



Renata Godinho Pinto

**Compósitos cimentícios reforçados com
fibras de curauá (*Ananas erectifolius*)
impregnadas com sílica ativa**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Dr. Marcelo de Souza
Picanço

Belém – Pará – Brasil
2019

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



Renata Godinho Pinto

**Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá
(*Ananas erectifolius*) impregnadas com sílica ativa**

Dissertação de Mestrado

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Marcelo de Souza Picanço

Belém
Fevereiro de 2019

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Renata Godinho Pinto.

TÍTULO: Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá (*Ananas erectifolius*) impregnadas com sílica ativa.

GRAU: Mestre ANO: 2019

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Renata Godinho Pinto

Av. Augusto Correa, n. 1
Campus Universitário do Guamá
Laboratório de Engenharia Civil Belém, Pará.
CEP 66075-970

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Biblioteca do ITEC/UFPA-Belém-PA

P659 Pinto, Renata Godinho, 1990
Compósitos cimentícios reforçados com fibras
de carauá (*Ananas erectifolius*) impregnadas com
sílica ativa / Renata Godinho Pinto. - 2019.

Orientador: Marcelo de Souza Picanço

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal
do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2019.

1.Cimento Portland. 2.Fibras – Propriedades
mecânicas. 3.*Ananas erectifolius*.
4.Reaproveitamento (sobras, refugos, etc.) 5.
Argamassa. I.Título.

CDD 23. ed. – 6 6 6 . 9 4

Elaborado por Kelren Cecília dos Santos Lima da Mota – CRB-2/1461



COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CURAUÁ (ANANAS ERECTIFOLIUS) IMPREGNADAS COM SILICA ATIVA

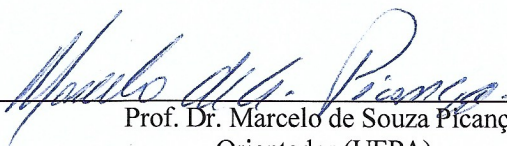
AUTORA:

RENATA GODINHO PINTO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL NA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 01 / 02 / 2019.

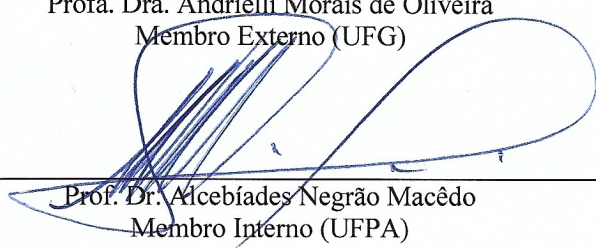
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Orientador (UFPA)

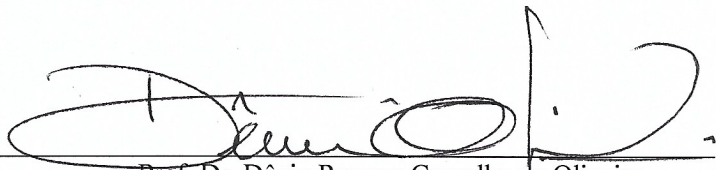


Profa. Dra. Andrielli Moraes de Oliveira
Membro Externo (UFG)



Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo
Membro Interno (UFPA)

Visto:



Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho não seria possível sem a ajuda de diversas pessoas que me acompanharam ao longo dessa caminhada. Primeiramente gostaria de agradecer ao professor Marcelo Picanço pela orientação e por dividir o seu conhecimento ao longo dessa pesquisa. Também agradeço aos professores Alcebiades Macêdo e Luciana Cordeiro por terem participado da minha banca de qualificação, cujas considerações foram fundamentais para o encaminhamento dessa dissertação.

Meus sinceros agradecimentos aos vários laboratórios da Universidade Federal do Pará que se disponibilizaram a realizar análises essenciais para o andamento desta pesquisa: Laboratório de Engenharia Civil, Laboratório de Física (Pesquisa); Laboratório de Microanálises e Laboratório de Mineralogia, Geoquímica e Aplicações do Instituto de Geociências; Laboratório de Ensaios Mecânicos da Faculdade de Engenharia Mecânica; Laboratório de Farmacognosia da Faculdade de Farmácia, além do Laboratório de Metalurgia do Instituto Federal do Pará.

Dedico esse trabalho especialmente à minha família. Aos meus pais Pedro e Socorro, responsáveis por todas as minhas conquistas, por incentivarem minha educação e por fazerem o possível e o impossível para viabilizar a execução desse estudo. Aos meus avós Lélío e Emília, que participaram ativamente dessa caminhada. À minha irmã Ana Carla, meu maior exemplo, cujos conhecimentos me guiaram no bom desenvolvimento de uma pesquisa científica. Ao meu namorado Ricardo, cujo constante apoio e incentivo foram essenciais para manter o foco e a dedicação necessários para a conclusão dessa etapa.

Agradeço à amiga que essa jornada me presenteou, Marcelly, meu braço direito, que me acompanhou nos momentos de trabalho (e muito), de dúvidas e especialmente nos de alegria, sendo indispensável para que eu conseguisse chegar até aqui. E por fim gostaria de agradecer a todos os meus amigos e colegas do mestrado, Neto, Igor, Vander, Denisson, André, Joel, Anna Flávia, Matheus, Ananda e a todos aqueles que ajudaram direta e indiretamente no progresso dessa pesquisa.

RESUMO

PINTO, Renata Godinho. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá (*Ananas erectifolius*) impregnadas com sílica ativa**. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

As fibras vegetais são uma alternativa para o reforço de argamassas cimentícias, uma vez que, diferentemente das fibras industrializadas, são renováveis, biodegradáveis e de baixo custo. A grande limitação desses compósitos diz respeito a baixa durabilidade das fibras inseridas na matriz cimentícia. Por isso, a presente pesquisa teve como objetivo analisar as propriedades de argamassas reforçadas com fibras de curauá previamente impregnadas com sílica ativa. O traço dos compósitos foi determinado por meio de um estudo piloto, foi utilizado o traço 1:3:0,61 e adição de 2% de fibras com 25 mm de comprimento. Foram moldadas seis famílias, empregando o cimento CP-IV e o CP-II E. Foi verificada as propriedades dos compósitos aos 28 dias e após o envelhecimento natural aos 180 e 270 dias. As características das fibras de curauá utilizadas foram: massa específica de 1,33 g/cm³, resistência à tração de 422,89 MPa e módulo de elasticidade de 28,83 GPa. Para os compósitos, quando avaliada a resistência à compressão, o tratamento prévio das fibras propiciou melhor resultado do que aquele obtido para as argamassas com fibras *in natura*. Para a resistência à tração, a inclusão das fibras de curauá proporcionou o reforço desejado melhorando essa propriedade em cerca de 45%. O módulo de elasticidade indicou que a adição das fibras reduziu a rigidez do material. Para a flexão, a adição das fibras impregnadas proporcionou um incremento máximo na resistência de 57,95% em relação à referência, porém foi identificado com o envelhecimento natural o decréscimo da resistência para compósitos com fibras *in natura*. O tratamento proposto foi eficaz em preservar a tenacidade dos compósitos após o envelhecimento natural. Pelos difratogramas das argamassas, verificou-se que a impregnação das fibras foi eficiente em limitar a formação da portlandita na matriz. Isso corrobora com as micrografias das argamassas, onde foi identificado sinais de degradação nos compósitos com fibras *in natura*, enquanto que as fibras previamente tratadas se mantiveram intactas mesmo após o envelhecimento natural. Dessa forma, pode-se considerar que a impregnação das fibras com sílica ativa melhorou as propriedades mecânicas dos compósitos e aumentou a durabilidade das fibras de curauá.

Palavras-chave: Fibras de Curauá; Compósitos cimentícios; Sílica Ativa; Envelhecimento natural.

ABSTRACT

PINTO, Renata Godinho. **Cementitious composites reinforced with curaua fibers (*Ananas erectifolius*) impregnated with silica fume**. 128 p. MSc Thesis - Civil Engineering, Federal University of Pará, Belém, 2019 (in Portuguese).

Vegetal fibers are an alternative for reinforcement in cementitious mortars, unlike the synthetic fibers, they are renewable, biodegradable and low cost. The great limitation of these composites concerns the low durability of the fibers inserted in the cementitious matrix. Therefore, the present research aim to analyze the properties of reinforced mortars with curaua fibers previously impregnated with silica fume. The mix design ratio of the composites was determined with a pilot study. The composites were prepared with mix design ratio 1:3:0.61 and with addition of 2% fibers with 25 mm length. Six families were molded using CP-IV cement and CP-II E. The properties of the composites were verified at 28 days and after natural aging at 180 and 270 days. The characteristics of the curaua fiber used were: density of 1.33 g/cm³, tensile strength of 422.89 MPa and modulus of elasticity of 28.83 GPa. For compressive strength, the composites fibers previous treatment provided a better result than that obtained for mortars with natural fibers. For the tensile strength, inclusion of fibers provided the desired reinforcement improving this property in 45 %. The modulus of elasticity indicated that the addition of the fibers reduced the stiffness of the material. For flexural strength the composite AFCS:IV showed a 57.95 % increase compared to the reference, but it was identified with the natural aging the decrease of the resistance for composites with untreated fibers. The proposed treatment was effective to preserve the toughness of the composites after natural aging. Due to the composites X-ray diffraction, it was verified that the previous treatment of the fibers was effective in limiting the formation of the portlandite in the matrix. This corroborates with micrographs of the mortars, where degradation signals were identified in composites with untreated fibers, while the previously treated fibers remained intact even after natural aging. Thus, it can be considered that the impregnation of the fibers with silica fume improved the properties of the composites and increased the durability of the curaua fibers.

Keywords: Curauá fibers; Cementitious composites; Silica fume; Natural aging.

Sumário

Capítulo	Página
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Justificativa	3
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo geral	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. Fibras	6
2.1.1. Fibras vegetais	7
2.2. Fibra de Curauá (<i>Ananas erectifolius</i>)	10
2.2.1. Características físicas	10
2.2.2. Extração e tratamento das fibras	12
2.2.3. Propriedades químicas e mecânicas	13
2.2.4. Aplicações	14
2.3. Compósitos de matriz cimentícia	15
2.3.1. Cimento Portland	16
2.3.2. Comportamento mecânico dos compósitos	18
2.4. Durabilidade dos compósitos com fibras vegetais	19
2.5. Tratamentos físicos e químicos	22
2.5.1. Tratamentos nas matrizes	22
2.5.2. Tratamentos nas fibras	22
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	24
3.1. Materiais	25
3.1.1. Cimento	25
3.1.2. Agregado miúdo	27
3.1.3. Aditivo Superplastificante	28
3.1.4. Sílica Ativa	28

3.1.5.	Fibra de Curauá	30
3.2.	Métodos	30
3.2.1.	Caracterização da Fibra de Curauá	30
3.2.1.1.	Massa Específica	31
3.2.1.2.	Absorção de água	32
3.2.1.3.	Teor de umidade	32
3.2.1.4.	Diâmetro das fibras	33
3.2.1.5.	Resistência à tração	34
3.2.1.6.	Módulo de elasticidade	35
3.2.1.7.	Teor de Lignina	35
3.2.1.8.	Análise Morfológica	36
3.2.1.9.	Índice de Cristalinidade	37
3.2.2.	Produção dos Compósitos Cimentícios	38
3.2.2.1.	Estudo Piloto	38
3.2.2.2.	Preparo das argamassas	40
3.2.2.3.	Moldagem e cura dos corpos de prova	42
3.2.2.4.	Envelhecimento natural	44
3.2.3.	Ensaaios mecânicos	45
3.2.3.1.	Resistência à compressão	45
3.2.3.2.	Tração por compressão diametral	46
3.2.3.3.	Módulo de elasticidade	47
3.2.3.4.	Flexão	48
3.2.3.5.	Tenacidade	49
3.2.4.	Análise microestrutural	50
3.2.5.	Análise mineralógica	51
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1.	Caracterização da Fibra de Curauá	52
4.1.1.	Massa Específica	52
4.1.2.	Absorção de água	52
4.1.3.	Teor de umidade	54
4.1.4.	Diâmetro das fibras	55
4.1.5.	Teor de lignina	56
4.1.6.	Índice de cristalinidade	57

4.1.7.	Resistência à tração	58
4.1.8.	Módulo de elasticidade	60
4.1.9.	Análise Morfológica	62
4.2.	Estudo Piloto	64
4.3.	Índice de Consistência	65
4.4.	Propriedades Mecânicas dos Compósitos	67
4.4.1.	Resistência à compressão	67
4.4.2.	Tração por compressão diametral	71
4.4.3.	Módulo de elasticidade	74
4.4.4.	Flexão	75
4.4.5.	Tenacidade	82
4.5.	Análise Mineralógica	84
4.6.	Análise Microestrutural	91
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
5.1.	Conclusões	98
5.2.	Sugestões de trabalhos futuros	99
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

