interação com o cimento (LIMA e TOLEDO FILHO, 2008). Estas fibras sofrem degradação muito rapidamente, quando inseridas em matrizes cimentícias, sendo necessário que a matriz apresente baixa alcalinidade e seja livre de hidróxido de cálcio, para garantir a sua durabilidade (SILVA *et al.*, 2010). A substituição parcial do cimento Portland por metacaulinita em pesquisas conseguiram reduzir o teor a praticamente à zero, em virtude da sua alta reatividade com hidróxido de cálcio, durante a hidratação do cimento, deste modo, garantindo a preservação da fibra dentro da matriz. Além de proteger as fibras, a metacaulinita aumenta o teor de finos na matriz cimentícia, com isso as fissuras causadas por retração por secagem nas argamassas autonivelantes diminuem.

Muitas vezes as fibras vegetais necessitam receber um tratamento para melhorar a interação da fibra com a matriz cimentícia e permitir a transferência eficiente de tensão da matriz para o reforço (BELTRAMI *et al.*, 2014; REBELO, 2016). Um tratamento muito usado é o tratamento alcalino, conhecido também por mercerização, que possibilita remover resíduos de extração, além de melhorar o seu desempenho mecânico.

Os compósitos cimentícios reforçados com fibras naturais podem ser empregados em diversas funções dentro da construção civil, tais como placas planas e corrugadas para elemento de cobertura, painéis divisórios, revestimentos externos, argamassas para piso entre outros (OLIVEIRA, 2013).

Portanto, este trabalho teve como finalidade o desenvolvimento e caracterização mecânica de um compósito cimentício fibroso, reforçado com fibras sintéticas de polipropileno

e fibras curtas naturais vegetais de juta e malva, que apresentou elevada fluidez, permitindo a sua aplicação como argamassa autonivelante para piso, ao mesmo tempo que se avaliou o comportamento dessas fibras no combate a retração por secagem.

### **1.1 Justificativa**

O estado do Amazonas é um dos maiores produtores de juta e malva do país, porém o seu cultivo, em áreas alagadiças de várzea por comunidades ribeirinhas, vem diminuindo devido a substituição das fibras naturais vegetais por fibras sintéticas, na produção de sacarias. A desvalorização da produção local de juta e malva, por falta de aplicabilidade desta matéria prima, é um fator que motiva pesquisadores locais a desenvolverem produtos com outras aplicabilidades para as fibras amazônicas, destinados principalmente à construção civil.

Além disso, o desenvolvimento sustentável está crescendo com maior força na indústria da construção e os estudos com matrizes cimentícias reforçadas com fibras naturais são promissores em garantir a melhoria da resistência do compósito, ao mesmo tempo que diminui o impacto ambiental, por utilizar recursos naturais disponíveis (ZAKARIA *et al.*, 2017). O uso de fibras naturais vegetais pode ser uma alternativa viável para a substituição dos produtos à base de fibras de amianto.

Deste modo, a elaboração deste projeto, justifica-se em virtude da necessidade de pesquisas sobre a aplicação de fibras naturais vegetais curtas de juta e malva, produzidas no Amazonas, como elemento de reforço em compósitos cimentícios, destinados a aplicação como argamassas autonivelantes para pisos, tendo em vista que as fibras de polipropileno usadas na construção civil local, em sua maior parte é importada de outras regiões do país. Também é significativo ao colaborar para a sustentabilidade da construção civil, empregando materiais regionais não convencionais, além de contribuir com o agronegócio no interior do estado.

### **1.2 Objetivo Geral**

Este trabalho teve como objetivo geral avaliar o efeito da adição de fibras sintéticas e naturais nas propriedades físico-mecânicas de argamassas autonivelantes para pisos.

### **1.3 Objetivos Específicos**

Para atingir ao objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Produzir e caracterizar uma metacaulinita através de ensaios físico-químicos;
- Caracterizar as fibras de juta, malva e polipropileno a partir de ensaios físicos e químicos;
- Caracterizar o compósito por ensaios físicos-mecânicos.

#### **1.4 Estrutura do Trabalho**

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos descritos a seguir.

O Capítulo 1 apresenta uma breve introdução, descreve os objetivos e a estrutura do trabalho desenvolvido.

No Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico, onde são mostrados conceitos e definições do assunto abordado nesta pesquisa.

O Capítulo 3 é direcionado aos “Materiais e Métodos”, onde são apresentados os materiais e métodos usados no desenvolvimento do compósito, além do plano estatístico adotado para a análise de alguns resultados experimentais.

O Capítulo 4 discorre sobre os resultados obtidos através dos ensaios realizados para a caracterização dos materiais, das fibras, da matriz e das argamassas autonivelantes com adição de fibras e metacaulinita.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas ao término desta pesquisa.

Por último, são mostradas as referências adotadas.

## Capítulo 2 – REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Argamassa autonivelante

A argamassa autonivelante é uma argamassa especial com a capacidade de preencher moldes e formatos, consolidando-se sob seu próprio peso sem qualquer energia de compactação, está sendo amplamente utilizada em países asiáticos nos últimos anos, devido ao aumento do custo de mão-de-obra e da demanda dos clientes (YANG *et al.*, 2016). Porém, no Brasil as argamassas autonivelantes começaram a ser estudadas e foram conceituadas por Nakakura e Bucher (1997). Martins (2009) afirma que as principais propriedades de uma argamassa autonivelante são sua fluidez, moderada viscosidade e coesão entre as partículas constituintes, mostrada na Figura 2.1.



**Figura 2.1** - Alta fluidez da argamassa autonivelante. Fonte: Martins, 2009.

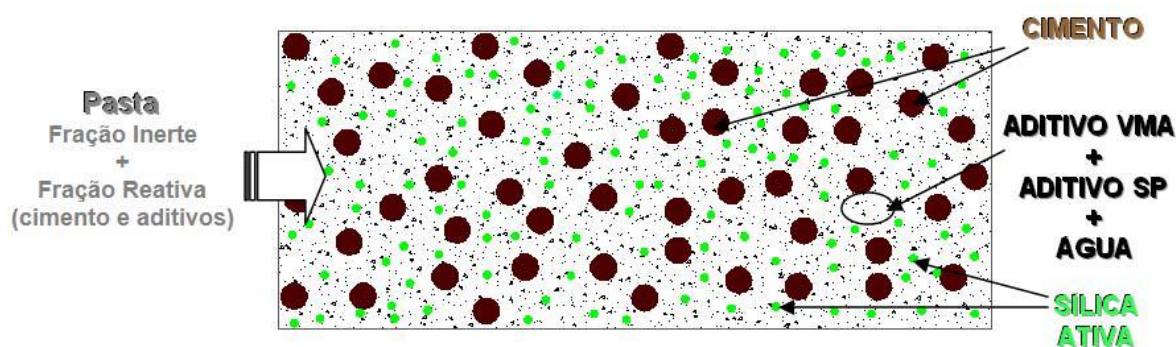
Este tipo de argamassa é reconhecida por suas propriedades no estado fresco (fluidez, coesão e homogeneidade) e no estado endurecido (endurecimento rápido, resistência inicial, compensação de retração, superfície lisa e boa durabilidade), desta forma sendo adequada para uso em vários campos, tais como escolas, hospitais, fábricas, estacionamentos, navios, lojas, apartamentos, prédio de escritórios e assim por diante (SAFI *et al.*, 2013; ONISHI e BIER, 2010; YANG *et al.*, 2019).

O alto custo das argamassas autonivelantes, está relacionado a complexidade da formulação, em virtude da escolha de mais de um tipo de cimento e de muitos tipos de aditivos químicos, mas em referência ao custo de aplicação, esta é consideravelmente mais econômica, por causa da necessidade de pouca mão de obra, e a sua fácil aplicação, além disso, promove

um aumento significativo da produtividade, reduzindo gastos com aplicação (LOPES DA SILVA, 2016). Portanto, o uso desse tipo de argamassa na execução de pisos e contrapisos, proporciona um processo construtivo mais econômico em relação aos métodos convencionais.

Para Lopes da Silva (2016) uma argamassa autonivelante tem uma composição básica semelhante ao concreto auto adensável, isso porque os dois possuem o mesmo princípio de adensamento por ação da gravidade e se caracterizam por uma estrutura cimentícia modificada por aditivos e adições minerais. Segundo Yang *et al.* (2019) a argamassa autonivelante à base de cimento é feita misturando materiais cimentícios, agregados e aditivos minerais, bem como aditivos químicos.

Esse tipo de argamassa é oriunda da argamassa auto adensável, apresentando uma superfície lisa e regular, sendo aceito apenas um desnível de 1 mm a cada 4m de comprimento do elemento estrutural, ao se analisar a sua reologia, nota-se que é uma suspensão de partículas, ou seja, mistura do tipo sólido/líquido onde na qual as partículas são uniformemente distribuídas no meio líquido, a Figura 2.2 representa a sua composição (MARTINS, 2009).



**Figura 2.2** - Microestrutura da pasta autonivelante. Fonte: Martins, 2009.

De acordo com Costa (2007), a concentração de sólidos influencia diretamente o desempenho reológico da argamassa e pastas, devido elas serem misturas granulares suspensas em água. A fluidez exibida pela argamassa autonivelante é gerada pelo elevado afastamento entre partículas maiores, reduzindo o contato entre elas, sendo que esta tendência é possibilitada pelo alto teor de finos usados na composição para conseguir este efeito. Porém, o elevado teor de finos e a alta fluidez podem ocasionar alguns problemas práticos como a dificuldade de controlar o tempo de pega, predisposição a segregação, necessidade de controle da retração por secagem e a dificuldade da saída de água (MARTINS, 2009).



Quanto a fluidez das argamassas autonivelantes, Nakakura e Bucher (1997) ao avaliarem a fluidez, afirmaram que as consistências para as aplicações das argamassas autonivelantes, obtidas através do cone de Kantro (Kantro, 1980), devem ser de 130 a 140 mm de diâmetro em material para regularização e de 160 a 165 mm para argamassas de acabamento. Sendo que nesta pesquisa, foi considerada a aplicação da argamassa autonivelante como uma camada de regularização.

Em relação ao estado endurecido, Nakakura e Bucher (1997) sugerem limites de resistência, fundamentado na norma brasileira para produção de pisos, com as seguintes indicações:

- Resistência à compressão: 25 a 35 MPa;
- Resistência à tração na flexão: 8 a 11 MPa;
- Resistência ao arrancamento por tração:
  - Pisos residenciais: 1 MPa (cura de 28 dias), 0,5 MPa (cura de 28 dias com 10.000 ciclos de passagem de carga de 25 N);
  - Pisos de locais públicos e indústrias leves: 2,0 MPa (após 28 dias de cura ao ar) e de 1,0 MPa (28 dias de cura e mais 10.000 aplicações de carga de 250 N com rodízios);
  - Pisos industriais submetidos à ação de rodas maciças de carregadeiras: > 3,0 MPa (28 dias de cura e mais 10.000 aplicações de 2.000 N).
- Resistência à abrasão (pelo método de ensaio de abrasão na máquina de Böhme): 6,0 cm<sup>3</sup>/50 cm<sup>2</sup> ou 1,2 mm de espessura;

Segundo Lopes da Silva (2016), as argamassas autonivelantes no estado endurecido, devem possuir uma superfície pouco porosa, para aplicação como piso acabado, em virtude de estar exposto ao meio externo, estando assim sujeito a agentes agressivos, tais como a limpeza do piso, intempéries e desgaste por abrasão decorrente do tráfego de equipamentos, ou maquinários, e pessoas. A diminuição da porosidade pode ser solucionada com a adições minerais.

Já a retração é um dos principais motivos do aparecimento de fissuras, sendo um problema em argamassas autonivelantes aplicadas em pisos, em virtude de possuírem uma

relação alta entre espessura e área aplicada do material, potencializando os efeitos de retração pela susceptibilidade de perda rápida de água para o meio externo e para o substrato. Por outro lado, a fim de obter excelentes desempenhos, uma grande quantidade de água-cimento e cimento pode ser adotada na proporção de mistura do material, o que também aumenta o risco de segregação, estratificação e fissuração da argamassa (ONISHI e BIER, 2010).

Em sua pesquisa, Souza *et al.* (2013), constatou a presença de fissuras logo nas primeiras idades, desta maneira, comprovando a intensidade do processo de retração do material, devido ao alto consumo de cimento na formulação. Os grãos de cimento, quando presentes em grandes quantidades, aceleram a formação dos hidratos, que por sua vez, possuem um tamanho menor, gerando a retração total do material, logo criam-se fissuras, por causa da incapacidade do mesmo de resistir a esse movimento interno da estrutura.

No contexto nacional, apesar do grande interesse de pesquisadores e construtoras na utilização da argamassa autonivelante, no Brasil ainda não existem normas regulamentadoras, sendo que as prescrições normativas e a tecnologia usada pelas construtoras são fundamentadas em métodos de outros países, os quais desconsideram características dos materiais aqui utilizados, além disso os procedimentos de dosagem não são normatizados, situação que dificulta a expansão do uso do material no país (CHAVES, 2019).

Abaixo serão expostos os principais materiais que compõem uma argamassa autonivelante:

### **2.1.1 Cimento**

Segundo Lopes da Silva (2016), para se obter uma argamassa autonivelante é necessário utilizar cimento Portland de alta resistência inicial (de 25 a 50% da massa total) e o restantes 10 a 15% da massa devem ser formados pelos aditivos químicos e adições minerais, mas Martins (2009) afirma que não existe a especificação de um determinado cimento a ser utilizado, sendo o cimento Portland mais usado por ser facilmente produzido e comercializado no Brasil. Porém, com relação ao teor de finos, os cimentos que possuem mais finos em sua composição proporcionam a maior rapidez nas reações de hidratação, tornando a argamassa mais propensa ao processo de retração e a consequente fissuração. Outra questão está relacionada ao alto consumo de cimento, pois quando o cimento Portland é usado como único material cimentício para preparar a argamassa autonivelante, é muito comum ocorrer

fissuramento e ondulações na superfície e nos cantos, gerado pela lenta taxa de hidratação menor resistência inicial e severa contração do cimento (ZHANG *et al.*, 2018).

### **2.1.2 Agregados**

De acordo com Martins (2009), a granulometria do agregado miúdo é responsável pela coesão e viscosidade da argamassa, portanto é recomendado o emprego de agregados com curvas granulométricas contínuas, pois agregados com frações mais grossas tendem a aumentar a viscosidade da matriz. Os agregados mais grossos atuam como obstáculo aumentando a viscosidade da argamassa, enquanto os com grãos pequenos agem como pasta lubrificante melhorando o fluxo (KATSIADRAMIS *et al.*, 2010). Em sua pesquisa Benabed *et al.* (2012) ao comparar o efeito de diversos tipos de areia nas propriedades das argamassas autonivelantes, chegaram à conclusão de que areias com baixo módulo de finura, demandaram mais água na mistura para atingir uma elevada fluidez e viscosidade.

### **2.1.3 Adições minerais**

Segundo Lopes da Silva (2016), o cimento pode ser substituído por adições minerais reativas, tais como cinzas volantes, metacaulinita ou escória de alto forno, promovendo a redução do custo do material, devido as partículas das adições terem tamanho médio entre as partículas de agregado miúdo e cimento promovendo o efeito fíler de preenchimento dos vazios, além desses materiais finos, atuarem na quebra da inércia do sistema, proporcionando a rápida reação das partículas de cimento com a água.

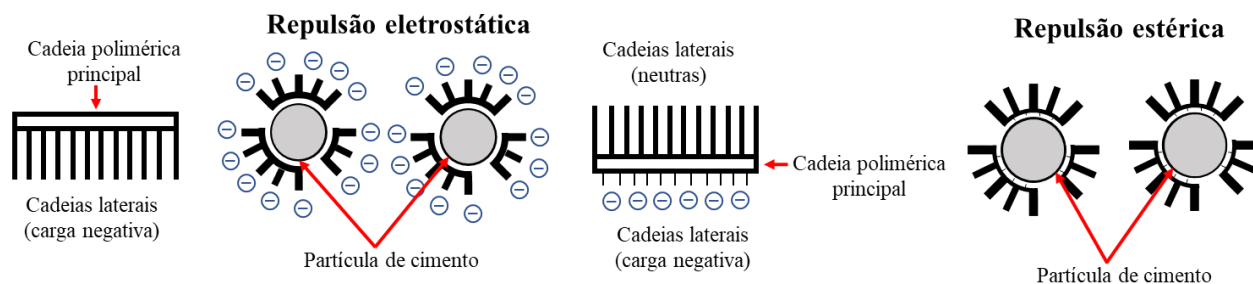
Para Benabed *et al.* (2012) a adição de finos melhora o desempenho das argamassas, quanto a resistência à compressão e flexão, além de diminuir a permeabilidade, absorção e porosidade. Desta forma, o uso das adições minerais já está bem consolidado, pois aumentam o adensamento das misturas de concreto, sem aumentar seu custo, enquanto reduz a dose de superplastificante necessária para obter um fluxo de espalhamento similar ao concreto feito com somente cimento Portland (DINAKAR *et al.*, 2013). Entretanto, o excesso de finos requer maior consumo de água em função do aumento da área específica, por outro lado, essa adição de água diminui a resistência da argamassa.

### 2.1.4 Aditivos químicos

Em argamassas autonivelantes é imprescindível a utilização de aditivos químicos, para obtenção das características reológicas desejadas. O aditivo superplastificante (SP) proporciona uma fluidez adequada, além de reduzir a tensão de escoamento, pois promovem a dispersão dos grãos, já o aditivo promotor de viscosidade auxilia na estabilidade da mistura. (MARTINS. 2009). Nesta pesquisa, utilizou-se apenas o aditivo superplastificante.

O uso de aditivos superplastificantes é comum na produção de concreto, especialmente quando são necessários: aumento da trabalhabilidade e resistência à compressão, e redução da relação água / cimento, sendo empregado na produção de concreto e argamassas de alto desempenho e autoadensável (SILVA *et al.*, 2019). Esse tipo de aditivo é a base de policarboxilatos, desta forma promovendo uma melhor dispersão das partículas de cimento, em decorrência das partículas de cimento adsorverem as partículas dos superplastificantes que por sua vez possuem base polimérica.

Segundo Tutikan e Dal Molin (2008), as cargas negativas do cimento são aumentadas pelos polímeros, ocorrendo uma dispersão por repulsão elétrica das partículas, diminuindo assim a quantidade de água necessária para fluidificar a pasta. Além de atuarem por repulsão eletrostática, agem na forma de repulsão estérica, porque em vários pontos da cadeia principal existe uma ramificação de uma cadeia longa que promove um forte efeito dispersante, como mostrado na Figura 2.3, ajudando os grãos a se dispersarem melhor na água e, assim, melhora a eficiência da hidratação (KATSIADRAMIS *et al.*, 2010).



**Figura 2.3** - Esquemática da ação da molécula de superplastificante. Fonte: Adaptação de Borsoi *et al.*, 1999.

Portanto, cria-se uma espécie de capa de adsorção de grande volume, empalhando a aproximação das partículas de cimento, por causa do impedimento do entrelaçamento das cadeias laterais das moléculas dos diferentes aditivos do composto. Entretanto, em alguns casos

o aditivo acaba por aglomerar as partículas, em virtude da incompatibilidade da composição química entre o aditivo e o cimento, sendo que o excesso de dosagem do aditivo promove a segregação e exsudação na mistura, por outro lado a falta do aditivo, faz com que o mesmo não seja eficaz na dispersão das partículas (LOPES DA SILVA, 2016).

A dosagem de superplastificante depende de vários fatores: tipo de cimento, forma e dimensão dos finos, relação a/c, marca do aditivo, compatibilidade entre cimento e superplastificante, bem como a temperatura e umidade dos materiais e do meio ambiente. Existe uma dosagem ótima de superplastificante para cada tipo de composição, e por muitas vezes, existem diferenças daqueles propostos pelo fabricante (SILVA *et al.*, 2019). A determinação da dosagem ótima de superplastificante é geralmente realizada em testes com pastas de cimento, considerando que a principal ação é sobre as partículas de cimento e adições. Conforme Rubin (2015) a adição de aditivos superplastificante não possui influência sobre a resistência mecânica das argamassas autonivelantes.

## **2.2 Fenômeno da retração em argamassas autonivelantes**

A retração pode ser definida como uma variação volumétrica ocasionada por alterações de umidade e por reações químicas e físicas entre o esqueleto sólido e a solução de poro WITTMAN (2008). Para Itim *et al.* (2011), o encolhimento acontece em condições climáticas consideradas seca, como baixa umidade e alta temperatura, enquanto o inchaço ocorre em um ambiente saturado com umidade elevada. A previsão de deformações em argamassas autonivelantes é fundamental para o estudo da sua durabilidade e de seu bom funcionamento a longo prazo.

A variação dimensional em argamassas autonivelantes depende de vários parâmetros, como a composição do concreto, a qualidade de seus componentes, o tamanho dos elementos, as condições de cura, adições minerais que substituem uma parte do cimento, reações químicas de hidratação do cimento, tensão superficial da água e variações de volume do material do estado plástico para estado endurecido e estão diretamente relacionadas com a resistência à compressão (ONISHI E BIER, 2010; ITIM *et al.*, 2011).

Os principais tipos de retração que ocorrem em argamassas são a retração autógena, relacionada as deformações originadas durante o processo de hidratação do cimento sem interferências de umidade com o ambiente externo e a retração por secagem, pode ser definida como deformações formadas pela troca de umidade entre a estrutura porosa da pasta e o

ambiente externo, onde ambas formam-se ao longo do tempo sem a presença de carregamentos externos (VELASCO, 2008; CARVALHO, 2015). A evaporação e a reação de hidratação intensa causadas pela construção em larga escala de argamassa autonivelante levam a retração por secagem significativa e retração química, respectivamente (YANG *et al.*, 2019).

### **2.2.1 Retração autógena**

A retração autógena é variação dimensional oriunda do processo de hidratação do cimento, onde as fissuras por retração autógena acontecem durante a remoção da água presente nos poros capilares para a formação dos produtos de hidratação, restringindo-se pelo volume sólido e pela presença de agregados, sendo que o concreto apresenta menor retração autógena que as pastas de cimento (VELASCO, 2008). De acordo com Carvalho (2015), a retração autógena advém das reações de hidratação do cimento, sendo influenciada pela quantidade de água disponível na mistura, deste modo, relaciona-se com o fator água cimento e com os tipos de aglomerantes utilizados.

Durante o processo de hidratação, a água nas misturas é gradualmente substituída pelos produtos de hidratação levando a uma redução da umidade relativa na microestrutura, sendo que a diminuição da umidade relativa leva a um aumento na pressão dos poros capilares, causando deformações de contração autógena no esqueleto sólido do produto de hidratação. (WEHBE e GHAHREMANINEZHAD, 2017).

Uma maneira de avaliar a retração autógena é a quantificação da água perdida durante o processo de cura, que desenvolvem pressões capilares medidas com sensores de pressão e os deslocamentos da superfície do concreto nas direções vertical e horizontal, sendo este método semelhante ao utilizado por Silva (2007) para medição da retração autógena.

### **2.2.2 Retração por secagem**

A retração ou encolhimento por secagem pode ser definida como a mudança volumétrica devido à secagem da argamassa, sendo que a mudança no volume da argamassa está relacionada à perda de água da matriz, porém esta mudança não é igual ao volume da água perdida (YANG *et al.*, 2019). Para Silva (2007) a retração causada pela evaporação da água nas faces expostas dos elementos estruturais, iniciada depois de alcançado o patamar de percolação, é denominada como retração plástica, porém pode ser chamada também de retração por

secagem, pois quando o concreto ou argamassa se retraem, este é um comportamento de sólido e ao perder água para o meio externo ocorre o mecanismo de secagem.

Durante a retração por secagem, a perda de água livre ocorre primeiro, isso faz com que ocorra pouco ou nenhum encolhimento. Conforme o processo de secagem da argamassa continua, a água adsorvida mantida pela tensão hidrostática em pequenos capilares (<50 nm) é diminuída significativamente, logo em seguida, a perda de água livre e água adsorvida produzem tensões de tração, que obrigam a argamassa a encolher, causando fissuras (GÜNEYISI *et al.*, 2010).

A secagem das superfícies da argamassa durante as horas iniciais, logo após a concretagem pode levar a uma perda de água muito pronunciada devido à alta permeabilidade no estado fresco, sendo que a retração por secagem pode ocasionar fissuras que se propagam facilmente devido à baixa resistência da argamassa, prejudicando o seu desempenho, e conseqüentemente, exigindo reparos caros. Além disso, na condição de secagem, um alto teor de cimento aumenta a retração por secagem e deteriora o desempenho da argamassa (ZHANG *et al.*, 2015).

Entretanto, para se obter uma boa fluidez e excelentes desempenhos, uma grande quantidade de água-cimento e cimento podem ser adotadas na proporção de mistura do material, aumentando desta forma o risco de segregação, estratificação e fissuração da argamassa, além do risco de fissuras por retração por secagem elevar-se com o aumento das taxas de evaporação, isto é, para superfícies expostas em condições de alta velocidade do vento, alta temperatura e baixa umidade relativa (WYRZYKOWSKI *et al.*, 2015).

De acordo com Wyrzykowski *et al.* (2015), as estratégias estabelecidas contra o fissuramento por retração por secagem podem ser geralmente divididas em soluções ativas e passivas. As soluções ativas visam limitar a perda de água por umedecimento da superfície com água, aplicando compostos de cura que limitam a evaporação, cobrindo a superfície com folhas de plástico ou sombreando os elementos do sol e / ou do vento, ou seja, diminuindo as intempéries. Um exemplo de solução passiva, consiste em projetar misturas de concreto com menor risco de fissuração por retração por secagem, que frequentemente inclui fibras tanto sintéticas (polipropileno), quanto naturais (juta e malva), aditivos redutores de contração e também a cura interna por meio de agregados leves (QI *et al.*, 2003; BANTHIA e GUPTA, 2006; BENTZ, 2006; LEEMANN *et al.*, 2014; LURA *et al.*, 2007; HENKENSIEFKEN *et al.*, 2010).

Conforme Wyrzykowski *et al.* (2015), o desempenho destes diferentes métodos e a sensibilidade de uma determinada composição de mistura ao fissuramento por retração por secagem são geralmente avaliados em um teste, onde uma amostra é exposta a condições de evaporação rápida e formação de rachaduras na superfície, frequentemente provocada por moldes altamente restritivos, é quantificado, similarmente ao realizado no ensaio de variação dimensional de acordo com a NBR 15261 (ABNT, 2005). Durante o teste, a perda de água da superfície pode ser seguida pela pesagem da amostra de secagem.

Nesta pesquisa, optou-se por avaliar a variação dimensional gerada pela retração por secagem, pois a avaliação da retração autógena é muito complexa, quando comparada com a anterior.

### **2.3 Fibras aplicadas a compósitos cimentícios**

As fibras são uma classe de material parecido ao cabelo sendo curto ou alongado, semelhante a pedaços de fio. Eles podem ser transformados em filamentos ou cordas sendo produzidos a partir de animais ou plantas. Esses materiais foram usados há séculos em vários processos, como roupas e o uso mais antigo encontrado neste material está no comércio de edifícios (JARAMILLO *et al.*, 2016).

A adição de fibras em compósito cimentício tem como principal finalidade melhorar as propriedades mecânicas tais como a resistência à tração, durabilidade, dureza e ductibilidade das estruturas, sendo encontrado em revestimentos de túneis, em radiers, pisos industriais, lajes e até em vigas. (AGOPYAN *et al.*, 2005; JAMERAN *et al.*, 2015). As fibras são muito eficazes e úteis quando são dispersas homoganeamente em concreto ou argamassas e usadas em quantidades adequadas (KARAKURT e ARSLAN, 2017). Segundo Quinino (2015), a inserção de filamentos em matrizes cimentícias é eficiente quando se considera a distribuição uniforme das fibras pela pasta de cimento, o fator de forma e o teor ótimo de adição das mesmas. Sendo estes parâmetros atendidos, os compósitos são mais deformáveis, possuem maior tenacidade e, conseqüentemente, maior módulo de elasticidade. (CHRIST, 2014).

A fibra de amianto foi o primeiro compósito adicionado ao cimento, esse material ainda é muito utilizado em países em desenvolvimento, devido ao seu baixo custo e bom comportamento mecânico. Em países industrializados ela é proibida por causa dos elevados riscos de danos à saúde humana e animal. Decorrente a todos esses perigos, o interesse mundial em substituir as fibras de asbestos por fibras vegetais cresceu, principalmente devido à sua

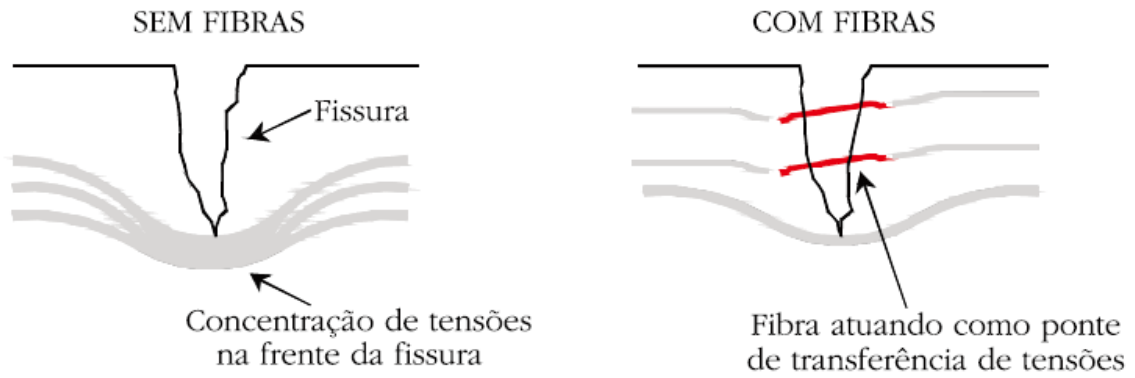


disponibilidade, baixo custo, biodegradação e baixo consumo energético de produção quando comparado com as fibras manufaturadas (LIMA e TOLEDO FILHO, 2008). Ao longo dos anos, os compósitos cimentícios foram melhorados e o uso de fibras vegetais como um reforço da matriz de cimento é um exemplo. As principais vantagens sobre o uso provêm do baixo custo de obtenção e suas características são próprias do uso como reforço de materiais frágeis (MOSTAFA e UDDIN, 2016).

Para Bentur e Mindess (2007), em compósitos reforçados com fibras, a fibra desempenha seu principal papel na zona pós-fissuração, na qual as fibras se cruzam sobre a matriz fissurada. O tipo, a distribuição, a relação comprimento-diâmetro e a durabilidade da fibra, assim como o seu grau de aderência com a matriz, determinam o comportamento mecânico do compósito e o desempenho do componente fabricado (SAVASTANO JÚNIOR e SANTOS, 2008).

A capacidade de absorção de energia do compósito cimentício e o aumento da sua ductilidade e a parada da progressão da fissura são as propriedades mais importantes que as fibras dão ao compósito. Em geral, à medida que o comprimento e a quantidade da fibra aumentam, as capacidades de absorção de energia dos compósitos em placas também aumentam. Embora as fibras não afetem significativamente a resistência máxima à fratura, o recurso de aumento de energia é elevado em quantidades significativas (KARAKURT e ARSLAN, 2017).

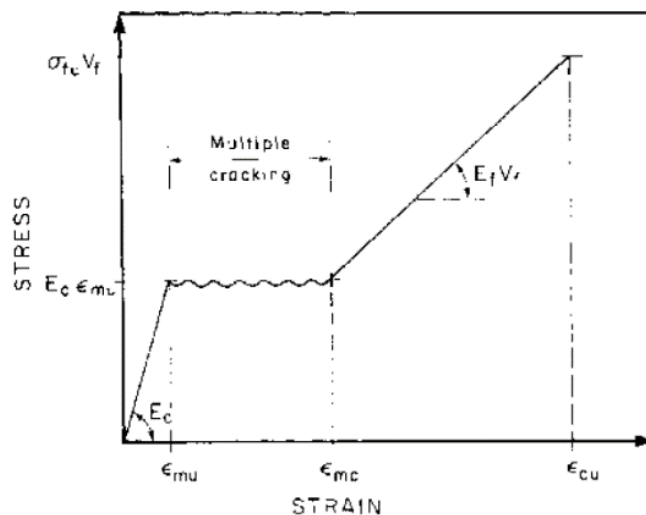
Em um composto bem projetado, as fibras podem possuir duas funções. A primeira é a capacidade de aumentar a força do compósito em relação ao da matriz, fornecendo um meio de transferir tensões e cargas entre as fissuras, implicando numa curva de tensão-deformação ascendente após a primeira fissuração, sendo esse comportamento chamado de endurecimento por tensão. A segunda, e mais importante, é a habilidade de aumentar a tenacidade do compósito, fornecendo mecanismos de absorção de energia, relacionados aos processos de descolagem e extração das fibras que fazem a ponte entre as fissuras, isso ocorre mesmo quando a curva de tensão-deformação é descendente após a primeira fissura (referida como suavização de tensão), isso pode ser exemplificado na Figura 2.4 (BENTUR e MINDESS, 2007).



**Figura 2.4** - Mecanismo de reforço da fibra atuando como ponte de transferência de tensões. Fonte: Nunes e Agopyan, 1998.

Segundo Bentur e Mindess (2007), o comportamento mecânico global do compósito cimentício reforçado com fibras, geralmente pode ser descrito em termos dos três estágios do estresse de tração versus curva da Figura 2.5 (o modelo ACK):

- 1) "Alcance Elástico", até o ponto da primeira rachadura, a matriz e as fibras estão em sua faixa elástica linear.
- 2) "Múltiplas fissuras", em que a deformação composta excedeu a deformação final da matriz.
- 3) Faixa "pós-múltiplas fissuras", durante a qual as fibras estão sendo esticadas ou retiradas da matriz trincada.



**Figura 2.5** - Descrição esquemática da curva de tensão-deformação, com base no modelo ACK. Fonte: Bentur e Mindess, 2007.

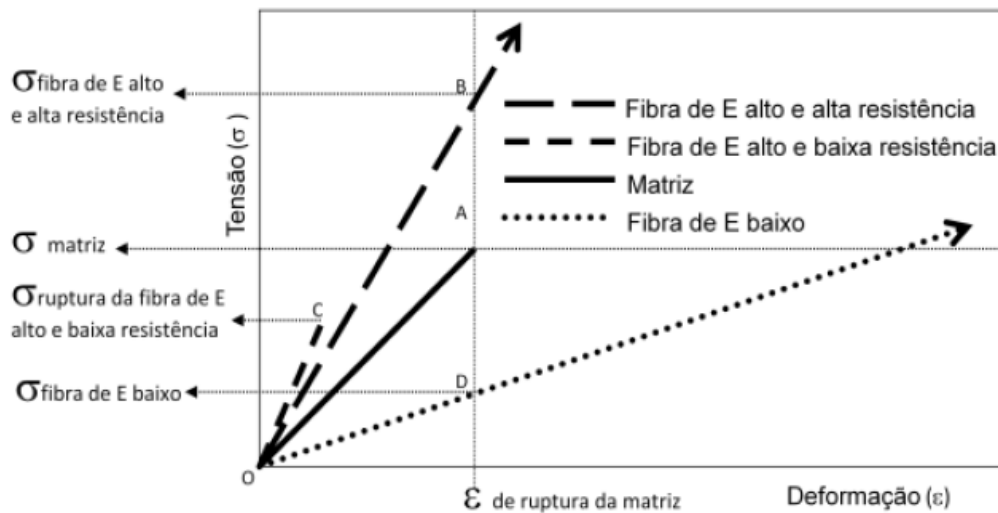
Na verdade, as fibras não impedem a formação de rachaduras nos compósitos, mas são capazes de aumentar a resistência à tração e controlar a propagação de fissuras. Quando a

primeira fenda aparece em um compósito sem a adição de fibras, sua abertura progressiva faz com que a matriz colapse. No entanto, em compósitos com fibras, esta fratura será atrasada. A ruptura torna-se um processo progressivo, para as pontes de transferência formadas pelas fibras que absorvem parte dos pedidos e resultam em uma quebra mais distribuída. O uso de fibras vegetais como material de reforço para concreto, resultou em benefícios em muitos aspectos, no entanto, é necessário consolidar este estudo (FERREIRA *et al.*, 2017).

Para Salvador (2013) a atuação das fibras em matrizes cimentícias é diferente no estado fresco e no estado endurecido. Em relação ao estado fresco, quando a fibra é misturada a matriz cimentícia, isso ocasiona na redução de trabalhabilidade, justificada pela sua geometria dificultar a mobilidade dos agregados, sendo que este fator é inversamente proporcional ao comprimento da fibra, ou seja, quanto maior o teor de fibras e mais compridas elas forem, menos adensável este compósito será. Já para o estado endurecido, as fibras interagem com a matriz no nível das microfissuras, proporcionando meios de transferências de tensões, de forma que a propagação dessas microfissuras seja retardada, e quando se atinge a resistência do compósito e as microfissuras forem formadas, as fibras podem restringir a abertura e crescimento dessas microfissuras.

Em sua pesquisa, Figueiredo (2011b) afirma que as principais propriedades que influenciam a capacidade de reforço que a fibra pode conferir são sua resistência mecânica e seu módulo de elasticidade, por isso essas propriedades ajudam no processo de escolha do tipo de fibra a ser utilizada na matriz cimentícia. Tendo este princípio, as fibras destinadas ao reforço de compósitos, podem ser caracterizadas como de alto ou baixo módulo, se tiverem módulo de elasticidade superior ou inferior ao do compósito cimentício endurecido, respectivamente, e alta ou baixa resistência mecânica.

Visando demonstrar a importância desse aspecto Figueiredo (2005a) elaborou um esquema simplificado, no qual simula uma matriz hipotética reforçada com os três tipos de fibras em condições de comportamento perfeitamente elástico, relatando que, o nível de tensão que uma fibra de baixo módulo pode suportar é inferior à tensão de ruptura da matriz, conforme a Figura 2.6. Então, para que essa fibra apresente capacidade de reforço adequado e consiga controlar a abertura da fissura, seu teor deve ser alto, para que a tensão por fibra não exceda sua tensão de ruptura. Já a utilização de fibras de alto módulo e de baixa resistência mecânica pode não conferir capacidade de reforço pós-fissuração ao compósito, pois estas são frágeis e têm baixa capacidade de deformação elástica.



**Figura 2.6** - Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto. Fonte: Figueiredo, 2005a.

No momento em que ocorre a ruptura da matriz, já foi ultrapassado o limite último de deformação da fibra e, mesmo com altos teores, as fibras já terão sido rompidas antes da matriz. As fibras de alto módulo e alta resistência mecânica apresentam elevado nível de tensão no momento em que a matriz atinge sua deformação crítica, um exemplo desse tipo de fibra são as fibras de aço, que quando estão sob a influência do estresse e das forças de tração, evitam um grande número de microfissuras (SIMSEK, 2016). Esse tipo de fibra proporciona um elevado nível de reforço quando a matriz se rompe, mesmo quando utilizada em baixos teores, contanto que sua resistência não seja superada.

As fibras utilizadas em compósitos cimentícios também podem ser classificadas em: macrofibras quando o comprimento da fibra excede duas vezes o tamanho máximo do agregado gráudo e seu diâmetro é muito maior que o diâmetro dos grãos de cimento; e microfibras quando o diâmetro da fibra é o mesmo dos grãos de cimento e seu comprimento é menor que o tamanho máximo do agregado (DIAS, 2018).

Segundo Figueiredo (2011b), as macrofibras são destinadas ao reforço do concreto e podem ser de aço ou poliméricas. O emprego das microfibras, poliméricas no geral, não enfoca o reforço do compósito, uma das suas aplicações é na proteção do concreto contra incêndio e na redução da fissuração, especialmente as oriundas de retração (TAMAKI, 2011).

As fibras ainda podem ser classificadas de outras formas. Segundo Naaman (2003), a classificação pode ser baseada no material da fibra (natural orgânica, natural mineral e sintética), nas propriedades químicas e físicas (densidade, rugosidade superficial, estabilidade

química, reatividade com a matriz e resistência ao fogo) e nas propriedades mecânicas (resistência à tração, módulo de elasticidade, rigidez e ductilidade).

Para Góis (2010), as propriedades do concreto reforçado com fibras dependem de vários fatores, entre eles:

- a) Teor de fibras adicionadas no concreto;
- b) Características geométricas das fibras;
- c) Orientação e distribuição das fibras dentro do concreto;
- d) Relação de aspecto ou fator forma (LF/DF) das fibras;
- e) Resistência da matriz de concreto e tensão de aderência entre as fibras e a matriz;
- f) Relação entre dimensão máxima do agregado e comprimento da fibra.

Os pesquisadores afirmaram que os compósitos cimentícios reforçado com fibra de aço e polipropileno apresentam maior resistência do que os compósitos simples, tais como altas durezas superficial e maior resistência à compressão. É afirmado que no teste de abrasão feito no mesmo trabalho, o compósito reforçado com fibra sofreu menos perdas de abrasão (CAN *et al.*, 2009).

Apesar do grande interesse sobre a potencialidade do uso de fibras vegetais na indústria da construção, é preciso garantir a sua durabilidade no ambiente alcalino do cimento (LIMA e TOLEDO FILHO, 2008). A baixa durabilidade causada pela degradação de fibra natural no ambiente alcalino-mineral de cimento, que esgota o efeito de reforço da fibra, muitas vezes é considerado um problema que precisa ser evitado. Essa tem sido a questão central que precisa ser resolvida antes de promover a aplicação generalizada de fibras naturais em vários compósitos (WEI e MEYER, 2015).

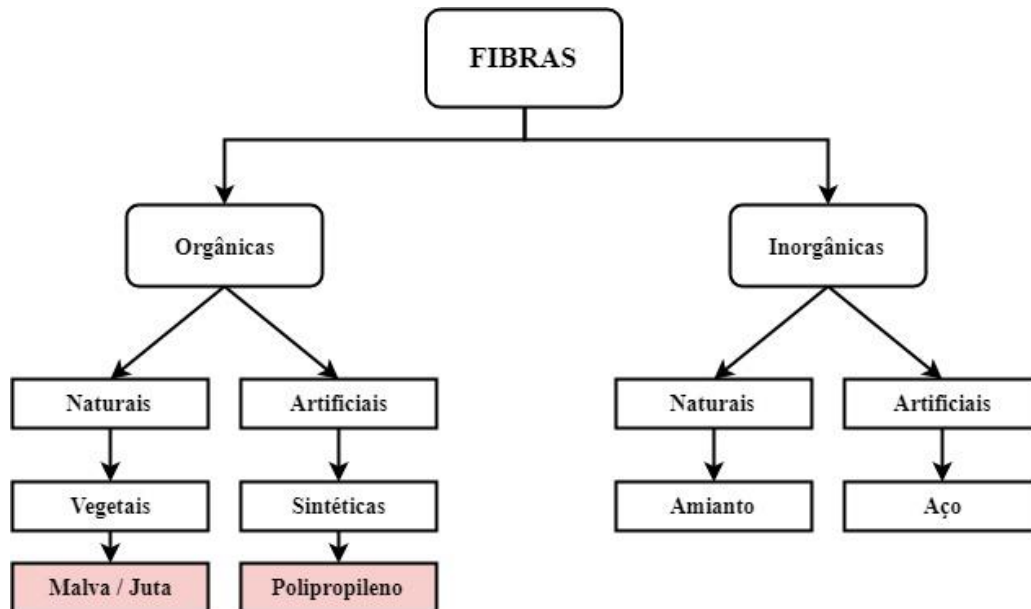
A perda precoce de resistência mecânica do compósito é associada ao enfraquecimento da fibra vegetal, ocorrida por causa do ataque alcalino, mineralização da fibra, em razão da migração do hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$  ou CH) para o lúmen e a parede das fibras, e da variação de volume das fibras com a absorção de água. Com o intuito de garantir a durabilidade dos compósitos reforçados com fibras vegetais, algumas técnicas de tratamento têm sido propostas, tais como impregnação da fibra com substâncias bloqueadoras e repelentes de água, selagem da matriz (diminuição da quantidade e do tamanho dos poros bem como da sua interconectividade) ou modificação da matriz por meio do uso de cimentos com alto teor de alumina ou com a adição de materiais pozolânicos, como sílica ativa, metacaulinita, cinza volante ou escória (LIMA e TOLEDO FILHO, 2008).

O uso de fibras sintéticas e naturais, como a de polipropileno e de origem vegetal, é vantajoso em relação aos demais tipos de fibras como as metálicas e de vidro, pois essas não sofrem processo corrosivo e tampouco são atacadas pelo meio alcalino do cimento (BENTUR e MINDESS, 2007; LOPES DA SILVA, 2016). As fibras sintéticas não estão sujeitas ao ataque de organismos xilófagos, por não terem a mesma característica orgânica natural das fibras de juta e malva, mas em compensação estas se degradam em meio alcalino, desta forma sendo necessário um tratamento alcalino nestas fibras ou diminuir a alcalinidade da matriz cimentícia com substituição do cimento (LOPES DA SILVA, 2016). Além disso, a adição de fibras em matrizes cimentícias, proporcionam o aumento da tenacidade e da resistência mecânica do material (CAMPELLO, 2013).

Em contrapartida, a adição de fibras em compósitos cimentícios e até mesmo a substituição do cimento, aumentam a resistência ao escoamento do fluido, tornando-se indispensável um estudo do teor de ótimo do aditivo para redução das fissurações da argamassa autonivelante, geradas pela retração por secagem, sem que prejudique a sua fluidez.

## **2.4 Classificação das fibras**

Segundo Silva (2002), de acordo com a sua composição as fibras podem ser classificadas em orgânicas e inorgânicas, que se subdividem em natural e artificial. Um exemplo de fibra orgânica natural e artificial é a fibra de celulose e a fibra de PVA, respectivamente, já em relação a fibra inorgânica natural e artificial pode-se citar como exemplo a fibra de amianto e a fibra de aço, respectivamente. Neste trabalho, denominou-se fibra orgânica natural aquela proveniente de vegetais que não passou por processo industrial antes de seu emprego como reforço, tais como fibras de malva e juta. Uma subdivisão das fibras artificiais são as fibras sintéticas que são originadas a partir do petróleo, sendo um exemplo as fibras de polipropileno e PVA (ROMERO *et al.*, 1995; SILVA, 2002). Quanto a fibra inorgânica natural e artificial pode-se citar como exemplo a fibra de amianto e a fibra de aço, respectivamente, porém não serão abordadas neste artigo. Na Figura 2.7 é mostrada esta classificação das fibras, sendo que as fibras que estão em destaque são temas desta pesquisa.



**Figura 2.7** - Classificação das fibras. Fonte: Adaptado de Silva (2002) que referencia Zhu (1993).

Além desta classificação, as fibras podem ser classificadas conforme a sua elasticidade, em fibras de baixo e alto módulo, diferindo, assim, suas aplicações. As fibras de alto módulo são aplicadas para melhorar a resistência do compósito, principalmente à tração, enquanto as de baixo módulo proporcionam melhores resistências ao impacto e permitem ao compósito trabalhar no estágio pós-fissurado (AGOPYAN, 1991).

As fibras sintéticas é um subgrupo das fibras orgânicas artificiais, são produzidas a partir de resinas derivadas do petróleo e surgiram após a Segunda Guerra Mundial, de origem petroquímica, começaram a ser produzidas pela indústria têxtil no Brasil em 1955, pela Rhodia. (ROMERO *et al.*, 1995).

As fibras orgânicas naturais geralmente são de origem vegetal, obtidas de diferentes partes das plantas, podendo ser oriundas do caule, folhas, sementes ou frutos das plantas. As fibras obtidas do caule são formadas por feixes de fibras, cada um contendo fibrocélulas individuais ou filamentos, como exemplo temos as fibras de juta, linho, cânhamo. As fibras das folhas, como o sisal e a banana, possuem diâmetro superior aos das fibras provenientes do caule. O algodão é um exemplo de fibra de sementes e a fibra de coco de fibra proveniente do fruto. Há ainda outras fontes de lignocelulose, que pode ser obtida através de resíduos agrícolas, como a casca de arroz, casca da semente de girassol e do bagaço da cana de açúcar (THOMAS *et al.*, 2011; FIDELIS, 2014).

As principais desvantagens associadas ao uso de fibras artificiais são seu custo relativamente alto e degradação do meio ambiente. Os compósitos de cimento reforçados com fibra natural são os mais adequados para a construção resistente ao terremoto, ao chão de base para máquinas em fábricas, fabricação de telhados e tábuas de tijolo leve e de teto, gesso e materiais de construção para habitação de baixo custo (ZAKARIA *et al.*, 2017).

#### **2.4.1 Fibras de Polipropileno**

A indústria do petróleo permitiu o desenvolvimento dos polímeros (TEIXEIRA, 2015). A partir da década de 1930 o petróleo tem sido a principal fonte de matéria-prima para a fabricação de produtos químicos orgânicos, tais como plásticos, fibras, borracha e adesivos (RODRIGUES e MONTARDO, 2002). No ano de 1966, a empresa “*Shell*”, desenvolveu e patenteou o processo de fabricação de fibras de polipropileno para utilização em concreto. Esta invenção refere-se a composições de moldagem de polímero de propileno reforçado com fibras inorgânicas. Mais especificamente, relaciona-se a tais composições, que exibem geralmente alta resistência à flexão e módulo. Tais fibras encaixam-se nesta aplicação muito bem devido à sua relação muito forte para peso, que excede a do aço (PAUL JUNIOR, 1966).

Segundo Kumar (2013), os tipos mais comuns de fibras de polipropileno são: monofilamento, multifilamento e fibriladas. As duas primeiras são fabricadas por extrusão, com diâmetros nominais entre 10 – 40  $\mu\text{m}$ . As monofilamentos são fabricadas de um único filamento e as multifilamentos da combinação de vários. Já as fibriladas são fabricadas em forma de filmes e utilizadas de maneira que podem ser expandidas em redes abertas. Os diversos tipos de fibras podem ser confeccionados com o comprimento desejado, comumente ente 3 – 20 mm. A Figura 2.8 ilustra uma fibra de polipropileno fabricada pela “Maccaferri do Brasil Ltda.”.



**Figura 2.8** - Fibra de polipropileno. Fonte: Maccaferri do Brasil Ltda., 2008.



O compósito fabricado com fibra de polipropileno é um material de construção embrionário, que pode ser descrito como um compósito com alta resistência mecânica, rigidez e durabilidade. Através da utilização de fibras de polipropileno, não só a melhor utilização dos materiais é alcançada, mas também a redução do custo. (MADHAVI *et al.*, 2014). As fibras de polipropileno agem como uma malha de finos filamentos de seção circular, aumentando a adesão entre a fibra e a matriz cimentícia, ocasionada pelo efeito de intertravamento (TEIXEIRA, 2015).

Nos últimos anos, foram realizados muitos estudos sobre a caracterização mecânica de compósitos cimentícios reforçados com fibra, devido ao seu baixo custo, boa resistência e a possibilidade de aumentar a resistência ao fissuramento por retração no concreto reforçado com fibras. Esse tipo de concreto é usado na montagem e reparação de elementos de concreto, como revestimentos de túnel e muros de contenção. Algumas vantagens em adicionar fibras ao concreto consistem na redução do agravamento, maior capacidade de moldagem e resistência à flexão. A maior atenção entre pesquisadores anteriores foi focada em fibras de polipropileno por causa de seu baixo custo, resistência excepcional, propriedades não corrosivas e resistência à fissuração de encolhimento melhorada (GAO *et al.*, 2016).

Usualmente, para aumentar a capacidade mecânica, a resistência à tração, à flexão e à retração à longo prazo utiliza-se fibras de aço (ROSA FILHO *et al.*, 2017). As fibras de polipropileno de baixo módulo de elasticidade podem reduzir a retração à curto prazo e ajudam a controlar o fenômeno de spalling do concreto durante um incêndio (SMARZEWSKI e BARNAT-HUNEK, 2014). As fibras de polipropileno agem como agentes redutores das consequências das patologias sofridas pelo concreto, principalmente relativas às fissuras, em especial as de retração, e contra o efeito spalling (ROSA FILHO *et al.*, 2017).

A fibras de polipropileno quando utilizadas em compósitos cimentícios possuem uma dosagem variando de 600 g/m<sup>3</sup> a 2400 g/m<sup>3</sup>, e que sua espessura é muito pequena (em torno de 30 µm), o efeito sobre o comportamento macroscópico do concreto ou argamassa reforçado com fibras é sentido apenas sensivelmente nas propriedades mecânicas do material. (KAKOOEI *et al.*, 2012). Conhecido como “Caricrete”, este material compósito foi caracterizado por permitir a adição máxima de fibra de 1% em volume (TANESI e FIGUEIREDO, 1999).

As fissuras de retração ocorrem quando o concreto ou argamassa sofre alterações volumétricas como resultado de secagem, retração ou efeitos térmicos (JUSOH *et al.*, 2016). Quando os esforços de tensão do concreto são excedidos, fissuras começarão a aparecer. Por sua vez, as fibras de polipropileno atuam eliminando ou reduzindo a formação das microfissuras (ROSA FILHO *et al.*, 2017). Isto acontece porque essas fibras possuem uma boa ductilidade, finura e propriedades dispersivas, podendo, dessa forma, restringir fissuras por secagem. As fibras sintéticas são usadas em pequenas quantidades volumétricas ao concreto ou argamassa de referência para agir como um reforço secundário ou para controlar a ocorrência de retrações plásticas nas idades iniciais. Essa fibra consegue alcançar facilmente a malha da estrutura com seus filamentos para criar uma ligação mecânica entre a matriz cimentícia e a fibra, permitindo a formação do chamado “efeito ponte” (AFROUGHSABET e OZBAKKALOGLU, 2015).

No entanto, as fibras de polipropileno têm níveis hidrofóbicos que as protegem contra a molhagem com pasta de cimento. A natureza hidrofóbica do polipropileno não tem efeito sobre a quantidade de água necessária para o concreto ou argamassa. Com base em uma revisão da literatura, apenas alguns estudos usaram fibras de polipropileno em concreto para aumentar a resistência à corrosão de estruturas de concreto armado (GAO *et al.*, 2016).

Segundo Choi e Chen (2005), recomenda-se a utilização de agentes superplastificantes em vez de mais água, para evitar a perda de capacidade de trabalho em fibras micro sintéticas e para facilitar o uso de mistura de concreto reforçado com fibra. Como resultado de pesquisas realizadas por pesquisadores, descobriu-se que as fibras de aço dão contribuições estruturais importantes para o concreto. No entanto, a exposição contínua de pavimentos rodoviários de concreto a condições climáticas adversas e pesadas cargas de tráfego, pode fazer com que as fibras de aço percam suas propriedades ao longo do tempo.

As fibras de polipropileno quando distribuídas uniformemente por todo o compósito, vaporizam-se a cerca de 170°C e derretem por volta de 460°C, quando do ataque do fogo, deixando espaço de poro pelo concreto para acomodar a formação de pressão de poro. A presença destas fibras não altera significativamente a resistência à compressão do compósito (VELASCO, 2002).

#### **2.4.2 Fibras orgânicas naturais vegetais**

As fibras orgânicas naturais vegetais surgem como uma opção para reforço em compósitos de matrizes cimentícias. Essas fibras também apresentam baixo custo, porém com a vantagem de serem biodegradáveis, oriundas de fontes renováveis e disponíveis em regiões tropicais do planeta. Dentre essas fibras vegetais, temos as fibras de juta e malva, sendo facilmente encontradas em regiões tropicais, são economicamente acessíveis e possuem um bom comportamento mecânico.

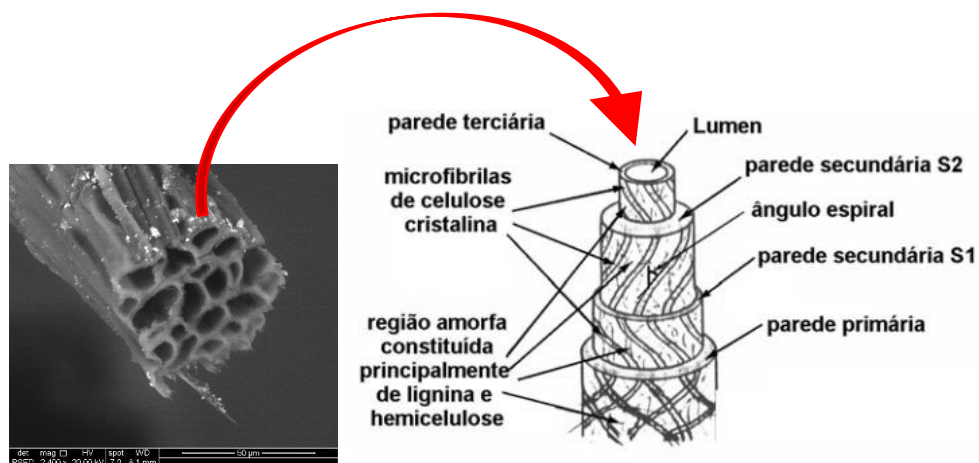
De acordo com Oliveira (2017), as fibras lignocelulósicas são constituídas de: celulose de 40-50%, hemicelulose de 20-30%, e lignina de 20-28%. Além destes componentes são encontrados compósitos inorgânicos e solventes orgânicos, como pectinas, carboidratos simples, gomas, saponinas, resinas, gorduras, entre outras (OLIVEIRA, 2017). Os principais componentes das fibras naturais são celulose, hemicelulose, lignina, pectina e ceras. A celulose ( $C_6H_{10}O_5$ ) é um polímero natural consistindo em unidades repetitivas de D-glucose anidra ligadas por ligações  $\beta$ -1,4-glicosídicas nas posições C1 e C4. O grau de polimerização é em torno de 10.000. Cada unidade de repetição contém três grupos hidroxila e estes, com a facilidade de realizar ligações de hidrogênio, desempenham um papel proeminente na formação da rede cristalina, além de governarem as propriedades físicas da celulose (MARQUES *et al.*, 2015).

A hemicelulose compreende um grupo de polissacarídeos, que consistem numa combinação de anéis de açúcar adicionando cinco e seis carbonos. A hemicelulose difere da celulose em três aspectos: primeiro, contém um número de diferentes unidades de açúcar, enquanto a celulose tem 1,4- $\beta$ -D-glucopiranosose. Em segundo lugar, exibe um grau considerável de ramificações contendo grupos pendentes que fornecem um aumento em sua natureza não-cristalina. Já a celulose é caracterizada por ser um polímero linear. Finalmente, o grau de polimerização da hemicelulose é de cerca de 50 a 300, 10 a 100 vezes menor que a celulose (MARQUES *et al.*, 2015).

A lignina é caracterizada pela formação de um complexo polimérico com grupos alifáticos e aromáticos. É completamente insolúvel na maioria dos solventes e não pode ser quebrada em unidades monoméricas. Além disso, é de natureza amorfa e hidrofóbica em sua totalidade, sendo responsável pelo enrijecimento das plantas. Grupos hidroxila, carbonila e metoxi são exemplos de grupos que podem ser identificados na lignina, que contém cinco grupos hidroxila e metoxi por unidade estrutural (JOHN e ANANDJIWALA, 2008; WADA *et*

*al.*, 2010). As variações nas propriedades das fibras estão relacionadas à remoção de lignina e hemicelulose da superfície das fibras, possivelmente causando enfraquecimento nas paredes externas das fibras (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

A pectina é a família estruturalmente mais complexa de polissacarídeos existente na natureza, constituindo 35% das paredes primárias em dicotiledôneas e monocotiledôneas e não-gramíneas, 2 a 10% de gramíneas e outras paredes primárias commelinoides, e até 5% das paredes em tecidos lenhosos. A pectina é abundante nas paredes que circundam as células em crescimento e em divisão, as paredes das células nas partes moles da planta, na lamela média e nos cantos das células (MOHNEN, 2008).



**Figura 2.9** - Constituição estrutural de uma fibra vegetal. Fonte: Adaptado de Rong *et al.*, 2001.

As fibras vegetais são constituídas de várias fibras elementares, ou fibrocélulas, fortemente ligadas entre si por lignina e envolvidas por hemicelulose mostrada na Figura 2.9. A fibra possui uma parede espessa formada por várias microfibrilas, formando espirais ao longo do eixo da fibra, tendo um lúmen no centro, que é uma cavidade central (SILVA, 2003). De acordo com Melo Filho (2012), as fibrocélulas são ligadas através da lamela intercelular ou média, constituída de hemicelulose e lignina. Em virtude da grande quantidade de lúmens, que são poros permeáveis, as fibras vegetais possuem uma grande absorção de água (SAVASTANO JÚNIOR, 2000). As fibras são diferenciadas por sua composição e quanto a orientação das fibrilas (ângulo espiral), sendo que tais características determinam as suas propriedades mecânicas (MOHANTY *et al.*, 2000). A Tabela 2.1 apresenta os valores encontrado na pesquisa de Oliveira (2013), para a caracterização das fibras de juta e malva.

**Tabela 2.1** - Composição química das fibras de juta e malva. Fonte: Adaptado de Oliveira, 2013.

<b>Fibras</b>	<b>Celulose (%)</b>	<b>Hemicelulose (%)</b>	<b>Lignina (%)</b>	<b>Extrativos totais (%)</b>
Juta	66,33	24,83	10,49	5,71
Malva	69,36	21,28	13,55	7,55

As fibras vegetais ao serem adicionadas em matrizes cimentícias, apresentam certa dificuldade na interação entre suas interfaces, impossibilitando uma transferência eficiente de tensão da matriz cimentícia para o reforço fibroso. Com a finalidade de melhorar esta interação, as fibras recebem um tratamento. Um dos tratamentos químicos, mais difundidos para diversas fibras vegetais é o tratamento alcalino, conhecido também por mercerização, onde as fibras são colocadas em uma solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH).

#### **2.4.2.1 Fibras de Juta**

A juta (*Corchorus capsularis*) é um tipo de fibra vegetal que provém da família Tilioidae, alcançando alturas variando de 3 a 4 metros, em alguns casos chegando até 8 metros, seu talo tem uma grossura de aproximadamente 20 mm, crescendo em climas úmidos e tropicais, tais como o Norte do Brasil e países asiáticos como a Índia, principal produtora. É comumente usada na confecção de produtos como cordas, tecidos, tapetes, capachos e sacos (PATEL e PATEL, 2018). Ela possui um grande potencial de aplicação devido a sua alta resistência, quando misturada a polímeros, dando origem a produtos com menor densidade (VARELA, 2017). O diâmetro das fibras varia de 20 a 100  $\mu\text{m}$ . Elas são de diferentes tonalidades, variando de amarelo claro a preto acastanhado. A seção transversal destas fibras é aproximadamente poligonal em forma e em algum momento com ângulos definidos agudamente (SINGH e SIL, 2015).

As plantas florescem após cinco meses de plantadas e imediatamente são colhidas. As árvores cortadas rentes ao solo por meio de foice são limpas das folhas, postas em feixes dentro de água corrente ou parada (LIMA, 2009). A fibra de juta tem aparência do linho, porém com irregularidades no lúmen, sendo causado por variações nas paredes celulares que são grossas em algumas partes e finas em outras, Figura 2.10. Sua força de tensão não é grande em comparação com outras fibras e a sua elasticidade é baixa (OLIVEIRA, 2013).



**Figura 2.10** - Fibra de juta na forma de fio. Fonte: Portela, 2016.

A juta difere quimicamente de outras fibras multicelulares, pois contém considerável quantidade de lignina, que acompanha a celulose em tecidos lenhosos. A juta é dificilmente alvejada, porque sofre degradação quando é tratada com cloro em solução alcalina (LIMA, 2009). A qualidade da juta distingue-se pela robustez das fibras e pela cor branca e brilhante do talo, as fibras com cores de talos mais escuras, mais acinzentadas e de menor comprimento possuem qualidade e resistência inferior às de cores mais claras (BREMBERGUER e LEBRÃO 2016).

Além dos usos convencionais da fibra de juta, ela pode ser usada também em compósitos cimentícios para a sua melhoria. Com a finalidade de superar a deficiência na tração, a fibra de juta pode ser aplicada de maneira dispersa para reforçar matrizes cimentícias. As vantagens das fibras naturais sobre as fibras sintéticas são: abundante disponibilidade, baixo custo, menos abrasividade, capacidade de absorver impacto mecânico, fácil de manuseio e processamento, sustentabilidade (PATEL e PATEL, 2018).

Em sua pesquisa Dantas *et al.* (2012) afirma que as fibras de juta possuem uma grande capacidade de absorção de água devido à sua natureza hidrofílica, pois a proteção lateral das bordas com resina, diminuiu a quantidade de água absorvida pelo compósito e aumentou o tempo de saturação dele.

#### **2.4.2.2 Fibras de Malva**

A malva, também conhecida como mallow, pertence à família Malvaceae, que compreende várias espécies, tais como malva sylvestris e urena lobata linn. Sua fibra tem

interesse econômico por itens têxteis e simples produção em áreas de baixa renda (MARGEM *et al.*, 2015). A fibra de malva (*urena lobata* linn) é extraída do caule da planta do mesmo nome e desde a década de 1930 os principais estados produtores no Brasil são Amazonas e Pará (AGUIAR, 2016).

A malva é usada para confecção de diversos subprodutos (denominação técnica: tipo 4, bucha, “cutting” e aparas) e enfrenta notável concorrência de produtos sintéticos. Apresenta como principal vantagem a presença de fibrilas (ramificações superficiais), que aumentam a sua ancoragem na matriz, porém a presença de impurezas interfere negativamente, sendo necessária uma limpeza prévia para seu uso. O seu preço é considerado alto, mas tem alta potencialidade de uso na construção civil, em vista da tendência de sua participação na indústria têxtil (SAVASTANO JÚNIOR e PIMENTEL, 2000).

Em suas pesquisas Savastano Júnior e Pimentel (2000) constataram que o compósito reforçado com fibras de malva apresentou uma elevada absorção de energia, quase 5 vezes maior que o padrão em comparação com outras fibras vegetais, sendo possível que o aspecto fibrilado da fibra tenha contribuído para a maior superfície de contato entre a fibra e a matriz, aumentando a dissipação de energia.

A fibra de malva é semelhante na coloração, na textura e na resistência à fibra de juta, Figura 2.11. A malva é uma fibra liberiana que aparece entre a camada do câmbio, envolvendo a medula central lenhosa do caule e a camada externa da casca, sendo classificada no grupo das fibras lignocelulósicas. A malva produz fibras têxteis parecidas às tradicionalmente utilizadas na fabricação de papel, vestuário, barbantes e tecidos para estofados e tapetes. É muito usada na confecção de sacaria para acondicionar produtos como açúcar, café, castanha de caju e cacau (COSTA *et al.*, 2012).



**Figura 2.11** - Fibra de malva. Fonte: Rodrigues, 2015.

A malva tem uma resistência a tração maior do que a produzida pela juta, mas menos brilhante e sedosa. Juntas, são plantados em sistema de intercalação e juta em terras baixas e malva nas planícies, em terras muito férteis. A fibra de malva ganhou visibilidade como uma boa planta de valor comercial pela conveniência e facilidade de cultivo em lugares não molhados. Esta é uma planta que tem uma alta produtividade em um curto período de tempo, pela remoção da fibra é feita em processo de imersão, a fibra tem a aparência amarelada, longa e superfície áspera (COSTA *et al.*, 2015).

Quando uma fibra vegetal é usada como reforço em compósitos cimentícios, podemos considerar algumas preocupações, como a degradação da fibra, pois a hidratação do cimento é um fator determinante no comportamento da degradação das fibras naturais, a baixa durabilidade causada pela degradação da fibra natural em ambiente alcalino-mineral do cimento prejudica o efeito de reforço da fibra, gerando assim, uma busca pela redução da alcalinidade da solução pura, sendo a metacaulinita eficiente em amenizar a deterioração destas fibras (WEI e MEYER, 2015). Em comparação ao concreto convencional, o concreto reforçado com fibras possui maior tenacidade e maior resistência ao impacto (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Atualmente, é reconhecido que, como compósito de reforço, as fibras lignocelulósicas podem competir com produtos sintéticos, em termos de vantagens econômicas, técnicas, sociais e ambientais. De fato, a aplicação na engenharia de fibras lignocelulósicas é considerada uma alternativa ecológica para substituir fibras sintéticas mais caras, não recicláveis e com alta taxa de energia para sua produção (MARGEM *et al.*, 2015).

Pesquisas recentes revelaram um grande potencial como reforço de compósitos. Ensaios preliminares com a fibra de malva revelou resistência à tração de 214-497 MPa e Módulo de



Young de 8,8 GPa. Esses valores são superiores do que as fibras naturais tradicionais, como o bambu e o coco (MARGEM *et al.*, 2015).

## 2.5 Tratamento alcalino

As fibras vegetais precisam, em determinados casos, receberem um certo tipo de tratamento, com o intuito de melhorar a interação entre os componentes de um compósito, isso permite a transferência eficiente de tensão da matriz para o reforço (BELTRAMI *et al.*, 2014; REBELO, 2016). A maioria dos estudos sobre fibras naturais, preocupam-se com a compreensão fundamental de seu comportamento como reforço para compósitos na interface entre fibra e matriz, modificação química da superfície da fibra e o processamento do compósito, sendo que os compósitos fabricados contêm apenas fibras naturais como reforço (SATHISHKUMAR *et al.*, 2017).