Lista de Tabelas

Tabela	Página
Tabela 2.1: Classificação das fibras conforme sua origem anatômica	7
Tabela 2.2: Propriedades mecânicas das fibras vegetais	9
Tabela 2.3: Tipos e composição dos cimentos Portland	17
Tabela 3.1: Características dos cimentos utilizados	26
Tabela 3.2: Análise Química dos cimentos utilizados	26
Tabela 3.3: Caracterização do agregado miúdo	27
Tabela 3.4: Composição química da Sílica Ativa	29
Tabela 3.5: Parâmetros utilizados em argamassas com fibras de curauá	39
Tabela 3.6: Misturas para determinar o comprimento e a fração volumétrica das fibras	40
Tabela 3.7: Programa experimental das misturas	41
Tabela 4.1: Massa Específica de fibras vegetais	52
Tabela 4.2: Absorção de água das fibras de Curauá	53
Tabela 4.3: Teor de Umidade de fibras vegetais	54
Tabela 4.4: Resultado do diâmetro médio das fibras de Curauá	55
Tabela 4.5: Diâmetro médio de fibras vegetais	56
Tabela 4.6: Teor de Lignina de fibras vegetais	56
Tabela 4.7: Composição química da fibra de curauá	57
Tabela 4.8: Índice de Cristalinidade de fibras vegetais	58
Tabela 4.9: Resultado da Resistência à Tração das fibras de Curauá	59
Tabela 4.10: Comparativo da Resistência à tração de fibras vegetais	59
Tabela 4.11: Resultado do Módulo de elasticidade das fibras de Curauá	60
Tabela 4.12: Comparativo do Módulo de Elasticidade de fibras vegetais	61
Tabela 4.13: Resultado da resistência à tração do estudo piloto	64
Tabela 4.14: Resultado do Módulo de elasticidade das argamassas	74

Lista de Figuras

Figura	Página
Figura 2.1: Classificação dos tipos de fibra	6
Figura 2.2: Estrutura das fibras vegetais	8
Figura 2.3: Fruto do curauá	10
Figura 2.4: Cultivo do curauá branco e do curauá roxo	11
Figura 2.5: Beneficiamento das fibras de curauá	12
Figura 2.6: Plantação de curauá	13
Figura 2.7: Tampa de porta malas produzido com compósitos de curauá	14
Figura 2.8: Comportamento de um compósito submetido à flexão	18
Figura 3.1: Programa experimental da dissertação	24
Figura 3.2: Curva Granulométrica do Agregado Miúdo	28
Figura 3.3: Curva Granulométrica da Sílica Ativa	29
Figura 3.4: Fibra longa de curauá	30
Figura 3.5: Determinação da massa específica das fibras de Curauá	31
Figura 3.6: Fibras de Curauá imersas em água	32
Figura 3.7: Medição do diâmetro da fibra de curauá	34
Figura 3.8: Ensaio de tração na fibra	34
Figura 3.9: Etapa intermediária do ensaio de determinação do teor lignina	36
Figura 3.10: Equipamento para análise microestrutural	37
Figura 3.11: Fibras de curauá cortadas	39
Figura 3.12: Processo de impregnação das fibras	41
Figura 3.13: Misturador utilizado na produção das argamassas	42
Figura 3.14: Corpos de prova cilíndricos na cura em água	43
Figura 3.15: Molde para corpos de prova prismáticos	44
Figura 3.16: Envelhecimento natural dos corpos de prova prismáticos	44
Figura 3.17: Ensaio de resistência à compressão	46
Figura 3.18: Ensaio de resistência à tração	47
Figura 3.19: Determinação do módulo de elasticidade	47
Figura 3.20: Ensaio de flexão	49
Figura 3.21: Curva carga-deslocamento segundo a norma ASTM C1018	50

Figura	Página
Figura 3.22: Difrátômetro de raios-x	51
Figura 4.1: Primeira hora de absorção de água das fibras de curauá	53
Figura 4.2: Absorção de água das Fibras de Curauá	54
Figura 4.3: Difratoograma da fibra de Curauá	58
Figura 4.4: Diagrama tensão-deformação da fibra de curauá	61
Figura 4.5: Micrografia da fibra de Curauá	62
Figura 4.6: Micrografia da fibra de curauá impregnada com sílica ativa	63
Figura 4.7: Microscopia da fibra de Curauá após ruptura por tração	63
Figura 4.8: Índice de consistência das argamassas de referência	66
Figura 4.9: Índice de consistência das argamassas com fibras <i>in natura</i>	66
Figura 4.10: Índice de consistência das argamassas com fibras com sílica ativa	67
Figura 4.11: Resistência à compressão dos compósitos com cimento CP-IV	68
Figura 4.12: Resistência à compressão dos compósitos com cimento CP-II E	69
Figura 4.13: Resistência à tração dos compósitos com cimento CP-IV	71
Figura 4.14: Resistência à tração dos compósitos com cimento CP-II E	73
Figura 4.15: Resistência à flexão dos compósitos com cimento CP-IV	75
Figura 4.16: Resistência à flexão dos compósitos com cimento CP-II E	77
Figura 4.17: Gráfico Carga x Deslocamento dos compósitos aos 28 dias	78
Figura 4.18: Gráfico Carga x Deslocamento dos compósitos aos 180 dias	80
Figura 4.19: Gráfico Carga x Deslocamento dos compósitos aos 270 dias	81
Figura 4.20: Índices de Tenacidade para os compósitos	82
Figura 4.21: Difratoogramas das argamassas AFC:IV	84
Figura 4.22: Difratoogramas das argamassas AFCS:IV	86
Figura 4.23: Portlandita em $18,1^{\circ}2\theta$ em argamassa com cimento CP-IV	87
Figura 4.24: Difratoogramas das argamassas AFC:II	88
Figura 4.25: Difratoogramas das argamassas AFCS:II	90
Figura 4.26: Portlandita em $18,1^{\circ}2\theta$ em argamassa com cimento CP-II E	91
Figura 4.27: Micrografias dos compósitos após 28 dias	92
Figura 4.28: Micrografias dos compósitos após 180 dias	94
Figura 4.29: Micrografias dos compósitos após 270 dias	96

Lista de Siglas

Símbolo	Significado
CEAPAC	Centro de Apoio a Projetos de Ação Comunitária
AGEITEC	Agência Embrapa de Informação Tecnológica
UFPA	Universidade Federal do Pará
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
ASTM	American Society for Testing and Materials
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry
FRX	Fluorescência de raios-x
DRX	Difratometria de raios-x
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
REF:IV	Argamassa de referência com cimento CP-IV
REF:II	Argamassa de referência com cimento CP-II E
AFC:IV	Argamassa com cimento CP-IV e fibra de curauá <i>in natura</i>
AFC:II	Argamassa com cimento CP-II E e fibra de curauá <i>in natura</i>
AFCS:IV	Argamassa com cimento CP-IV e fibra de curauá impregnada com sílica
AFCS:II	Argamassa com cimento CP-II E e fibra de curauá impregnada com sílica

Lista de Abreviaturas e Símbolos

Símbolo	Significado
C_3S	Alita - Silicato tricálcico
C_2S	Belita - Silicato dicálcico
C_3A	Aluminato tricálcico
C_4AF	Ferroaluminato tetracálcico
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
CH	Hidróxido de cálcio
SiO_2	Dióxido de silício
Al_2O_3	Óxido de alumínio
Fe_2O_3	Óxido de ferro
CaO	Óxido de cálcio
SO_3	Óxido sulfúrico
MgO	Óxido de magnésio
TiO_2	Dióxido de titânio
Mn_2O_3	Óxido de manganês
K_2O	Óxido de potássio
Na_2O	Óxido de sódio
<i>a/c</i>	Relação água/cimento
<i>CP</i>	Cimento Portland
<i>pH</i>	Potencial hidrogeniônico
f_c	Resistência à compressão
f_t	Resistência à tração
σ_b	Fator de tenacidade
E	Módulo de elasticidade
TI	Teor de lignina
IC	Índice de cristalinidade
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
GPa	Gigapascal

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

Na construção civil o cimento é utilizado em larga escala, associado à água, agregados miúdos e/ou graúdos pode ser produzido pastas, argamassas e concretos, para as mais variadas finalidades. Os materiais cimentícios geralmente estão presentes em todas as construções, seja na sua estrutura, fechamento, acabamento, fundação ou cobertura. Entretanto, matrizes cimentícias são conhecidas por sua baixa resistência à tração e seu comportamento frágil, o que resulta em uma ruptura brusca, sem altas deformações (ALI, LI, CHOUW, 2013; EHRENBRING, TUTIKIAN, 2016).

Visando desenvolver novos materiais, que solucionem essa limitação das matrizes frágeis, as pesquisas na área de engenharia buscam incorporar fibras de diversos tipos como reforço de compósitos cimentícios. Esse tipo de material apresenta novas características diferentes da matriz cimentícia plena. As fibras conferem ao compósito um comportamento dúctil, maior resistência à tração e melhora no comportamento pós-fissuração retardando a propagação de fissuras (SELLAMI, MERZOUD, AMZIAN, 2013; AYDIN, BARADAN, 2013).

Segundo Melo Filho (2012), os compósitos reforçados com fibras apresentam aplicações diversas, como elementos de cobertura, revestimentos, painéis divisórios, reforço e reabilitação de paredes de alvenaria e diversos componentes habitacionais. Para esse reforço podem ser utilizadas fibras sintéticas (como as metálicas e poliméricas), fibras minerais (como o amianto), fibras vegetais, entre outras. Conforme Martins Neto (2010), fibras sintéticas são àquelas produzidas pelo homem, que resultaram de pesquisas na área de engenharia dos materiais com estudos sobre o petróleo e seus derivados. Apesar deste tipo de fibra apresentar elevado desempenho mecânico, também apresentam desvantagens relacionadas à sua produção (WEI, MEYER, 2014a).

Dentre as fibras sintéticas as do tipo poliméricas, apresentam um elevado custo de produção, são poluentes e consomem grandes quantidades de matéria prima petroquímica. Por sua vez, as fibras de amianto têm seu uso relacionado com diversas doenças sendo recentemente proibidas no Brasil. Atualmente, vem crescendo a conscientização quanto a utilização de materiais sustentáveis, ou seja, aqueles que apresentam baixo impacto

ambiental, buscando-se investigar a possibilidade de inserir fibras naturais como reforço de compósitos cimentícios (CODISPOTI *et al.*, 2015; LECOMPTE *et al.*, 2015).

Como evidenciado por Sellami, Merzoud e Amziane (2013), o Brasil possui uma gama excepcional de flora com uma ampla variedade de fibras que podem ser estudadas. Essas fibras são principalmente aplicadas nas indústrias têxtil e automobilística, mas diversas pesquisas (ARRUDA FILHO *et al.*, 2012; LIMA *et al.*, 2014; EHRENBRING, TUTIKIAN, 2016), têm focado no seu uso como reforço de concretos e argamassas.

As fibras vegetais são uma opção mais sustentável quando comparadas às fibras sintéticas, pois elas são biodegradáveis, são provenientes de fontes renováveis e disponíveis em diversos países de clima tropical. A utilização de fibras vegetais como um material de construção resulta em um baixo custo de produção e elevada eficiência energética, promovendo o conceito de sustentabilidade (FERREIRA *et al.*, 2012; YAN, SU, CHOUW, 2015).

Beltrami, Scienza e Zattera (2014) descrevem que entre as fibras com grande disponibilidade no Brasil estão o sisal, a juta, a malva e o curauá. Dentre essas, a última se destaca por suas propriedades mecânicas superiores as demais. Além disso, o curauá (*Ananas erectifolius*) é uma planta de fácil cultivo uma vez que não necessita de condições específicas do solo para se desenvolver, sendo necessária apenas a presença abundante de luz e de chuva. Essa espécie é encontrada em diversas regiões do Brasil e do mundo.

Uma das maiores limitações na produção de compósitos cimentícios com fibras vegetais diz respeito à sua durabilidade. A fibra inserida na matriz cimentícia sofre diversos tipos de degradação devido a alta alcalinidade da matriz, o que leva a deterioração dos componentes químicos presentes nas fibras vegetais. Com isso, se torna necessária a investigação destes processos de degradação como também identificar mecanismos para contê-lo (LOPES *et al.*, 2011).

Pacheco-Torgal e Jalali (2011) relatam que vários trabalhos (GHAVAMI, 2005; SEDAN *et al.*, 2008; TONOLI *et al.*, 2009), vêm buscado alternativas para aumentar a durabilidade dos compósitos reforçados com fibras. Dentre elas, o tratamento das fibras e modificações nas matrizes vem sendo investigados. De forma a comprovar a sua eficácia, são realizados ensaios mecânicos e de caracterização das fibras para compósitos submetidos ao envelhecimento, como também submetidos à diferentes condições de cura.

1.2. Justificativa

O Brasil estava entre os cinco maiores consumidores de amianto no mundo, cerca de 90% do seu uso foi destinado para a indústria da construção civil na produção de telhas de fibrocimento, caixas d'água, entre outros. Este grande consumo foi estimulado devido às suas elevadas propriedades físico-químicas como resistência mecânica e a altas temperaturas, qualidade isolante, durabilidade, além do baixo custo de produção deste material (ABREA, 2018).