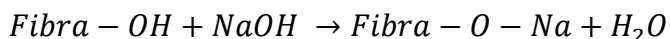
De acordo com Beltrami *et al.* (2014), a atração física entre átomos polares da matriz e do reforço, favorece a adesão na interface, e esse efeito está diretamente relacionado a problemas de adesão entre a fibra e a matriz, pois diminui a transferência de esforços, comprometendo as propriedades mecânicas do compósito.

Um dos tratamentos amplamente utilizado para esta finalidade, é o tratamento alcalino, também conhecido por mercerização, realizado em uma solução aquosa a base de hidróxido de sódio (NaOH), com o objetivo de modificar as superfícies das fibras, visando aumentar sua aderência na matriz (ESMERALDO,2006; BELTRAMI, 2014).

A mercerização é um processo de modificação química que altera o comportamento dos constituintes químicos na fibra natural, sendo estes: celulose, hemicelulose, lignina, pectina e impurezas como cera, cinza e óleo natural (ISLAM BOSSUNIA *et al.*, 2016). Segundo Beltrami *et al.* (2014), durante esse tratamento, ocorre o rompimento da ligação de hidrogênio no grupo hidroxila (OH) presente na estrutura da fibra, aumentando a sua rugosidade superficial, além de remover uma determinada quantidade de lignina.

O efeito do álcali na fibra de celulose é uma reação de intumescimento, ou inchamento, durante a qual a estrutura cristalina natural da celulose relaxa. A celulose nativa (isto é, celulose como ocorre na natureza) mostra uma rede cristalina monoclínica de celulose-I, que pode ser transformada em diferentes formas polimórficas através de tratamentos químicos ou térmicos. O tipo de álcali e sua concentração influenciarão o grau de intumescimento e, portanto, o grau de transformação da rede em celulose II. O cátion Na<sup>+</sup> tem um diâmetro favorável, capaz de

alargar os poros pequenos entre os planos da rede e penetrar neles. Consequentemente, o tratamento com hidróxido de sódio (NaOH) resulta em uma maior quantidade de inchaço, levando à formação de uma nova rede de Nelcelulose-I, uma rede com distâncias relativamente grandes entre as moléculas de celulose, e esses espaços são preenchidos com moléculas de H<sub>2</sub>O. Os grupos OH da celulose são convertidos em grupos de O-Na, expandindo as dimensões das moléculas, conforme mostrado na Equação 2.1 (ISLAM BOSSUNIA *et al.*, 2016).



#### Equação 2.1

A lavagem subsequente com água remove os íons de Na ligados e converte a celulose numa nova estrutura cristalina, isto é, celulose-II, que é termodinamicamente mais estável que a celulose-I. Desta forma o hidróxido de sódio (NaOH) pode causar uma completa transformação da estrutura de celulose-I para celulose-II. Contudo, pode-se afirmar que a mercerização altera a topografia da superfície das fibras tornando-a áspera, resultando num melhor intertravamento mecânico, diminuindo o diâmetro da fibra, aumentando a capacidade de absorção de água da fibra, conforme aumento na concentração de hidróxido de sódio. Consequentemente, o tratamento alcalino tem um efeito duradouro no comportamento mecânico das fibras naturais, especialmente em sua resistência e rigidez (ISLAM BOSSUNIA *et al.*, 2016).

A mercerização remove uma certa quantidade de lignina, cera e óleos que envolvem a superfície externa da parede celular da fibra, despolimerizando a celulose amorfa, removendo grande parte da hemicelulose das fibras (BELTRAMI *et al.*, 2014). Por mais que este tratamento amplie a adesão da fibra com a matriz, dependendo da concentração de solução alcalina, a resistência mecânica da fibra pode ser significativamente reduzida, consequentemente, prejudicando a resistência do compósito fabricado com estas fibras.

## 2.6 Uso da metacaulinita como pozolana

A pozolana é um material inorgânico fino composto principalmente por fases amorfas ricas em silício ou sílico-aluminosas, que possuem propriedades de ligante inferior ou nenhuma, mas na presença de água, a temperatura e pressão comuns, reagirá quimicamente com hidróxido de cálcio para produzir compostos com propriedades do aglutinante. As pozolanas são matérias-primas disponíveis em todo o mundo e utilizadas para a produção de compósitos de sistemas

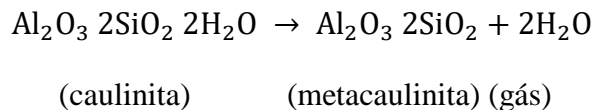
misturados, como substituição parcial do aglutinante (cimento) em argamassa e em concreto. Esses materiais podem ser explorados como uma fonte geossensora (fonte natural) ou obtidos de um processo industrial (fonte artificial), geralmente de um subproduto (FERRAZ *et al.*, 2015).

A pozolona tem como principal propriedade a capacidade de reagir e se combinar com o hidróxido de cálcio, formando compostos estáveis de poder aglomerante, tais como: silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, assim, no cimento Portland o hidróxido de cálcio liberado pela hidratação dos silicatos, reage com a pozolana, utilizada como substituição parcial do cimento, resultando em uma produção extra de silicatos de cálcio hidratados, que são produtos mais estáveis do cimento hidratado (OLIVEIRA e BARBOSA, 2006). As pozolanas são materiais silicosos ou sílico-aluminosos, naturais ou que contêm um elevado teor de sílica reativa, com estrutura pouco cristalina ou não cristalina (amorfa).

De acordo com Faria (2019), a palavra caulim ou “china clay” deriva da palavra chinesa Kauling, traduzindo seria algo como “colina alta” e se refere a uma colina de Jauchau Fu situada ao norte da China, onde esse material é obtido há muito tempo, em compensação a designação caulinita foi proposta pela primeira vez por Johnson e Blake, em 1867, quando a denominou como a espécie mineral contida no caulim.

A metacaulinita, ou caulim calcinado, é um tipo de pozolana, oriunda da calcinação da caulinita presente no caulim, um tipo de argila, submetida a temperatura elevada entre 500°C e 900°C, tendo por objetivo garantir sua reatividade com o hidróxido de cálcio (MEDINA, 2011; FARIA, 2019). Isso a torna economicamente viável, pois representa uma maneira econômica de reduzir os custos de construção por substituição parcial do cimento. No entanto, esse potencial depende de algumas características da metacaulinita, como a melhor temperatura de calcinação, finura e pozolanicidade estão entre as mais importantes (COIMBRA e MORELLI, 2001).

A caulinita torna-se reativa quando é calcinada entre 500°C e 850°C, pois nessa faixa de temperatura ocorre a desidroxilação da caulinita, transformando-se em um material amorfo, com estrutura desordenada e de elevada reatividade. Vários fatores influenciam no comportamento reativo da metacaulinita, tais como: tipo de forno, tempo de permanência, taxas de aquecimento e resfriamento (MAZZA, 2010). A desidroxilação do caulim ocorre conforme a Equação 2.2, e em torno de 500°C:



### Equação 2.2

A metacaulinita é constituída por sílica (SiO<sub>2</sub>) e alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) na fase amorfa, tendo a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio Ca(OH)<sub>2</sub>, gerado durante a hidratação do cimento Portland e formar produtos hidratados similares aos decorrentes da hidratação direta do clínquer Portland. Essa interação física com o cimento Portland modifica a reologia dos compósitos conferindo propriedades especiais à durabilidade e ao desempenho mecânico no estado endurecido do concreto quando comparados à compósitos sem a sua presença, tais como: aumento da resistência à compressão e a flexão, redução da porosidade e da permeabilidade, aumento da resistência a sulfatos, aumento da resistência a difusibilidade de íons cloreto, mitigação da reação álcali agregado, redução da ocorrência de eflorescências, aumento da resistividade elétrica (MEDINA, 2011).

Os principais compostos resultantes da hidratação do cimento Portland são o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o hidróxido de cálcio (CH ou Ca(OH)<sub>2</sub>) e os sulfoaluminatos de cálcio assim também como partículas de clínquer não hidratadas (ANJOS *et al.*, 2012). O volume de sólidos de uma pasta de cimento completamente hidratada é formado de 50 a 60% por C-S-H, sendo este o principal responsável pelas suas propriedades mecânicas. O CH contribui de 20 a 25% do volume de sólidos de uma pasta de cimento hidratada, mas em comparação com o C-S-H, o CH tem pouca contribuição na resistência, além de afetar desfavoravelmente a resistência química dos materiais cimentícios quando submetidos à ação de soluções ácidas (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A adição de materiais pozolânicos pode beneficiar significativamente as propriedades dos compósitos reforçados com fibras vegetais, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido, além de melhorar também a sua durabilidade, através da reação pozolânica realizada por esses materiais, que transformam o hidróxido de cálcio, cristais grandes e instáveis, em estruturas cristalinas menores e mais resistentes, o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) (ANJOS *et al.*, 2012).

Rocha *et al.* (2013) estipularam faixa de decomposição de produtos de hidratação do cimento Portland, resultantes encontrados, com suas temperaturas correspondentes exibidos na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2** - Faixa de decomposição térmica de produtos de hidratação do cimento Portland. Fonte: Rocha *et al.*, 2013.

<b>Compostos</b>	<b>Faixa de temperatura</b>
Etringita (fase Aft)	76 – 84
Silicato de cálcio hidratado (C-S-H)	104 – 140
Sílico-aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H)	157 – 163
Aluminato de cálcio hidratado (C-A-H)	230 – 240
Portlandita (CH)	460 – 465
Calcita (CC)	620 - 645

Quando incorporados em misturas binárias, sabe-se que os materiais pozolânicos reagem com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), que é um produto da hidratação do cimento, para produzir produtos de reação adicionais, como o hidrato de silicato de cálcio (C-S-H) que melhora a força e a porosidade. Isso, por sua vez, leva a um concreto de alto grau mais impermeável e durável, sendo estas características primordiais em pisos (PRADIG D. e AJAY P., 2013).

A principal característica da metacaulinita é sua alta reatividade com hidróxido de cálcio,  $\text{Ca(OH)}_2$  e sua capacidade de acelerar a hidratação do cimento. Quando comparada com outras adições minerais, espera-se que a ação pozolânica da metacaulinita seja mais significativa devido à sua alta concentração de sílica e alumina. Especificamente, espera-se que a relação cálcio / silício (C / S) dos hidratos de sílica cálcica produzidos (C – S – H) seja maior, levando assim a uma microestrutura de concreto consideravelmente melhorada e o melhoramento final do desempenho global do compósito cimentício, em termos de resistência, porosidade, permeabilidade e difusividade Além disso, como todas as outras pozolanas ultrafinas, a metacaulinita contribui significativamente para o preenchimento de pequenos poros e vazios e, assim, densifica a zona de transição da interface devido ao efeito do microferizador (BADOGIANNIS *et al.*, 2015).

A utilização da metacaulinita e de fibras vegetais na produção de fibrocimento o torna um material ecologicamente mais eficiente do que os tradicionalmente presentes no mercado. Em torno de 20% dos compostos hidratados do cimento são  $\text{Ca(OH)}_2$ , não contribuindo na resistência final do material endurecido. Já em presença de metacaulinita, durante a hidratação do cimento Portland formam-se silicatos de cálcio hidratados que melhoram para a resistência e a durabilidade das pastas, argamassas e concretos no estado endurecido. Ao final desse processo, obtém-se material cimentício com menor quantidade de clínquer e, conseqüentemente, menor consumo de energia e menor emissão de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). As fibras vegetais são biodegradáveis, possuem baixo custo de produção e podem ser utilizadas

localmente na produção de fibrocimento, eliminando custos de transporte e favorecendo a construção de infraestrutura de países em desenvolvimento. O estudo da durabilidade do fibrocimento produzido com fibras vegetais é fundamental para a implementação industrial, utilização em larga escala e aumento da competitividade comercial desse produto (LIMA e TOLEDO FILHO, 2008).

A adição de materiais pozolânicos pode beneficiar significativamente as propriedades dos compósitos reforçados com fibras vegetais, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido, além de melhorar também a sua durabilidade, através da reação pozolânica realizada por esses materiais, que transformam o hidróxido de cálcio, cristais grandes e instáveis, em estruturas cristalinas menores e mais resistentes, o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) (ANJOS *et al.*, 2012).

Outras melhorias advindas das adições minerais são a redução da permeabilidade e porosidade capilar, resultando no aumento da resistividade físico-mecânica aos agentes agressivos (TUTIKAN, 2004). Também, alteram a viscosidade aumentando a densidade e coesão da argamassa controlando assim a exsudação e a segregação (LOPES DA SILVA, 2016).

Um fator a ser estudado em argamassas com elevados teores de adições minerais, pode ser a escassez, ou mesmo ausência, de  $\text{Ca(OH)}_2$  em idades próximas ou acima dos 28 dias, pois é possível, e mesmo expectável, que todo o  $\text{Ca(OH)}_2$  produzido pela hidratação do cimento seja consumido por parte das adições minerais até aos 28 dias e, desta forma, as adições minerais colocadas em excesso podem vir a não reagir quimicamente, funcionando apenas como material de enchimento (ANJOS *et al.*, 2012). A análise termogravimétrica (TG/DTG) é uma técnica muito apropriada na avaliação do teor de hidróxido de cálcio em pastas de cimento, já que a decomposição do  $\text{Ca(OH)}_2$  em  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$  é caracterizada por uma perda de massa entre a faixas de temperatura de 425°C a 550°C, permitindo a leitura dos eventos relacionados com a desidratação, desidroxilação ou descarbonatação e ocorridos numa pasta de cimento hidratado (ALARCON-RUIZ *et al.*, 2005).

Segundo Mokarem *et al.* (2005) a adição de pozolanas e cimento com escória, geralmente aumentam o refinamento dos poros do concreto, desta forma criando poros menores, sendo que a retração por secagem está diretamente associada à água contida nos poros menores. Em contrapartida, uma grande desvantagem da argamassa autonivelante é seu alto custo relacionado ao uso de aditivos químicos, alto teor de cimento de alumínio e altos volumes de

pós. Uma solução para reduzir o seu alto custo é adicionar pozolanas ou alguns materiais residuais como substituição (YANG *et al.*, 2016).

Na literatura recente, diversos materiais residuais têm sido utilizados como matérias-primas para a fabricação de argamassas autonivelantes, como resíduos plásticos (SAFI *et al.*, 2013), conchas (SAFI *et al.*, 2015), ardósia aterrada de resíduos de extração (BARLUENGA e HERNÁNDEZ-OLIVARES, 2010), cinza volante e pó de tijolo (SAHMARAN *et al.*, 2006) e assim por diante. Isso inspirou o interesse em estudar a utilização da metacaulinita como matéria-prima para a preparação da argamassa autonivelante.

Durante a produção de argamassas, o alto consumo de cimento Portland na sua produção, provoca fissurações em contrapisos e pisos (FORTUNATO *et al.*, 2018), além de gerar impactos ambientais. Com uma visão sustentável, muitas pesquisas foram desenvolvidas para reduzir o consumo de cimento Portland em concretos e argamassas, avaliando novos materiais que possam substituí-lo e, ainda, preservar ou até mesmo melhorar as propriedades do produto.

Portanto, a metacaulinita, ou argila tratada termicamente, pode ser usada como material suplementar ao cimento em concretos e argamassas, pois reduz o consumo de cimento, aumenta a força e a taxa de ganho de força, diminui a permeabilidade, melhora a durabilidade e reduz a porosidade do concreto. O compósito cimentício possui uma resistência à tração muito baixa, uma limitada ductilidade e pouca resistência ao fissuramento. Reconheceu-se que a adição de fibras pequenas, estreitamente espaçadas e uniformemente dispersas nesse tipo de compósito funcionaria como uma forma de evitar as fissuras e melhoraria substancialmente suas propriedades de resistência à compressão e à flexão (SHIKHARE e KALURKAR, 2013).

### Capítulo 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados nesta pesquisa encontram-se caracterizados e descritos neste capítulo, assim como os procedimentos experimentais adotados para obtenção dos dados. A Figura 3.1 exibe uma visão geral da pesquisa, assim como dos métodos que foram usados.

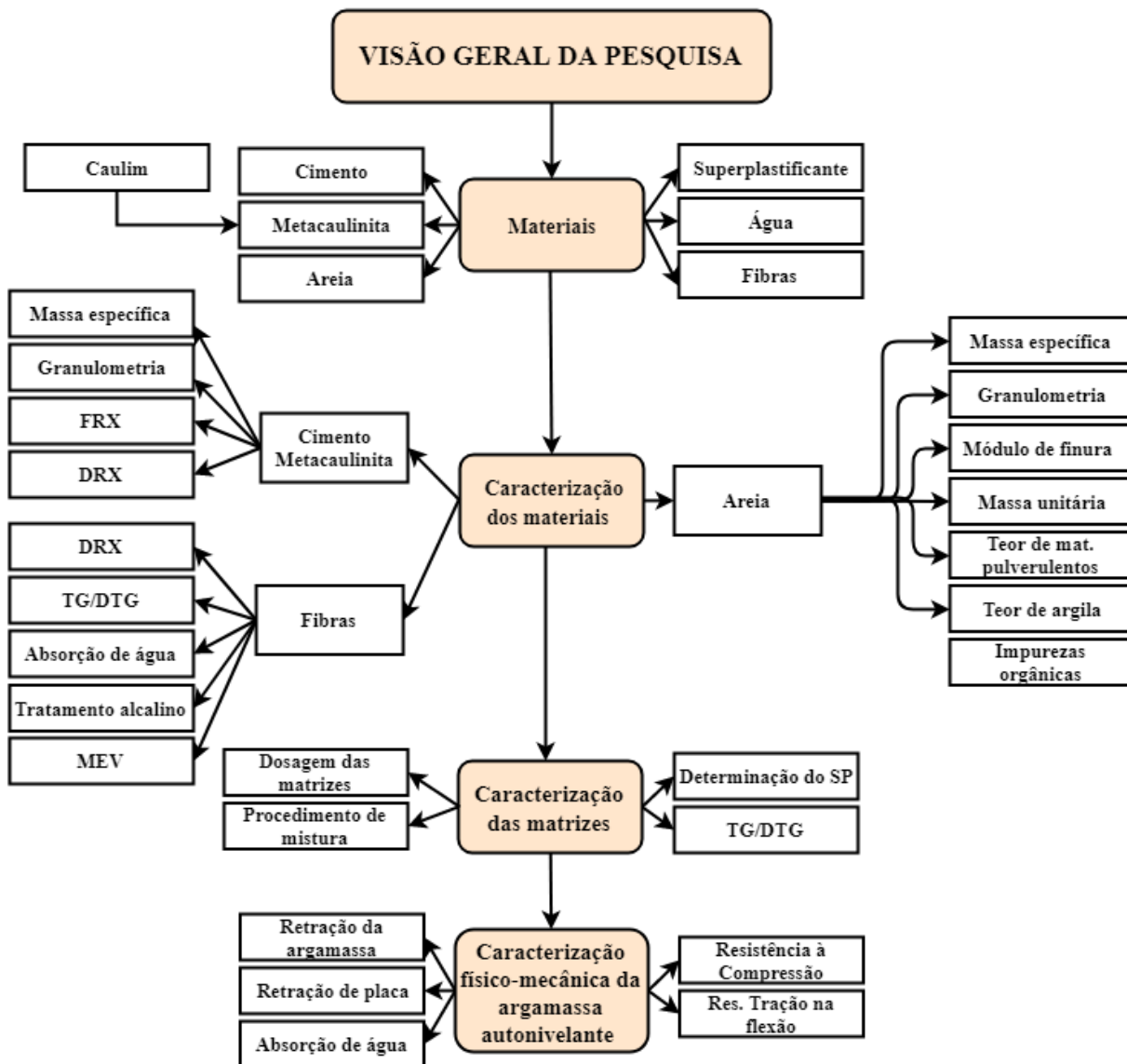


Figura 3.1 - Visão geral da pesquisa.



## 3.1 Materiais

### 3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland escolhido para o desenvolvimento deste compósito foi o CP II E-32 adquirido no comércio de Manaus, fabricado pela empresa CEMEX, Cimento Vencemos do Amazonas LTDA, conforme a Figura 3.2.



**Figura 3.2** - Cimento Portland Composto CP II E 32.

O CP II E é um tipo de cimento composto, apresentando na sua composição em torno de 56 % a 94 % de clínquer e gesso, e 6 % a 34 % de escória granulada de alto-forno. A adição de escória proporciona baixo calor de hidratação, com o seu uso indicado em estruturas que precisem de um desprendimento de calor moderadamente lento (NASCIMENTO, 2009). Portanto, este cimento foi escolhido por ter como característica principal, baixas temperaturas de reação, com o intuito de degradar menos as fibras vegetais usadas no compósito.

A empresa fabricante do cimento Portland forneceu os dados de algumas propriedades química, física e mecânica do Cimento Portland Composto que são apresentados na Tabela 3.1. Os parâmetros químicos e físicos foram avaliados e estão em conformidade com os estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

**Tabela 3.1** - Análise Física do Cimento Portland CII E 32. Fonte: CEMEX, 2018.

Análise Física		Valores	NBR 16697:2018
Perda ao Fogo (P.F.)	-	5,83	≤ 8,50
Resíduo Insolúvel (R.I)	-	1,99	≤ 5,00
Blaine	(m <sup>2</sup> /kg)	424	-
Expansibilidade a Quente	mm	0	≤ 5,00
Finura # 75µm	%	0,20	≤ 12,00
Resistência a Compressão por Idade	1 dia	MPa	-
	3 dias	MPa	≥ 10,00
	7 dias	MPa	≥ 20,00
	28 dias	MPa	≥ 32,00
Tempo de Pega	Início	H	03h 25min
	Fim	H	04h 25min

### 3.1.2 Caulim

Neste trabalho a metacaulinita foi produzida em laboratório a partir do caulim oriundo do quilometro 44 da BR 174 (-2.5870442, -60.0329724) que fica próximo a Ponte sobre o Igarapé Cabeça Branca, na rodovia que liga a cidade de Manaus ao município de Presidente Figueiredo, Figura 3.3.



**Figura 3.3** - Local da extração do caulim.

### 3.1.3 Areia

A areia utilizada é proveniente de rio e foi adquirida no comércio local da cidade de Manaus no estado do Amazonas mostrada na Figura 3.4. Para realização dos ensaios e produção do compósito, utilizou-se apenas o material que passou na peneira 1,18 mm.



**Figura 3.4** - Areia usada para fabricação do compósito.

### 3.1.4 Superplastificante

Para se obter uma matriz cimentícia autonivelante, usou-se o superplastificante MC-PowerFlow 1160 ®, fabricado pela MC Bauchemie, sendo um aditivo com coloração marrom escuro e composição básica de solução de policarboxilato em meio aquoso. A Tabela 3.2 apresenta os dados técnicos do SP.

**Tabela 3.2** - Dados Técnicos do MC-PowerFlow 1160 ®. Fonte: MC-Bauchemie, 2014.

<b>Característica</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>	<b>Observações</b>
Densidade	g/m <sup>3</sup>	1,07	
Dosagem recomendada	%	0,2 a 5,0	Sobre o peso do cimento
Teor de cloretos	%	< 0,1	
Teor de álcalis	%	< 1,0	

### 3.1.5 Água

A água utilizada, na fabricação dos compósitos e nos ensaios experimentais, foi proveniente de poços artesianos localizados dentro das universidades, que abastecem tanto o Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), quanto o Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade do Estado do Amazonas (UEA) onde foram realizados.

### 3.1.6 Fibra de Polipropileno

A Fibra de Polipropileno (FPP) usada neste estudo foi a FibroMac® 12, com 12 mm de comprimento, fabricada e doada pela empresa Maccaferri do Brasil Ltda., é uma fibra de polipropileno produzida a partir de multifilamentos, sendo indicada para reforço de concretos e argamassas com a finalidade de gerar um composto homogêneo e controlar a fissuração por retração, conforme a Figura 3.5. As suas propriedades estão contidas na Tabela 3.3.



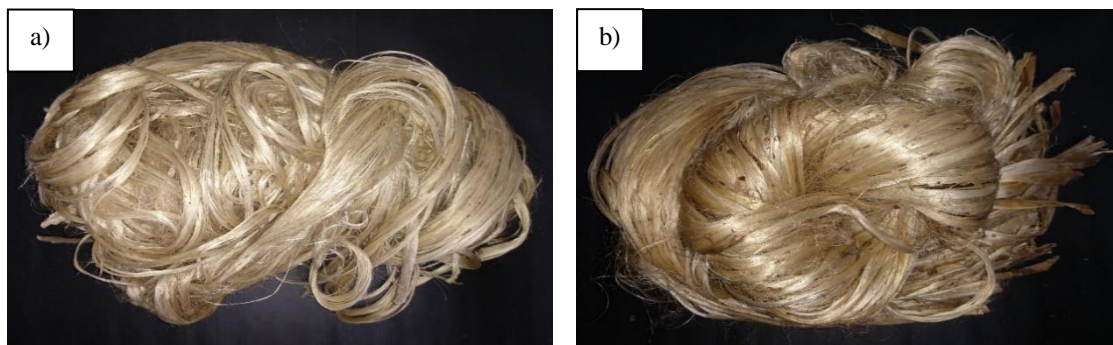
**Figura 3.5** - Fibras de polipropileno FibroMac® 12.

**Tabela 3.3** - Propriedades físicas e mecânicas das fibras de polipropileno. Fonte: Maccaferri do Brasil Ltda., 2008.

Propriedades Físicas		Propriedades Mecânicas	
Diâmetro ( $\mu\text{m}$ )	18	Temperatura de Fusão ( $^{\circ}\text{C}$ )	160
Seção	Circular	Temperatura de Ignição ( $^{\circ}\text{C}$ )	365
Comprimento (mm)	12	Resistência à Tração (MPa, N/mm <sup>2</sup> )	300
Alongamento (%)	80	Módulo de Young (MPa)	3000
Matéria-Prima	Polipropileno		
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	0,91		

### 3.1.7 Fibra de Malva e Juta

As fibras naturais vegetais usadas nesta pesquisa foram a Fibra de Malva (FM) e a Fibra de Juta (FJ), adquiridas em forma de novelos com aproximadamente 1,00 kg cada, diretamente na Cooperativa dos Juticultores, Pescadores e Produtores Extrativistas do Amazonas (COOPERFIBRAS), localizada na Av. Barão do Rio Branco, no município de Manacapuru, aproximadamente 84 Km da cidade de Manaus, no estado do Amazonas. As fibras estavam ao natural, sem nenhum tipo de tratamento ou lavagem, de acordo com a Figura 3.6.



**Figura 3.6** - Fibras naturais vegetais: a) juta e b) malva.

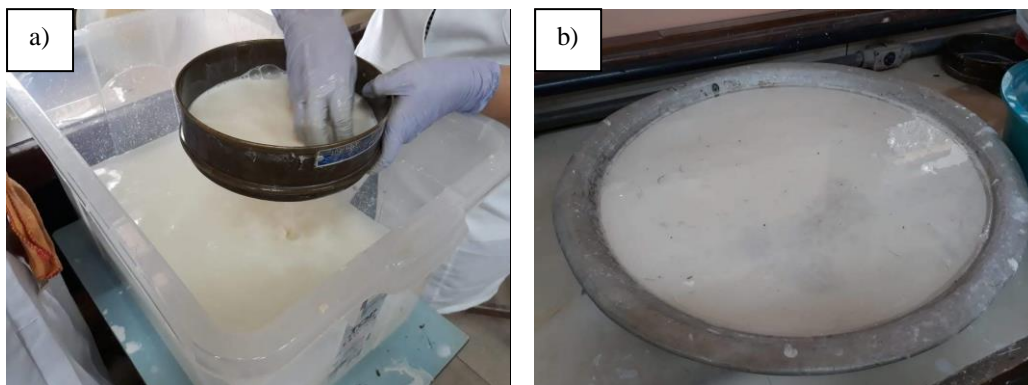
Para a realização dos ensaios e dos compósitos, as fibras vegetais ficaram imersas em água por 24 horas, depois foram lavadas em água corrente para remover os resíduos de solo e em seguida foram colocadas para secar por 48 horas à temperatura ambiente para retirar a umidade. Ressalta-se que as fibras que foram adicionadas aos compósitos, foram cortadas com tesoura com o mesmo comprimento da fibra de polipropileno, neste caso de 12 mm e não receberam nenhum tratamento químico.

## **3.2 Métodos**

### **3.2.1 Produção da metacaulinita**

A metacaulinita usada neste trabalho foi fabricada em laboratório a partir do estudo de Mazza (2010), onde realizaram-se várias calcinações com tempos e temperaturas diferentes, em caulins oriundos de lugares distintos. Com a finalidade de conseguir uma metacaulinita mais reativa e em estado mais amorfo, realizou-se a Difractometria de Raios-X (DRX) após cada calcinação. A calcinação com 750°C e duração de 4 horas foi a escolhida, pois se apresentou mais amorfa em comparação com as outras.

O processo iniciou-se com a coleta do caulim, sendo colocado em água por um período de 24 horas. Depois desse processo inicial, o caulim foi peneirado em via úmida com a peneira de abertura 75,00  $\mu\text{m}$ , conforme a Figura 3.7 (a). O material passante foi deixado em um recipiente com água para decantar por 24 horas (Figura 3.7 (b)), com o intuito de retirar o excesso de água. Após a remoção da água, o material foi colocado para secar em estufa dentro de um recipiente metálico, até atingir massa constante em temperatura de 105°C  $\pm$  5°C. A estufa utilizada foi a de marca DeLeo Equipamentos Laboratoriais e pertence ao Laboratório de Pavimentação (LABPAV) da UFAM. Com o material seco, fez-se o destorroamento do caulim com um pistilo, dentro de um almofariz de porcelana.



**Figura 3.7** - Etapas das produção da metacaulinita: a) Peneiramento do caulim por via úmida; b) Decantação do caulim.

Após o processo de tratamento do caulim, este foi distribuído em vasilhas de porcelana, e com o objetivo de realizar uma calcinação mais uniforme do material, fizeram-se cavidades na região central. Por último, o caulim foi calcinado em um forno tipo mufla fabricado por Linn Elektro Therm, no Laboratório de Laminação da Geologia da UFAM, com taxa de aquecimento em torno de 20°C / minuto até uma temperatura de 750°C por 4 horas, como ilustrado na Figura 3.8.



**Figura 3.8** - Caulim no interior da mufla para calcinação.

### **3.2.2 Tratamento alcalino nas fibras naturais**

As fibras naturais de juta e malva receberam um tratamento alcalino, conhecido também por mercerização. Os procedimentos adotados foram baseados no trabalho de Rebelo (2016), foi utilizado hidróxido de sódio a 99%. O teor da solução de hidróxido de sódio (NaOH) adotado foi de 10% em água destilada, com a imersão das fibras na solução durante 120 minutos (Figura 3.9 (a)), posteriormente, as fibras foram lavadas até atingirem o pH neutro, (Figura 3.9 (b)), ressalta-se que este ensaio foi realizado no LAMAC.





**Figura 3.9** - Tratamento alcalino nas fibras naturais: a) Fibras de juta e malva imersas em solução alcalina; b) Lavagem das fibras.

### 3.2.2 Caracterização dos materiais

#### 3.2.2.1 Caracterização física

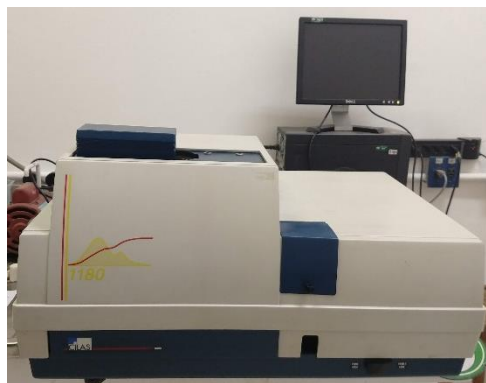
Neste trabalho foram executados ensaios tecnológicos para caracterização física do cimento, metacaulinita e areia. Os ensaios foram executados segundo normas vigentes de acordo com a Tabela 3.4.

**Tabela 3.4** - Ensaios empregados na caracterização física.

<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>
Massa específica do cimento e metacaulinita	NBR NM 23 (2000)
Massa específica da areia	NBR 9776 (1987)
Composição granulométrica da areia	NBR NM 248 (2003)
Massa unitária em estado compactado e em estado solto da areia	NBR NM 45 (2006)
Teor de materiais pulverulentos da areia	NBR NM 46 (2003)
Teor de argila em torrões e materiais friáveis da areia	NBR 7218 (2010)
Impurezas orgânicas da areia	NBR NM 49 (2000)

#### 3.2.2.2 Ensaio de granulometria a laser

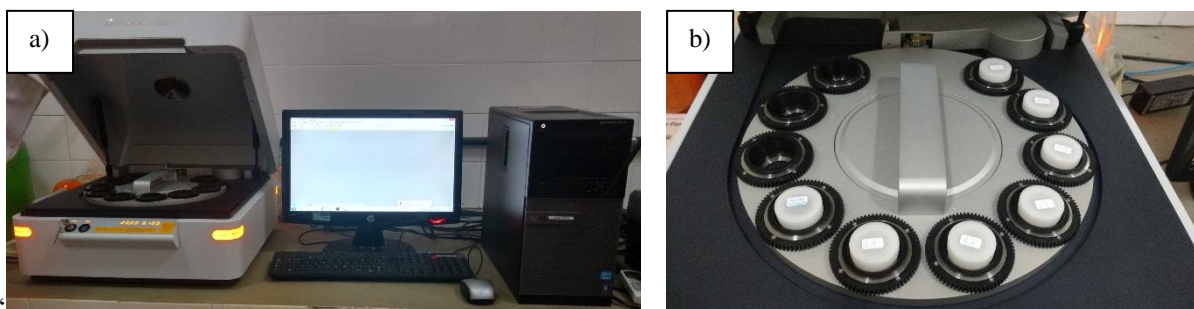
O ensaio de granulometria a laser foi realizado no Analisador de Tamanho de Partícula CILAS 1180, conforme a Figura 3.10, com faixa de medição entre 0,04  $\mu\text{m}$  e 2500  $\mu\text{m}$ , do Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER), situado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). As amostras de cimento e metacaulinita foram diluídas em álcool etílico PA e água, respectivamente, até a sua dispersão, em seguida o material foi colocado no porta amostra para a execução do ensaio.