A partir de 1993 aumentaram consideravelmente os relatos de doenças profissionais relacionadas ao seu uso, dentre elas: a asbestose (doença crônica pulmonar de origem ocupacional), cânceres de pulmão, do trato gastrointestinal, tumores, entre outras. Essa substância por ser considerada altamente nociva à saúde humana, foi incluída na Lista de Doenças Relacionadas ao Trabalho pelo Ministério da Saúde em 1999, classificada como agente etiológico de risco ocupacional (PORTEZAN, 2013).

Vários países reconheceram os danos à saúde provocados pelo uso do amianto, proibindo a utilização e a comercialização deste material, em um total de 66 países, incluindo Argentina, Chile e Uruguai. Cinco estados brasileiros já possuíam leis para proibir a utilização do amianto, mas em 29/11/2017 o Supremo Tribunal Federal tornou inconstitucional o artigo 2º da lei federal 9.055/95 que regulava a exploração do mineral no país e permitia o seu uso de forma “controlada”, esta decisão pode ser considerada um marco na luta pelo banimento desta substância no Brasil (COUTINHO, 2018).

Conforme Quinino (2015), os constantes esforços para limitar o uso do amianto no Brasil e no mundo, com a criação de legislações específicas até a sua proibição total, são responsáveis por estimular a realização de pesquisas para se obter uma fibra com propriedades similares viabilizando a sua substituição. As fibras poliméricas vêm sendo empregadas para a produção de telhas e de outros elementos que anteriormente utilizavam o amianto, entretanto esse tipo de fibra sintética necessita de elevado custo de produção como também é responsável por um grande impacto ambiental.

Sendo assim, a proibição do uso do amianto representa uma grande oportunidade para o desenvolvimento de pesquisas no âmbito dos compósitos com fibras vegetais, devido às suas propriedades mecânicas similares às fibras sintéticas, seu custo-benefício e, acima de tudo, por gerarem um menor impacto ambiental (PACHECO-TORGAL, JALALI, 2011).

Contudo, a heterogeneidade das fibras vegetais resulta na necessidade de pesquisas para analisar as propriedades de cada espécie de fibra, como também verificar o seu comportamento quando inseridas em compósitos com diferentes constituições. Segundo Codispoti *et al.* (2015), cada fibra vegetal apresenta características diferentes devido à não uniformidade de sua estrutura e, com isso, suas propriedades mecânicas, físicas e geométricas diferem, pois são influenciadas por diversos fatores, dentre eles: sua natureza hidrofílica, teor de umidade, dimensões celulares e morfologia que variam para cada espécie.

Uma espécie que apresenta um grande potencial de utilização é o curauá (*Ananas erectifolius*), uma vez que é uma espécie facilmente encontrada no Brasil e que não necessita de cuidados específicos para o seu desenvolvimento. Sendo assim, é indispensável a realização de novas pesquisas para melhor caracterização e avaliação das fibras de curauá como reforço de concretos e argamassas (LIMA *et al.*, 2011).

Os compósitos cimentícios com fibras vegetais necessitam de análises mais aprofundadas para poder prever o seu comportamento mecânico e possibilitar que esse material seja empregado em larga escala na construção civil. Haja vista que, além das vantagens econômicas, as fibras vegetais quando comparadas às sintéticas, apresentam baixa densidade o que pode gerar compósitos mais leves. Estas também apresentam boas propriedades mecânicas, não sendo abrasivas para as ferramentas de trabalho, não irritantes a mucosa e, portanto, possuindo menor risco à saúde (CARDOSO, 2014).

Além disso, quanto à durabilidade das fibras vegetais, ainda não são claros todos os efeitos dos tratamentos propostos atualmente sobre a estrutura e composição química das fibras, como também as suas características à longo prazo, sendo necessários mais estudos nessa área. Para se prever o comportamento mecânico de um compósito é necessário conhecer as propriedades das fibras, da matriz e da interface entre elas (ALI, LI, CHOUW, 2013).

Dessa forma, este trabalho busca contribuir para a investigação dos mecanismos de deterioração da fibra de curauá inserida na matriz cimentícia por meio da sua análise microestrutural, como também verificar o comportamento mecânico dos compósitos reforçados com essa fibra. Também será investigada a eficácia do tratamento prévio das fibras com impregnação com sílica ativa, afim de prolongar a durabilidade deste compósito. Com isso é possível obter informações necessárias para o desenvolvimento de um novo material para a construção civil, contribuindo para o desenvolvimento sustentável da sociedade.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar as propriedades mecânicas, microestruturais e mineralógicas de argamassas cimentícias reforçadas com fibras de curauá tratadas por meio da impregnação com sílica ativa e submetidas ao processo de envelhecimento natural.

1.3.2. Objetivos específicos:

- Realizar a caracterização física e mecânica das fibras de curauá (*Ananas erectifolius*) *in natura*;
- Definir, por meio de processo experimental, as características da fibra de curauá (comprimento e fração volumétrica) que serão utilizadas no reforço das argamassas cimentícias;
- Determinar a eficácia do tratamento das fibras de curauá com impregnação com pasta de sílica ativa, por meio das propriedades mecânicas dos compósitos submetidos ao envelhecimento natural;
- Verificar a influência da composição química dos cimentos empregados na matriz e do tratamento prévio das fibras com sílica ativa na mineralogia das argamassas cimentícias;
- Observar indicativos de deterioração das fibras de curauá após o envelhecimento natural dos compósitos por meio de análise morfológica da interface fibra-matriz.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Fibras

A utilização de fibras para diversas atividades tem seu início nas primeiras civilizações da humanidade, suas aplicações se diversificaram e suas técnicas se aperfeiçoaram com o tempo. Hoje em dia, estas fibras são aplicadas em diversos segmentos industriais como o têxtil e a construção civil. Neste último, as fibras são utilizadas como reforço de compósitos com matrizes poliméricas, metálicas ou cerâmicas (MARQUES, 2015).

Fibras são elementos descontínuos, longos e finos, que possuem alta resistência à tração em sua direção longitudinal e podem ser classificadas como micro ou macrofibras. As microfibras apresentam diâmetro da ordem de 10 a 30 μm , comprimento entre 3 e 18 mm, tendo como principal vantagem o controle de retração e fissuração das matrizes frágeis na fase plástica. Enquanto que as macrofibras possuem diâmetro superior a 0,30 mm, comprimento entre 30 e 60 mm e são indicadas para conferir resistência residual pós-fissuração do compósito (SALVADOR, 2013).

As fibras podem ser caracterizadas de acordo com a sua origem (figura 2.1), sendo natural ou sintética. De acordo com Cunha (2012), as fibras naturais se dividem em três grupos: minerais, animais e vegetais. Fibras minerais são constituídas de grandes cadeias cristalinas, como as fibras de amianto. Fibras de origem animal, como a lã e a seda, possuem cadeias proteicas, enquanto que as fibras vegetais são lignocelulósicas, como fibras de coco, juta, sisal, etc. As fibras vegetais serão mais detalhadas posteriormente uma vez que são objetos desta pesquisa. As fibras sintéticas podem ser orgânicas que são àquelas formadas por polímeros, como as fibras de acrílico, polietileno, polipropileno, ou inorgânicas como as fibras de vidro e as metálicas.

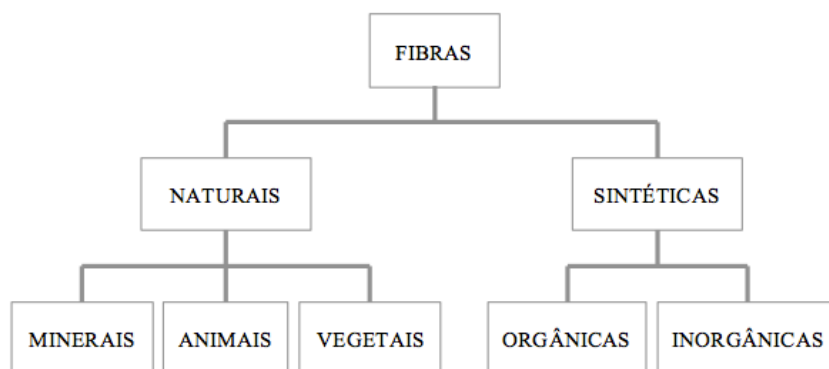


Figura 2.1: Classificação dos tipos de fibra. Fonte: AUTORA, 2019.

2.1.1. Fibras vegetais

Segundo Rodrigues (2015), a fibra vegetal, ou lignocelulósica, pode ser definida como um corpo flexível, cilíndrico, pequeno, com seção transversal reduzida e elevado fator de forma, a qual considera a relação entre o seu comprimento e diâmetro.

Em função da sua utilização, as fibras podem se dividir em primárias e secundárias. Primárias são aquelas espécies cultivadas para a extração das fibras, como a juta e a malva, enquanto que fibras secundárias são produzidas para outros fins e suas fibras consistem em um subproduto, como óleo de palma e o coco. As fibras também podem ser classificadas de acordo com seu valor do módulo de elasticidade, as de baixo módulo são mais resistentes ao impacto, propiciando aumento da tenacidade do compósito, enquanto que as fibras de alto módulo melhoram a resistência à tração (RODRIGUES, 2015).

A utilização das fibras vegetais em contrapartida às sintéticas possui diversas vantagens, como: são de baixo custo, proporcionam incentivo na economia agrícola, possuem baixa massa específica, baixa abrasividade, são biodegradáveis, originárias de fontes renováveis e de grande abundância. Entretanto, apresentam algumas desvantagens, não possuem uniformidade nas propriedades físicas, tem baixo módulo de elasticidade, baixa estabilidade dimensional e menor resistência ao fogo (CUNHA, 2012; CARDOSO, 2014; ANDIÇ-ÇAKIR *et al.*, 2014; FERREIRA *et al.*, 2015).

Em relação à sua extração, como pode ser visto na tabela 2.1, cada espécie possui uma origem anatômica diferente, ou seja, as fibras naturais são extraídas de diferentes partes da planta. Estas podem ser provenientes do caule, das folhas, das sementes ou dos frutos (ARDANUY, CLARAMUNT, TOLEDO FILHO, 2015; SANTOS, 2016a).

Tabela 2.1: Classificação das fibras conforme sua origem anatômica. Fonte: CÉLINO *et al.*, 2013.

Local	Nome comum	Nome científico
Caule / Colmo	Linho	<i>Linum usitatissimum</i>
	Cânhamo	<i>Cannabis sativa</i>
	Bagaço de cana	<i>Saccharum spp.</i>
	Juta	<i>Corchorus capsularis</i>
	Bambu	<i>Bambusa spp.</i>
	Rami	<i>Boehmeria nivea</i>
Folha	Sisal	<i>Agave sisalana</i>
	Abacá	<i>Musa textilis</i>
	Henequén	<i>Agave fourcroydes</i>
	Abacaxi	<i>Ananas comosus</i>
	Banana	<i>Musa sapientum</i>

	Curauá	<i>Ananas erectifolius</i>
	Piaçava	<i>Attalea funifera</i>
Fruto / Semente	Algodão	<i>Gossypium M.</i>
	Coco	<i>Cocus nucifera</i>
	Sumaúma/ Kapok	<i>Ceiba pentand</i>

Fatores físicos influenciam diretamente na eficiência das fibras como reforço de compósitos. O diâmetro e comprimento da fibra, e a relação entre eles, é determinante na transferência de esforços para a matriz. O fato das fibras vegetais apresentarem seção transversal irregular e aspecto fibrilado ajudam na ancoragem das fibras na matriz do compósito. O volume de vazios, diferente para cada espécie, afeta positivamente a fibra, propiciando menor massa específica, maior absorção acústica e menor condutibilidade térmica, mas também é responsável pelo alto índice de absorção de água e consequentemente retração da fibra (CUNHA, 2012).

Conforme Ardanuy, Claramunt e Toledo Filho (2015), as fibras são constituídas principalmente de celulose, lignina e hemicelulose, apresentando uma estrutura complexa, como pode ser visto na figura 2.2. Cada feixe de fibra é constituído por células individuais, que são compostas por microfibrilas conectadas entre si por lignina. As células são formadas pela parede primária, três paredes secundárias compostas por celulose, além de uma cavidade central denominada de lúmen (SANTOS, 2016a).

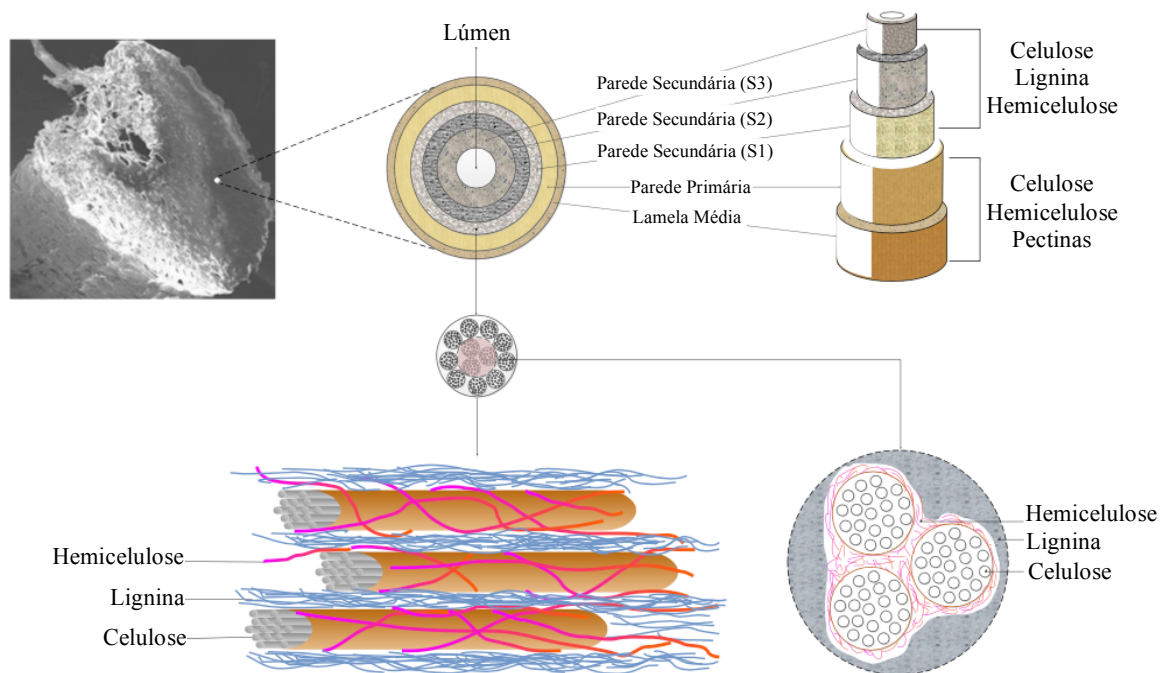


Figura 2.2: Estrutura das fibras vegetais. Fonte: Adaptado WEI, 2014.

A lamela média consiste em uma fina camada de caráter amorfo formada principalmente por lignina e pectina cuja função é unir as células entre si; a parede primária é fina e apresenta fibrilas de celulose bem afastadas formando uma malha espaçada e organizada; as microfibrilas se apresentam em um arranjo denso e helicoidal em cada parede secundária; a parede secundária (S2) possui fibrilas dispostas em um ângulo de orientação maior que formam uma rede de malha fina e muito resistente, além de ser a camada mais espessa. Devido a esses dois fatores ela é responsável pelas propriedades mecânicas das fibras. A parede secundária interna (S3) engloba o lúmen que são lacunas responsáveis pela elevada absorção de água (GUIMARÃES JUNIOR, 2011).

Como descrito por Martins (2012), a celulose é um polímero, sendo presente nos vegetais na forma cristalina e amorfa. A hemicelulose é composta por um grupo de polissacarídeos encontrada na lamela média e é encarregado de ligar as paredes celulares das fibras, enquanto que a lignina é um polímero termoplástico totalmente amorfo, característica que aumenta a sua degradabilidade. A lignina é responsável pela rigidez da fibra e proteção contra microrganismos (GEHLEN, 2014).

Mesmo as fibras apresentando a mesma estrutura celular (paredes celulares, lamela média e lúmens), estas apresentam diferenças quanto à área da sua seção transversal, espessura das paredes celulares, quantidade e área dos lúmens. Estas variáveis vão influenciar nas propriedades mecânicas das fibras (FIDELIS, 2014).

A composição química também influencia na resistência das fibras devido às proporções de lignina, celulose e hemicelulose presentes em cada espécie. Dentre elas, o teor de celulose é o principal responsável pela sua resistência, rigidez e estabilidade estrutural. Também foi observado que quanto maior o grau de cristalinidade da fibra, melhor é o alinhamento das suas cadeias poliméricas e com isso, maior é sua resistência (FIDELIS, 2014; CARDOSO, 2014). Na tabela 2.2 pode-se observar algumas propriedades mecânicas de diferentes fibras vegetais presentes na literatura.

Tabela 2.2: Propriedades mecânicas das fibras vegetais. Fonte: SANTANA, 2016.

Fibras	Resistência à tração (MPa)	Módulo elástico (GPa)
Curauá	543 ± 260	63,7 ± 32,5
Juta	249 ± 89	43,9 ± 12,3
Sisal	484 ± 135	19,5 ± 04,5
Piaçava	131 ± 11,8	3,8 ± 0,09
Coco verde	162 ± 32	3,39
Coco maduro	186 ± 55	4,16

Bambu	639 ± 175	33,00
Pita mexicana	42,0	2,6
Algodão	400	12
Cânhamo	550	70
Linho	1339	54,08

2.2. Fibra de Curauá (*Ananas erectifolius*)

2.2.1. Características físicas

O curauá, da espécie *Ananas erectifolius*, é pertencente à família das bromélias ou bromeliáceas. Possui de pequeno a médio porte e é uma monocotiledônea, cujas fibras provêm das folhas. Apresenta folhas eretas, planas e rígidas com 4 a 5 cm de largura e comprimentos de até 1,5 metros (NUNES, 2015; CARDOSO, 2014). Por ser do gênero *Ananas*, o curauá produz um fruto similar ao do abacaxi (figura 2.3), porém de menor tamanho e com polpa bastante fibrosa, o que desestimula o seu cultivo para produção do fruto (SANTANA, 2016).



Figura 2.3: Fruto do curauá. Fonte: CEAPAC, 2017.

Como pode ser observado na figura 2.4, o curauá possui duas variações de espécie, uma com folha verde-claro, o “curauá branco” e o “curauá roxo” com folhas roxa-avermelhadas. Segundo Silva (2012), o curauá branco apresenta folhas mais curtas e estreitas com fibras mais claras e fortes, enquanto que o curauá roxo tem um crescimento mais acelerado e possui maior rendimento que o curauá branco. Não foram identificadas diferenças significativas no que diz respeito às propriedades físicas, mecânicas e térmicas entre as duas variações, mesmo assim, o curauá branco é o preferido para cultivo pois produz uma maior quantidade de mudas (GEHLEN, 2014).



Figura 2.4: Cultivo do curauá branco e do curauá roxo. Fonte: SILVA, 2012.

O cultivo do curauá só foi estabelecido a partir da última década do século XX, quando a planta começou a ser domesticada para fins comerciais. Naturalmente é encontrado nas bacias hidrográficas dos rios Xingu, Tocantins, Tapajós, Marcuru, Trombetas, Paru, Acará e Guamá, e na ilha do Marajó. Além dos estados da Região Norte, o curauá também pode ser encontrado em Goiás e Mato Grosso (HAGE, 2012).

No estado do Pará iniciou-se os primeiros plantios da espécie que eram destinados à produção de fibras para a indústria automobilística. Na década de 1990, a Daimler-Chrysler financiou a instalação de novos plantios para a utilização da fibra de curauá em componentes de automóvel. Em 2002, a Pematec Triangel do Brasil SA iniciou suas atividades na produção de fibra de curauá para a produção de peças para a indústria automobilística (SANTANA, 2016).

O curauá como uma planta tipicamente amazônica, necessita de clima quente e úmido para seu desenvolvimento. Para sua produção não é necessária elevada qualidade do solo, sendo possível desenvolver seu plantio em solos arenosos e pobre de nutrientes. Entretanto, essa espécie é extremamente dependente dos índices pluviométricos da região, que necessitam estar acima de 2.000 mm/ano, além de locais com alta intensidade luminosa (CARDOSO, 2014; BILCATI, 2015).

Como Teixeira (2015) relatou, atualmente o curauá possui cultivos comerciais na região oeste do estado do Pará, com cerca de 3 mil hectares e produção de 5 mil toneladas de fibras por ano, enquanto que a produção brasileira é de cerca de 8 mil toneladas ao ano.

2.2.2. Extração e tratamento das fibras

Primeiramente ocorre a colheita manual das plantas, em seguida as folhas passam pela etapa de decorticação, que consiste em um processo mecânico de retirada das fibras do interior das folhas (figura 2.5a). Após este processo, são obtidas fibras verdes que passam pela etapa de secagem ao sol (figura 2.5b). A decorticação é realizada de forma rudimentar com máquina de facas rotativas que separam as fibras, a mucilagem e o soro, produzindo cerca de 500 kg por dia. A mucilagem e o soro são resíduos da atividade e podem ser usados como adubo orgânico, na fabricação de papel e ração animal, além disso, as mudas são consideradas outro subproduto da produção (CORDEIRO *et al.*, 2009; FIDELIS *et al.*, 2013).



Figura 2.5: Beneficiamento das fibras de curauá. (a) Decorticação, (b) Secagem das fibras. Fonte: CEAPAC e PEMATEC, 2017.

O plantio de curauá (figura 2.6) apresenta 5 a 6 anos de produtividade, o que corresponde a vida útil da planta (NUNES, 2015; SALES, 2015). As colheitas são realizadas de 3 a 4 vezes ao ano. Ao final do primeiro ano é realizada a primeira colheita cuja produção é menor que as posteriores, estando em torno de 16 toneladas de folhas por hectare, nos anos subsequentes atinge cerca de 45 toneladas de folhas por hectare (SANTANA, 2016).



Figura 2.6: Plantação de curauá. Fonte: PEMATEC, 2017.

Ao fim do primeiro ano as folhas alcançam cerca de 1,00 m de comprimento e produzem 21,11 folhas/planta e 1 muda/planta. O plantio das mudas obedece um espaçamento de 0,90 x 0,90 m o que equivale a aproximadamente 11.111 mudas por hectare, plantios mais adensados também são viáveis chegando até 25.000 mudas/ha. Esta espécie apresenta uma produtividade em torno de 7,6%, ou seja, uma tonelada de folhas pode produzir 76 kg de fibras secas (CORDEIRO *et al.*, 2009).

2.2.3. Propriedades químicas e mecânicas

Pesquisas demonstram o potencial das fibras de curauá como reforço de materiais compósitos, uma vez que são fibras de excelente qualidade e são comparáveis às fibras de vidro em relação à sua resistência, maciez e peso. A fibra de curauá mesmo possuindo espessura reduzida, possui grande resistência mecânica e capacidade para suportar tensões elevadas (SILVA, 2012; GEHLEN, 2014).

Tanto Teixeira (2015), como Santos *et al.* (2009), afirmam que quando comparada com outras fibras, o curauá se destaca devido ao seu módulo de elasticidade específico (em relação à densidade) que permite a produção de compósitos com uma diminuição de até 15% do seu peso. Esta fibra apresenta melhor resistência à tração do que as fibras de juta e sisal, e quando relacionada às fibras de vidro apresenta maior flexibilidade, rigidez e resistência ao impacto, além da sua utilização promover baixa abrasividade e menor consumo de energia no processamento (BELTRAMI, SCIENZA, ZATTERA, 2014).

A fibra de curauá, assim como todas as fibras vegetais, são compostas por hemicelulose, celulose e lignina, além de pequenas quantidades de pectina, sais orgânicos e

elementos nitrogenados. As fibras com alta porcentagem de celulose resultam em compósitos com melhores propriedades mecânicas, devido às ligações formadas entre a celulose e a matriz (PEREIRA, 2015). Em uma análise econômica da produção no Brasil, a fibra de curauá é a terceira, ficando atrás somente do sisal e da juta. Dentre as principais características das fibras está a sua resistência mecânica, leveza, suavidade ao toque e ausência de odor (BILCATI, 2015).

2.2.4. Aplicações

As fibras de curauá possuem um uso tradicionalmente popular, empregada pelos índios para trançar redes, produzir cordas, linhas de pesca, cestas e tapetes, sendo escolhidas devido a resistência e leveza da fibra. Sua utilização também é identificada na indústria automobilística onde as fibras picadas reforçam matrizes de polipropileno. Este compósito é empregado no acabamento interno de veículos da marca Volkswagen do Brasil (BILCATI, 2015; TEIXEIRA, 2015).

Também na indústria automobilística, os compósitos plásticos com fibra de curauá são utilizados para produzir peças pelo processo de moldagem por injeção, como botões do painel de carros, maçanetas e dobradiças de quebra-sol. A parte interna das portas e a tampa do porta malas (figura 2.7), também são produzidos com essa fibra vegetal. Além do setor automobilístico, estas fibras têm aplicação na produção de caixas-d'água, piscinas, tecidos antialérgicos, entre outros (SILVA, 2012).



Figura 2.7: Tampa de porta malas produzido com compósitos de curauá. Fonte: PEMATEC, 2017.

São abundantes as pesquisas da fibra de curauá inseridas em diversos tipos de matriz polimérica (SPINACÉ *et al.*, 2011; ALMEIDA JÚNIOR *et al.*, 2012; ORNAGHI JÚNIOR *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2016; SCALIONI, GUTIÉRREZ, FELISBERTI, 2016). Em

menor quantidade também são encontradas pesquisas dessa fibra inserida em matrizes cimentícias para a produção de: painéis (BILCAT, 2015), telhas de fibrocimento (SALES, 2015), dentre outros trabalhos visando a determinação das propriedades destes compósitos (LIMA *et al.*, 2011; PIMENTEL *et al.*, 2016; SANTOS, 2016). Mais recentemente também se encontram estudos sobre a sua aplicação como reforço de vigas de madeira laminada colada (DONADON *et al.* 2017).