**Figura 3.10** - Analisador de Tamanho de Partícula CILAS 1180.

### **3.2.2.3 Espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX)**

Esta técnica foi realizada para identificar a composição química do cimento, do caulim e da metacaulinita. As análises de espectrometrias de fluorescência de raios-X (FRX) por energia dispersiva foram feitas no equipamento da marca Panalytical modelo Epsilon 3 XL, conforme a Figura 3.11 (a), com tensão máxima de 50 kV, corrente máxima de 3 mA, com gás hélio (pressão 10 atm./10 kgf/cm<sup>2</sup>) do Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LAMAC) da UFAM. A Figura 3.11 (b) mostra as amostras distribuídas no equipamento.



**Figura 3.11** - Ensaio de FRX: a) Espectrômetro de fluorescência de raios-X modelo Epsilon 3 XL da Panalytical.; b) Amostras.

### **3.2.2.4 Difração de raios-X (DRX)**

As medidas de difração de raio-x foram realizadas em um difratômetro modelo Bruker D2 Phaser, mostrado na Figura 3.12, equipado com fenda de 0,6 mm, fenda de 3mm, tubo de radiação de Cu ( $k\alpha = 0,15406$  nm, 30 kV, 10 mA), num passo de 0,02°, com intensidades registradas por 1 segundo em cada passo, localizado no Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais (LSCN) do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia Do Amazonas (IFAM).





**Figura 3.12** -Difratômetro Bruker D2 Phaser do Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais do IFAM.

Para o cimento, caulim, metacaulinita e fibras de polipropileno o objetivo foi analisar as fases do material. A identificação dos compostos foi realizada através do programa da Panalytical (X'Pert High Score Plus) no contexto do difratômetro utilizado, com padrões difratométricos do International Center for Diffraction Data (ICDD) contidos em sua base de dados PDF-2.

A finalidade do ensaio de difração de raios-X para as fibras de malva e juta foi de determinar o índice de cristalinidade, sendo que as fibras foram previamente lavadas, deixadas para secar em temperatura ambiente e cortadas com tesoura em comprimentos muito pequenos, como um pó, para facilitar a realização do ensaio. O ensaio foi realizado sob condições ambientes, no equipamento modelo Bruker D2 Phaser diffractometer com ângulo de varredura de 0° a 60° para todas as fibras, num passo de 0,02°, com intensidades registradas por 1 segundo em cada passo.

O índice de cristalinidade mede a quantidade de celulose presente na fibra. Segundo Villate Diaz (2016), a celulose é um dos itens que constituem a fibra, a sua presença está diretamente ligada a resistência de fibras vegetais, portanto faz-se necessário conhecer o seu índice de cristalinidade. Nesta pesquisa, para o cálculo do índice de cristalinidade, escolheu-se o método empírico de Segal *et al.* (1959) conforme a Equação 3.1, este mesmo método foi adotado em estudos anteriores, como Roy *et al.* (2012) e Fernandes *et al.* (2009).

$$I_c = \frac{I_{(002)} - I_{(am)}}{I_{(002)}} \times 100$$

**Equação 3.1**

Onde:

$I_c$  – Índice de cristalinidade em porcentagem;

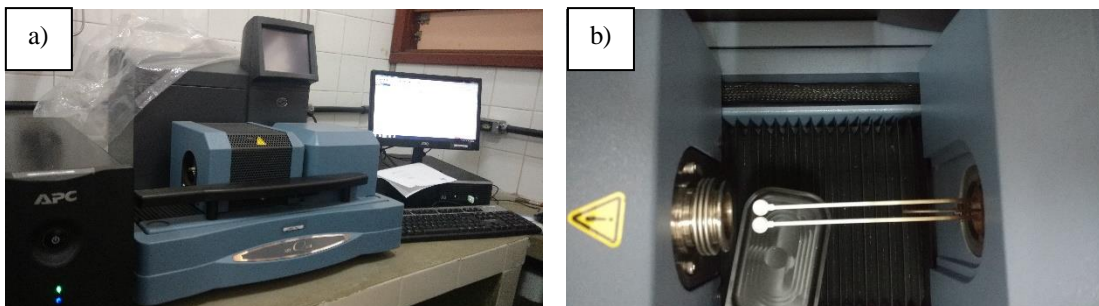
$I_{(002)}$  – Pico de intensidade de difração que representa o material cristalino perto de  $2\theta = 22^\circ$ ;

$I_{am}$  – Pico de intensidade de difração que representa o material amorfo perto de  $2\theta = 18^\circ$ .

### **3.2.2.5 Análise Termogravimétrica e Termogravimetria Derivada (TG/DTG)**

O ensaio de termogravimetria (TG/DTG) foi realizado com o intuito de analisar o comportamento térmico das pastas de cimento e das fibras. O equipamento utilizado foi o de modelo SDT Q600 TGA/DTA/DSC Simultâneo da TA Instruments do LAMAC na UFAM, conforme Figura 3.13 (a). A taxa de aquecimento foi de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ , da temperatura ambiente até aproximadamente  $800^\circ\text{C}$  para as fibras e até aproximadamente  $900^\circ\text{C}$  para as pastas em atmosfera de nitrogênio e fluxo do registrador de  $30\text{ mL}/\text{min}$ , com cadinhos de platina (Figura 3.13 (b)).

Para este ensaio as fibras naturais foram previamente lavadas, deixadas para secar em temperatura ambiente. As fibras naturais e sintéticas foram cortadas com tesoura em aproximadamente  $0,5\text{ mm}$  de comprimento. As massas iniciais para as fibras de polipropileno, malva e juta foram  $9,662\text{ mg}$ ,  $10,233\text{ mg}$  e  $9,113\text{ mg}$  respectivamente.



**Figura 3.13** - Ensaio de termogravimetria: a) Equipamento de termogravimetria; b) Detalhe da amostra no cadinho.

A pasta da matriz referência foi constituída pela mistura de cimento e água; já a pasta da matriz com substituição foi composta com substituição parcial do cimento de 50% por metacaulinita e água. As pastas foram preparadas e mantidas em sacos de plástico, os quais foram selados durante o armazenamento para hidratação, evitando a troca de ar com o ambiente, o ensaio foi realizado em idade de 28 dias.

Os teores de hidróxido de cálcio livre ( $CH_L$ ) presentes nas pastas após a hidratação foram calculados através da Equação 3.2. Já a hidratação total, ou o teor de água quimicamente combinada foi determinada de acordo com a Equação 3.3, porém com a perda de massa total de 1000°C (BAERT *et al.*, 2008).

$$CH_L = Ca(OH)_2 = ML_{Ca(OH)_2} \times \frac{MM_{Ca(OH)_2}}{MM_{H_2O}}$$

**Equação 3.2** - Teor de hidróxido de cálcio livre.

$$H_2O_{Q.comb} = massa_{1000^\circ C} - massa_{105^\circ C}$$

**Equação 3.3** - Água quimicamente combinada.

Onde:

$CH_L$  – Teor de hidróxido de cálcio livre produzido durante a hidratação da pasta, em %;

$ML_{Ca(OH)_2}$  – Perda de massa verificada na curva TG para  $Ca(OH)_2$ , em %;

$MM_{Ca(OH)_2}$  – Massa molecular do  $Ca(OH)_2$ , em g/mol;

$MM_{H_2O}$  – Massa molecular do  $H_2O$ , em g/mol;

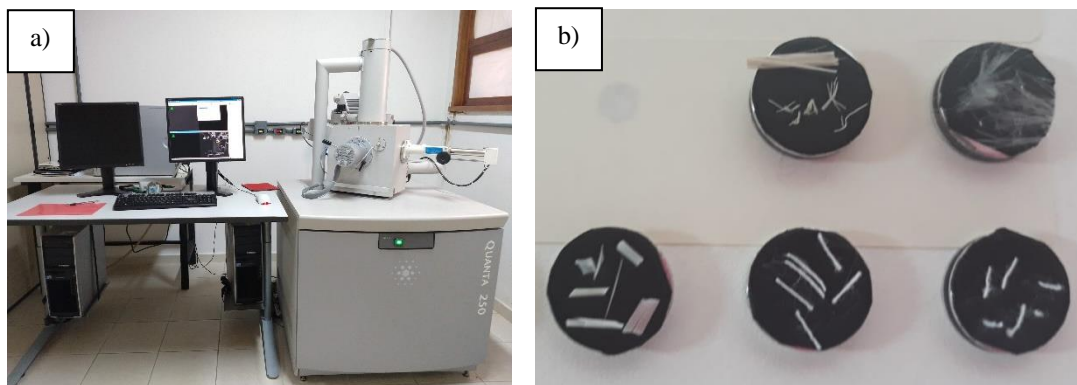
$H_2O_{Q.comb}$  – Água quimicamente combinada;

$massa_{1000^\circ C}$  – Perda de massa total entre 0 e 1000°C;

$massa_{105^\circ C}$  – Perda de massa referente a água livre, entre 35 e 105°C.

### **3.2.2.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

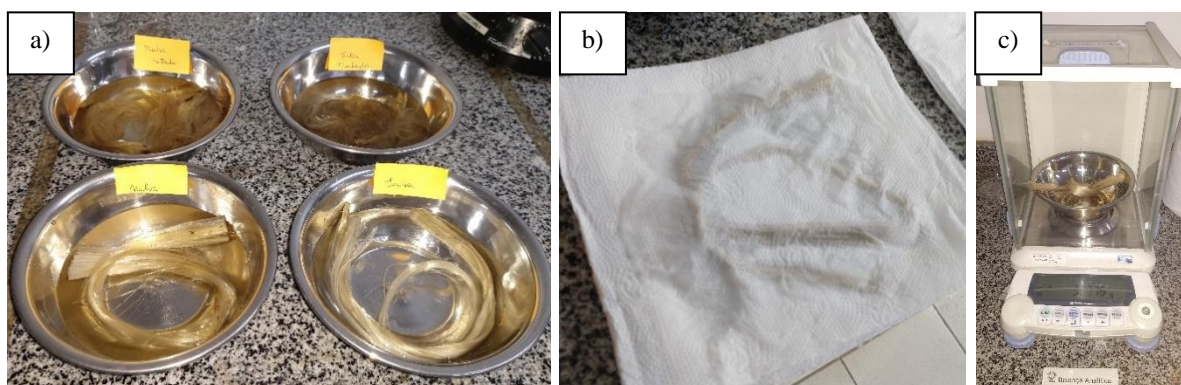
A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada no microscópio eletrônico de varredura Quanta 250 da Fei Company do Laboratório de Técnicas Mineralógicas (LabTecMin) da UFAM (Figura 3.14 (a)) e no microscópio eletrônico de varredura TESCAN VEGA3 do Laboratório Temático de Microscopia Ótica e Eletrônica, no Instituto Nacional de Pesquisas Amazônicas (LTMOE) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Nesta técnica as fibras de polipropileno não passaram por nenhum tratamento. No entanto, as fibras vegetais não tratadas e mercerizadas ficaram imersas em água por 24 horas, em seguida foram secadas superficialmente com papel absorvente, antes da execução do ensaio. Após a preparação inicial, todas as fibras foram cortadas com uma lâmina metálica com comprimento de aproximadamente 2,0 mm, como mostrado Figura 3.14 (b). O objetivo deste ensaio foi analisar a morfologia das fibras.



**Figura 3.14** - Ensaio de MEV : a) Microscópio eletrônico de varredura modelo Quanta 250 da Fei CoMPany; b) Detalhe das amostra.

### 3.2.2.7 Absorção de água das fibras naturais

Este ensaio teve a finalidade de avaliar a absorção de água das fibras vegetais. O procedimento realizado foi semelhante ao de Portela (2016). Para a determinação da absorção de água, as fibras foram secas em estufas até atingirem peso constante, em seguida foram resfriadas em dessecador em temperatura ambiente. Inicialmente mediu-se o peso inicial das fibras, depois estas foram imersas em recipientes com água destilada (Figura 3.15 (a)). Após serem retiradas da água, elas foram secas superficialmente com papel absorvente (Figura 3.15 (b)). A amostras foram pesadas em balança analítica após 0,5, 1, 2, 3, 24, 48 e 72 horas do início do teste (Figura 3.15 (c)). Este ensaio foi realizado no LAMAC e a Figura 3.15 mostra partes da execução do ensaio.



**Figura 3.15** - Ensaio de absorção de água das fibras naturais: a) Fibras imersas em água destilada; b) Secagem das fibras; c) Pesagem das Fibras.

Os resultados foram obtidos através da Equação 3.4.

$$\text{Aborção de água (\%)} = \frac{P_1 - P_0}{P_0}$$

**Equação 3.4**

Na qual:

$P_0$  – Peso inicial, em gramas;

$P_1$  – Peso após imersão em água, em gramas.

### ***3.2.4 Caracterização das matrizes***

Todo o processo de produção e caracterização das matrizes foi realizado no LEM da UFAM.

#### **3.2.4.1 Dosagem das matrizes**

De forma a dar continuidade às pesquisas sobre argamassa autonivelantes adotou-se as formulações de Lopes da Silva (2016) 1:1,25:0,5 (material cimentício: areia: água/material cimentício em peso), que em seu trabalho deu prosseguimento aos estudos de Martins (2009), sendo que este desenvolveu um procedimento para obtenção de pasta para argamassas, e de Souza *et al.* (2013) que a partir do primeiro estudo de Martins (2009) desenvolveram algumas formulações de argamassa autonivelante, mas identificaram através da aplicação prática do material em obra, a ocorrência do fenômeno de retração, pelo surgimento de fissuras superficiais no estado endurecido do piso, aplicado em uma edificação.

A partir da formulação de Lopes da Silva (2016), foram propostos ajustes de formulação com a substituição do cimento buscando-se desenvolver uma matriz livre de hidróxido de cálcio, garantindo também a fluidez desejada, devido a diferença da origem dos materiais usados nesta pesquisa, além de algumas matrizes possuírem substituição parcial de cimento. Para isso utilizou-se a mesma porcentagem de substituição de cimento desenvolvida por Melo Filho (2012), que substituiu 50% do volume de cimento por pozolana comercial com o intuito de aumentar a durabilidade de fibras vegetais em matrizes cimentícias. Porém, neste trabalho, optou-se por usar a metacaulinita fabricada em laboratório como pozolana e fibras sintéticas ou naturais, sendo desenvolvidas sete formulações, conforme a Tabela 3.5.

**Tabela 3.5** - Códigos e descrições das formulações de argamassas.

<b>Código</b>	<b>Descrição</b>	<b>Teor de fibras (g/m<sup>3</sup>)</b>
R	Formulação referência sem substituição de cimento e sem adição de fibras	-
RS	Formulação com substituição de cimento em 50% e sem adição de fibras	-
RFPP	Formulação referência sem substituição de cimento e com adição de 0,10% de fibras de polipropileno	910
RFJ	Formulação referência sem substituição de cimento e com adição de 0,10% de fibras de juta	1.300
RFM	Formulação referência sem substituição de cimento e com adição de 0,10% de fibras de malva	1.375
RSFJ	Formulação com substituição de cimento em 50% e adição de 0,10% de fibras de juta	1.300
RSFM	Formulação com substituição de cimento em 50% e adição de 0,10% de fibras de malva	1.375

Optou-se também por diminuir o fator água / cimento para 0,4, visando aumentar as propriedades mecânicas. A porcentagem de adição das fibras para as formulações determinadas foram todas baseadas no valor sugerido pelo fabricante da fibra de polipropileno, com teor de 0,10% da massa de cimento, com um intuito de comparação dos resultados, entre as formulações e de verificação do desempenho das fibras naturais vegetais, com uma fibra já conceituada no mercado. Na Tabela 3.6 estão mostrados os traços das misturas estudadas.

**Tabela 3.6** - Traço das misturas (kg/ m<sup>3</sup>).

<b>Materiais</b>	<b>CP</b>	<b>MK</b>	<b>Areia</b>	<b>Água</b>	<b>SP</b>	<b>FPP</b>	<b>FJ</b>	<b>FM</b>
<b>Matrizes</b>								
<b>R</b>	832,72	-	1.040,90	330,97	3,78	-	-	-
<b>RFPP</b>	832,72	-	1.040,90	330,97	3,78	910,00	-	-
<b>RFJ</b>	832,72	-	1.040,90	330,97	3,78	-	1.300,00	-
<b>RFM</b>	832,72	-	1.040,90	330,97	3,78	-	-	1.375,00
<b>RS</b>	416,36	416,36	1.040,90	326,73	11,35	-	-	-
<b>RSFJ</b>	416,36	416,36	1.040,90	326,73	11,35	-	1.300,00	-
<b>RSFM</b>	416,36	416,36	1.040,90	326,73	11,35	-	-	1.375,00

CP - Cimento Portland; MK - Metacaulinita; SP - Superplastificante; FPP - Fibra de Polipropileno; FJ - Fibra de

Juta; FM - Fibra de Malva.

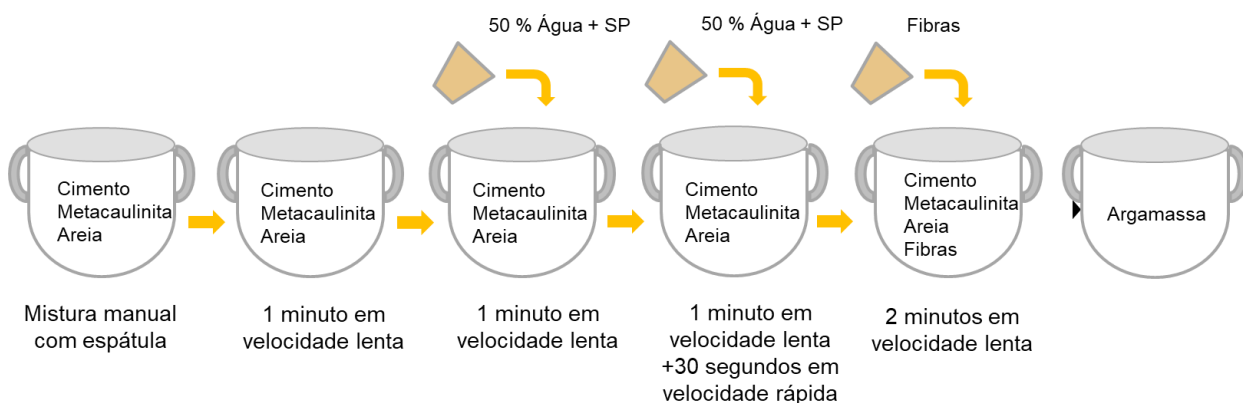
#### **3.2.4.2 Procedimento de mistura das matrizes**

As matrizes foram produzidas em um misturador da marca MATEST com capacidade de 5 litros, do LEM da UFAM, mostrada na Figura 3.16.



**Figura 3.16** - Procedimento de mistura.

O procedimento de mistura adotado foi adaptado de Souza *et al.* (2013), obedecendo a seguinte ordem: mistura manual dos componentes secos, seguido de mistura durante 1 minuto dos materiais secos no misturador planetário em velocidade lenta; depois acrescentou-se 50% da mistura de água com superplastificante e misturou por 1 minuto em velocidade lenta; por fim acrescentou o restante de água e misturou por 1 minuto em velocidade lenta e 30 segundos em velocidade rápida. Nas matrizes com adição de fibras, foi acrescido o tempo de 2 minutos na velocidade lenta, para evitar o enovelamento das fibras, conforme ilustrado na Figura 3.17. As fibras naturais adicionadas aos compósitos foram cortadas com tesoura com o mesmo comprimento da fibra de polipropileno e não receberam nenhum tratamento químico.



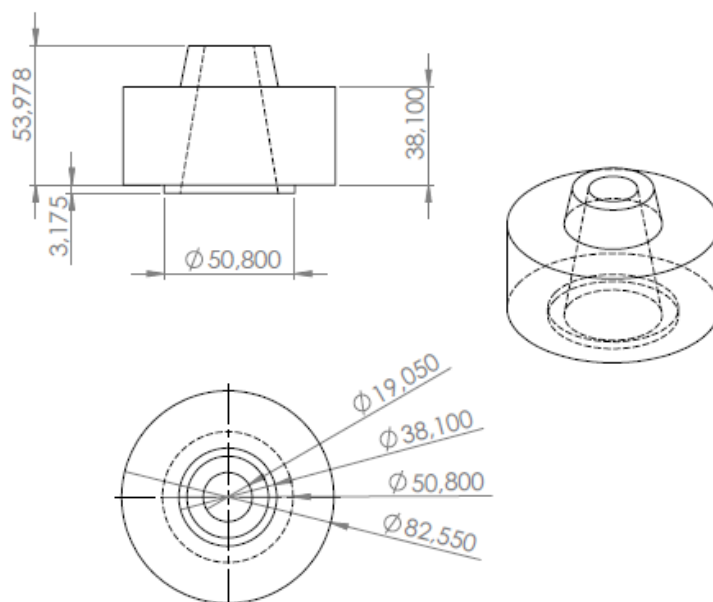
**Figura 3.17** - Esquematização do procedimento de mistura.

### 3.2.4.3 Determinação do teor de superplastificante

Inicialmente usou-se o mesmo traço usado por Lopes da Silva (2016), porém a argamassa obtida, apresentou um diâmetro de espalhamento muito inferior ao estabelecido por Nakakura e Bucher (1997) de 130 mm, além de não ter fluidez. Isso pode ser explicado pelos materiais

usados serem diferentes, além de que neste estudo trabalhou-se com a substituição parcial do cimento por metacaulinita, e para garantir a fluidez da argamassa e as propriedades autonivelantes, houve a necessidade de ajuste do aditivo químico. Nesta pesquisa o aditivo químico utilizado foi apenas o superplastificante.

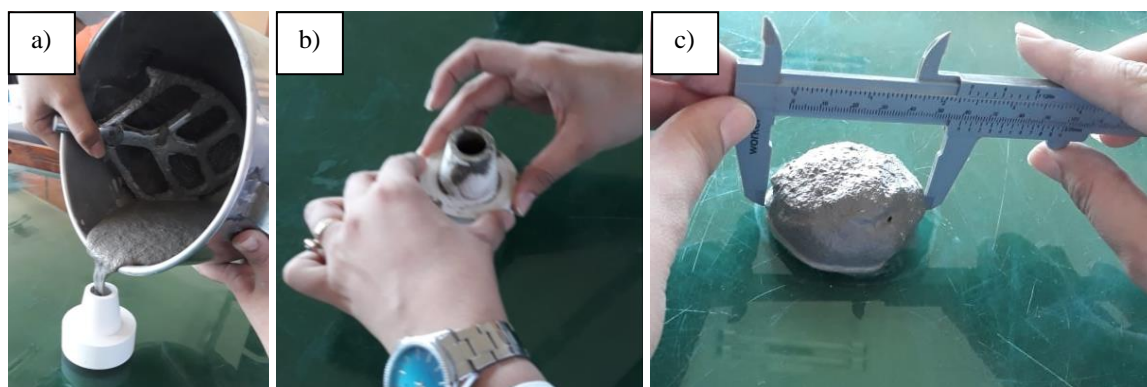
O método adotado foi o ensaio de consistência com o cone de Kantro (KANTRO,1980), no qual é verificado o diâmetro de espalhamento do material com a finalidade de avaliação da fluidez, seguindo os critérios de Martins (2009) e Lopes da Silva (2016), onde eles avaliaram visualmente as condições de borda e a existência de segregação e exsudação. Salienta-se, que este método foi proposto por Nakakura e Bucher (1997) para avaliação da consistência de argamassas, por causa da fluidez e composição das mesmas, e seguindo suas orientações, adotou-se o diâmetro mínimo de 130 mm. A Figura 3.18, mostra as dimensões do cone de Kantro.



**Figura 3.18** - Cone de Kantro (medidas em mm). Fonte: Lopes da Silva, 2016.

Neste ensaio, o diâmetro de espalhamento foi obtido conforme o procedimento: colocou-se a argamassa no cone de Kantro sobre uma placa ou mesa de vidro (Figura 3.19 (a)); encheu-se totalmente o cone; retirou-se o cone (Figura 3.19 (b)); após 1 minuto realizou-se 4 medidas do diâmetro com um paquímetro conforme a Figura 3.19 (c) e por fim calculou-se a média aritmética, indicando a fluidez da argamassa. Simultaneamente, as condições de bordas, existência de segregação e exsudação foram avaliadas conforme as recomendações de definidas por Martins (2009) para as pastas. A Figura 3.19 exhibe a sequência do ensaio do cone de Kantro.





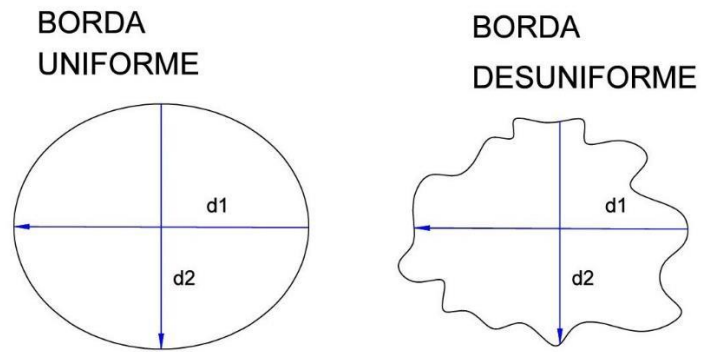
**Figura 3.19** - Ensaio de cone de Kantro: a) Enchimento do cone de Kantro; b) Retirada do cone; c) Medição do diâmetro.

Na Tabela 3.7 é apresentada o consumo de cimento e dos materiais usados para a formulação das argamassas autonivelantes. O objetivo em substituir o cimento pela metacaulinita, foi o de reduzir o seu consumo, tendo em vista que o fenômeno da retração geralmente é resultante das reações de hidratação do cimento, além da metacaulinita atuar na diminuição a degradação das fibras naturais vegetais, ao tornar a matriz livre de hidróxido de cálcio.

**Tabela 3.7** - Consumo de material durante a dosagem, em gramas.

Materiais	Matrizes						
	R	RFPP	RFJ	RFM	RS	RSFJ	RSFM
<b>Cimento</b>	179,86	179,86	179,86	179,86	89,93	89,93	89,93
<b>Metacaulinita</b>	-	-	-	-	89,93	89,93	89,93
<b>Areia</b>	224,82	224,82	224,82	224,82	224,82	224,82	224,82
<b>Água</b>	71,78	71,78	71,78	71,78	70,57	70,57	70,57
<b>SP</b>	0,82	0,82	0,82	0,82	2,45	2,45	2,45
<b>Fibra de Polipropileno</b>	-	0,18	-	-	-	-	-
<b>Fibra de Juta</b>	-	-	0,26	-	-	0,26	-
<b>Fibra de Malva</b>	-	-	-	0,27	-	-	0,27

Segundo Lopes da Silva (2016), a verificação das condições de borda é feita por meio da avaliação visual da uniformidade da borda da argamassa espalhada sobre a placa de vidro, após ensaio de cone de Kantro, conforme demonstrado na Figura 3.20, sendo que a uniformidade depende dos processos de segregação e exsudação da argamassa.



**Figura 3.20** - Condições de uniformidade visual da borda da argamassa escoada. Fonte: Lopes da Silva, 2016.

A ocorrência de segregação e exsudação também foram analisadas visualmente, sendo que as condições estabelecidas por Martins (2009), são exemplificadas na Figura 3.21, onde as bordas podem se apresentar altas ou baixas, fluidas em excesso ou não, com ou sem forma definida, e também pode-se identificar a presença de sólidos aglomerados.



**Figura 3.21** - Análise visual da argamassa escoada quanto à segregação. Fonte: Lopes da Silva, 2016.

A Figura 3.22 exemplifica uma argamassa autonivelante durante o procedimento de dosagem que apresentou segregação.



**Figura 3.22** - Argamassa autonivelante com segregação.

Na análise de existência de exsudação, verificou-se a presença ou não de água com nata de cimento, sobre a superfície da argamassa e na borda, resultado da percolação de água, exemplificada na Figura 3.23.

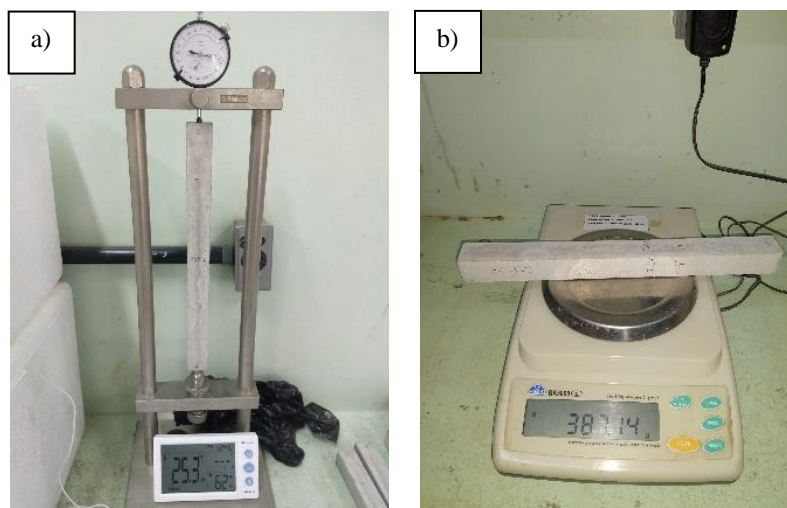


**Figura 3.23** - Argamassa autonivelante com exsudação.

### ***3.2.5 Caracterização físico-mecânica da argamassa autonivelante***

#### **3.2.5.1 Ensaio de variação dimensional**

A retração por secagem dos compósitos foi avaliada conforme, o ensaio de variação dimensional, descrito na NBR 15261 (ABNT, 2005). Este procedimento teve como finalidade, monitorar a variação dimensional das amostras e avaliar o comportamento de retração por secagem. Foram confeccionados 3 corpos de prova prismáticos para cada mistura, com dimensões de 25 x 25 x 285 mm, moldados com pinos, que permitiram a fixação do corpo de prova no estado endurecido a um pórtilho com relógio comparador de marca Mitutoyo, com resolução de 0,001 mm (Figura 3.24 (a)). De acordo com a norma, foram feitas leituras e pesagens nas idades de 1, 7, 14 e 28 dias, a contar da desforma, neste caso feita 72 horas após a moldagem (Figura 3.24 (b)). As leituras foram realizadas sempre na mesma posição, como ilustra a Figura 3.24. Além disso, usou-se um termo-higrômetro MT-241<sup>a</sup> da Minipa, para aferição da temperatura e umidade para cada idade. O ensaio foi Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade do Estado do Amazonas (UEA).



**Figura 3.24** - Ensaio de variação dimensional e de massa: a) Aferição da variação dimensional; b) Pesagem de corpo de prova.

A variação dimensional foi calculada a partir da Equação 3.5.

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_0}{0,25}$$

**Equação 3.5**

Onde:

$\varepsilon_i$  - Variação dimensional na idade “i”, em mm/m;

$L_i$  - Leitura efetuada na idade final, em mm;

$L_0$  - Leitura efetuada após a desforma, em mm;

0,25 - Distância entre pinos fixos no corpo de prova (m).

Esta equação permite a obtenção de valores de expansão ou retração em mm/m no tempo de ensaio. Ou seja, se o valor da variação dimensional for positivo é sinal de que houve uma expansão, porém se o valor for negativo houve uma retração. A variação dimensional final foi a média dos valores obtidos.

A variação de massa foi calculada pela Equação 3.6.:

$$\Delta_{m_i} = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100$$

**Equação 3.6**

Onde:

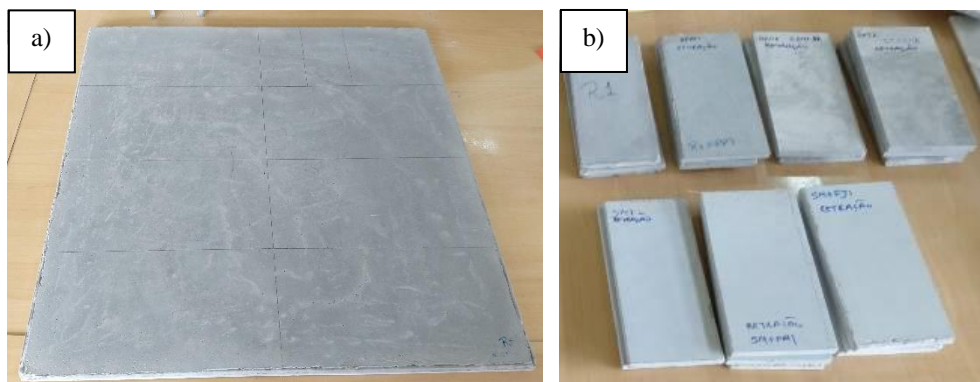
$\Delta m_i$  – Variação de massa, arredondada ao décimo mais próximo, em %;

$m_i$  – Massa na idade final, em g;

$m_0$  – Massa após a desforma do corpo de prova, em g.

### **3.2.5.2 Ensaio de variação dimensional por imersão e secagem**

Este ensaio foi realizado conforme a NBR 15498 (ABNT, 2007), com o objetivo de estabelecer uma comparação com o ensaio de variação dimensional de argamassa descrito na NBR 15261 (ABNT, 2005). Para isso foram moldadas placas cimentícias para cada matriz estudada (Figura 3.25 (a)), com espessura de aproximadamente 10 mm, das quais foram cortadas 4 amostras com dimensões de 100 mm x 200 mm como mostrado na Figura 3.25 (b). As amostras de cada matriz foram mantidas imersas em água por 48 horas e após esse período, elas foram removidas da água e secadas superficialmente. Na região central, no sentido do comprimento, foram identificados pontos de marcação com 80 mm distantes entre si, sendo esta a medida inicial, tomando-se cuidado para sempre marcá-los com exatidão. Em seguida, os corpos de prova foram secos por 48 horas em uma estufa de marca DeLeo Equipamentos Laboratoriais, pertencente ao LABPAV, à temperatura de  $90^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  até atingirem massa constante. Posteriormente, foram colocados para esfriar em um dessecador até temperatura de  $25^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ . Quando estavam frios, realizou-se uma nova medição nos mesmos pontos de medida, sendo estas o comprimento final.