2.3. Compósitos de matriz cimentícia

Compósito é um material constituído de dois ou mais elementos, insolúveis entre si e que combinados formam um material de engenharia útil, que possui propriedades não encontradas nos constituintes isoladamente. Duas fases compõem um compósito, uma fase denominada “dispersa”, que é descontínua, mais forte e resistente e a outra denominada “matriz”, que é menos resistente e contínua. Na região de contato entre as duas fases encontra-se a interface ou zona de transição que exerce papel fundamental no compósito pois é responsável por transferir os esforços da matriz para o reforço (CORRADINI, 2014).

De acordo com Tessaro *et al.* (2015), o uso de fibras vegetais como reforço de matrizes tem origem na civilização antiga, que empregava palha e capim na produção de tijolos de barro cru, conhecidos como adobes. Figueiredo (2011), relatou que há registros dessa prática nas Sagradas Escrituras: “Naquele mesmo dia o Faraó deu esta ordem aos inspetores do povo e aos capatazes: não continueis a fornecer palha ao povo, como antes, para o fabrico dos tijolos” (Êxodo 5, 6-7). Ao longo do século XX o uso das fibras vegetais nos compósitos foi pouco aplicado, especialmente devido ao surgimento de fibras metálicas e sintéticas nas décadas de 70 e 80.

Embora os materiais compósitos sejam conhecidos desde a antiguidade, compósitos cimentícios reforçados com fibra representam uma pequena porcentagem do concreto produzido no mundo, a argamassa armada e o fibrocimento ainda empregam na sua produção fibras de aço e amianto, respectivamente. Apenas nos últimos 25 anos começou a ser entendidas as características das fibras como reforço de materiais frágeis, como a pasta de cimento, argamassa e concreto (ARRUDA FILHO *et al.*, 2012).

Os materiais compósitos são de grande importância para a engenharia pois possibilitam o desenvolvimento de um material com características superiores às convencionais (TESSARO *et al.*, 2015). Devido as restrições quanto ao uso do amianto foi

estimulado o desenvolvimento de pesquisas com materiais capazes de substituí-lo. Com isso, surgiram estudos de compósitos com a incorporação de fibras metálicas, vegetais e sintéticas (ARDANUY *et al.*, 2011; KHORAMI, GANJIAN, 2011).

Entretanto, hoje em dia, são muito os problemas causados pelo consumo de energia para a produção das fibras metálicas e danos ao meio ambiente na fabricação de fibras sintéticas, com isso, ouve o incremento nas pesquisas para se utilizar fibras vegetais como reforços de matrizes cimentícias (TESSARO *et al.*, 2015).

2.3.1. Cimento Portland

Silva, Marques e Fornari Júnior (2012), descrevem que as matrizes cimentícias são compostas de aglomerantes naturais, minerais e podem conter agregados, que originam pastas, argamassas ou concretos. Podem existir materiais com matrizes à base de cal e gesso, mas as mais utilizadas são as que empregam o cimento Portland.

O cimento é um material seco, finamente pulverizado, que por si só não é aglomerante, mas desenvolve essas propriedades como resultado da sua hidratação. Na produção do cimento Portland, suas matérias-primas principais, calcário e argila, são moídas e aquecidas até uma temperatura de cerca de 1450 °C em forno rotativo, onde o material é sintetizado e funde parcialmente formando o clínquer (COSTA, 2014).

O cimento Portland apresenta quatro fases principais: a Alita (C_3S - Silicato Tricálcico), que compõem cerca de 50 a 70% do cimento Portland, cuja hidratação se inicia em poucas horas e é a maior responsável pela resistência mecânica das primeiras idades. A Belita (C_2S - Silicato Dicálcico), que representa 15 a 30% do cimento Portland. Sua hidratação é lenta, com baixo desprendimento de calor e é responsável pela resistência mecânica nas idades mais avançadas (COSTA, 2014; CORRADINI, 2014).

A terceira fase consiste no Aluminato Tricálcico (C_3A), que configura 5 a 10% da composição do cimento Portland. Sua hidratação é extremamente rápida, com elevado desprendimento de calor e aumenta a resistência mecânica no primeiro dia, mas não promove aumento nas idades posteriores, além disso, é responsável pela rapidez da pega do cimento. Por fim, o Ferroaluminato Tetracálcico (C_4AF), que está presente entre 0,5 a 0,6% na composição do cimento (CORRADINI, 2014).

Também são encontrados compostos secundários como MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O e Na_2O , que constituem um pequeno percentual da massa do cimento. Dentre eles, os de maior relevância são os óxidos de sódio e de potássio (Na_2O e K_2O , respectivamente), conhecidos como álcalis. Estes podem reagir com alguns agregados, produzindo uma

reação que leva a degradação do concreto, além de afetar a velocidade e o ganho de resistência do cimento (NEVILLE, 2016).

De acordo com Costa (2014), a hidratação do C_2S e do C_3S produz como resultado desta reação silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que é o produto mais importante para as propriedades mecânicas do cimento, e o hidróxido de cálcio (CH) que pouco contribui para a resistência mecânica. A hidratação do C_3A e do C_4AF produz a etringita, que geralmente é a primeira a se cristalizar e contribui para o endurecimento, a pega e a resistência inicial do cimento.

No Brasil o cimento Portland normatizado é produzido em diversos tipos como esta apresentado na tabela 2.3, nos quais variam a proporção dos seus materiais constituintes e alguns apresentam adições incorporadas durante a moagem do clínquer.

Tabela 2.3: Tipos e composição dos cimentos Portland. Fonte: NBR 16697, 2018.

Tipo	Nome	Clínquer + Sulfato de Cálcio (%)	Escória de alto-forno (%)	Material Pozolânico (%)	Material Carbonático (%)
Comum	CP I	95-100	0 – 5	0 – 5	0 – 5
	CP I - S	90 – 94	0	0	6 – 10
	CP II – E	51 – 94	6 – 34	-	0 – 15
Composto	CP II – Z	71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
	CP II – F	75 – 89	0	0	11 – 25
Alto-forno	CP III	21 – 65	35 – 70	0	0 – 10
Pozolânico	CP IV	45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Alta resistência inicial	CP V - ARI	90 – 100	0	0	0 – 10

Cada tipo de cimento apresenta diferenças no teor de compostos o que influencia nas suas propriedades como na velocidade e ganho de resistência. Foi observado por Neville (2016), que a resistência do cimento após 28 dias é fortemente afetada pela quantidade de álcalis, quanto maior esta quantidade, menor será o ganho de resistência após essa idade. Também, se for constatado a total ausência de álcalis, a resistência inicial será extremamente baixa. Outro fator condicionado a presença dos álcalis é a alcalinidade do cimento Portland, a pasta fresca de cimento apresenta pH elevado, acima de 12, com o aumento no teor de álcalis o pH se torna ainda maior.

Geralmente, cimentos com menor velocidade de endurecimento obtêm uma resistência final um pouco maior que os demais. O cimento tipo CP-IV apresenta um ganho de resistência lento, apresentando menor resistência aos 28 dias, mas esta é substancialmente aumentada até a idade de 5 anos. Já o cimento tipo CP-II apresenta um equilíbrio entre as suas propriedades (NEVILLE, 2016).

2.3.2. Comportamento mecânico dos compósitos

A principal função das fibras inseridas em compósitos cimentícios é desacelerar a propagação das fissuras na matriz sob carregamento (figura 2.8), retardando a fratura total do material, com isso, obtém-se um aumento na tenacidade, na resistência à tração e ao impacto do compósito. Influencia nas propriedades finais do compósito reforçado com fibras o tipo de matriz, as propriedades físicas e a geometria das fibras, além da interação entre a fibra e a matriz (ARRUDA FILHO *et al.*, 2012; WEI, MEYER, 2014a).

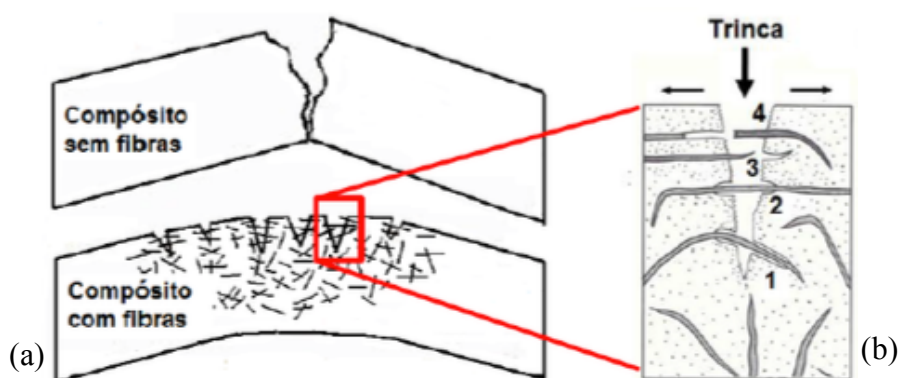


Figura 2.8: Comportamento de um compósito submetido à flexão. (a) Com e sem adição de fibras, (b) Desenvolvimento da fissura: 1- Deslocamento, 2- Interceptação, 3-Arrancamento, 4- Fratura da fibra. Fonte: FARRAPO, 2015.

O comprimento da fibra exerce grande influência no comportamento dos compósitos, Silva *et al.* (2014) afirmam que o comprimento “crítico” das fibras afeta os mecanismos de transferência de tensões no compósito, quando as fibras são menores que o comprimento crítico, a ancoragem não é suficiente para gerar tensões de escoamento e consequentemente estas são arrancadas da matriz (efeito *pull-out*). Entretanto, caso o comprimento da fibra seja muito superior ao crítico, a resistência do compósito diminui devido ao emaranhamento e aglomeração das fibras que resultam em falhas na matriz.

Além do comprimento, a fração volumétrica de fibras também interfere nas propriedades dos compósitos. Para proporcionar a capacidade de transporte de tensões e o

comportamento dúctil é necessária uma dosagem de fibras elevada. O alto teor de fibras, por sua vez, resulta na redução da trabalhabilidade da mistura, o que deve ser levado em consideração, podendo ser resolvido pela incorporação de aditivos superplastificantes ou modificando a dosagem da matriz (TOSUN-FELEKOGLU, FELEKOGLU, 2013).

Conforme Callister e Rethwisch (2016), as fibras inseridas nos compósitos podem ser longas e alinhadas ou fibras curtas descontínuas, que por sua vez, podem estar alinhadas ou dispersas aleatoriamente na matriz. A tenacidade de um compósito é efetivamente melhorada com a utilização de fibras curtas uniformemente distribuídas e aleatoriamente orientadas que são capazes de controlar a iniciação e o crescimento das microfissuras na matriz (WEI, MEYER, 2014a).

Ao contrário do comportamento sob tração e flexão, os compósitos cimentícios reforçados com fibras apresentam uma redução na resistência à compressão. Isso ocorre, pois, as fibras vegetais diferentemente dos agregados miúdos presentes nas argamassas, são macias e a resistência à compressão do material é influenciada diretamente pela resistência e rigidez dos seus componentes (SELLAMI, MERZOUD, AMZIANE, 2013).

2.4. Durabilidade dos compósitos com fibras vegetais

Apesar de possuir um grande potencial, a utilização de fibras vegetais como reforço de matrizes frágeis de cimento Portland apresenta uma limitação no que diz respeito à reduzida vida útil desses compósitos. A durabilidade de um material pode ser definida como a capacidade de preservar as suas principais características, sob determinadas condições de exposição e a longo prazo (CORRADINI, 2014; QUININO, 2015).

Compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais apresentam baixa durabilidade devido à diversos mecanismos de degradação que ocorrem nas fibras inseridas nas matrizes de cimento, devido a sua alcalinidade e composição rica em minerais. Dentre estes mecanismos os de maior impacto são o ataque alcalino da matriz e a mineralização das fibras (WEI, MEYER, 2015).

No ataque alcalino, como apontado por Silva *et al.* (2015), os produtos gerados na fase de hidratação do cimento, como o hidróxido de cálcio e silicatos/aluminatos de cálcio hidratados, formam um ambiente alcalino na matriz (pH em torno de 12) que pode afetar os constituintes das fibras vegetais resultando na sua degradação.

Essa degradação ocorre pela destruição das cadeias de macromoléculas durante a hidrólise alcalina da celulose e a dissolução da lignina e da hemicelulose, que acarreta na

diminuição do grau de polimerização e consequentemente na redução da sua resistência. Esse mecanismo de degradação ocorre pela movimentação fácil da água dos poros pela superfície das fibras (WEI, 2014; SANTOS *et al.* 2015).

No processo de mineralização ocorre a migração dos produtos da hidratação do cimento, como o hidróxido de cálcio, também chamado de Portlandita, para a cavidade central, parede e vazios das fibras, que cristalizam. Este processo leva a uma ruptura da fibra sem alongamento reduzindo as propriedades mecânicas dos compósitos cimentícios, além de afetar a interação entre a fibra e a matriz (MELO FILHO, SILVA, TOLEDO FILHO, 2013; SILVA *et al.*, 2015).

A exposição ao clima também provoca severa degradação nos compósitos devido aos danos interfaciais provocados pelas contínuas mudanças de volume das fibras que são porosas e hidrofílicas. Este processo causa a redução da interface fibra-matriz fazendo com que sua aderência seja reduzida perdendo assim a capacidade de transferir tensões (FIDELIS, 2014; SANTOS, 2015).

Melo Filho, Silva e Toledo Filho (2013), afirmam que os compósitos sofrem o processo de envelhecimento quando submetidos a ambientes úmidos, acarretando na redução da sua resistência e tenacidade. A produção de compósitos cimentícios de baixo custo utilizando fibras vegetais é possível, mas para isso, é preciso solucionar os problemas relacionados com a compatibilidade do cimento Portland e a baixa durabilidade da fibra incorporada na matriz cimentícia (MARQUES *et al.*, 2016).

A durabilidade de argamassas reforçadas com fibras vegetais pode ser determinada principalmente pelas propriedades mecânicas do material. Isso pode ser justificado uma vez que a resistência dos compósitos é influenciada por diversos fatores, dentre eles a resistência da matriz, a resistência da fibra isoladamente e a ligação interfacial da fibra com a matriz (WEI, 2014).

Wei, Ma e Thomas (2016), verificaram mecanismos para identificar a degradação dos compósitos reforçados com fibras naturais. A durabilidade pode ser avaliada por meio das propriedades de flexão em vigas após o envelhecimento do compósito, onde-se é possível obter a resistência e a tenacidade do material pós fissuração. A tenacidade consiste na quantidade de energia absorvida após a fissura inicial, que é calculada como a área sob a curva carga-deslocamento. Está diretamente relacionada a eficiência da fibra na matriz, uma vez que as fibras são responsáveis por evitar uma fissura em grande escala no material substituindo-a por múltiplas fissuras menores que consequentemente consomem mais energia.

Ainda segundo os autores, pode-se verificar a durabilidade dos compósitos por meio das propriedades das fibras. A resistência à tração uniaxial das fibras incorporadas medida no ensaio de pull-out é sensível ao processo de envelhecimento do material. As variações nestas propriedades interferem na ligação fibra-matriz reduzindo a eficiência da fibra inserida no compósito e são um indicativo de degradação deste material.

Análises térmicas nas fibras podem revelar outro indicativo da sua degradação, a redução de resistência das fibras após o envelhecimento do compósito pode ser justificada pela degradação da celulose e hemicelulose que podem ser quantificadas por meio das análises termogravimétricas e termogravimétricas derivadas (TGA e DTG, respectivamente). A quantidade de celulose presente na fibra é diretamente proporcional à resistência à tração da mesma.

Outra forma de se analisar o grau de degradação das fibras presentes nos compósitos cimentícios é por meio de análises de difratometria de raios-x (DRX), esta é utilizada para estudar os materiais a nível atômico, identificando sua estrutura cristalina. Um feixe de raios-x é incidido sobre a amostra e interagem com os átomos dos cristais que compõem o material, ocorrendo o fenômeno da difração (SANTOS, 2016b). Com o DRX é possível identificar o índice de cristalinidade da fibra, e a sua variação após o envelhecimento do compósito, que esta diretamente relacionado com sua resistência mecânica.

Entretanto, Savastano Júnior (2000), descreve a dificuldade de se avaliar a degradação diretamente por meio da fibra, uma vez que o processo de extração da fibra do compósito pode comprometer suas propriedades mecânicas, além de que, a fibra extraída apresenta sua superfície coberta por produtos da hidratação do cimento, sendo necessária uma técnica para a dissolução destes produtos que não altere a composição química do material. Ele afirma que um meio viável para avaliar esta degradação é por meio da análise em microscópio eletrônico de varredura.

A utilização da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) nos permite realizar uma análise visual dos indicativos de degradação das fibras. O microscópio funciona por meio da incidência de feixes de elétrons que varrem a superfície da amostra estudada, os feixes de elétrons refletivos, são captados por um detector e exibidos, na mesma taxa de varredura, sobre um tubo de raios catódicos que os traduz na forma de imagem ampliada, tridimensional e de alta resolução (CALLISTER, RETHWISCH, 2016). A análise da microestrutura das fibras permite identificar a morfologia das fibras *in natura*, avaliar a interação física da fibra e da matriz e visualizar modificações morfológicas nas fibras após sua inserção em matrizes cimentícias que indiquem sua degradação.

2.5. Tratamentos físicos e químicos

De forma a prolongar a durabilidade destes compósitos, diversas técnicas têm sido estudadas, como: a impregnação das fibras com substâncias bloqueadoras e repelentes de água, a selagem da matriz para reduzir o tamanho e a quantidade dos poros, a modificação da matriz com o uso de cimento com alto teor de alumina, além da adição de materiais pozolânicos como a sílica ativa, cinza volante e a escória. Além disso, tratamentos químicos nas fibras também têm sido investigados, buscando a impermeabilização da fibra e a redução da sua absorção de água (TESSARO *et al.*, 2015).

Segundo Wei e Meyer (2014b), a efetividade dos tratamentos aplicados nas matrizes e nas fibras podem ser avaliados por meio da investigação das propriedades mecânicas dos compósitos, além da análise das mudanças de composição química das fibras, seus índices de cristalinidade e sua microestrutura após o envelhecimento.

2.5.1. Tratamentos nas matrizes

Como relatado por Melo Filho, Silva e Toledo Filho (2013), o tratamento mais promissor para reduzir a degradação das fibras consiste na substituição parcial do cimento Portland por material pozolânico de forma a reduzir a quantidade de hidróxido de cálcio na matriz, que é o principal elemento que acarreta a alta alcalinidade do cimento. Diversos autores avaliaram a eficiência deste método, utilizando substituições com o metacaulim, a sílica ativa e outros materiais pozolânicos (KHORAMI, GANJIAN, 2013; SANTOS *et al.*, 2014; FIDELIS *et al.*, 2016).

Além disso, outros tratamentos buscaram reduzir a porosidade da matriz, evitando assim a percolação da água dos poros para as fibras. Ferreira *et al.* (2015), descrevem que a substituição parcial do cimento por microsílica resulta no aumento da aderência das fibras na matriz, isso é relacionado com a elevada finura da microsílica que reduz a porosidade da matriz aumentando a sua interface com a fibra.

2.5.2. Tratamentos nas fibras

Os tratamentos nas fibras destinados a melhorar a sua durabilidade podem ser divididos em físicos e químicos. Os tratamentos físicos, visam melhorar as propriedades da fibra como resistência, módulo de elasticidade, alongamento e reduzir sua absorção de água, evitando assim a retração e o descolamento da fibra na compósito. Enquanto que os tratamentos químicos buscam aumentar a interação da fibra com a matriz e proteger a fibra

dos mecanismos de degradação provenientes da composição química do cimento (WEI, 2014).

De acordo com Marques (2015), entre os tratamentos físicos está a hornificação, que submete as fibras a ciclos de molhagem e secagem durante um mesmo período de tempo. Após esse procedimento, as paredes celulares entram em colapso, modificando a sua estrutura com a redução do diâmetro dos lúmens. Este tratamento busca minimizar a capacidade da fibra absorver água, reduzindo a sua variação dimensional (FIDELIS, 2014).

Dentre os tratamentos químicos está o tratamento alcalino, que consiste em mergulhar as fibras em diferentes soluções alcalinas visando remover parcialmente a lignina, hemicelulose e outros resíduos da superfície da fibra. Este método provoca a separação das fibras aumentando a sua área superficial efetiva. O tratamento é eficaz em remover impurezas artificiais das fibras resultando em uma superfície áspera que aumenta a adesão entre as fibras e a matriz (WEI, 2014).

Também são encontrados na literatura tratamentos que aplicam um recobrimento na fibra vegetal com diversos materiais, como resinas e polímeros que formam um filme e protegem a fibra impedindo o seu contato direto com os produtos da hidratação do cimento (FIDELIS, 2014; CORRADINI, 2014; FERREIRA *et al.*, 2015).

O tratamento com a impregnação das fibras em pasta de sílica ativa antes da incorporação na matriz cimentícia, como descrito por Tolêdo Filho *et al.* (2003), obteve resultados favoráveis evitando a redução da resistência e fragilização das fibras no compósito após o envelhecimento. Este método consegue solucionar os dois mecanismos de degradação uma vez que com a impregnação os espaços entre os filamentos da fibra são preenchidos com partículas de microsílica, criando um ambiente de pH baixo ao seu redor e reduzindo as concentrações de hidróxido de cálcio na matriz.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental desta dissertação pode ser observado na figura 3.1. Este divide-se em: etapas de caracterização dos materiais que serão utilizados, produção das argamassas e ensaios mecânicos, microestruturais e mineralógicos dos compósitos.

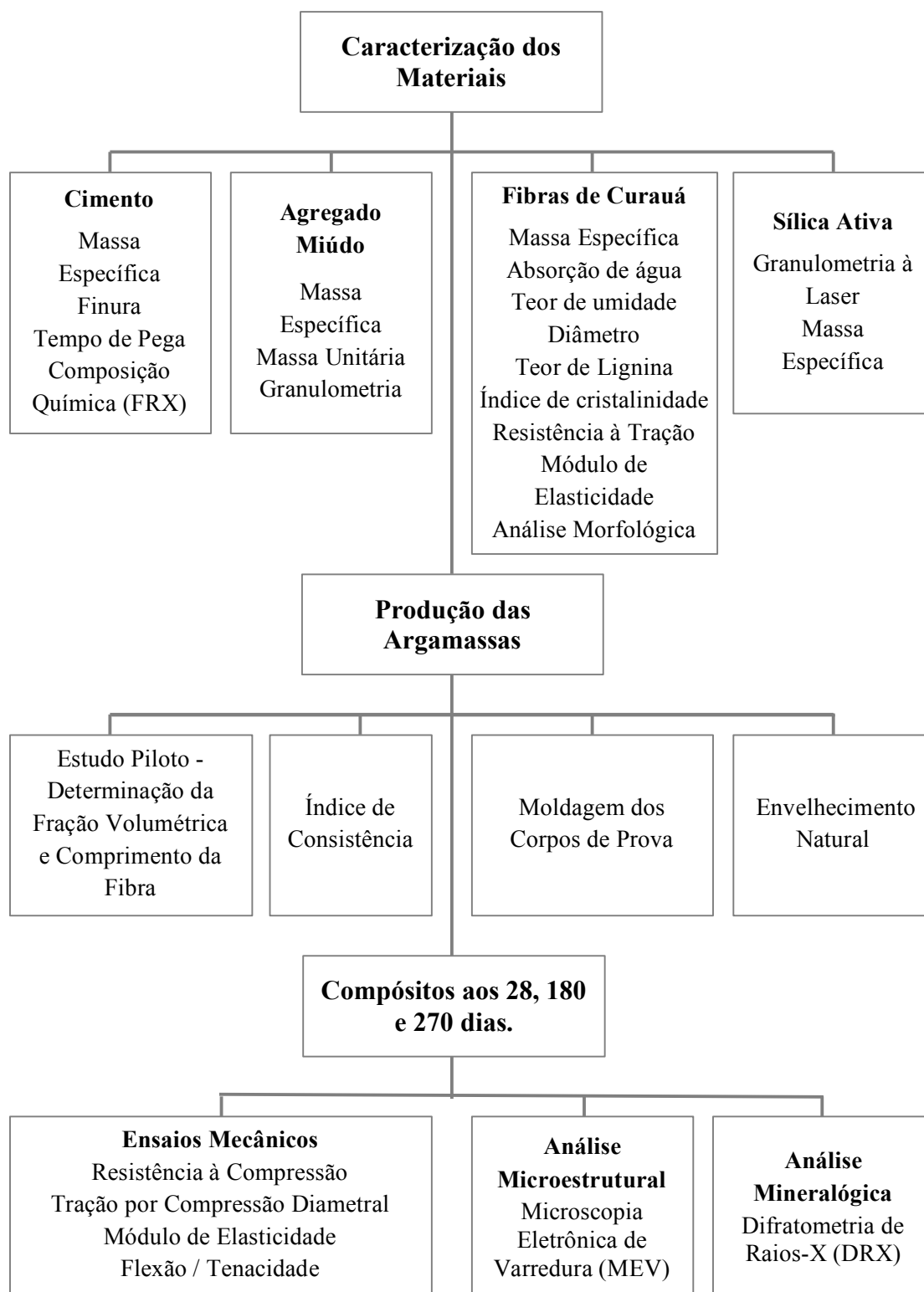


Figura 3.1: Programa experimental da dissertação. Fonte: AUTORA, 2019.

Para avaliar as propriedades e a durabilidade dos compósitos determinou-se algumas variáveis de estudo de acordo com os objetivos estabelecidos neste trabalho. As variáveis relacionadas à composição química da argamassa consistem na utilização de matrizes com dois tipos de cimento (CP-IV 32 RS e CP-II E 32 RS) e as variáveis relacionadas às fibras, compreendendo a presença do reforço com fibras de curauá e a utilização do tratamento prévio com impregnação com sílica ativa.