**Figura 3.25** - Ensaio de variação dimensional por imersão e secagem: a) Placa cimentícia; b) Amostras.

Em posse dos valores, a variação dimensional das placas foi calculada conforme a Equação 3.7.

$$v = \frac{l_i - l_f}{l_f} \times 100$$

**Equação 3.7**

Onde:

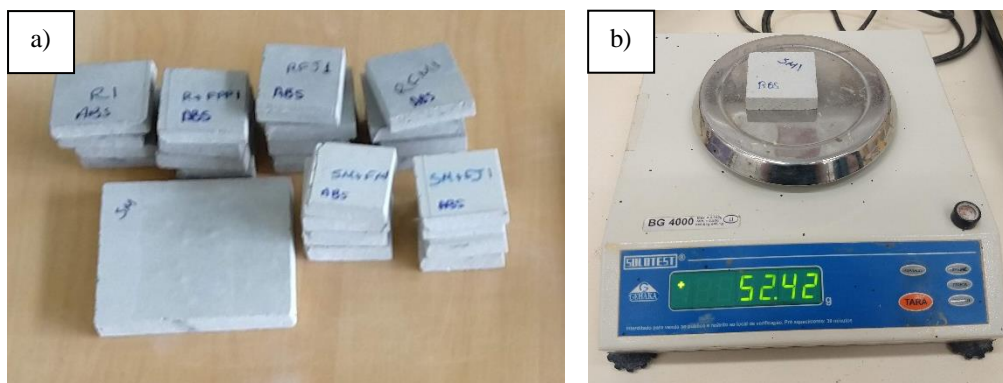
$v$  -Variação dimensional, em %;

$l_i$  - Comprimento inicial, em mm;

$l_f$  - Comprimento final, em mm.

### 3.2.5.3 Ensaio de absorção de água do compósito

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com a NBR 15498 (ABNT, 2007), onde os corpos de prova foram extraídos da mesma placa confeccionada para o ensaio anterior com área superficial de 25 cm<sup>2</sup> (Figura 3.26 (a)). Inicialmente, as amostras foram imersas em água até a sua saturação por um período de 48 horas, sendo em seguida pesadas e obtidas a massa inicial (Figura 3.26 (b)). Após esse processo, as amostras foram colocadas para secar em estufa, de marca DeLeo Equipamentos Laboratoriais no LABPAV, sendo mantidas à temperatura de 90°C ± 5°C por 48 horas. A Figura 3.26 mostra uma parte da execução do ensaio.



**Figura 3.26** - Ensaio de absorção de água em placas: a) Amostras; b) Pesagem das amostras.

Ao final, a absorção de água foi calculada pela Equação 3.8.

$$w = \frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100$$

**Equação 3.8**



Onde:

$w$  - Absorção de água, em porcentagem;

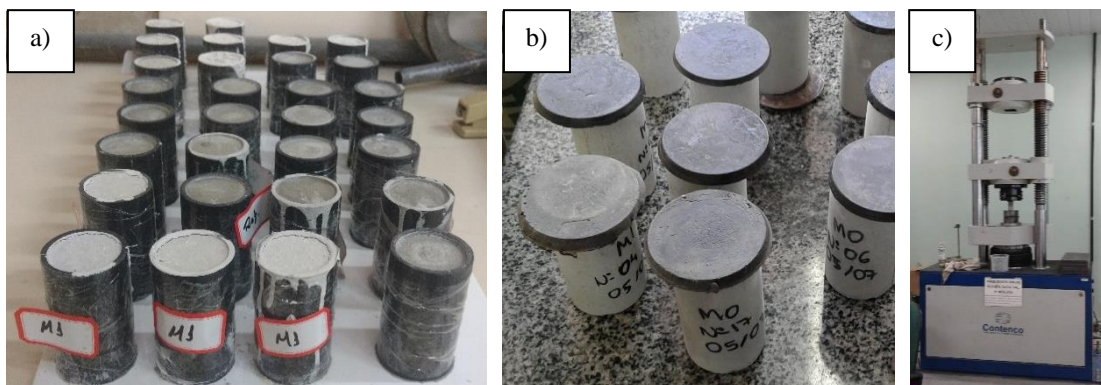
$m_i$  - Massa inicial, em gramas;

$m_f$  - Massa final, em gramas.

### 3.2.5.4 Ensaio de resistência à compressão

Os corpos de prova para a determinação da resistência à compressão axial foram confeccionados segundo uma adaptação da NBR 7215 (ABNT, 1996), sendo moldados 4 corpos de prova para a idade de 28 dias, cilíndricos medindo 50,00 mm de diâmetro e 100,00 mm de altura, para cada matriz, imediatamente após o amassamento e com maior rapidez possível, como ilustrado na Figura 3.27 (a). Em virtude da alta fluidez da argamassa, não foi possível adensá-la em camadas. Ao final desse processo rasou-se o topo da forma com uma espátula metálica e removeu a argamassa que ultrapassou da borda. Os corpos de prova foram deixados por 24 horas em cura inicial, depois desse período as formas foram retiradas, os mesmos foram colocados para cura submersa em água saturada com cal. Para a realização do ensaio de compressão, os corpos de prova foram retirados da cura submersa e deixados para secar em temperatura ambiente por 24 horas antes do ensaio. Em seguida foram identificados, pesados, capeados com enxofre nas extremidades para diminuir as imperfeições, mostrado na Figura 3.27 (b).

O equipamento utilizado foi uma máquina universal eletrônica digital, hidráulica da marca Contenco Fabricantes de Produtos Pavitest (Figura 3.27 (c)), com capacidade de 100 T. A mesma operou com velocidade constante de 0,50 mm/min, do Laboratório de Materiais e Estruturas da Universidade do Estado do Amazonas (UEA) Figura 3.27 (c).



**Figura 3.27** - Ensaio de resistência à compressão: a) Corpos de prova; b) Capeamento dos corpos de prova; c) Equipamento.

A resistência à compressão foi determinada pela Equação 3.9.

$$R_c = \frac{F_c}{A_c}$$

**Equação 3.9**

Onde:

$R_c$  – Resistência à compressão, em MPa;

$F_c$  – Carga máxima aplicada, em N;

$A_c$  – Área do corpo de prova, em mm<sup>2</sup>.

### **3.2.5.5 Ensaio de resistência à tração na flexão**

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado conforme a NBR 15498 (ABNT, 2007), no qual primeiramente moldaram-se placas cimentícias de 400 mm x 400 mm x 10 mm para cada uma das 7 matrizes (R, RS, RFPP, RFJ, RFM, RSFJ e RSFM), das quais foram extraídos 4 corpos de prova com idade de 28 dias, igualmente ao ensaio de compressão. Esta norma foi adotada em virtude de tentar simular o desempenho da argamassa autonivelante aplicada com 10 mm de espessura. Os corpos de prova possuíam formato retangulares com dimensões de 100 mm x 200 mm x 10 mm. Como dito anteriormente, não foi necessário aplicar os golpes de adensamento previstos na norma, em virtude da argamassa se apresentar bastante fluida. Vale ressaltar que os corpos de prova foram desformados após 24h da moldagem, saturados em água e envoltos em plástico filme para cura.

A resistência à tração na flexão foi calculada pela Equação 3.10.

$$R_f = \frac{3P_{max}L}{2be^3}$$

**Equação 3.10**

Na qual:

$R_f$  – Resistência à tração na flexão, em MPa;

$P_{max}$  – Carga de ruptura por flexão, em N;

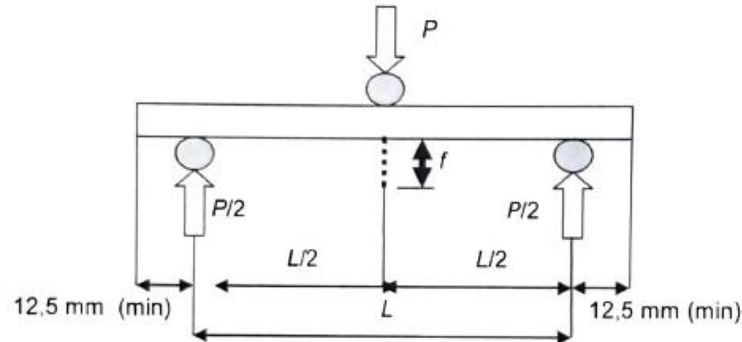
$L$  – Distância entre eixos de suporte, em mm;

$b$  – Largura do corpo de prova, em mm;



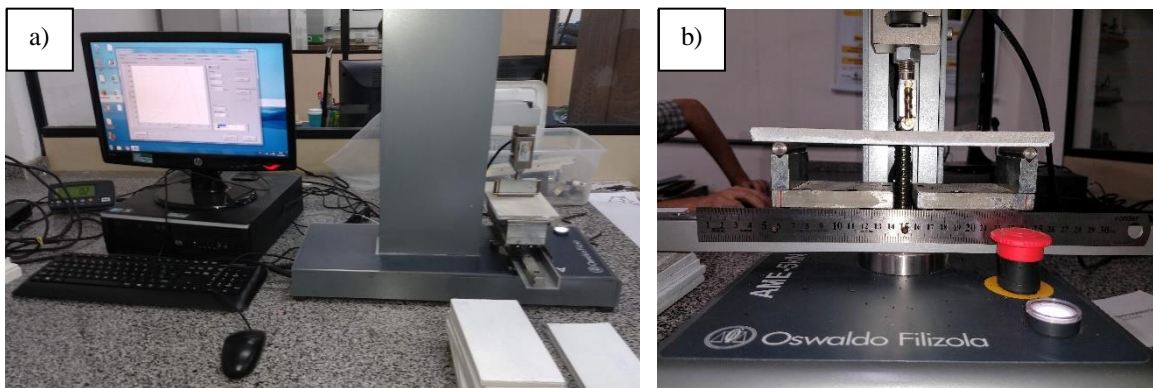
$e$  – Espessura média do corpo de prova (média aritmética das medidas), em mm.

A Figura 3.28 mostra o esquema do ensaio de flexão de 3 pontos.



**Figura 3.28** - Esquema do ensaio de flexão de três pontos. Fonte: NBR 15498 (ABNT, 2007).

O equipamento utilizado foi uma Máquina Universal de Ensaio modelo AME-5kN, com capacidade de 5kN (500kgf) com velocidade de ensaio de 0,50 mm/min, do Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LAMAC) da UFAM, Figura 3.29 (a). A Figura 3.29 (b) mostra a execução do ensaio.



**Figura 3.29** - Ensaio de tração na flexão: a) Equipamento; b) Execução do ensaio.

### 3.2.6 Avaliação estatística dos dados experimentais

Os resultados obtidos para os ensaios de caracterização da matriz cimentícia e caracterização físico-mecânica da argamassa autonivelante, foram avaliados estatisticamente por análise de variância (ANOVA), ao nível ao nível probabilístico de 5% ( $p < 0,05$ ). Após a coleta dos dados, excluiu-se os valores espúrios. Em seguida, usou-se a tabela ANOVA para tratamento estatístico dos dados, com a finalidade de avaliar a existência de uma diferença

significativa entre as médias e se algum fator exerceu alguma influência em alguma variável dependente.

As variáveis deste estudo foram os diferentes tipos de matrizes, com e sem substituição do cimento e os tipos de fibras vegetais de juta e malva. Considerando o desenvolvimento da formulação da argamassa autonivelante a unidade de análise, a Figura 3.30 exibe as seguintes variáveis independentes.

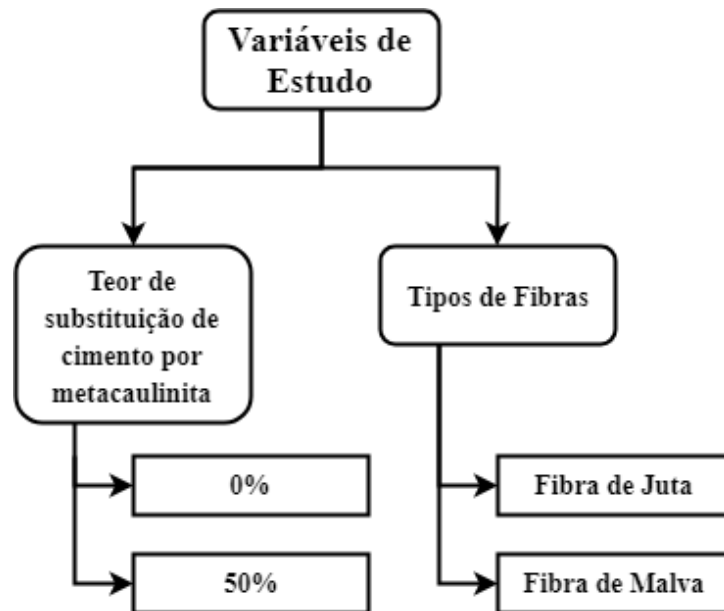


Figura 3.30 - Representação esquemática das variáveis de estudo.

## Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização dos materiais

#### 4.1.1 Caracterização Física

Os índices físicos da areia são apresentados na Tabela 4.1, assim também como as normas utilizadas para a execução dos ensaios. Os resultados foram comparados aos limites máximos estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2005), estando todos dentro da conformidade. O seu módulo de finura foi de 1,71 e encontra-se dentro da zona utilizável inferior.

**Tabela 4.1** - Índices físicos da areia.

<b>Índices Físicos</b>	<b>Resultados</b>	<b>Norma utilizada</b>
Dimensão máxima característica (mm)	2,40	NBR NM 248:2003
Módulo de Finura	1,71	NBR NM 248:2003
Massa específica	2,62	NBR 9776:1987
Massa unitária em estado solto (kg/m <sup>3</sup> )	1.536,11	NBR NM 45:2006
Massa unitária em estado seco compactado (kg/m <sup>3</sup> )	1.564,44	NBR NM 45:2006
Impurezas orgânicas	Mais clara	NBR NM 49:2001
Teor de argila (%)	0,11%	NBR 7218:2010
Teor de material pulverulento (%)	0,19%	NBR NM 46:2003

#### 4.1.2 Ensaio de granulometria a laser

Na granulometria da areia adotou-se a NBR NM 248 (ABNT, 2003), enquanto que para o cimento e a metacaulinita, realizou-se o ensaio de granulometria a laser no Analisador de Tamanho de Partícula CILAS 1180, com faixa de medição entre 0,04  $\mu\text{m}$  e 2500  $\mu\text{m}$ . Analisando a curva granulométrica da metacaulinita (MK) na Figura 4.1, quando comparada a curva do cimento Portland (CP), destaca-se que a MK é um material mais fino que o cimento utilizado nesta pesquisa. O cimento apresenta partículas com diâmetro entre 0,1 e 100  $\mu\text{m}$ , enquanto que a metacaulinita possui partículas de dimensões entre 0,1 e 70  $\mu\text{m}$ . Na produção das matrizes, utilizou-se uma areia fina, com poucas impurezas orgânicas, sendo proveniente de rio, com curva granulométrica exibida na Figura 4.1, as curvas granulométricas foram condizentes com as encontradas por Bentz *et al.* (2016).

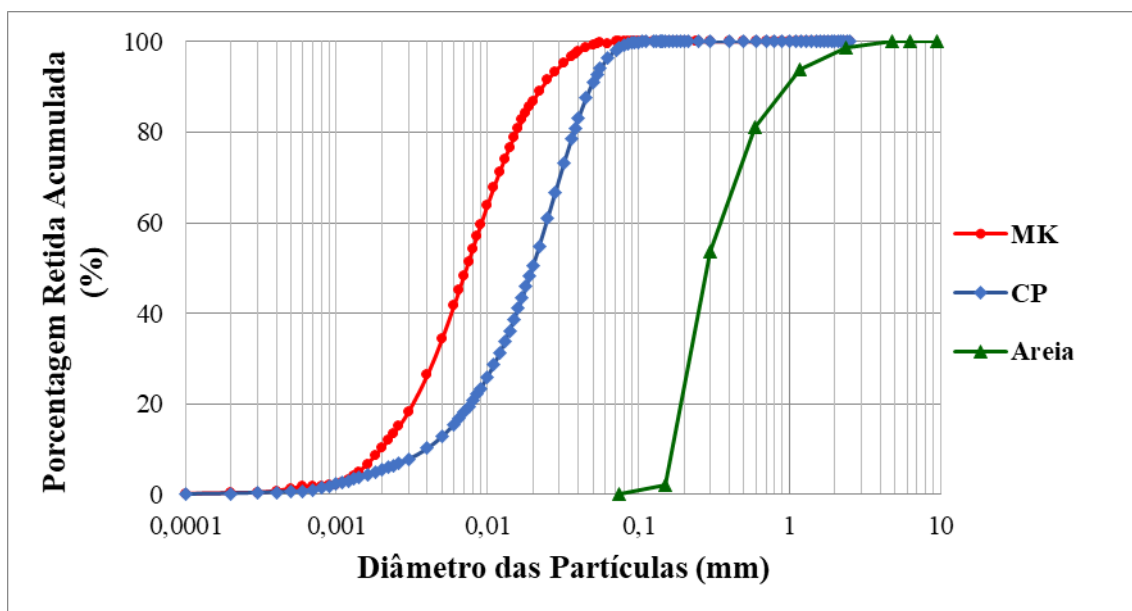


Figura 4.1 - Curva granulométrica metacaulinita, cimento CP II E-32 e da areia.

#### 4.1.3 Espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX)

A análise química do cimento Portland (CP), do caulim (CL) e da metacaulinita (MK) se deu através da espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) por energia dispersiva no equipamento da marca Panalytical, modelo Epsilon 3 XL, com tensão máxima de 50 kV, corrente máxima de 3 mA, com gás hélio (pressão 10 atm./10 kgf/cm<sup>2</sup>). A massa específica foi realizada conforme a NBR NM 23 (ABNT, 2000) apenas para o CP e a MK. Os valores encontrados estão mostrados na Tabela 4.2 para o cimento, caulim e metacaulinita.

Tabela 4.2 - Análise Química do Cimento Portland CII E 32 e da Metacaulinita.

Material	SO <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	K <sub>2</sub> O (%)	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )
CP	3,708	2,055	64,999	18,440	5,109	3,467	0,580	0,458	3,04
CL	-	-	0,094	55,147	43,044	0,580	0,418	0,261	-
MK	-	-	0,194	55,941	41,209	0,924	0,765	0,381	2,75

No cimento, os valores encontrados de SO<sub>3</sub> foi de  $3,708 \leq 4,500$ , e o de MgO  $2,055 \leq 6,500$  e ficaram dentro do limite estabelecido na NBR 16697 (ABNT, 2018). Os óxidos encontrados no CL foram idênticos aos encontrados por Faria (2019), porém as porcentagens foram bem distintas, podendo ser explicado, em decorrência do local de extração ser diferente. Em sua pesquisa Rocha (2005), afirma que em relação a composição química teórica, a

metacaulinita de alta reatividade deve possuir de  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 90,00\%$  e teor de  $\text{CaO} < 1,00\%$ . Portanto, com base no ensaio de fluorescência de raios-X a metacaulinita utilizada apresenta alta reatividade, possuindo teores  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  de cerca de 98,70% e teor de  $\text{CaO}$  de 0,194. A sílica e a alumina têm percentuais de 54,1% e 45,9% respectivamente, exibindo uma relação  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$  de 0,736 comprovando o alto nível de pureza, apesar de não ser totalmente amorfa.

#### 4.1.4 Difração de raios-X (DRX)

A Figura 4.2 apresenta o difratograma de raios X do cimento CP II E-32, no qual indicou a presença de alita (A), brownmillerite (B), calcita (C), gipsita (G), quartzo (Q), larnita (L) e portlandita (P). A gipsita e o calcário são resultantes das adições durante a sua fabricação (SILVA e LIBÓRIO, 1999).

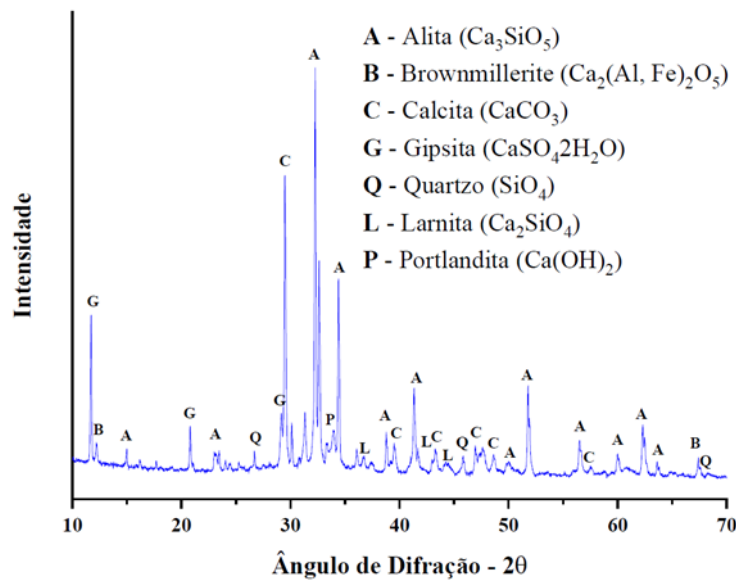


Figura 4.2 - Difratograma do cimento CP II E-32.

De acordo com o difratograma na Figura 4.3, o caulim apresentou caulinita (C) e quartzo (Q). Após o processo de calcinação durante 4 horas em temperatura de  $750^\circ\text{C}$ , a metacaulinita obtida, apresentou um halo amorfo situado na faixa de  $20^\circ$  a  $30^\circ$ , indicando a presença de materiais amorfos na amostra, estando em conformidade com Medina (2011). Porém, mesmo

após a calcinação ainda foi identificado a presença de quartzo (Q) na metacaulinita diferente da metacaulinita de Mazza (2010) que ficou totalmente amorfa.

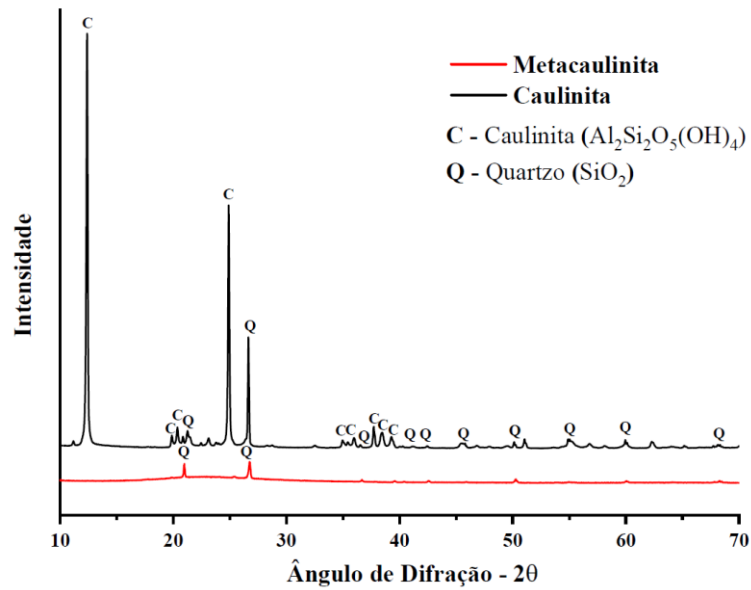


Figura 4.3 - Difratoograma do caulim e da metacaulinita.

A Figura 4.4 mostra o difratograma da fibra de polipropileno, onde apresentou picos característicos do polipropileno ( $\text{C}_3\text{H}_6$ ), conforme Ota (2004).

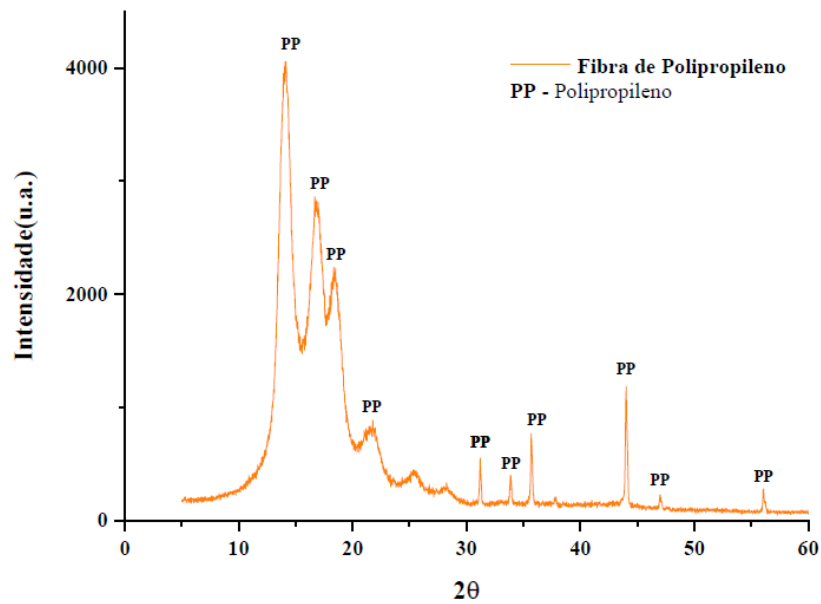
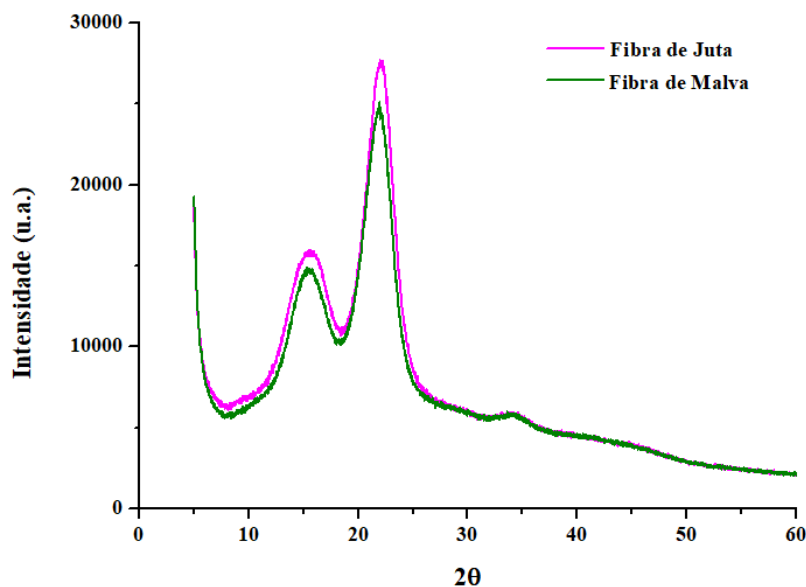


Figura 4.4 - Difratoogramas de raios-X da fibra de polipropileno.

A Figura 4.5 apresenta o difratograma das fibras vegetais sem tratamento químico. Através do método empírico de Segal (1959), foi possível determinar os índices de cristalinidade das fibras vegetais de juta e malva.



**Figura 4.5-** Difratogramas de raios-X das fibras de malva e juta.

Os resultados encontram-se na Tabela 4.3. O índice de cristalinidade da malva foi muito próximo ao encontrado por Oliveira *et al.* (2014), que afirma que o grau de cristalinidade das fibras naturais, indica o seu potencial como reforço em compósitos. No entanto, a juta obteve um valor superior ao encontrado por Portela (2016) e Roy *et al.* (2012).

**Tabela 4.3 - Índices de cristalinidade.**

<b>Fibra</b>	$I_{(002)}$	$I_{am}$	$I_c$ (%)
Malva	24.687,23	10.273,76	58,38
Juta	27.555,62	10.942,38	60,29

#### **4.1.5 Análise Termogravimétrica e Termogravimetria Derivada (TG/DTG) das fibras**

A Figura 4.6 mostra a análise termogravimétrica da fibra de polipropileno, onde a curva apresenta apenas um trecho de perda de massa, decompondo-se termicamente numa faixa de temperatura de 400-450°C. Em comparação com a pesquisa de Velasco (2002), nota-se que esta fibra resiste à temperaturas maiores, da mesma forma do que no estudo de Grubeša *et al.* (2018) onde a faixa de temperatura da decomposição de 236-390°C com o maior pico exotérmico a 350 ° C, e toda a perda de massa ocorreu bem abaixo de 400°C. Com relação aos dados do

fabricante na Tabela 3.3, no Capítulo 3, a fibra realmente apresenta ponto de ignição em torno 365°C.

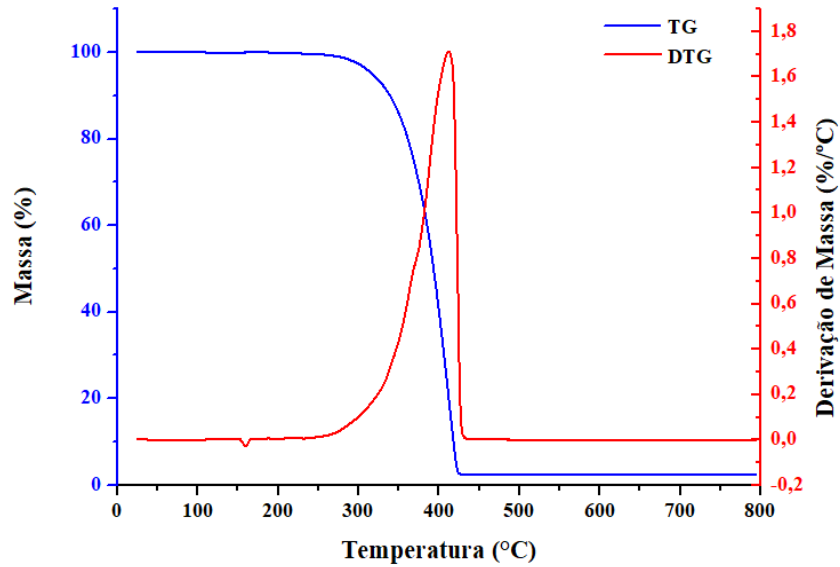


Figura 4.6 - Curvas de TG e DTG da fibra de polipropileno.

A Figura 4.7 mostra a análise termogravimétrica da fibra de malva e de juta. Diferentemente das curvas de TG e DTG de malva e juta na pesquisa de Oliveira (2013), que apresentaram apenas três trechos de perda de massa, estas apresentaram 4 trechos. Segundo Tomczak *et al.* (2007), o quarto trecho está relacionado a degradação de lignina.

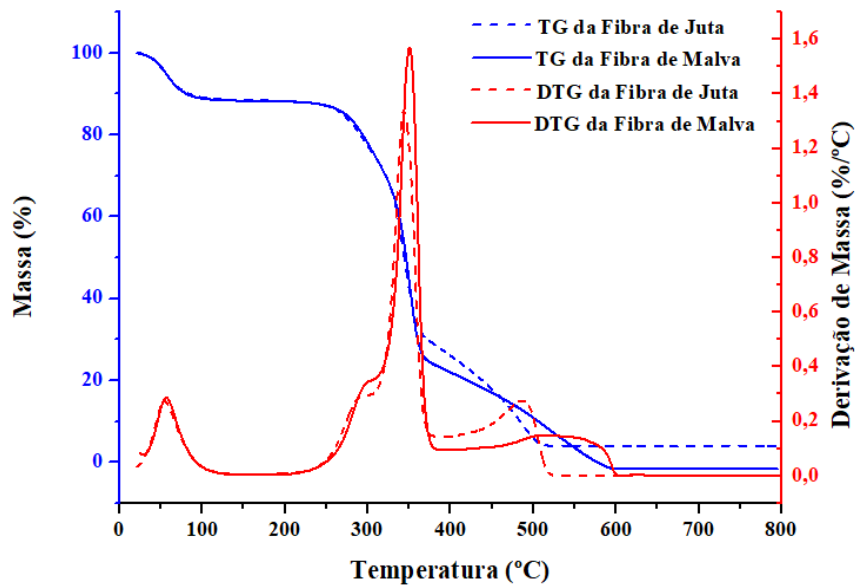


Figura 4.7 - Curvas de TG e DTG da fibra de malva e juta.



A malva apresentou o primeiro trecho entre as temperaturas de 25,06°C e 107,52°C indicando a perda de massa foi de 11,29% referente a perda de umidade. Em seguida, houve um decréscimo entre as temperaturas de 223,18°C e 313,63°C com perda de massa de 14,84% decorrente da decomposição da hemicelulose. O terceiro trecho corresponde às temperaturas de 313,63°C e 366,48°C à decomposição de celulose correspondendo a 46,95% da massa. O quarto trecho corresponde a decomposição lenta de lignina 366,48°C e 577,15°C, aproximadamente 26,17%, após esta temperatura a fibra degradou-se totalmente, sendo diferente do encontrado por Rodrigues (2015).

A curva de TG da juta foi semelhante à da malva, mudando apenas as temperaturas encontradas. Em seu primeiro trecho, a perda de massa de 11,42% foi referente a perda de umidade e ocorreu entre as temperaturas de 21,53°C e 143,69°C. O segundo trecho entre as temperaturas de 217,56°C e 308,14°C, com perda de massa de 13,13%, houve a decomposição da hemicelulose. O terceiro trecho corresponde às temperaturas de 308,14°C e 365,45°C à decomposição de celulose, teve perda de massa de 43,50%. O último trecho está relacionado com a decomposição da lignina 365,45°C e 519,37°C, com 27,34%. A curva foi muito parecida à de Ferreira *et al.* (2017), porém as temperaturas encontradas foram diferentes.

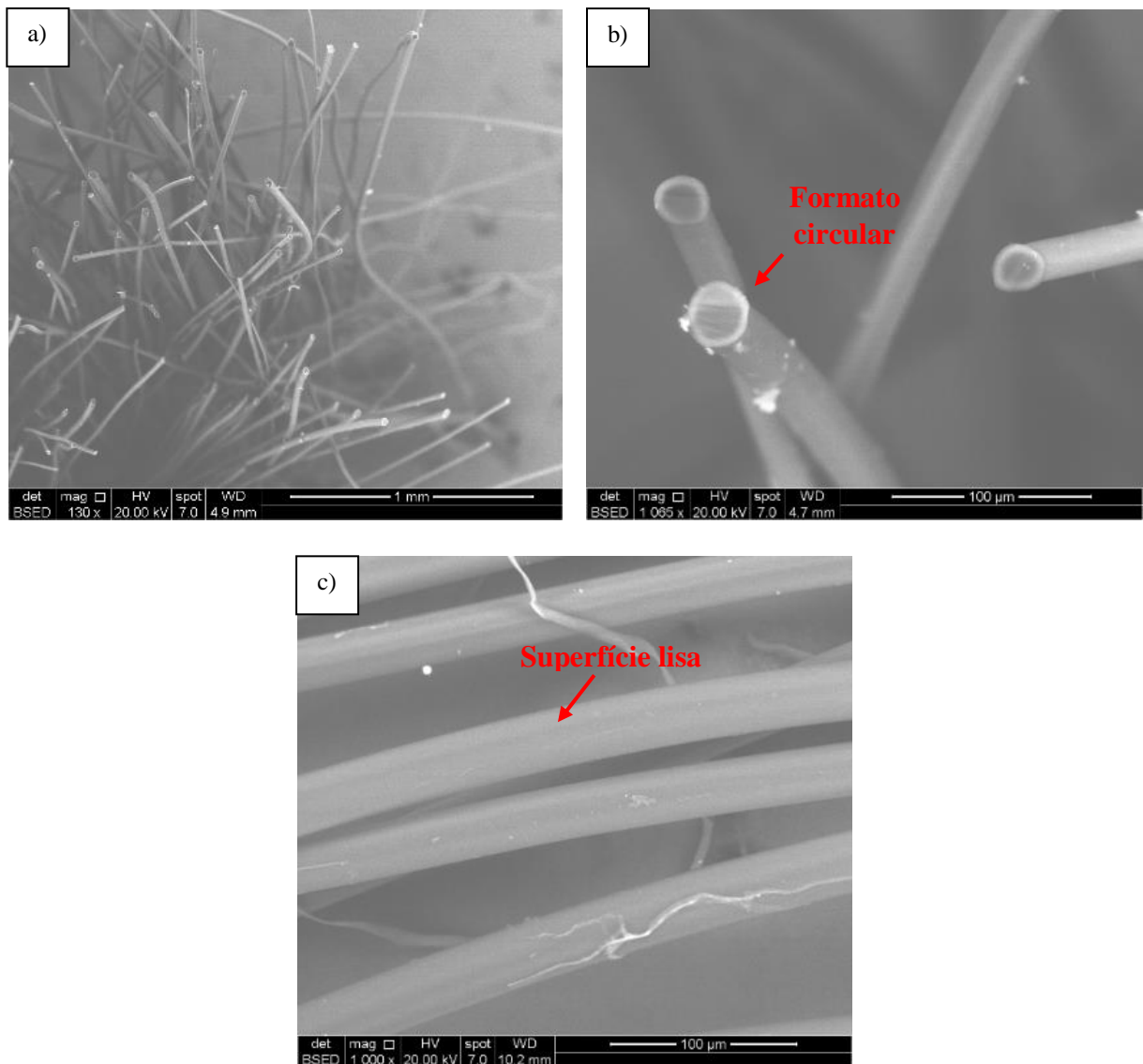
**Tabela 4.4** - Análise térmica das fibras.