Com isso, tem-se como variáveis de resposta que compõem o presente estudo, a resistência à compressão e tração por compressão diametral dos compósitos, o módulo de elasticidade, a flexão, a tenacidade, a análise visual de alterações morfológicas da amostra após envelhecimento natural por meio da microscopia eletrônica de varredura e a análise qualitativa do teor de portlandita por difratometria de raios-X.

3.1. Materiais utilizados

Abaixo estão discriminados os materiais utilizados para a produção dos compósitos cimentícios, suas especificações foram fornecidas pelos respectivos fabricantes, entretanto, demais ensaios tecnológicos foram realizados para complementar a caracterização dos materiais.

3.1.1. Cimento

Foram utilizados dois tipos de cimento para o desenvolvimento desta pesquisa. Empregou-se o cimento do tipo CP-IV 32 RS da marca Nassau, produzido no Pará, que consiste em um cimento Portland com adição pozolânica cujos teores variam entre 15% a 50% em massa do cimento, conforme determinado pelo fabricante. Optou-se por utilizar também o cimento do tipo CP-II E 32 RS da marca Bravo, cuja fábrica situa-se no estado do Maranhão. Este é um cimento composto que apresenta em sua composição 6% a 34% de escória granulada de alto-forno. Ambos os tipos de cimentos são comercializados na região metropolitana de Belém.

As características dos cimentos tipo CP-IV e CP-II E podem ser observadas na tabela 3.1. As propriedades como finura, tempos de início e fim da pega dos cimentos empregados estão de acordo com os requisitos estabelecidos na norma ABNT NBR 16697:2018 (Cimento Portland – Requisitos).

Tabela 3.1: Características dos cimentos utilizados. Fonte: AUTORA, 2019.

Propriedade	CP-IV	CP-II E	Norma
Massa Específica	3,00 g/cm ³	2,95 g/cm ³	NBR 16605:2017
Finura	7,4 %	4,8 %	NBR 11579:2012
Início da Pega	70 min	60 min	NBR 16607:2017
Fim da Pega	260 min	240 min	

As composições químicas dos cimentos utilizados podem ser vistas na (tabela 3.2). Empregou-se a técnica de fluorescência de raios-x (FRX) para a determinação das composições químicas, sendo realizado no Laboratório de Caracterização Tecnológica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Os teores apresentados foram determinados em amostra fundida com tetraborato de lítio anidro, na calibração CIM-1 (cimentos), relativa a análise quantitativa por comparação com materiais de referência certificados, em espectrômetro de fluorescência de raios X, marca PANalytical, modelo Zetium. A perda ao fogo (PF) foi efetuada a 1.020°C por 2 h.

Tabela 3.2: Análise Química dos cimentos utilizados. Fonte: AUTORA, 2019.

Amostra	CP- IV	CP- II E
CaO (%)	50,40	56,40
MgO (%)	2,79	2,65
SiO₂ (%)	25,30	19,30
Al₂O₃ (%)	10,90	7,07
Fe₂O₃ (%)	3,16	2,81
Na₂O (%)	<0,10	0,22
K₂O (%)	0,15	0,65
P₂O₅ (%)	0,27	<0,10
TiO₂ (%)	0,66	0,33
SrO (%)	<0,10	<0,10
MnO (%)	<0,10	0,51
SO₃ (%)	2,10	2,97
PF (%)	3,56	2,63

Para analisar a influência da composição química do cimento nas propriedades dos compósitos com fibras de curauá, decidiu-se empregar matrizes com dois tipos de cimento. Em uma matriz utilizou-se o cimento CP-II E por possuir um maior teor de álcalis em sua composição (concentrações de Na₂O e K₂O), o que poderia resultar em uma matriz mais agressiva e propensa a degradação das fibras. Paralelamente, outra mistura foi realizada empregando o cimento tipo CP-IV por possuir elevada porcentagem de material pozolânico, o que poderia proporcionar um meio de menor alcalinidade e menos suscetível ao ataque das fibras.

3.1.2. Agregado miúdo

A areia natural quartzosa foi utilizada como agregado miúdo sendo esta adquirida em estâncias no entorno da Universidade Federal do Pará, sendo proveniente de leitos de rio nas proximidades da cidade de Belém. Os sacos foram estocados em local protegido e antes da produção das argamassas, a areia foi mantida em ambiente fechado e depois seca em estufa até remover a umidade absorvida.

Sua caracterização (tabela 3.3) foi realizada com a obtenção de sua massa específica por meio da norma ABNT NBR NM 52:2009 (Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente), massa unitária conforme a norma ABNT NBR NM 45:2006 (Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios), além de sua composição granulométrica por meio do ensaio descrito na norma ABNT NBR NM 248:2003 (Agregados - Determinação da composição granulométrica).

Tabela 3.3: Caracterização do agregado miúdo. Fonte: AUTORA, 2019.

Propriedade	Resultado	Norma
Massa Específica (g/cm ³)	2,63	NBR NM 52:2009
Massa Unitária (g/cm ³)	1,54	NBR NM 45:2006
Diâmetro máximo (mm)	1,2	NBR NM 248:2003
Módulo de finura	2,05	NBR NM 248:2003
Zona	Utilizável	NBR 7211:2009

Como pode ser observado na curva granulométrica do agregado miúdo (figura 3.2), o mesmo está situado na zona utilizável inferior, conforme os parâmetros estabelecidos na

norma ABNT NBR 7211:2009 (Agregados para concreto – Especificação), sendo este considerado apto para a utilização na produção dos compósitos. A distribuição granulométrica do agregado miúdo afeta diretamente a relação água/cimento da argamassa. O agregado miúdo utilizado apresenta uma configuração uniforme o que pode alterar a trabalhabilidade da argamassa demandando um maior consumo de água na mistura (COSTA, 2014).

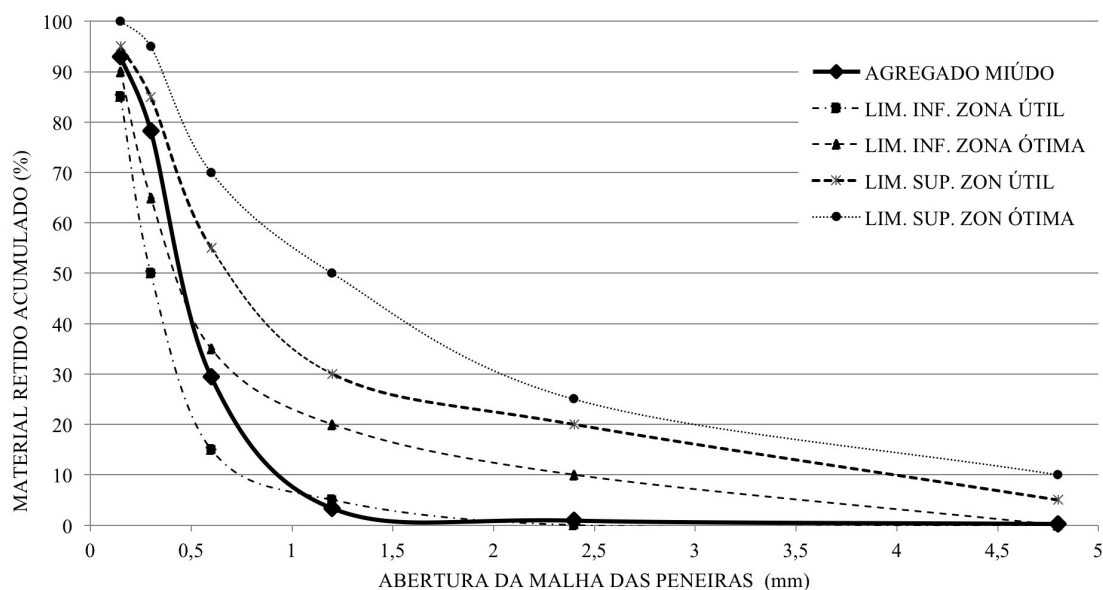


Figura 3.2: Curva Granulométrica do Agregado Miúdo. Fonte: AUTORA, 2019.

3.1.3. Aditivo Superplastificante

Nos compósitos com adição das fibras de curauá foi utilizado o aditivo superplastificante tipo II (SP-II N) número 4685 da marca Plastol. Este apresenta coloração levemente amarelada e aspecto líquido sendo composto por uma solução de policarboxilatos em meio aquoso, não contendo cloretos. A eficácia é mediante sua ação redutora da água de amassamento (a/c), melhorando a trabalhabilidade da mistura. Conforme o fabricante, apresenta massa específica de $1,1 \text{ g/cm}^3$ e deve ser adicionado à argamassa em uma dosagem de 0,3% a 0,9% sobre a massa do cimento (VIAPOL, 2013).

3.1.4. Sílica ativa

As fibras de curauá foram tratadas por meio da impregnação com uma pasta feita de sílica ativa. Para isso empregou-se a sílica ativa Silmix[®] da marca Dow Corning, fabricada no estado do Pará, sua composição química pode ser observada na tabela 3.4.

Tabela 3.4: Composição química da sílica ativa. Fonte: DOW CORNING, 2010.

Substância	CAS ⁽¹⁾	Composição química (%)
Sílica Amorfa (SiO ₂)	69012-64-2	≥ 85,0
Sílica Cristalina (SiO ₂)	14808-60-7	≤ 0,5
Óxido de sódio (Na ₂ O)	1313-59-3	≤ 1,5
Carbono total (C)	1333-86-4	≤ 6,0
Umidade (H ₂ O)	-	≤ 3,0

(1) CAS: Chemical Abstract Service Registry Number.

A sílica ativa apresenta massa específica de 2,22 g/cm³ que foi determinada utilizando o mesmo método ensaiado para o cimento, conforme a norma ABNT NBR 16605:2017. Na figura 3.3 pode ser verificada a distribuição granulométrica da sílica ativa, que foi obtida utilizando um analisador de partículas à laser, situado no Laboratório de Mineralogia, Geoquímica e Aplicações, do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará.

Foi colocada 1 g da amostra em suspensão em 7 ml de água destilada, em seguida, o líquido com a amostra foi pipetado em uma unidade de dispersão que também utiliza água como líquido de suspensão. A leitura da amostra foi realizada no analisador de partículas à laser da marca Fritsch GmbH, modelo “Analysette 22” Micro Tec Plus. O intervalo de medida avaliado foi de 0,08 a 2.000 µm.

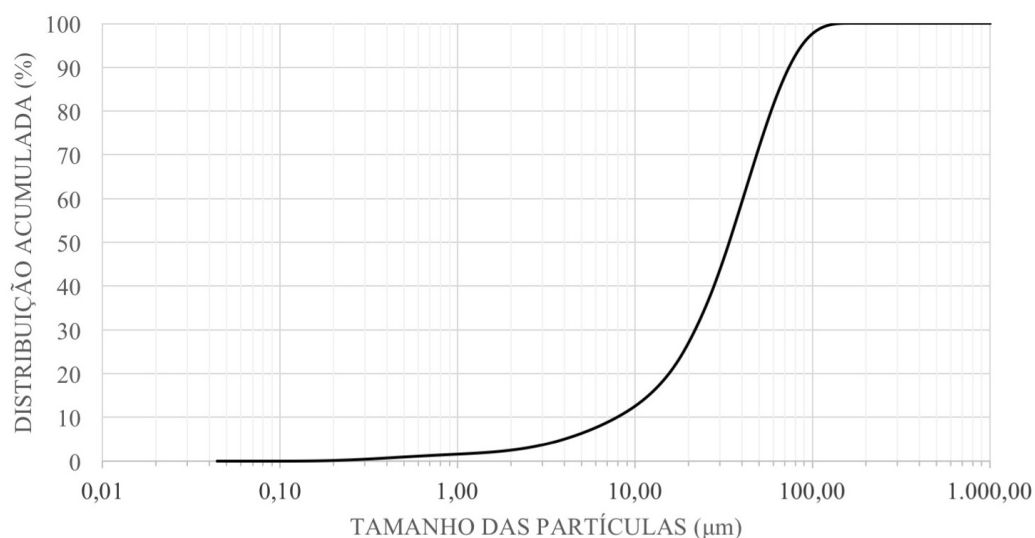


Figura 3.3: Curva granulométrica da sílica ativa. Fonte: AUTORA, 2019.

A sílica ativa utilizada possui diâmetro médio (d50) de 32,72 μm , o que contribui para que as partículas de sílica possam entrar e preencher os pequenos vazios presentes nas fibras de Curauá. A sílica ativa, assim como outros materiais pozolânicos, são constituídos essencialmente de SiO_2 e na presença de água e hidróxido de cálcio reagem formando compostos com propriedades aglomerantes.

3.1.5. Fibras de Curauá

Para a produção dos compósitos reforçados com fibras, foi escolhida a fibra de curauá (*Ananas erectifolius*) na variação branca devido às suas elevadas propriedades mecânicas. As fibras foram doadas à Universidade Federal do Pará pela empresa PEMATEC, localizada em Santarém, no Pará. Estas já foram recebidas beneficiadas (figura 3.4), após os processos de decorticação e secagem das fibras, para a aplicação nos compósitos as fibras foram cortadas manualmente com tesoura em comprimento pré-definido.



Figura 3.4: Fibra longa de curauá. Fonte: AUTORA, 2019.