Elemento	Polipropileno		Juta		Malva	
	Perda de massa (%)	Temperatura (°C)	Perda de massa (%)	Temperatura (°C)	Perda de massa (%)	Temperatura (°C)
Polipropileno	100	400 - 450	-	-	-	-
Umidade	-	-	11,42	21,53 - 143,69	11,29	25,06 - 107,52
Hemicelulose	-	-	13,13	217,56 - 308,14	14,84	223,18 - 313, 63
Celulose	-	-	43,50	308,14 - 365,45	46,95	313,63 - 366,48
Lignina	-	-	27,34	365,45 - 519,37	26,17	366,48 - 577,15

Em relação às curvas de DTG, foi possível identificar através de picos, as temperaturas máximas a qual ocorreram a perda de umidade, para a fibra de malva foi de 57,15°C e a de juta de 54,08 °C, a decomposição da hemicelulose para fibra de malva foi de 300,96°C e a de juta de 298,04°C e a decomposição da celulose, 350,27°C para a fibra de malva e 343,78°C para a de juta. Observou-se que a fibra de malva apresentou mais massa em relação a fibra de juta. A Tabela 4.4 resume os resultados obtidos.

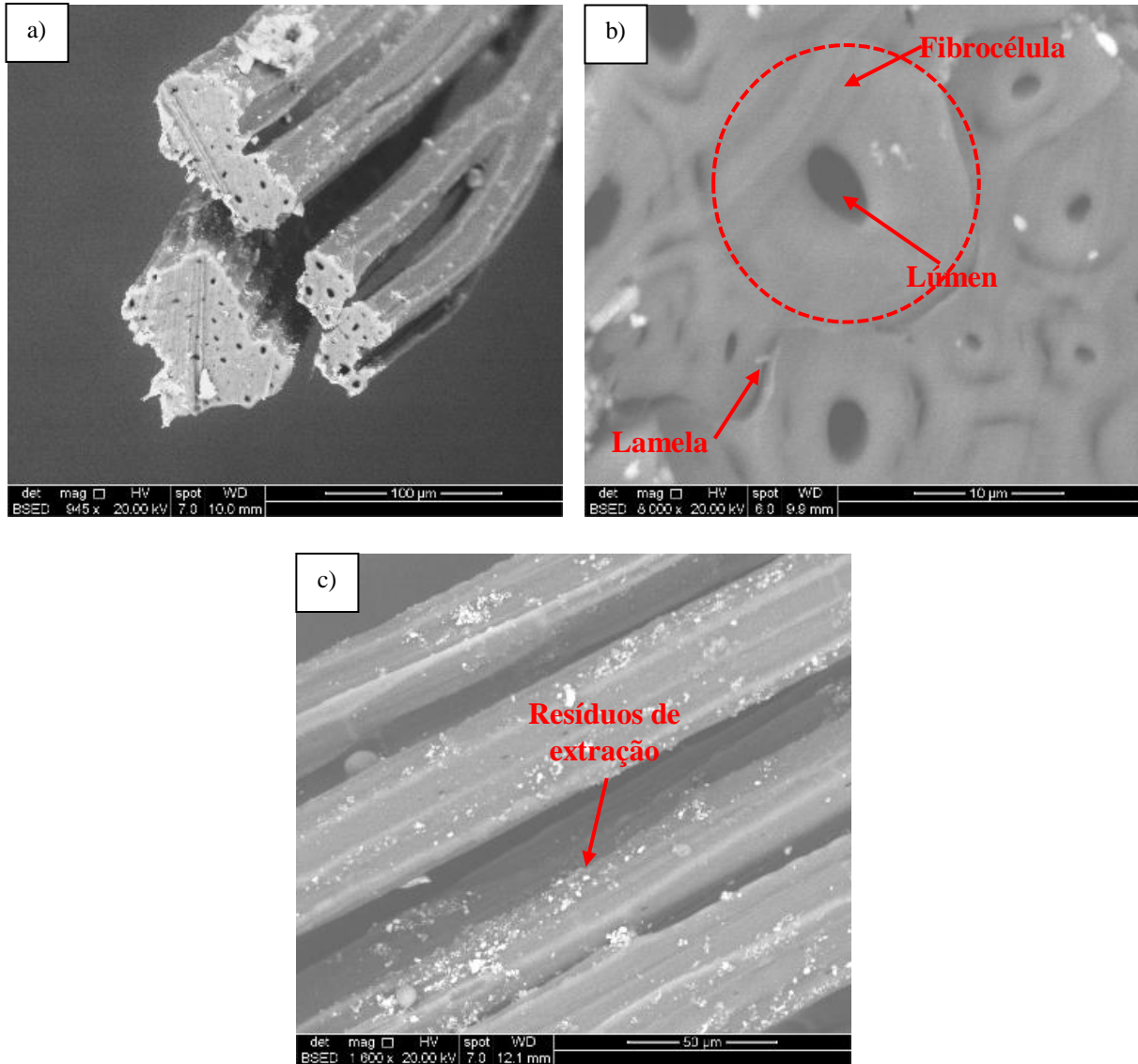
#### 4.1.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura permitiu analisar morfológicamente as fibras (Figura 4.8 (a)). A superfície da seção longitudinal das fibras de polipropileno se mostrou bem lisa e limpa (Figura 4.8 (c)), com grande grau de uniformidade em relação ao tamanho e forma, o mesmo encontrado por Grubeša *et al.*, (2018), Lai e Cheng (2018) e Ranjbar (2016). A seção transversal apresentou formato circular bem definido e uniforme, conforme Figura 4.8 (b). Devido as amostras não terem sido metalizadas, não foi possível realizar uma aproximação maior da seção transversal, pois com a maior incidência de elétrons, a fibra o polipropileno começava a se decompor termicamente.



**Figura 4.8** - MEV da fibra de polipropileno: a) Fibras de PP; b) Seção transversal; c) Seção longitudinal.

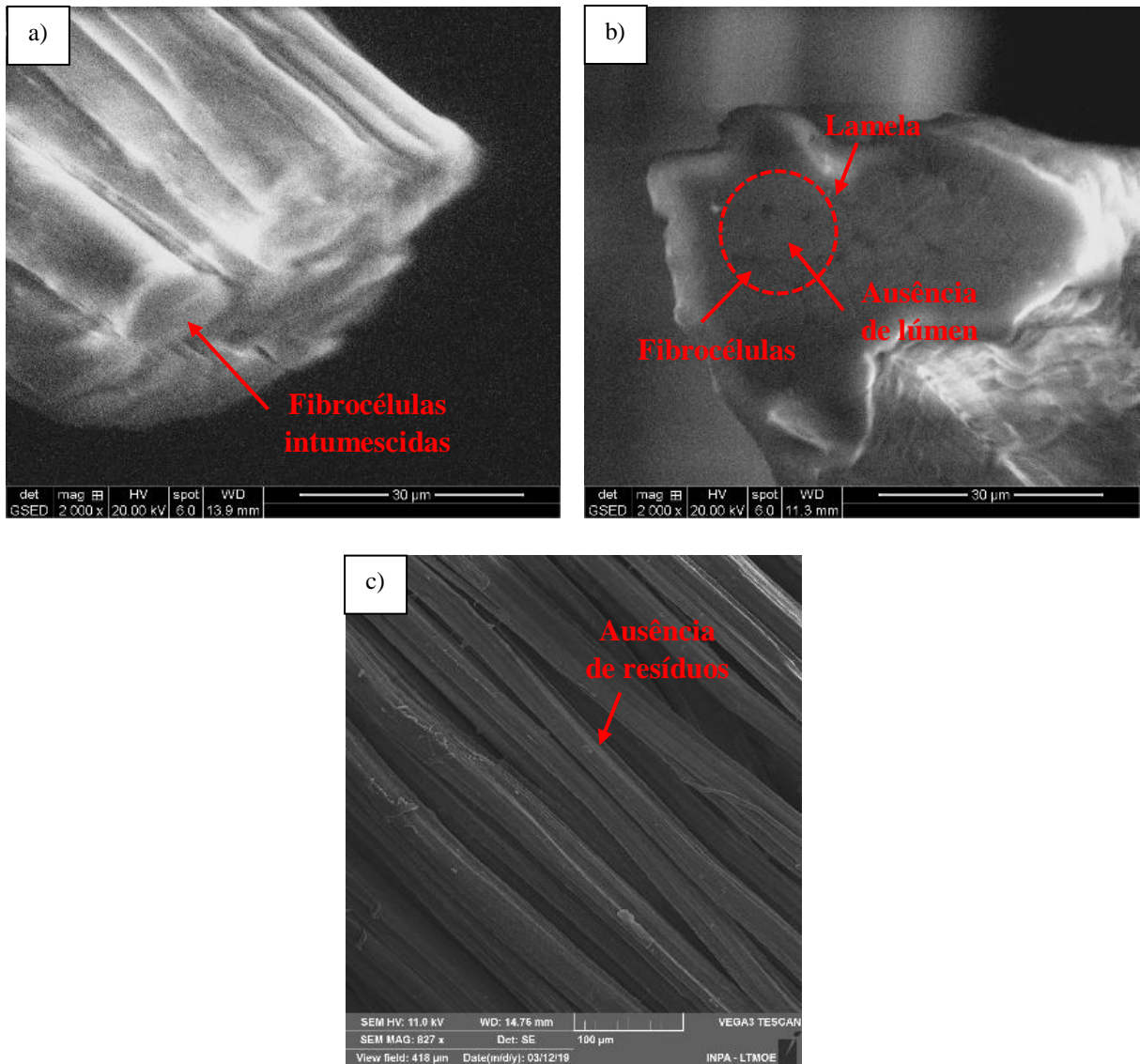
As fibras de malva sem tratamento apresentaram rugosidade e forma heterogênea como mostra as imagens de MEV na Figura 4.9 (a), de acordo com Margem (2013) esse aspecto é característico das fibras de malva justamente por serem fibras vegetais. Na Figura 4.9 (b) é possível identificar as fibrocélulas, o lúmen e a lamela média. A imagem da seção longitudinal (Figura 4.9 (c)), evidencia resíduos da extração sem desfibramento das microfibrilas segundo Costa *et al.* (2012).



**Figura 4.9** - MEV da fibra de malva sem tratamento: a)Fibras de malva; b) Seção transversal; c) Seção longitudinal.

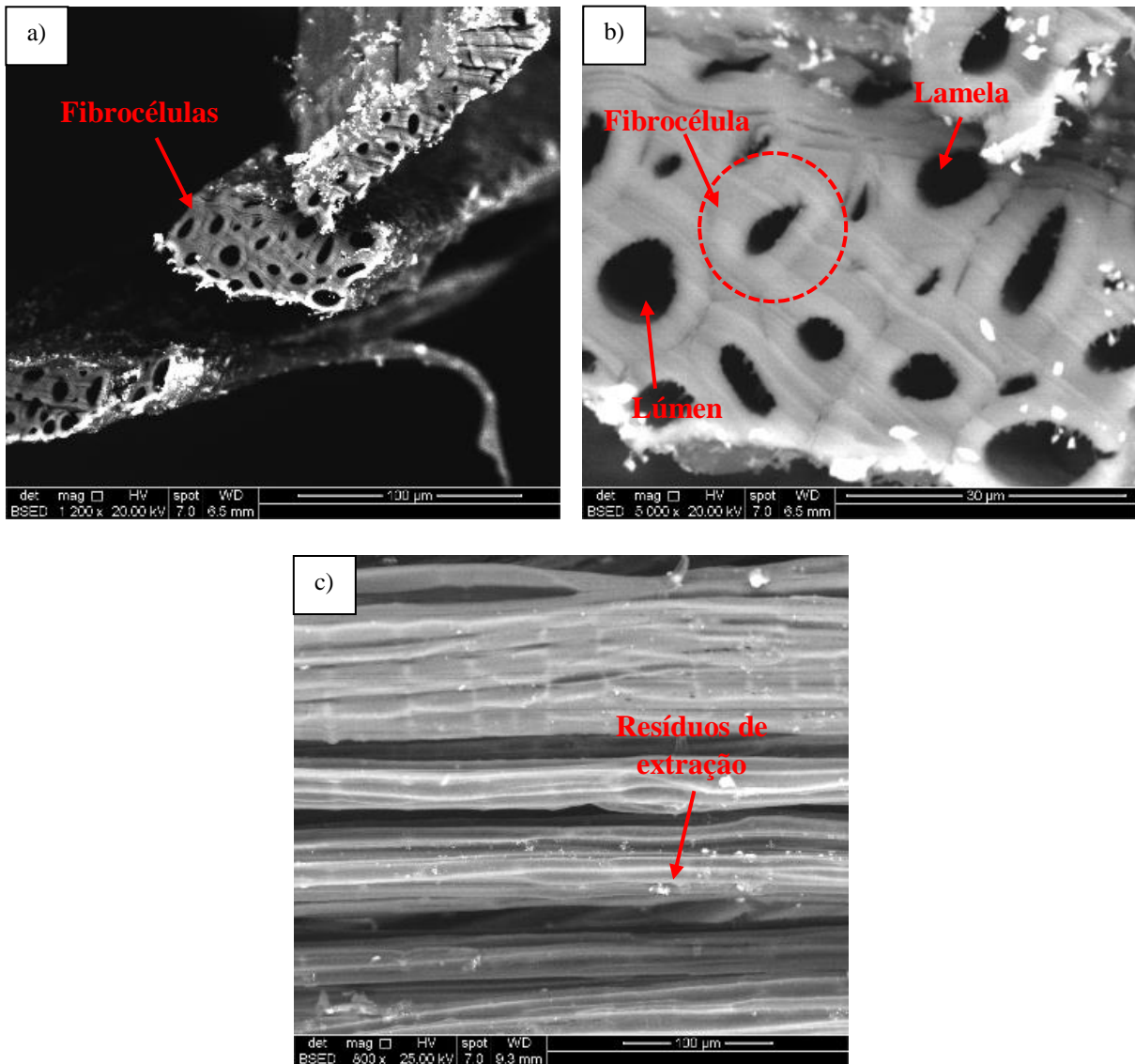
Em comparação com as fibras sem tratamento, as fibras mercerizadas ficaram intumescidas (Figura 4.10 (a)). Ao observar a seção transversal nota-se que estas não apresentaram lúmen, como ilustrado na Figura 4.10 (b), isso pode ser explicado em virtude de o tratamento modificar a estrutura da fibra. É possível notar que o tratamento removeu uma

certa quantidade de resíduos da extração (Figura 4.10 (c)), como cera e óleos que envolviam a superfície externa da parede celular da fibra, conforme afirmado por Beltrami *et al.* (2014).



**Figura 4.10** - MEV da fibra de malva com tratamento : a)Fibras de malva; b) Seção transversal; c) Seção longitudinal.

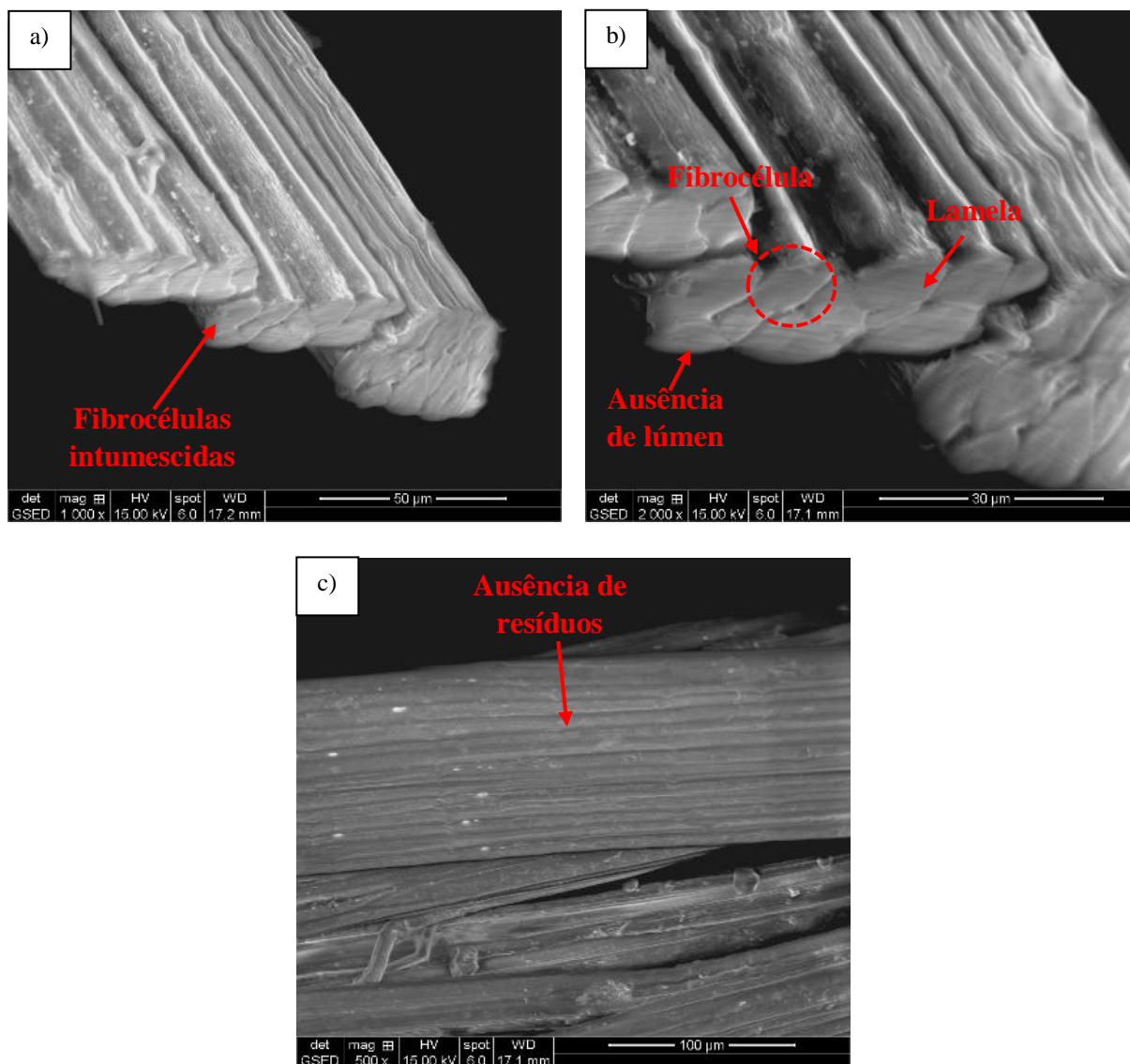
As imagens de MEV da fibra de juta, de acordo com a Figura 4.11 (a), foram semelhantes as encontradas por Oliveira (2013), onde identificou-se as fibrocélulas, o lúmen e a lamela (Figura 4.11 (b)). Na superfície é possível notar resíduos também identificados por Marques *et al.* (2015) e John e Anandjiwala (2008). Para Cavalcante (2017), os pontos luminosos na seção longitudinal, podem estar associados aos polissacarídeos normalmente depositados na parede celular das fibras, que é uma camada protetora natural das fibras vegetais, conforme a Figura 4.11 (c) (MARQUES *et al.*, 2015).



**Figura 4.11** - MEV da fibra de juta sem tratamento: a)Fibras de juta; b) Seção transversal; c) Seção longitudinal.

As fibras de juta tratadas (Figura 4.12 (a)), assim como as de malva com tratamento, não apresentaram lúmen, ou tiveram seu diâmetro reduzidos após a mercerização (Figura 4.12 (b)), de acordo com, a espessura da parede celular teve um aumento significativo, conforme afirmado por Islam Bossunia *et al.* (2016) em seu trabalho. Assim como Ferreira *et al.* (2017), algumas fibras apresentaram fibrocélulas desconfigurada, sendo explicada pelo colapso da estrutura da fibra, ou seja, da lignina presente na superfície, resultando na redução do lúmen e inchamento da espessura. As paredes primárias, que são compostas por lignina, praticamente desapareceram nas fibras mercerizadas, como mostrado na Figura 4.12 (c), além do tratamento ter removido grande parte dos resíduos e ter deixado a superfície das fibras mais lisa e limpa.

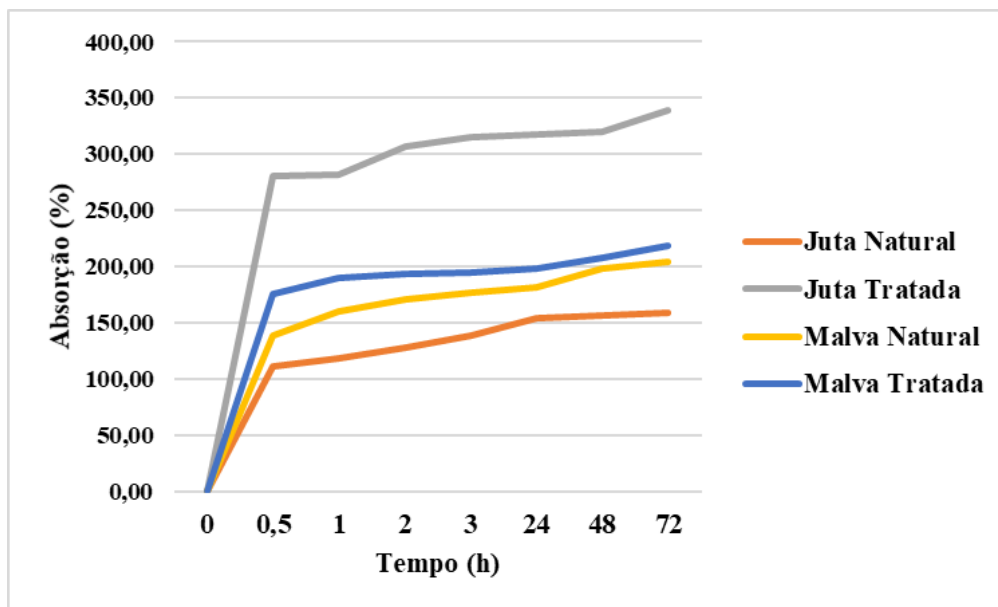




**Figura 4.12** - MEV da fibra de juta com tratamento: a)Fibras de juta; b) Seção transversal; c) Seção longitudinal.

#### 4.1.7 Absorção de água das fibras naturais

A Figura 4.13 exibe os resultados obtidos para o ensaio e absorção de água, sendo possível observar que grande parte da absorção ocorreu nos primeiros 30 minutos, um comportamento diferente da pesquisa de Portela (2016). A fibra de juta in natura ao final do ensaio, apresentou uma taxa de absorção de 159,53%, valor semelhante ao encontrado por Portela (2016), no entanto para as fibras de juta tratada a absorção foi de 339,31%, ou seja, houve uma absorção 113% maior do que nas fibras sem o tratamento. Os valores obtidos para as fibras de malva in natura e tratada foram 204,01% e 218,49%, respectivamente, podendo-se afirmar que o tratamento alcalino pouco influenciou na absorção.



**Figura 4.13** - Absorção de água das fibras juta e malva, naturais e tratadas.

Esse comportamento é explicado por Rodrigues (2015), onde afirma que as fibras vegetais possuem grande hidrofiliçidade, tornando-se um problema quando adicionadas em matrizes cimentícias, pois faz com que a água presente na matriz, num primeiro momento, seja absorvida internamente pela fibra, conseqüentemente expandindo-a, e durante o processo de cura, a água presente na fibra retorna novamente para a matriz, aumentando a probabilidade de haver retração, pois aumenta a relação água/ cimento na região interfacial entre a fibra/matriz. Portanto, baseado nesses resultados, optou-se por adicionar na matriz cimentícia apenas as fibras in natura, em decorrência das fibras tratadas terem absorvido mais água do que as fibras sem tratamento, pois o tratamento nas fibras removeu a proteção natural como os óleos vegetais e a lignina, elementos que dificultavam a absorção de água, ressaltando-se que o objetivo é justamente combater a retração em argamassas autonivelantes para piso.








## 4.2 Caracterização das matrizes

### 4.2.1 Determinação do teor de superplastificante

O teor de ótimo de aditivo para a matriz referência (R) foi de 0,20% e de 0,60% para a matriz com substituição (RS), sendo que a matriz R teve teor de aditivo no limite mínimo recomendado pelo fabricante, mas em teores acima do encontrado, ocorreu a segregação e exsudação da argamassa, por outro lado a matriz RS apresentou um teor maior, em virtude de possuir uma maior quantidade de finos. Para a dosagem das matrizes com fibras utilizou-se os

mesmos teores obtidos nas matrizes R e RS, acrescentando-se apenas 0,10% de cada fibra, seguindo o recomendado pelo fabricante da fibra de polipropileno (FPP), para se ter uma comparação no desempenho das fibras vegetais de juta (FJ) e malva (FM).

**Tabela 4.5** - Dosagens das matrizes.

<b>Matrizes</b>							
<b>Nome</b>	<b>Traço</b>	<b>CP (%)</b>	<b>MK (%)</b>	<b>a/mc</b>	<b>SP (%)</b>	<b>Φ (mm)</b>	<b>Espalhamento</b>
R	1:1,25	100	0	0,40	0,20	146,7	
RFPP	1:1,25	100	0	0,40	0,20	137,75	
RFJ	1:1,25	100	0	0,40	0,20	141,00	
RFM	1:1,25	100	0	0,40	0,20	137,00	
RS	1:1,25	50	50	0,40	0,60	150,25	
RSFJ	1:1,25	50	50	0,40	0,60	142,70	
RSFM	1:1,25	50	50	0,40	0,60	139,25	

CP - Cimento Portland; MK – Metacaulinita; SP - Superplastificante; a/mc – Fator água/material cimentante; φ – Diâmetro.



As matrizes adotadas apresentaram uma borda uniforme sem segregação e exsudação e com diâmetro mínimo de 130 mm. Apesar dos valores de espalhamento obtidos não serem próximos, o critério de análise foi quanto a consistência e a trabalhabilidade das argamassas, sendo estas muito parecidas para as sete matrizes. Por fim chegou-se à formulação apresentada na Tabela 4.5.

A Figura 4.14 exemplifica melhor os diâmetros de espalhamentos obtidos. Com base nos resultados, percebe-se que as matrizes com fibras RFPP, RFJ e RFM tiveram um decréscimo de 6,13%, 3,92% e 6,64%, nesta ordem, em relação a matriz R. As matrizes com substituição e com adição de fibras RSFJ e RSFM tiveram uma redução no espalhamento de 4,99% e 7,32%, respectivamente, quando comparadas com a matriz RS. As fibras relativamente diminuíram um pouco o espalhamento, mas não o suficiente para interferir na fluidez, tanto que as matrizes apresentaram borda uniforme e ausência de segregação e exsudação, em conformidade com o método de avaliação proposto por Martins (2009).

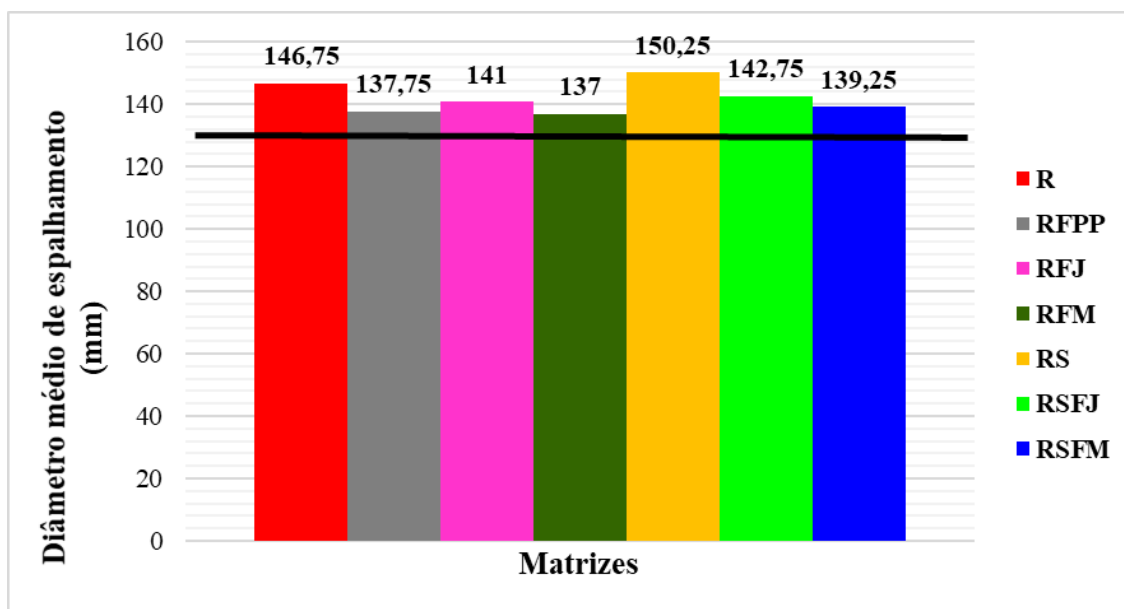


Figura 4.14 - Diâmetro médio de espalhamento. — Limite mínimo  $D_m = 130$  mm.

Quando comparados a outros estudos sobre a dosagem de matrizes autonivelantes, Santos *et al.* (2017), também obtiveram uma redução no espalhamento ao adicionar a pozolana, sendo este comportamento explicado em decorrência da maior quantidade de finos, com maior absorção, afetando a reologia da argamassa no estado fresco e conseqüentemente, reduzindo a sua consistência, desta forma, houve a necessidade de aumentar o teor de SP, para contribuir para a obtenção de uma trabalhabilidade adequada. Lopes da Silva (2016) os espalhamentos

ficaram dentro da faixa de 135 mm e 160 mm, a matriz com FPP obteve um diâmetro maior, podendo ser explicado em virtude da diferença de materiais e também, dela ter adicionado além do SP, o aditivo modificador de viscosidade. Em relação a adição das fibras de FJ e FM, nota-se que as matrizes com FM tiveram um diâmetro menor, em virtude da dificuldade de dispersão dessas fibras que prejudicaram, portanto, o espalhamento.

Por fim, realizou-se a análise de variância para as argamassas com e sem adição de fibras vegetais e diferentes matrizes, neste caso com e sem substituição (Tabela 4.6). Ao analisar os resultados, observa-se que tanto o tipo de fibra quanto o teor de substituição influenciam no valor do espalhamento, porém o tipo de fibra influencia 84,38% quando comparado com o teor de substituição. Esse comportamento pode ser explicado por diferenças nas propriedades das fibras vegetais, ressaltando-se que a fibra de malva possui uma superfície mais áspera, com presença de fibrilas, diferente da fibra de juta, conseqüentemente diminuindo o diâmetro de espalhamento, conforme exibido na Figura 4.14.

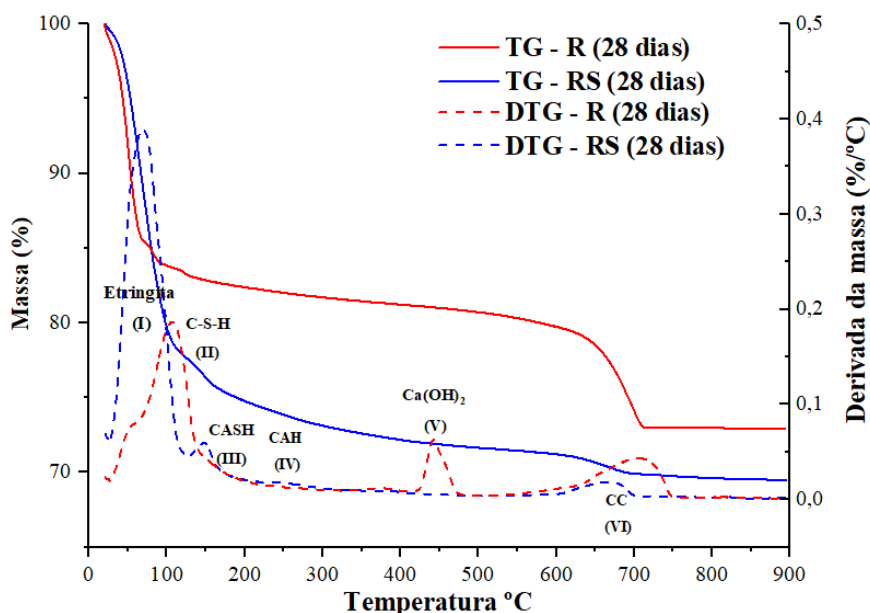
**Tabela 4.6** – Análise de variância dos resultados do espalhamento das argamassas R, RS, RFJ, RFM, RSFJ e RSFM.

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>F Tab</b>	<b>Significância</b>
<b>Teor de substituição do cimento (A)</b>	37,50	1	37,5	16,46	4,41	S
<b>Tipo de fibra (B)</b>	441,58	2	220,79	96,93	3,55	S
<b>AB</b>	3,25	2	1,63	0,71	3,55	NS
<b>ERRO</b>	41	18	2,78			
<b>Total</b>	523,33	23				

SQ – soma quadrática; GL – graus de liberdade; MQ – média quadrática; F – valor calculado de F; F Tab – valor tabelado de F; S – valor significativo; NS – valor não significativo; Se  $F < F \text{ Tab}$  – efeito não significativo.

#### **4.2.2 Análise Termogravimétrica e Termogravimetria Derivada (TG/DTG) das pastas**

A Figura 4.15 mostra as curvas termogravimétricas para as pastas com idade de 28 dias com apenas cimento (R) e com substituição do cimento por metacaulinita em 50% de massa (RS).



**Figura 4.15** - Curvas de TG e DTG das pastas.

De acordo com Dweck *et al.* (2000), o sulfato de cálcio dihidratado (gesso) no cimento, desempenha um papel importante no processo de hidratação, formando em seus estágios iniciais o sulfato de aluminato de cálcio hidratado (etringita) pela reação com o aluminato de cálcio original do cimento. Segundo Cavalcante *et al.* (2018), o primeiro pico da DTG, refere-se à decomposição da etringita que neste estudo ocorreu em 107,21°C para R e 71,66°C para o RS. A decomposição de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e sílico-aluminato de cálcio hidratado (CASH), aconteceu entre 107,21°C a 213,48°C para R, e 71,66°C a 213,48°C para RS. Já a decomposição do aluminato de cálcio hidratado (CAH) foi observada na faixa de temperatura de 218,74°C a 295,86°C para R e RS. A portlandita ou hidróxido de cálcio livre só foi observada em na curva R entre as temperatura de 416,43°C a 477,74°C, comprovando que a substituição por metacaulinita consumiu todo o CH presente no cimento e de acordo com Cavalcante *et al.* (2018), a diminuição no pico, neste caso a ausência, indica a reatividade pozolânica, que pode ser observada pela progressão do consumo de CH (redução de picos) de acordo com o aumento do teor de reposição. Por fim a decomposição do carbonato de cálcio (CC), aconteceu entre 558,24°C e 748,40°C na matriz R e de 596,99°C a 704,95°C na matriz RS.

Com a identificação das temperaturas nas curvas de termogravimetria, foi possível calcular as perdas de massa de água combinada, o teor de hidróxido de cálcio livre e a perda de massa total. Na Tabela 4.7 é possível ver os resultados obtidos para a água quimicamente combinada e para o teor de hidróxido de cálcio.

**Tabela 4.7** - Perdas de massa aos 28 dias de idade.

Compostos	Perda de massa	
	R	RS
Água quimicamente combinada (%)	16,41	26,34
Teor de hidróxido de cálcio livre (%)	1,41	0
Calcita (%)	7,15	1,27

De acordo com Anjos *et al.* (2012), a perda de água não combinada acontece em dois estágios, sendo o primeiro entre 35°C e 70 °C, no qual a água presente nos poros maiores que 0,05 µm é evaporada, e o segundo entre 70°C e 105 °C, onde é libertada a água retida por tensão capilar em poros capilares. A perda de água combinada, é vista entre 35°C e 200 °C, sendo que o pico DTG indica uma perda de água combinada proveniente da etringita, do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), sílico-aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H) e do aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) (MELO FILHO *et al.*, 2013; MARQUES, 2017). Os valores obtidos para o teor de água quimicamente combinada em RS foi 60,51% maior em relação a R.

Os valores foram bem diferentes pelo encontrados Cavalcante *et al.* (2018) e Melo Filho (2012), que registraram aumento deste teor nas pastas com substituição, ressalta-se que as curvas foram bem similares aos obtidos nestes estudos anteriores. O teor de água quimicamente combinada da pasta RS, devido à menor quantidade de cimento e à presença do material pozzolânico, neste caso a metacaulinita, sendo semelhante as curvas de DTG encontradas por Melo Filho *et al.* (2013), Marques (2017) e Cavalcante *et al.* (2018). Porém, quando comparados os valores de água quimicamente combinada obtidos, houve diferença nos valores encontrados por Melo Filho *et al.* (2013), Marques (2017) e Cavalcante *et al.* (2018), em virtude da diferença no tipo de cimento adotado em cada estudo.

O teor de hidróxido de cálcio diminuiu de 1,41% na pasta da matriz referência, para 0 na pasta com substituição de 50% do cimento por metacaulinita, reduzindo 100% em relação a matriz R, comprovando-se a alta reatividade da argila calcinada proveniente do caulim. O mesmo ocorreu com Cavalcante *et al.* (2018), que também reduziu o teor de hidróxido de cálcio

livre em 100% na sua matriz com substituição de cimento por metacaulinita. Outro resultado semelhante foi o obtido por Marques (2017), que usou em seu trabalho na produção da metacaulinita, um caulim oriundo de uma região muito próxima ao que foi coletado nesta pesquisa, porém a sua pasta com 50% de metacaulinita reduziu 98,61% do CH. Por sua vez, Melo Filho (2012) teve uma redução de 96,60%, que também substituiu o cimento em 50% por MK.

### 4.3 Caracterização físico-mecânica das argamassas autonivelantes

#### 4.3.1 Ensaio de variação dimensional

Este ensaio foi realizado para todas as sete matrizes em temperatura média de 26,87°C e umidade média de 62%, sendo mostrados na Figura 4.16. Ao analisar o gráfico é possível observar que as argamassas R e RS apresentaram expansão na idade de 14 dias, conforme Lopes da Silva (2016) a causa foi controle de umidade insuficiente no local onde os corpos de prova estiveram expostos durante o tempo de ensaio, sendo que ocorreu expansão em dias com umidade mais elevada, sendo esta tendência também foi observada por Itim *et al.* (2011) e Lopes da Silva (2016).

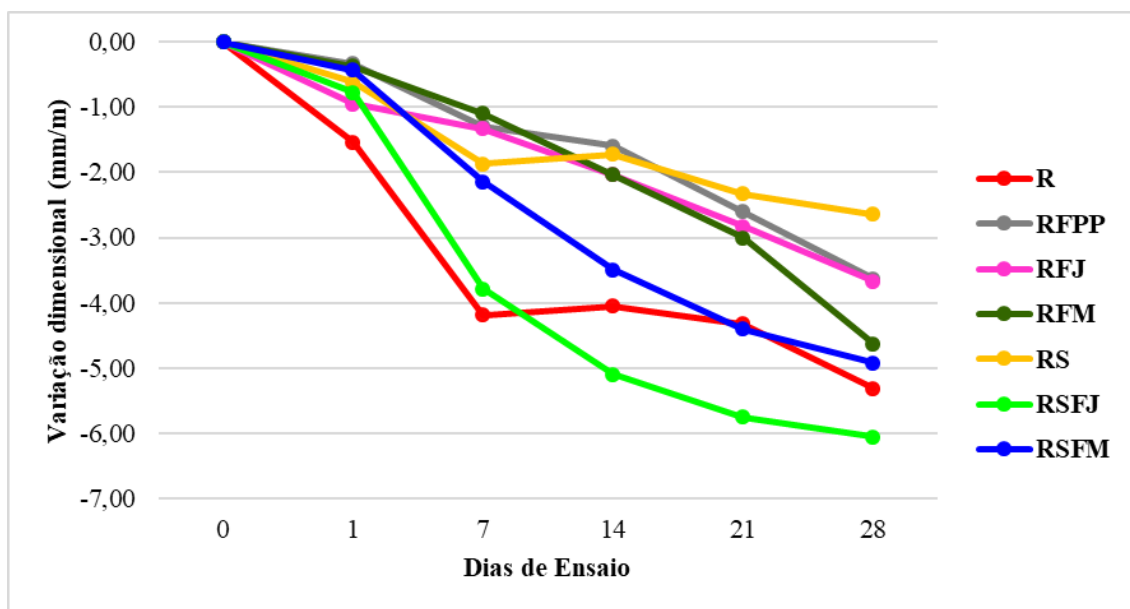


Figura 4.16 - Variação dimensional das matrizes.

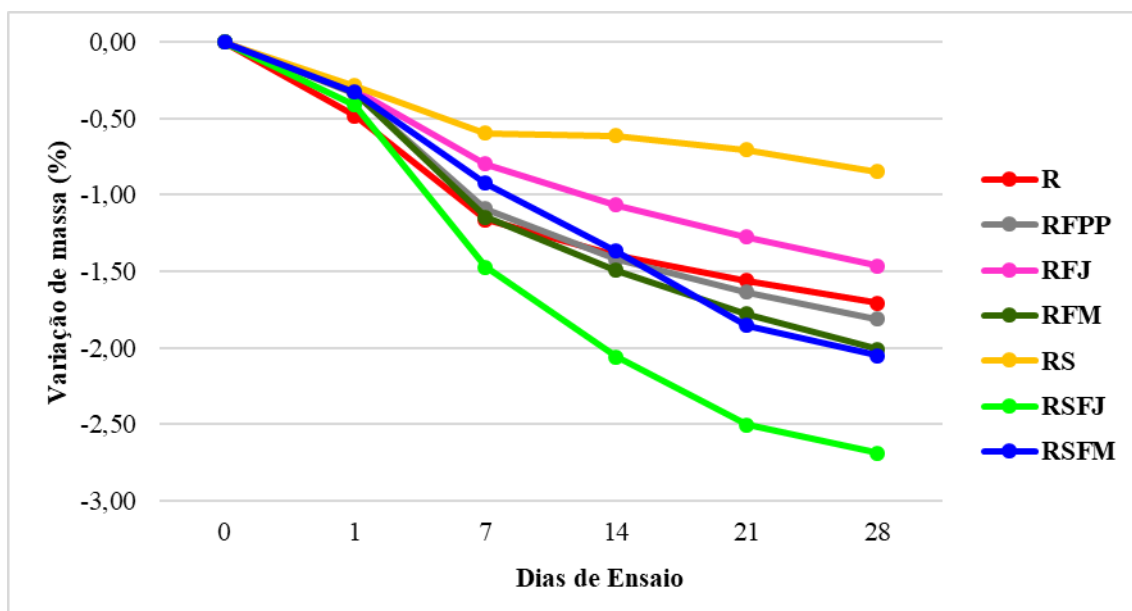
A argamassa R e RSFJ, quando comparada as demais, tiveram uma retração bem significativa. A matriz R teve uma retração muito mais acentuada devido ao elevado teor de cimento conforme Zhang *et al.* (2015) diferentemente da matriz RS. A matriz RS apresentou

uma retração final menor que as outras matrizes, estando em acordo com estudos anteriores de Mokarem *et al.* (2005) e Bentz *et al.* (2016), onde a adição de pozolanas e cimento com escória, aumentou o refinamento dos poros do concreto, desta forma criando poros menores, sendo que o encolhimento da secagem está diretamente associado à água contida nos poros menores.

As matrizes com metacaulinita e fibras vegetais RSFM e RSFJ demonstraram uma retração mais acentuada, quando comparadas as matrizes sem substituição RFJ e RFM. Pode-se considerar que a substituição do cimento e as adições de fibras nas matrizes, realmente ajudaram a combater a retração, mas quando estas duas soluções foram aplicadas na mesma matriz, o efeito não foi tão bom quanto nas demais, isso pode ser explicado pois havia mais água disponível nas misturas com substituição, fazendo com que num primeiro momento as fibras absorvessem a água contida nas matrizes e depois devolvessem essa água para a matriz, aumentando a retração nessas argamassas. A matriz RFPP, por conter uma fibra bastante difundida no mercado, apresentou uma retração menor em relação as demais, em virtude de sua característica hidrofóbica.

Em relação aos valores encontrados para a variação dimensional, estes foram praticamente o dobro dos encontrados por Lopes da Silva (2016) e quanto as curvas, neste trabalho foram mais uniformes seguindo um determinado comportamento, diferente do obtido no estudo dela.

Quanto aos resultados encontrados para perda de massa, contidos na Figura 4.17, observa-se que a matriz RS, obteve uma menor perda, seguida da RFJ. Porém, diferentemente da variação dimensional, a argamassa R, teve uma menor perda de massa neste ensaio, tendo um valor próximo ao da matriz RFPP. Novamente a matriz RSFJ não teve um resultado tão bom, apresentando uma grande perda de massa. O desempenho das matrizes com malva, tiveram uma perda de massa bem similares.



**Figura 4.17** - Variação de massa das matrizes.

Houve uma tendência de maior perda de água registrada nos primeiros 14 dias, que pode ser explicado por Santos *et al.* (2017) como a perda da água contida nos maiores poros capilares e dos 14 aos 28 dias, a perda da água contida nos menores poros capilares. Diferente de Santos *et al.* (2017), os valores obtidos para a variação de massa foram bem menores.

No geral, os resultados exibidos na Tabela 4.8 demonstraram que as argamassas desenvolvidas apresentaram retrações maiores que 0,80 mm/m, sendo este valor foi estabelecido por Lopes da Silva (2016) como um valor de retração aceitável para argamassas autonivelantes aplicadas como contrapiso. Porém, quando comparado ao valor obtido para a matriz R é nítido que as formulações com adição de fibras (RFPP, RFJ, RSFM) e a substituição do cimento (RS), reduziram o fenômeno da retração por secagem.

**Tabela 4.8** - Retração por secagem aos 28 dias das argamassas formuladas.

<b>Matriz</b>	<b>Retração por secagem aos 28 dias (mm/m)</b>	<b>Perda de massa aos 28 dias (%)</b>
R	5,13	1,71
RFPP	3,63	1,81
RFJ	3,67	1,46
RFM	4,63	2,01
RS	2,64	0,85
RSFJ	6,06	2,69
RSFM	4,92	2,05

No entanto, a análise de variância dos resultados encontrados para o ensaio de variação dimensional com idade de 28 dias, de acordo com a Tabela 4.9, mostrou que o teor de substituição do cimento e o tipo de fibra não influenciaram nos resultados, porém a interação entre essas duas variáveis afetou muito mais os valores.

**Tabela 4.9** - Análise de variância dos resultados da variação dimensional aos 28 dias das argamassas R, RS, RFJ, RFM, RSFJ e RSFM.

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>F Tab</b>	<b>Significância</b>
<b>Teor de substituição do cimento (A)</b>	8,89E-05	1	8,89E-05	5,07E-05	4,75	NS
<b>Tipo de fibra (B)</b>	2,86	2	1,43	0,81	3,89	NS
<b>AB</b>	19,44	2	9,72	5,54	3,89	S
<b>ERRO</b>	21,04	12	1,75			
<b>Total</b>	43,34	17				

SQ – soma quadrática; GL – graus de liberdade; MQ – média quadrática; F – valor calculado de F; F Tab – valor tabelado de F; S – valor significativo; NS – valor não significativo; Se  $F < F_{Tab}$  – efeito não significativo.

Quando se analisa a Tabela 4.10 para a variação de massa aos 28 dias, verifica-se que o tipo de fibra e sua interação com o tipo de matriz influenciam nos resultados, confirmando que as fibras que receberam a matriz com substituição juntamente com fibras naturais, obtiveram muito mais retração que as demais matrizes.



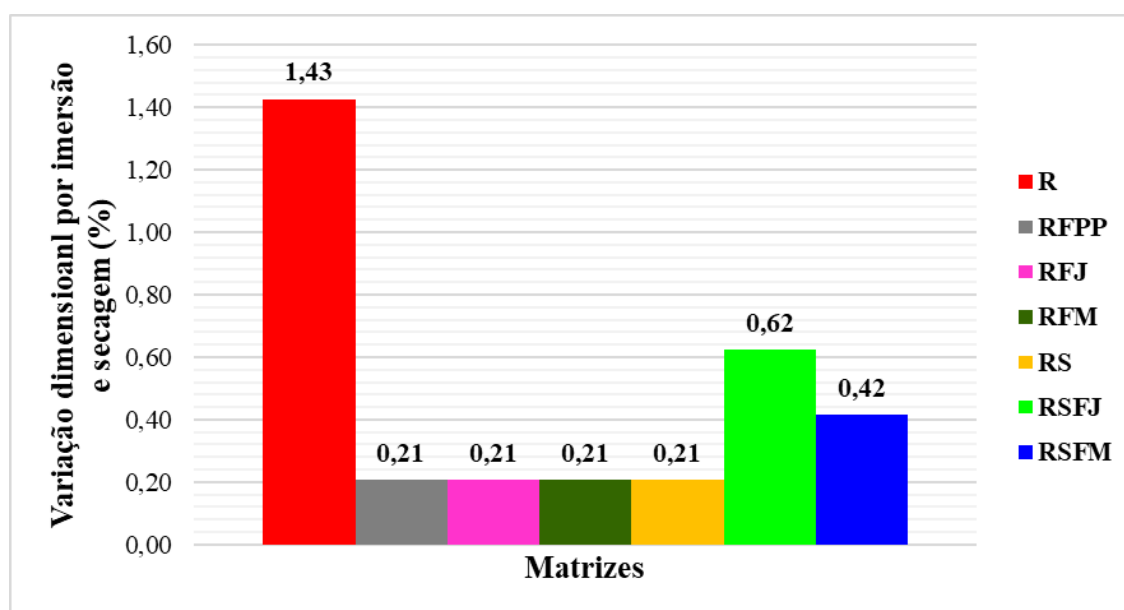
**Tabela 4.10** – Análise de variância dos resultados da variação de massa aos 28 dias das argamassas R, RS, RFJ, RFM, RSFJ e RSFM.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	F Tab	Significância
<b>Teor de substituição do cimento (A)</b>	0,08	1	0,08	0,74	4,75	NS
<b>Tipo de fibra (B)</b>	2,41	2	1,21	10,97	3,89	S
<b>AB</b>	3,27	2	1,63	14,85	3,89	S
<b>ERRO</b>	1,32	12	0,11			
<b>Total</b>	7,09	17				

SQ – soma quadrática; GL – graus de liberdade; MQ – média quadrática; F – valor calculado de F; F Tab – valor tabelado de F; S – valor significativo; NS – valor não significativo; Se  $F < F \text{ Tab}$  – efeito não significativo.

#### 4.3.2 Ensaio de variação dimensional por imersão e secagem

Os valores encontrados para o ensaio de variação dimensional por imersão e secagem em placas, estão ilustrados na Figura 4.18. De acordo com os resultados, novamente as matrizes R, RSFJ e RSFM tiveram maior variação dimensional, quando comparadas com as demais matrizes. As matrizes RFPP, RFJ e RFM tiveram os mesmos resultados, sendo estes que tiveram os melhores resultados, seguidos da matriz RS, que teve uma redução considerável quando comparada com R. Ocorreu a mesma tendência do ensaio passado para as argamassas com substituição do cimento e com adição de juta e malva.



**Figura 4.18** - Variação dimensional por imersão e secagem.

Porém, ao analisar a Tabela 4.11, percebesse que a influência do teor de substituição do cimento, o tipo de fibra e a interação entre eles não apresentam influência significativa sobre os resultados, confirmando os valores encontrados na Figura 4.18.

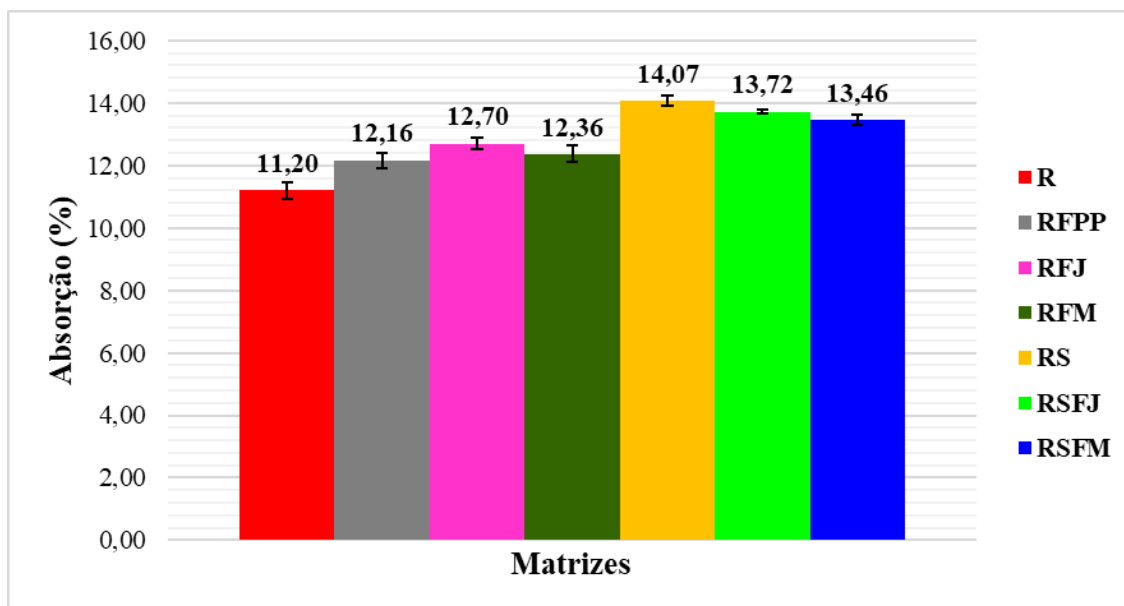
**Tabela 4.11** – Análise de variância dos resultados variação dimensional por imersão e secagem das argamassas R, RS, RFJ, RFM, RSFJ e RSFM.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	F Tab	Significância
<b>Teor de substituição do cimento (A)</b>	0,18	1	0,18	0,35	4,75	NS
<b>Tipo de fibra (B)</b>	0,85	2	0,43	0,85	3,89	NS
<b>AB</b>	2,37	2	1,19	2,36	3,89	NS
<b>ERRO</b>	6,02	12	0,50			
<b>Total</b>	9,43	17				

SQ – soma quadrática; GL – graus de liberdade; MQ – média quadrática; F – valor calculado de F; F Tab – valor tabelado de F; S – valor significativo; NS – valor não significativo; Se  $F < F_{Tab}$  – efeito não significativo.

#### 4.3.3 Ensaio de absorção de água do compósito

O ensaio de absorção de água do compósito exibido na Figura 4.19, na qual é possível ver que as argamassas com substituição RS, RSFJ e RSFM tiveram uma maior absorção. Segundo Cavalcante (2017), isto aconteceu pois a metacaulinita possui uma menor densidade de empacotamento, quando comparada ao cimento, justificada pela sua alta superfície específica, desta forma, gerando uma grande absorção de água pelas partículas.



**Figura 4.19** - Absorção de água do compósito.

Quando avalia-se os resultados da análise de variância, na Tabela 4.12, nota-se que tanto o teor de substituição do cimento, quanto o tipo de fibra e suas interações influenciam diretamente nos resultados do ensaio de absorção de água do compósito, sendo que o teor de substituição corresponde a 72,18%, desta maneira, confirmando que a metacaulinita apresenta uma grande absorção de água.

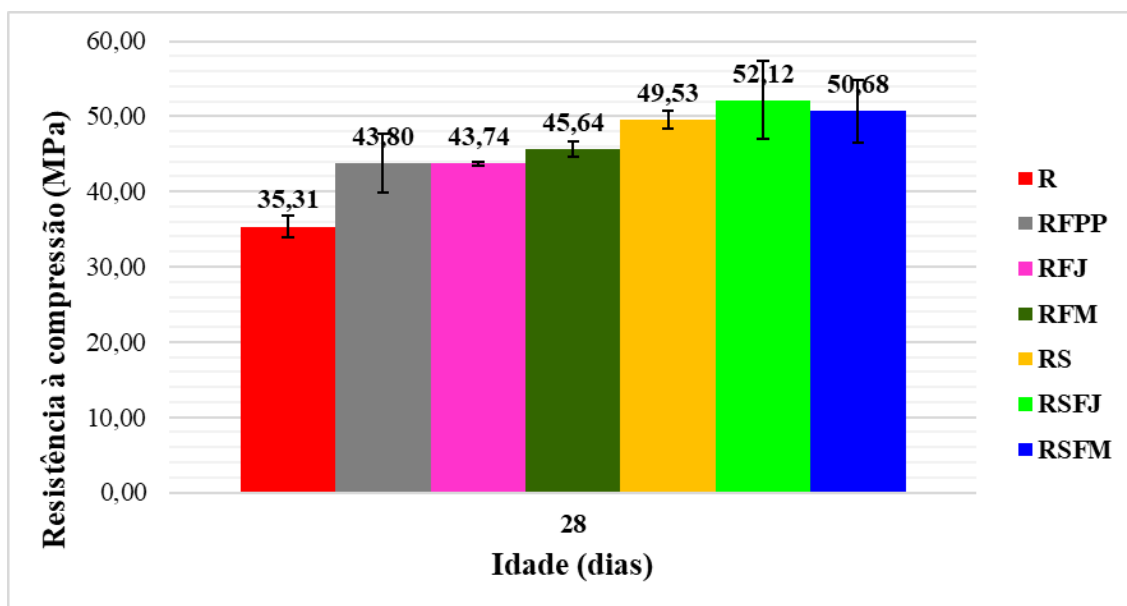
**Tabela 4.12** – Análise de variância dos resultados de absorção de água das argamassas R, RS, RFJ, RFM, RSFJ e RSFM.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	F Tab	Significância
<b>Teor de substituição do cimento (A)</b>	16,55	1	16,55	440,40	4,41	S
<b>Tipo de fibra (B)</b>	1,31	2	0,66	17,50	3,55	S
<b>AB</b>	4,39	2	2,19	58,36	3,55	S
<b>ERRO</b>	0,68	18	0,04			
<b>Total</b>	22,93	23				

SQ – soma quadrática; GL – graus de liberdade; MQ – média quadrática; F – valor calculado de F; F Tab – valor tabelado de F; S – valor significativo; NS – valor não significativo; Se  $F < F_{Tab}$  – efeito não significativo.

#### 4.3.4 Ensaio de resistência à compressão

Os valores encontrados para resistência a compressão das matrizes estão expostos na Figura 4.20. Fazendo-se uma comparação entre R e RS, esta última, registrou um ganho de 40,27%, relacionado a atuação da metacaulinita, que diminuiu a porosidade da matriz e consequentemente aumentou a resistência. No entanto a matriz referência R, quando comparada com o estudo de Lopes da Silva (2016), teve uma resistência bem menor, isso aconteceu devido a diferença nos materiais, destacando-se a areia, pois nesta pesquisa usou-se uma areia fina com módulo de finura (MF) 1,7, enquanto que no estudo base, usou-se um areia média com MF de 2,4. Essa diferença foi condizente com a pesquisa de Camargo e Moreira (2017), no qual as argamassas feitas com areias consideradas finas, se mostraram menos resistentes, quando comparadas com as que continham areia média e grossa. Por outro lado, Carneiro *et al.* (1997) relacionou que quanto menor a massa unitária da areia, menor será a resistência a compressão, porém nesta pesquisa o efeito foi inverso, pois a massa unitária da areia usada foi de 1,56 g/cm<sup>3</sup>, enquanto que a areia de Lopes da Silva (2016) tinha 1,54 g/cm<sup>3</sup>.



**Figura 4.20** - Dados de resistência à compressão.

De um modo em geral, todas as matrizes com fibras RFPP, RFJ e RFM, tiveram ganhos de 24,04%, 23,87% e 29,26%, nesta ordem de resistência a compressão, quando comparados com R, o mesmo aconteceu com Lopes da Silva (2016). Já nas argamassas com substituição do cimento por metacaulinita RSFJ e RSFM, o aumento foi de 5,23% e 2,32%, respectivamente, em relação a matriz RS, sendo este aumento discreto. Conforme Shikhare e Kalurkar (2013), a adição de fibras pequenas, estreitamente espaçadas e uniformemente dispersas, funciona no compósito, como uma forma de evitar as fissuras e melhora as propriedades de resistência à compressão e à flexão. Evidencia-se que as matrizes que receberam adição de juta, RFJ e RSFJ, obtiveram ganhos mais expressivos que as matrizes RFM e RSFM. A matriz RSFJ apresentou o maior ganho em relação a R, com 47,61%.

Por fim, com exceção da matriz R, todas as outras argamassas desenvolvidas, classificam-se como argamassas de alta resistência por terem atingido resistências à compressão à cima de 40 MPa, limite mínimo prescrito pela norma para argamassas de alta resistência mecânica para pisos NBR 11801 (ABNT, 2012).

Na análise de variância da Tabela 4.13, tanto o teor de substituição, quanto o tipo de fibra natural influenciaram na resistência à compressão, sendo que a maior influência é observada para o teor de substituição do cimento. Portanto, o uso da metacaulinita como pozolana, melhorou o desempenho mecânico da argamassa elevando aumentando a resistência, pois reagiu com o cimento formando de silicatos de cálcio hidratados, que são produtos mais

estáveis do cimento hidratado. Por outro lado, o tipo de fibra também influencia, em virtude de possuírem propriedades mecânicas diferentes. A interação entre as duas variáveis de estudo, também interferiu nos valores obtidos, tanto que as formulações que receberam a metacaulinita e as fibras naturais, apresentaram ganhos mais elevados quando comparadas as demais.

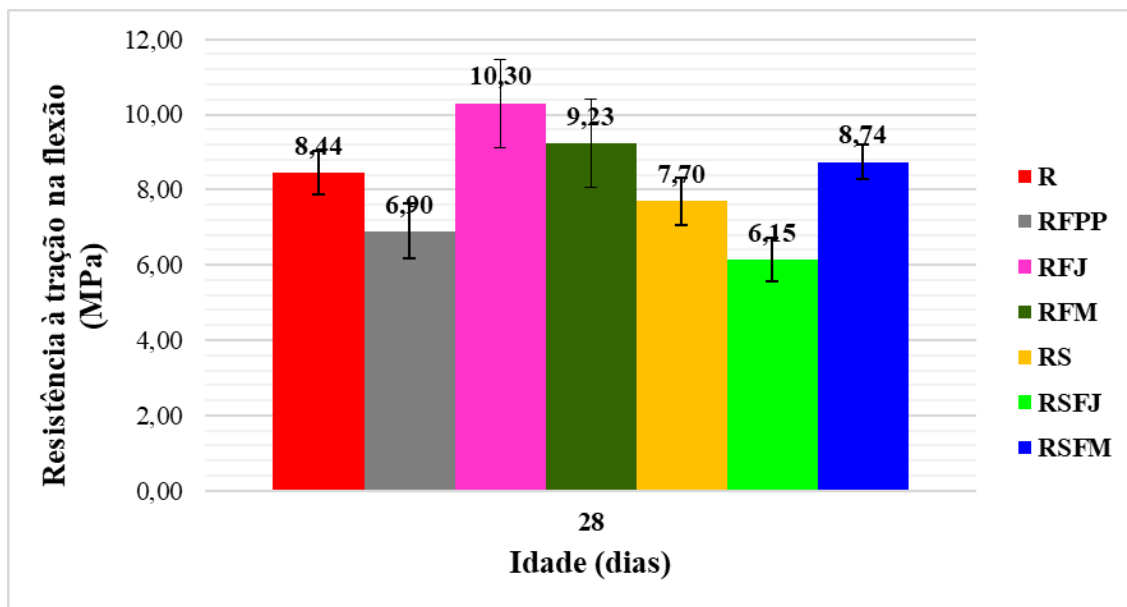
**Tabela 4.13** – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão das argamassas R, RS, RFJ, RFM, RSFJ e RSFM.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	F Tab	Significância
<b>Teor de substituição do cimento (A)</b>	400,64	1	400,64	46,79	4,74	S
<b>Tipo de fibra (B)</b>	141,95	2	70,98	8,29	3,88	S
<b>AB</b>	75,06	2	37,53	4,38	3,88	S
<b>ERRO</b>	102,75	12	8,56			
<b>Total</b>	720,41	17				

SQ – soma quadrática; GL – graus de liberdade; MQ – média quadrática; F – valor calculado de F; F Tab – valor tabelado de F; S – valor significativo; NS – valor não significativo; Se  $F < F \text{ Tab}$  – efeito não significativo.

#### 4.3.5 Ensaio de resistência à tração na flexão

As médias dos resultados obtidos para esse ensaio estão apresentadas na Figura 4.21. Diferente do que ocorreu no ensaio de compressão, a matriz RS teve valor inferior de 8,77% em relação a R. No que diz respeito as matrizes com fibras, nem todas tiveram ganhos, apenas as argamassas RFJ e RFM com 22,04%, 9,36%, a RFPP registrou um decréscimo de 18,25%, podendo estar relacionado à formação de novelos imperceptíveis de fibra, que quando submetidos à esforços de tensão, tornam-se pontos frágeis passíveis de ruptura com menor resistência. Nas matrizes com substituição, somente RSFM teve aumento de resistência à tração com 13,51%, comparando-se com RS. A matriz RSFJ teve redução de 20,13% em relação a RS. Quando se comparam os valores com estudos anteriores, as matrizes formuladas nesta pesquisa resultaram em resistências um pouco maiores em relação à argamassa desenvolvida por Lopes da Silva (2016), a qual se escolheu a formulação para dar continuidade. A matriz R e RS, tiveram valores bem maiores, ressaltando-se que ela usou cinza volante para substituição, porém a RFPP obteve valor inferior.



**Figura 4.21** - Dados de resistência à tração na flexão.

Ao analisar os resultados, nota-se que todas as argamassas tiveram valores muito próximos, quando se tem como base o desvio padrão. Salienta-se que nas matrizes com fibras, estas atuaram como ponte de transferência de tensões, aumentando a resistência à tração. Apesar dos valores terem dado diferentes, todas as argamassas desenvolvidas nesta pesquisa, baseada na NBR 11801 (ABNT, 2012), classificaram-se como argamassas de alta resistência por terem atingido resistências à tração acima de 4 MPa, sendo este o limite mínimo prescrito pela norma para argamassas de alta resistência mecânica para pisos.

Por fim, ao analisar a Tabela 4.14, observa-se que o teor de substituição e a interação com a outra variável do estudo interferem nos resultados obtidos para resistência à tração na flexão. Porém, o tipo de fibra natural, seja de juta ou malva, não influenciou nos valores, isto se explica devido tanto a juta quanto a malva apresentarem um comportamento a tração bem similar.

**Tabela 4.14** – Análise de variância dos resultados de resistência à tração na flexão das argamassas R, RS, RFJ, RFM, RSFJ e RSFM.

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>F Tab</b>	<b>Significância</b>
<b>Teor de substituição do cimento (A)</b>	14,47	1	14,47	21,58	4,74	S
<b>Tipo de fibra (B)</b>	2,87	2	1,44	2,14	3,88	NS
<b>AB</b>	12,57	2	6,28	9,37	3,88	S
<b>ERRO</b>	8,04	12	0,67			
<b>Total</b>	37,96	17				

SQ – soma quadrática; GL – graus de liberdade; MQ – média quadrática; F – valor calculado de F; F Tab – valor tabelado de F; S – valor significativo; NS – valor não significativo; Se  $F < F \text{ Tab}$  – efeito não significativo.

## Capítulo 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou a avaliação da adição de fibras sintéticas de polipropileno e naturais de juta e malva nas propriedades físico-mecânicas em compósitos produzidos com matriz cimentícia livre de hidróxido de cálcio, destinados ao uso em argamassas autonivelantes para pisos.

O processo de produção da metacaulinita adotado não a deixou completamente amorfa, sendo identificados quartzo em seu difratograma. Porém, os resultados obtidos pelos ensaios de FRX e TG/DTG demonstraram que esta foi altamente reativa. A análise térmica, constatou que a metacaulinita usada na substituição do cimento, consumiu 100% do teor hidróxido de cálcio contido nas pastas com apenas cimento, comprovando a sua alta reatividade. Assim, as argamassas produzidas com a metacaulinita apresentaram os maiores valores para o ensaio de compressão, em comparação com as que continham apenas cimento, tendo este desempenho pois os hidratos formados pela reação pozolânica refinaram os poros.

A fibra de polipropileno, como já era esperado de acordo com a literatura, mostrou-se bem uniforme e padronizada quando comparada as fibras vegetais, decorrentes do processo de fabricação, apresentando resultados semelhantes aos disponibilizados pelo próprio fabricante e aos encontrados na literatura. No entanto, a caracterização das fibras vegetais de juta e malva sem tratamento, ou in natura, mostrou-se um pouco diferente do encontrado em estudos anteriores, em virtude de ser um produto oriundo da própria natureza, tendo vários fatores influenciando diretamente nestas propriedades. Com o ensaio de MEV foi possível identificar as fibrocélulas, os lúmens e as lamelas médias nas fibras in natura, também mostrou resíduos decorrentes da extração, indicando que a lavagem das fibras, durante o seu preparo inicial, não foi suficiente para a remoção completa. Nas fibras vegetais de juta e malva que receberam o tratamento alcalino, ou mercerização, observou-se a diminuição do lúmen, além da ausência de lignina na superfície das fibras. O ensaio de absorção de água, confirmou a hidrofiliabilidade das fibras vegetais, mesmo nas fibras tratadas,. De um modo em geral, a caracterização prévia das fibras contribuiu para a escolha das fibras vegetais mais adequadas para o uso no compósito, optando-se por usar somente as fibras in natura, em decorrência da alta absorção de água das fibras tratadas, que de certa forma aumentaria a retração nas argamassas, sendo que o foco da pesquisa foi justamente combater a retração.

Em relação as propriedades reológicas das misturas, a substituição parcial do cimento, modificou a trabalhabilidade da argamassa, por causa da maior quantidade de materiais finos,



sendo necessário o uso de mais superplastificante, para obtenção de uma argamassa fluida, sem segregação e exsudação. A adição das fibras diminuiu o espalhamento, devido à dificuldade na dispersão das fibras nas matrizes, porém não foi o suficiente para interferir na fluidez e qualidade da argamassa.

Na caracterização dos compósitos por ensaios físico-mecânico, os resultados classificaram todas as argamassas como de alta resistência. A resistência à compressão foi maior nas argamassas com substituição do cimento por metacaulinita, quando comparadas as demais, decorrente da diminuição da porosidade. A adição de fibras melhorou o comportamento das argamassas à tração na flexão, em virtude de atuarem como pontes de transferência de tensão, retardando o processo de abertura de microfissuras. Através dos ensaios de variação dimensional, comprovou-se que a adição de fibras curtas e o uso de pozolana, realmente diminuem retração em compósitos, porém isoladamente. A absorção de água correu de maneira mais significativa nos compósitos com a metacaulinita, por causa da sua alta superfície específica, acarretando numa maior absorção de água.

Perante a todos os dados expostos, constata-se a viabilidade tanto do uso das fibras naturais vegetais, quanto da substituição do cimento por metacaulinita, para o combate a retração, sendo viável a produção de argamassas autonivelantes para piso com estes materiais visto que diminuiram a retração por secagem nestes compósitos.

### **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

A partir dos resultados obtidos com o programa experimental e com as limitações desta pesquisa sugere-se como trabalhos futuros:

- Estudar formulações de argamassas autonivelantes que contenham as fibras naturais de juta e malva com diferentes taxas de substituição do cimento por metacaulinita;
- Estudar formulações de argamassas autonivelantes com fibras de polipropileno e com taxa de substituição do cimento de 50% por metacaulinita;
- Estudar a retração em argamassas autonivelantes com fibras naturais de juta e malva, com outros tipos de tratamentos para reduzir a absorção de água das fibras.
- Verificar a aplicação em campo das argamassas autonivelantes para piso desenvolvidas nesta pesquisa;

- Analisar a retração autógena nas argamassas autonivelantes;
- Avaliar a durabilidade dos compósitos desenvolvidos neste estudo.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** ABNT. Rio de Janeiro, 2000.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** ABNT. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem.** ABNT. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 49: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas.** ABNT. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** ABNT. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação.** ABNT. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** ABNT. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR 7218: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.** ABNT. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 9776: Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.** ABNT. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 11801: Argamassa de alta resistência mecânica para pisos - Requisitos.** ABNT, Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **NBR 15261: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear).** ABNT, Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 15498: Placa plana cimentícia sem amianto - Requisitos e métodos de ensaio.** ABNT, Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos.** ABNT. Rio de Janeiro, 2018.

- AFROUGHSABET, V.; OZBAKKALOGLU, T. **Mechanical And Durability Properties of High-Strength Concrete Containing Steel And Polypropylene Fibers**. Artigo. Construction and Building Materials. Vol. 94, 2015.
- AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso das fibras vegetais**. Tese de livre-docência. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1991.
- AGOPYAN, V. SAVASTANO JÚNIOR, H. JOHN, V. M., CINCOTTO, M. A. **Developments on vegetable fibre-cement based material in São Paulo, Brazil: on overview**. Cement and Concrete Composites. Vol. 27. 2005.
- AGUIAR, A. S. **Estudos das propriedades físicas e mecânicas de placas cimentícias reforçadas com fibras longas de malva**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2016.
- ALARCON-RUIZ, L. PLATRET, G. MASSIEU, E. EHRLACHER, A. **The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste**. Artigo. Cement and concrete research. Vol. 35, 2005.
- ANJOS, M. A. S. CAMÕES, A. JESUS, C. DUARTE, F. **Avaliação da hidratação de pastas cimentícias com elevados teores de adições minerais**. Artigo. Engenharia UM. N.º 44, 2012.
- AWWAD, E. HAMAD, B. MABSOUT, M. KHATIB, H. **Sustainable construction material using hemp fibers—preliminary study**. Artigo. Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Ancona, Itália, 2010.
- BADOGIANNIS, E. G. SFIKAS, I. P. VOUKIA, D. V. TREZOS, K. G. **Durability of metakaolin Self-Compacting Concrete**. Artigo. Construction and Building Materials. Vol. 82, 2015.
- BAERT, G. HOSTE, S. DE SCHUTTER, G. DE BELIE, N. **Reactivity of fly ash in cement paste studied by means of thermogravimetry and isothermal calorimetry**. Artigo. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. Vol. 94, 2008.
- BANTHIA, N. GUPTA, R. **Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete**. Artigo. Cement and Concrete Research. Vol. 36, 2006.

- BARLUENGA, G. HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. **Self-levelling cement mortar containing grounded slate from quarrying waste**. Artigo. Construction and Building Materials. Vol. 24, 2010.
- BELTRAMI, L. V. R. SCIENZA, L. C. ZATTERA, A. J. **Efeito do Tratamento Alcalino de Fibras de Curauá sobre as Propriedades de Compósitos de Matriz Biodegradável**. Artigo. Polímeros: Ciência e Tecnologia. Vol. 24, n.º 3, 2014.
- BENABED, B. KADRI, E. A. AZZOUZ, L. KENAI. S. **Properties of self-compacting mortar made with various types of sand**. Artigo. Cement & Concrete Composites. Vol. 34, 2012.
- BENTUR, A. MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. Modern Concrete Technology Series. Taylor & Francis. 2ª Ed. 2007.
- BENTZ, D. P. **Influence of shrinkage-reducing admixtures on early-age properties of cement pastes**. Artigo. Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 4, 2006.
- BENTZ, P. JONES, S. Z., LOOTENS, D. **Minimizing Paste Content in Concrete Using Limestone Powders – Demonstration Mixtures**. Nota técnica do NIST 1906. Departamento de Comércio dos EUA, 2016.
- BORSOI, A. COLLEPARDI, S. COPPOLA, L. TROLI, R. COLLEPARDI, E. M. **Advances in superplasticizers for concrete mixtures**. Artigo. Il Cemento. Vol. 69, 1999.
- BREMBERGUER, H. L. LEBRÃO, G. W. **Caracterização mecânica e estética de compósitos de poliéster com fibras de sisal, juta e kenaf**. Artigo. 22º Congresso Brasileiro de engenharia e ciências dos materiais – CBECIMAT. Natal, 2016.
- CAMARGO, D. J. MOREIRA. **Estudo da influência granulométrica do agregado miúdo para uso em argamassas de revestimento**. Anais. XXVI Encontro Anual de Iniciação Científica e VI Encontro Anual de Iniciação Científica Junior. Maringá, 2017.
- CAMPELLO, E. F. **Comportamento mecânico de argamassas reforçadas por fibras sintéticas e metálicas**. Tese de doutorado. Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2013.
- CAN, Ö. DURMUŞ, G. SUBAŞI, S. YILDIZ, K. ARSLAN, M. **The effects of the concrete mixed fibrous material on the wearing strength**. Artigo. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, Türkiye, 2009.

CARNEIRO, A. M. P. CINCOTTO, M. A. JOHN, V. M. **A massa unitária da areia como parâmetro de análise das características de argamassa.** Artigo. Ambiente Construído. Vol. 1, 1997.

CARVALHO, H. D. S. **Análise da retração por secagem em argamassas autonivelantes utilizando adições minerais como substitutos parciais do cimento Portland.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

CAVALCANTE, D. G. **Estudo das características física, mecânica e química de compósitos cimentícios reforçados com tecido de juta e malva tratado e adição de materiais pozolânicos.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2017.

CAVALCANTE, D. G. MARQUES, M. G. S. MELO FILHO, J. A. **Influence of the levels of replacement of portland cement by metakaolin and silica extracted from rice husk ash in the physical and mechanical characteristics of cement pastes.** Artigo. Cement and Concrete Composites. Vol. 94, 2018.

CEMEX. **Certificado do produto nº 001-18-CPII-E-32.** Manaus, 2018.

CHAVES, P. S. **Argamassa autonivelante com adição mineral (fíler) de resíduo de beneficiamento de mármore e granito.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2019.

CHOI, J. H. CHEN, H. R. L. **Design of Continuously Reinforced Concrete Pavements Using Glass Fiber Reinforced Polymer Rebars.** Artigo. N. FHWA-HRT-05-081. Department of Transportation Federal Highway Administration (FHWA). Georgetown Pike, USA, 2005.

CHRIST, R. **Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de pós-reativos com misturas híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2014.

COIMBRA, M. A. MORELLI, M. R. **Pozzolanic powders prepared by treatment of residual materials.** Artigo. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Carlos, 2001.

COSTA, D. S. PERES, M. N. P. B. BARREIRA, R. M. SILVA, R. L. B. DA SILVA, V. L. D. SÁ, F. A. SOUZA, J. A. S. **Compósitos reforçados com fibras de sisal e malva: análise da**

**tensão x comprimento de fibras.** Artigo. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 20º CBECIMAT. Joinville, 2012.

**COSTA, M. R. M. M. Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos.** Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

**DANTAS, C. M. FREIRE JUNIOR, R. C. S. AQUINO, E. M. F. Influência da proteção lateral na absorção de água e nas propriedades mecânicas de um compósito à base de fibras de juta.** Artigo. 20º Congresso Brasileiro de engenharia e ciências dos materiais – CBECIMAT. Joinville, 2012.

**DIAS, R. F. Comparação da determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço por meio do ensaio de abertura por encunhamento e da ASTM C1609.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2018.

**DINAKAR, P. REDDY, M. K. SHARMA, M. Behaviour of self compacting concrete using Portland pozzolana cement with different levels of fly ash.** Artigo. Materials and Design. Vol. 46, 2013.

**DWECK, J. BUCHLER, P. M. COELHO, A. C. V. CARTLEDGE, F. K. Hydration of a Portland cement blended with calcium carbonate.** Artigo. Thermochemica Acta. Vol. 346, 2000.

**ESMERALDO, M. A. Preparação de novos compósitos suportados em matriz de fibra vegetal/natural.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2006.

**FARIA, R. A. Beneficiamento e Caracterização do Caulim da Região de Prado (BA).** Trabalho de conclusão de curso. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2019.

**FERNANDES, R. I. M. MULINARI, D. R. CARVALHO, K. C. C. CONEJO, L. S. VOORWALD, H. J. C. CIOFFI, M. O. Estudo da modificação química nas fibras provenientes da coroa do abacaxi.** Artigo. Anais do 10º Congresso Brasileiro de Polímeros. Foz do Iguaçu, 2009.

**FERRAZ, E. ANDREJKOVIČOVÁ, S. HAJAJI, W. VELOSA, A. L. SILVA, A. S. ROCHA, F. Pozzolanic activity of metakaolins by the french standard of the modified chapelle test:**

**a direct methodology.** Artigo. Acta Geodyn. Geomater. Vol. 12, N.º 3. República Tcheca, 2015.

FERREIRA, S. R. SILVA, F. A. LIMA, P. R. L. TOLEDO FILHO, R. D. **Effect of hornification on the structure, tensile behavior and fiber matrix bond of sisal, jute and curauá fiber cement based composite systems.** Artigo. Construction & Building Materials. Vol. 139, 2017.

FIDELIS, M. E. A. **Desenvolvimento e Caracterização Mecânica de Compósitos Cimentícios Têxteis Reforçados com Fibras de Juta.** Tese de Doutorado. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras.** In: Isaia, Geraldo Cechella. (Org.) Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações. IBRACON. Vol. 2, Capítulo 39. São Paulo, 2005a.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras.** Tese de Livre Docência. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011b.

FORTUNATO, M. MARTINS, B. R. CASALI, J. M. COLLODETTI, G. BETIOLI, A. M. **Estudo da substituição de cimento portland pelo fino de britagem em argamassa autoadensável.** Artigo. Revista Técnico-Científica do CREA-PR. Edição especial Entac, 2018.

FREITAS, E. R. BORJA, E. V. ANJOS, M. A. S. PEREIRA, A. C. VIANA, J. S. **Estudo das adições e aditivos minerais nas propriedades de argamassas auto-nivelantes.** Anais. V CONNEPI. Maceió, 2010.

GAO, Z. PAYER, J. LIANG, R. PATNAIK, A. K. **Mass Loss and Capacity Loss of Reinforced Concrete Slabs with and without Polypropylene Fibers Corroded with Pre-existing Cracks and Sustained Loading.** Anais. Risk Management Conference. 2016.

GÓIS, F. A. P. **Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço: Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2010.

GRUBEŠA, I. N. MARKOVIĆ, B. GOJEVIĆ, A. BRDARIĆ, J. **Effect of hemp fibers on fire resistance of concrete.** Artigo. Construction and Building Materials. Vol. 184, 2018.



- GÜNEYISI, B. GESOĞLU, M. ÖZBAY, E. **Strength and drying shrinkage properties of self-compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures.** Artigo. Construction and Building Materials. Vol. 24, 2010.
- HENKENSIEFKEN, R. BRIATKA, P. BENTZ, D. P, NANTUNG, T. E. WEISS, J. **Plastic shrinkage cracking in internally cured mixtures.** Artigo. Concrete. Internacional. Vol. 32, 2010.
- ISLAM BOSSUNIA, M. T. PODDAR, P. HASAN, M. M. HOSSAIN, M. T. GULENOOR, F. KHAN, R. A. SARWARUDDIN CHOWDHURY, A. M. **Irradiated Jute Reinforced Polypropylene Composites: Effect of Mercerization and SEM Analysis.** Artigo. Journal of Material Science & Engineering. Vol. 5, 2016.
- ITIM, A. EZZIANE, H. KADRI, E. H. **Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions.** Artigo. Construction and Building Materials. Vol. 25, 2011.
- JAMERAN, A. IBRAHIM, I. S. YAZAN S. H. S. RAHIM, S. N. A. A. **Mechanical properties of steelpolypropylene fiber reinforced concrete under elevated temperature.** Artigo. Procedia Engineering. Vol. 125, 2015.
- JARAMILLO, N. HOYOS, D. SANTA, J. F. **Composites with pineapple-leaf fibers manufactured by layered compression molding.** Artigo. Ingeniería y Competitividad, Vol. 18., n.º 2. Cali, 2016.
- JOHN, M. J.; ANANDJIWALA, R. D. **Recent Developments in Chemical Modification and Characterization of Natural Fiber-Reinforced Composites.** Artigo. Polymer Composites. Vol. 29, 2008.
- JUSOH, W. A. W. IBRAHIM, I. S. SAM, A. R. M. SARBINI, N. N. **Mechanical and shrinkage properties of hybrid steel and polypropylene fibre reinforced concrete composite.** Artigo. Jurnal Teknologi. Malásia, 2016.
- KANTRO, D. L. **Influence of water-reducing admixtures on properties of cemente paste – A miniature slump test.** Cement, Concrete anual Aggregates. Vol. 2, n.º. 2, 1980.
- KARAKURT, C. ARSLAN, A. T. **Properties of concrete pavements produced with different type of fibers.** Artigo. Journal of The Turkish Chemical Society, Section B: Chemical Engineering. Turquia, 2017.

- KATSIADRAMIS, N. J. SOTIROPOULOU, A. B. PANDERMARAKIS, Z.G. **Rheological and Mechanical Response Modifications for a Self-Leveling Mortar**. Artigo. EPJ Web of Conferences. Vol. 6, 2010.
- KUMAR, R. GOEL, P.; MATHUR, R. **Suitability of Concrete Reinforced with Synthetic Fiber for the Construction of Pavements**. Artigo. Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Kyoto, Japão, 2013.
- LAI, W. J. CHENG, K. C. **Crystallization and Luminescence Properties of Polypropylene Fiber Containing Rare Earth Aluminates and a Sorbital Derivative Nucleating Agent**. Artigo. Fibers and Polymers. Vol. 19, 2018.
- LEEMANN, A. NYGAARD, P. LURA, P. **Impact of admixtures on the plastic shrinkage cracking of self-compacting concrete**. Artigo. Cement and Concrete Composites. Vol. 46, 2014.
- LIMA, A. C. **Caracterização e propriedades de compósitos de Tecido de juta reforçando matriz de polietileno reciclado**. Tese de doutorado. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campo dos Goyracazes, 2009.
- LIMA, P. TOLEDO FILHO, R. D. **Uso da metacaulinita para incremento da durabilidade de compósitos à base de cimento reforçados com fibras de sisal**. Artigo. Ambiente Construído. Vol. 8, n.º 4. Porto Alegre, 2008.
- LOPES DA SILVA, S. H. **Desenvolvimento de formulações de argamassas autonivelantes para pisos e avaliação da retração por secagem**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2016.
- LURA, P. MAZZOTTA, G. B. RAJABIPOUR, F. WEISS, J. **Influence of shrinkagereducing admixtures on development of plastic shrinkage cracks**. Artigo. ACI Materials Journal. Vol. 104, 2007.
- MACCAFERRI DO BRASIL LTDA. **Fibra de polipropileno**. FibroMac® 12. Fibras para Reforço do Concreto. Características técnicas. 2008.
- MADHAVI, T. RAJU, L. S. MATHUR, D. **Polypropylene Fiber Reinforced Concrete - A Review**. Artigo. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. Vol. 4, Special Issue 4, 2014.

MAGALHÃES, F. C. REAL, M. V. **Análise probabilística do concreto reforçado com fibras utilizado na construção do dique seco do Estaleiro Rio Grande.** Artigo. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. Vol. 4, n.º 2, 2011.

MARGEM, J. I. **Estudo das características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de malva.** Tese de doutorado. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, 2013.

MARGEM, J. I. GOMES, V. A. MARGEM, F. M. RIBEIRO, C. G. D. BRAGA, F. O. MONTEIRO, S. N. **Flexural Behavior of Epoxy Matrix Composites Reinforced with Malva Fiber.** Artigo. Material Research. Vol. 18. São Carlos, 2015.

MARQUES, C. S. **Estudo comparativo do potencial pozolânico de adições argilo-minerais disponíveis no Amazonas e Porto Velho, utilizando as técnicas de termogravimetria, difração de raios-x e teste de cal saturada.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2017.

MARQUES, M. F. V. MELO, R. P. ARAUJO, R. S. LUNZ, J. N. AGRUIAR, V. O. **Improvement of mechanical properties of natural fiber–polypropylene composites using successive alkaline treatments.** Artigo. Journal of Applied Polymer Science. Vol. 132, 2015.

MARTINS, E. J. **Procedimento para dosagem de pastas para argamassa autonivelante.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

MAZZA, S. C. **Estudo das propriedades mecânicas e da aderência entre argamassa de reparo geopolimérica e substrato de concreto com cimento Portland.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2010.

MC-BAUCHEMIE. **Construction Chemicals Linhas de Produtos.** 2014.

MEDINA, E. A. **Pozolanicidade do metacaulinita em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio.** Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

MEHTA, K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** Livro. 2ª Ed. Editora Nicole Pagan Hasparyk. IBRACON, 2014.

MELO FILHO, J. A. **Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal.** Tese de doutorado. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

- MELO FILHO, J. A. SILVA, F. A. TOLEDO FILHO, R. D. **Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems.** Artigo. Cement and Concrete Composites. Vol. 40, 2013.
- MOHANTY, A. K. MISRA, M. HINRICHSEN, G. **Biofibres biodegradable polymers and biocomposites: An overview.** Artigo. Macromolecular Material and Engineering. Vol. 276/277, 2000.
- MOHNEN, D. **Pectin structure and biosynthesis.** Artigo. Current Opinion in Plant Biology. Vol. 11, 2008.
- MOKAREM, D. W. WEYERS, R. E. LANE, D. S. **Development of a shrinkage performance specifications and prediction model analysis for supplemental cementitious material concrete mixtures.** Artigo. Cement and Concrete Research. Vol. 35, 2005.
- MOSTAFA, M. UDDIN, N. **Experimental analysis of Compressed Earth Block (CEB) with banana fibers resisting flexural and compression forces.** Artigo. Case Studies in Construction Materials. Vol. 5, 2016.
- NAAMAN, A. E. **Engineered Steel fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites.** Artigo. Journal of Advanced Concrete Technology. Japan Concrete Institute. Vol.1, n.º 9. Japão, 2003.
- NAKAKURA, E. H.; BUCHER, H. R. E. **Pisos Auto-nivelantes. Propriedades e Instalações.** Anais. II Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Salvador, 1997.
- NASCIMENTO, R. M. **Estudo da aditivção do metacaulinita de alta reatividade, produzido por meio do método de calcinação flash em cimento Portland.** Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia – PIPE. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.
- NUNES, N. L. AGOPYAN, V. **Influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibra de aço.** Boletim Técnico. Escola Politécnica da USP, Departamento de Construção Civil, 1998.
- OLIVEIRA, I. R. C. **Propriedades mecânicas, físicas e químicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras longas de juta e de malva.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2013.

- OLIVEIRA, M. P. BARBOSA, N. P. **Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas.** Artigo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol. 10, n.º 2. Campina Grande, 2006.
- OLIVEIRA, M. S. **Desenvolvimento e caracterização de telhas cimentícias reforçadas com tecido de fibras vegetais da Amazônia.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2017.
- OLIVEIRA, P. F. SILVA, R. A. MARQUES, M. F. V. **Biocompósitos de PHB reforçados com fibras de malva.** Artigo. IMA, UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- ONISHI, K. BIER, T. A. **Investigation into relations among technological properties, hydration kinetics and early age hydration of self-leveling underlayments.** Artigo. Cement and Concrete Research. Vol. 40, 2010.
- OTA, W. N. **Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional.** Dissertação de Mestrado. Programa Interdisciplinar de Pós-graduação em Engenharia (PIPE) Área de concentração: Ciência e Tecnologia de Materiais. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2004.
- PATEL, R. PATEL, V. R. **Using Jute Fiber in Cement Concrete Pavement with IRC Mix Design and Ambuja Mix Design.** Artigo. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Vol. 5, 2ª Ed. 2018.
- PAUL JUNIOR, J. T. **Glass fiber reinforced crystalline polypropylene composition and laminate.** US3437550. Patente. United States Patent Office, 1966.
- PORTELA, G. **Compósito geopolimérico reforçado com tecido de juta.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2016.
- PRADIG D., J. AJAY P., S. **Determination of durability of Metakaolin Blend High Grade Concrete by using Water Permeability Test.** Artigo. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). Vol. 5, 2ª Ed. Índia, 2013.
- QI, C. WEISS, J. OLEK, J. **Characterization of plastic shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using image analysis and a modified Weibull function.** Artigo. Materials and Structures. Vol. 36, 2003.

QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adição híbridas de fibras**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação da Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

RANJBAR, N. TALEBIAN, S. MEHRALI, M. KUENZEL, C. METSELAAR, H. S. C. JUMAAT, M. Z. **Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites**. Artigo. Composites Science and Technology. Vol. 122, 2016.

REBELO, V. S. M. **Efeitos da mercerização em fibras de Piaçava Amazônica (Leopoldinia piassaba) para produção de painéis de partículas de média densidade**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2016.

ROCHA, G. G. N. **Caracterização Microestrutural do Metacaulim de Alta Reatividade**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal De Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.

RODRIGUES, F. A. **Estudo da influência de diferentes tratamentos (fibra/matriz) nas propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com fibra de malva**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2015.

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

ROMERO, L. L. VIEIRA, J. O. W. M. MEDEIROS, L. A. R. MARTINS, R. F. **Fibras artificiais e sintéticas**. BNDES, 1995.

RONG, M. Z. ZHANG, M. Q. LIU, Y. YANG, G. C. ZENG. H. M. The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. Artigo. Composites Science and Technology. Vol. 61, 2001.

ROSA FILHO, C. D. COSTA E SILVA, A. J. PARISI, S. A. MONTEIRO, E. C. B. ALMEIDA, D. C. B. **Análise do comportamento mecânico do concreto com adição de fibras de polipropileno e sua atuação no combate às manifestações patológicas**. Artigo. Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas – CONPAR. Recife, 2017.

ROY, A. CHAKRABORTY, S. KUNDU, S. P. BASAK, R. K.; MAJUMDER, S. B.; ADHIKARI, B. **Improvement in mechanical properties of jute fibres through mild alkali treatment as demonstrated by utilisation of the weibull distribution model.** Artigo. Bioresource technology. Vol. 107. Índia, 2012.

RUBIN, A. P. **Argamassas autonivelantes industrializadas para contrapiso: análise do desempenho físico-mecânico frente às argamassas dosadas em obra.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

SAFI, B. SAIDI, M. ABOUTALEB, D. MAALLEM, M. **The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: effect on physical and mechanical properties.** Artigo. Construction and Building Materials. Vol. 43, 2013.

SAFI, B. SAIDI, M. DAOUI, A. BELLAL, A. MECHEKAK, A. TOUMI, K. **The use of seashells as a fine aggregate (by sand substitution) in self-coMPacting mortar (SCM).** Artigo. Construction and Building Materials. Vol. 78, 2015.

SAHMARAN, M. CHRISTIANTO, H. A. YAMAN, I. O. **The effect of chemical admixtures and mineral additives on the properties of self-compacting mortars.** Artigo. Cement & Concrete Composites. Vol. 28, 2006.

SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras.** Dissertação de mestrado. Mestrado em Engenharia Civil - Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

SANTOS, D. O. J. FONTES, C. M. A. LIMA, P. R. L. **Uso de agregado miúdo reciclado em matrizes cimentícias para compósitos reforçados com fibras de sisal.** Artigo. Revista Matéria. Vol. 22, 2017.

SATHISHKUMAR, S. SURESH, A. V. NAGAMADHU, M. KRISHNA, M. **The effect of alkaline treatment on their properties of Jute fiber mat and its vinyl ester composites.** Artigo. Materials Today: Proceedings. Vol. 4, n.º 4, 2017.

SAVASTANO JÚNIOR, H. PIMENTEL, L. L. **Viabilidade do aproveitamento de resíduos de fibras vegetais para fins de obtenção de material de construção.** Artigo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol. 4. N. 1. Campina Grande, 2000.

- SAVASTANO JÚNIOR, H. SANTOS, S. **Uso de resíduos de fibra vegetal em construção.** Artigo. Revista Eletrônica de Jornalismo Científico. 2008.
- SAVASTANO JÚNIOR, H. **Sistema de cobertura para construção de baixo custo: uso de fibras vegetais e de outros resíduos agroindustriais.** Tese de livre-docência. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.
- SEGAL, L. CREELY, J. J. MARTIN JR., A. E. CONRAD. **An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer.** Artigo. Textile Research Journal. 1959.
- SHIKHARE, V. B. KALURKAR, L. G. **Effect of different types of steel fibers with metakaolin & fly ash on mechanical properties of high strength concrete.** Artigo. International Journal of Civil Engineering and Technology. Vol. 4, 2013.
- SILVA, A. C. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose.** Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002.
- SILVA, E. F. **Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração.** Tese de doutorado. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- SILVA, F. A. TOLEDO FILHO, R. D. MELO FILHO, J. A. FAIRBAIRN, E. M. R. **Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites.** Artigo. Construction and Building Materials. Vol. 24, 2010.
- SILVA, I. J. LIBÓRIO, J. B. L. **Hidratação do cimento de alto desempenho e suas propriedades mecânicas.** Artigo. Anais do 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica. Florianópolis, 1999.
- SILVA, O. F. GOMES, P. C. C. MORAIS, K. A. M. **Analytical method for determining the saturation point of superplasticizers in cement pastes using the Marsh cone.** Artigo. Cerâmica. Vol. 65, 2019.
- SILVA, R. A. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais.** Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.
- SIMSEK, O. **Beton ve Beton Teknolojisi.** 5ª Ed. Ankara: Seçkin Yayıncılık, 2016.



SINGH, M. P. SIL, A. **Behaviour of jute fibre reinforced concrete beam under cyclic loading**. Artigo. International Journal of Advance and Innovation Research. Vol. 2. Índia, 2015.

SMARZEWSKI, P. BARNAT-HUNEK, D. **Fracture properties of plain and steelpolypropylene-fiber-reinforced high-performance concrete**. Artigo. 22nd International Conference on Materials and Technology. Portorož, Eslovênia, 2014.

SOUZA, A. S; FERREIRA, A. Z.; AZEVEDO, B. L. O. **Estudo para o desenvolvimento de argamassa autonivelante para contrapiso**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

TAMAKI, L. **Reforço de fibra**. Artigo. Revista Técnica. Ed. 170. São Paulo, 2011.

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

TEIXEIRA, R. S. **Efeito das fibras de curauá e de polipropileno no desempenho de compósitos cimentícios produzidos por extrusão**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.

THOMAS, S. PAUL, S. A. POTHAN, L. A. DEEPA B. **Natural Fibres: Structure, Properties and Applications**. In: Kalia S., Kaith B., Kaur I. (eds) Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.

TOMCZAK, F. SYDENSTRICKER, T. H. D. SATYANARAYANA, K. G. **Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part II: Morphology and properties of Brazilian coconut fibers**. Artigo. Composites: Part A. applied Science and manufacturing. Vol. 38, 2007.

TORGAL, F. P. JALALI, S. **Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review**. Artigo. Construction and Building Materials. Vol. 25, 2011.

TUTIKAN, B. F. DAL MOLIN, D. C. **Concreto auto-adensável**. Ed. PINI. São Paulo, 2008.

TUTIKAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

VARELA, P. H. A. **Obtenção, caracterização e aplicabilidade e um compósito com matriz de resina ortoftálica e reforço de tecido de juta (corchorus capsularis) hibridizado com fibra de vidro**. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2017.

- VELASCO, R. V. **Concreto de Alto Desempenho Reforçado com Fibras de Polipropileno e Sisal Submetido a Altas Temperaturas**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.
- VELASCO, R. V. **Concretos auto-adensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânicas e térmicas**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.
- VENTURA, A. M. F. M. **Os compósitos e a sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas**. Artigo. Ciência & Tecnologia dos Materiais. Vol. 21, 2009.
- VILLATE DIAZ, J. P. **Comportamento Mecânico de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibras de Pupunha**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2016.
- WADA, M.; HORI, R.; KIM, U.-J.; SASAKI, S. **X-ray diffraction study on the thermal expansion behavior of cellulose I $\beta$  and its high-temperature phase**. Artigo. Polymer Degradation and Stability. Vol. 95, 2010.
- WEHBE, Y. GHAREMANINEZHAD, A. **Combined effect of shrinkage reducing admixtures (SRA) and superabsorbent polymers (SAP) on the autogenous shrinkage, hydration and properties of cementitious materials**. Artigo. Construction and Building Materials. Vol. 138, 2017.
- WEI, J.; MEYER, C. **Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites**. Artigo. Cement and Concrete Research. Vol. 73. USA, 2015.
- WITTMAN, F. H. **Heresies on shrinkage and creep mechanisms**. Anais. CONCREEP 2008, Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures. Vol. 1, 2008.
- WYRZYKOWSKI, M. TRTIK, P. MÜNCH, P. WEISS, J. VONTOBEL, P. LURA, P. **Plastic shrinkage of mortars with shrinkage reducing admixture and lightweight aggregates studied by neutron tomography**. Artigo. Cement and Concrete Research. Vol. 73, 2015.
- YANG, L. ZHANG, Y. YAN, Y. **Utilization of original phosphogypsum as raw material for the preparation of self-leveling mortar**. Artigo. Journal of Cleaner Production. Vol. 127, 2016.

**YANG, Y. LIU, L. LIAO, Q. WU, J. LI, J. ZHANG, L. Effect of superabsorbent polymers on the drying and autogenous shrinkage properties of self-leveling mortar.** Artigo. Construction and Building Materials. Vol. 201, 2019.

**ZAKARIA, M. AHMED, M. HOQUE, M. M. ISLAM, S. Scope of using jute fiber for the reinforcement of concrete material.** Artigo. Textiles and Clothing Sustainability 2:11. Bangladesh, 2017.

**ZHANG, S. XU, X. MEMONC, S. A. DONG, Z. LI, D. CUI, H. Effect of calcium sulfate type and dosage on properties of calcium aluminate cement-based self-leveling mortar.** Artigo. Construction and Building Materials. Vol. 167, 2018.

**ZHANG, W. HAMA, Y. NA, S. H. Drying shrinkage and microstructure characteristics of mortar incorporating ground granulated blast furnace slag and shrinkage reducing admixture.** Artigo. Construction and Building Materials. Vol. 93, 2015.

**ZHU, W. H. Utilisation of banana fibre in composite materials.** Dissertação de mestrado. Victoria University of technology, Melbourne, 1993.