3.2. Métodos

3.2.1. Caracterização da Fibra de Curauá

As fibras de curauá antes de serem utilizadas na produção dos compósitos tiveram suas propriedades físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas determinadas possibilitando verificar o potencial desta fibra vegetal como reforço de matrizes cimentícias.

3.2.1.1. Massa específica

Para a obtenção da massa específica das fibras de curauá, utilizou-se o frasco de Chapman (figura 3.5) conforme realizado por Pimentel *et al.*, (2016). As fibras foram cortadas com comprimentos médios de 25 mm para possibilitar a inserção das mesmas no frasco e foram secas em estufa até apresentarem massa constante (quando duas pesagens sucessivas e com intervalo de 2 h não apresentam variação na massa da amostra) previamente ao ensaio.



Figura 3.5: Determinação da massa específica das fibras de Curauá. Fonte: AUTORA, 2019.

O frasco foi preenchido de água até a marca de 200 cm³ seguido pela colocação de 50 g de fibras, o conjunto foi reservado por um período de 24 horas, este procedimento possibilitou que os vazios presentes na amostra pudessem ser ocupados antes que fosse realizada a leitura do nível do frasco. Após transcorrido este período foi realizada a aferição do nível d'água, com isso, a massa específica da fibra pode ser calculada, conforme a equação 3.1.

$$\mu = \frac{m_f}{L - 200} \quad \text{Equação 3.1}$$

Onde:

μ = massa específica da fibra, em gramas por centímetro cúbico;

m_f = massa da amostra de fibras secas, em gramas;

L = leitura do frasco com as fibras, em centímetro cúbico.

3.2.1.2. Absorção de água

Para medir a capacidade de absorção de água das fibras de curauá, foi empregado o método utilizado por Sales (2015). As amostras foram secas em estufa até constância de massa para em seguida serem imersas em água (figura 3.6). Em determinados períodos, foi retirado o excesso de água das fibras com um papel absorvente e foi determinada a sua massa.

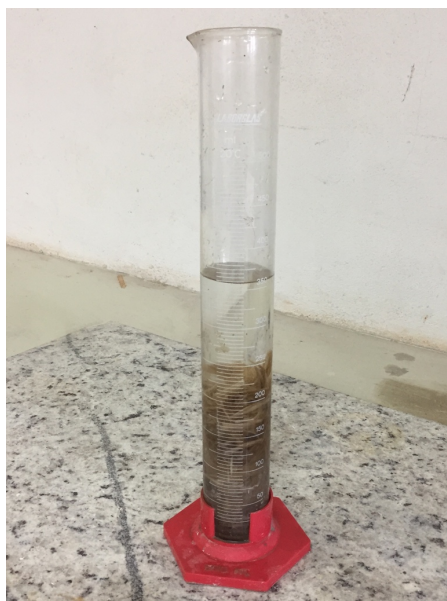


Figura 3.6: Fibras de Curauá imersas em água. Fonte: AUTORA, 2019.

As medidas de massa foram realizadas em intervalos de 5 minutos, 30 minutos, 1 hora e 2 horas, seguindo por medições a cada 24 horas até completar o sexto dia de ensaio. A medição continuou com intervalo de 48 horas até se alcançar o ponto de saturação das fibras. Por meio da equação 3.2 foi calculada a absorção de águas das fibras de curauá.

$$A = \frac{P_{ht} - P_e}{P_e} \times 100 \quad \text{Equação 3.2}$$

Onde:

A= absorção de água, em porcentagem;

P_{ht}= massa da fibra úmida no tempo t, em gramas;

P_e = massa da fibra seca em estufa, em gramas.

3.2.1.3. Teor de umidade

Para determinar o teor de umidade das fibras de curauá utilizou-se a metodologia descrita na norma TAPPI T550 om-08 (2013) (*Determination of equilibrium moisture in*

pulp, paper and paperboard for chemical analysis). Primeiramente o recipiente a ser colocado a fibra foi pesado em balança eletrônica de precisão de 0,01g, em seguida o valor foi tarado e foi adicionado 2 g de amostra da fibra, o conjunto ficou exposto ao ar por 24 h. Logo após, o conjunto foi colocado em estufa a 105°C por 1 h. Após obtenção de constância de massa, o conjunto foi pesado e o percentual de umidade pode ser calculado por meio da equação 3.3.

$$U(\%) = \frac{m_u - m_s}{m_u} \times 100 \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde:

U (%)= teor de umidade, em porcentagem;

m_s = massa da fibra seca em estufa, em gramas;

m_u = massa da fibra úmida, em gramas.

3.2.1.4. Diâmetro das fibras

Anterior a realização do ensaio de resistência à tração da fibra de curauá, foi necessário determinar o seu diâmetro possibilitando o cálculo do seu limite de resistência. A medição do diâmetro foi realizada no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará. Para isso utilizou-se um microscópio óptico da marca LEICA modelo DM750 M com lente MC120 HD com poder de ampliação entre 50x e 1.000x e equipado com software de medição.

Foram realizadas medições em 15 amostras de fibras com 25 mm de comprimento, como estas apresentaram variações no seu diâmetro ao longo do comprimento, foram feitas aferições em três posições na superfície da fibra, como pode ser visto na figura 3.7. Ao final, foi determinada a média do diâmetro nos três pontos medidos de cada amostra e em seguida uma nova média foi estabelecida considerando os valores de todas as fibras analisadas.

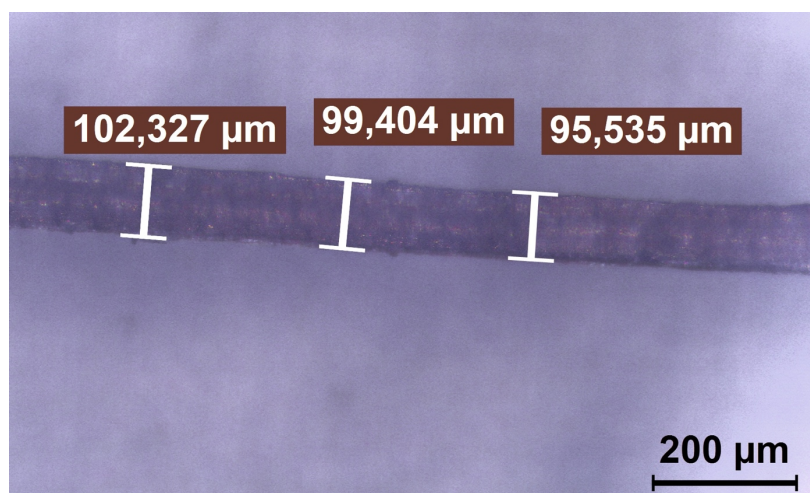


Figura 3.7: Medição do diâmetro da fibra de curauá. Fonte: AUTORA, 2019.

3.2.1.5. Resistência à tração

Para determinar a resistência à tração de uma única fibra de curauá, baseou-se na metodologia estabelecida pela norma ASTM C1557 – 03 (*Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers*). Inicialmente foram preparados moldes (figura 3.8a) com papel de gramatura 180 g/m², em seguida, cada fibra foi cuidadosamente separada e fixada entre dois moldes de papel com cola branca à base de resina de PVA (álcool polivinílico). Optou-se pela utilização de dois moldes de forma a assegurar maior fixação da amostra nas garras da máquina de ensaios. A largura do molde corresponde a dimensão da garra, enquanto que o comprimento da janela consiste na dimensão da fibra que foi inserida nos compósitos. Após posicionado nas garras, as laterais do molde foram recortadas (figura 3.8b) para dar início ao ensaio.

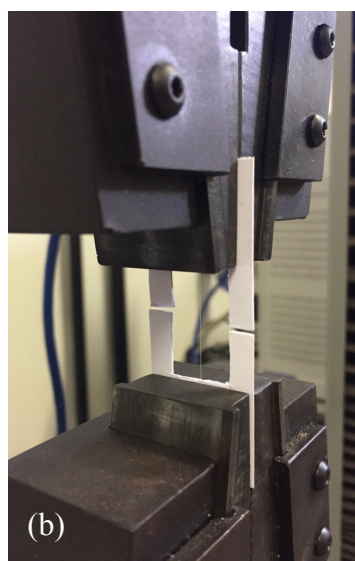
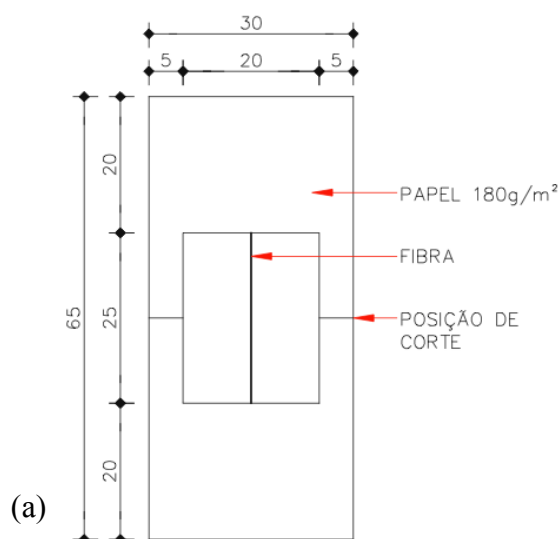


Figura 3.8: Ensaio de tração na fibra. (a) Molde (em milímetros), (b) Detalhe do corte do molde para realização do ensaio. Fonte: AUTORA, 2019.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaaios Mecânicos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará na máquina de ensaios universal Kratos, série KE, modelo IKCL3-USB, com célula de carga de 100N e sob uma taxa de deformação de 0,2 mm/min. De posse dos diâmetros médios das fibras, foram ensaiadas 15 amostras, porém foram descartadas aquelas que sofreram deslizamento ou que a ruptura ocorreu próximo ao molde de papel, com isso, obteve-se 10 amostras em conformidade com a norma.

Para calcular a tensão de tração da fibra, utilizou-se a carga máxima obtida no ensaio e com os diâmetros previamente medidos, foi calculada a seção transversal da fibra. Por meio da equação 3.4 foram determinados os valores da resistência.

$$\sigma = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A} \quad \text{Equação 3.4}$$

Onde:

σ = resistência à tração, em megapascals;

$P_{m\acute{a}x}$ = carga máxima de tração, em newtons;

A = área da seção transversal da fibra, milímetros quadrados.

3.2.1.6. Módulo de elasticidade

Após o ensaio de resistência à tração, obteve-se os dados referentes a deformação da fibra para determinada carga aplicada, com isso, traçou-se a curva tensão *versus* deformação. Dessa forma pode-se calcular o módulo de elasticidade tangencial no trecho da curva que corresponde a 20% e 70% da tensão máxima, aplicando a equação 3.5.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \times 10^{-3} \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde:

E = módulo de elasticidade, em gigapascals;

$\Delta\sigma$ = variação da tensão, em megapascals;

$\Delta\epsilon$ = variação de deformação unitária, em milímetros por milímetros.

3.2.1.7. Teor de Lignina

Foi determinado o teor de lignina das fibras de curauá *in natura*. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma TAPPI T 222 om-02, 2006 (*Acid-insoluble lignin in*

wood and pulp) no Laboratório de Farmacognosia da Faculdade de Farmácia da Universidade Federal do Pará. Ensaiou-se 1g do material previamente seco em estufa. A amostra seca foi colocada em um becker de 100 ml com 15 ml de ácido sulfúrico 72% durante 2 horas, mexendo frequentemente. Em seguida, o material foi transferido para um Erlenmeyer de um litro e adicionado 560 ml de água destilada com temperatura variando entre 90°C e 100°C, submetendo o material ao banho-maria durante 4 horas (figura 3.9).



Figura 3.9: Etapa intermediária do ensaio de determinação do teor lignina. Fonte: AUTORA, 2019.

Após este período, a mistura foi filtrada em cadinho com auxílio de bomba à vácuo e água destilada, logo após a amostra foi levada para estufa durante 24 horas. Com isso, os cadinhos foram resfriados em dessecador e pesados. O teor de lignina foi calculado conforme a equação 3.6.

$$Tl = \frac{Pac - Pc}{Pas} \times 100 \quad \text{Equação 3.6}$$

Onde:

Tl= teor de lignina, em porcentagem;

Pac= peso do cadinho com a amostra, em gramas;

Pc= peso do cadinho filtrante, em gramas;

Pas = peso da amostra seca.

3.2.1.8. Análise morfológica

Foi realizada a análise morfológica das fibras por meio da microscopia eletrônica de varredura, executada no Laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências da

Universidade Federal do Pará. Utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura Zeiss modelo LEO-1430 (figura 3.10a), as condições de operação foram: análise de elétrons secundários, corrente do feixe de elétrons de 90 μ A, voltagem de aceleração constante de 10 kV e distância de trabalho de 15 mm.

As amostras, secas em estufa, foram previamente montadas em stubs fixadas com fitas dupla face de carbono e metalizadas em ouro por 1,5 minutos (aproximadamente 15 nm), antes de serem colocadas no MEV (figura 3.10b). Foi realizado o recobrimento das amostras a serem analisadas com deposição de íons metálicos de forma a tornar o material condutor com maior nível de emissão de elétrons, o que facilita na obtenção das imagens (SANTOS, 2016b).

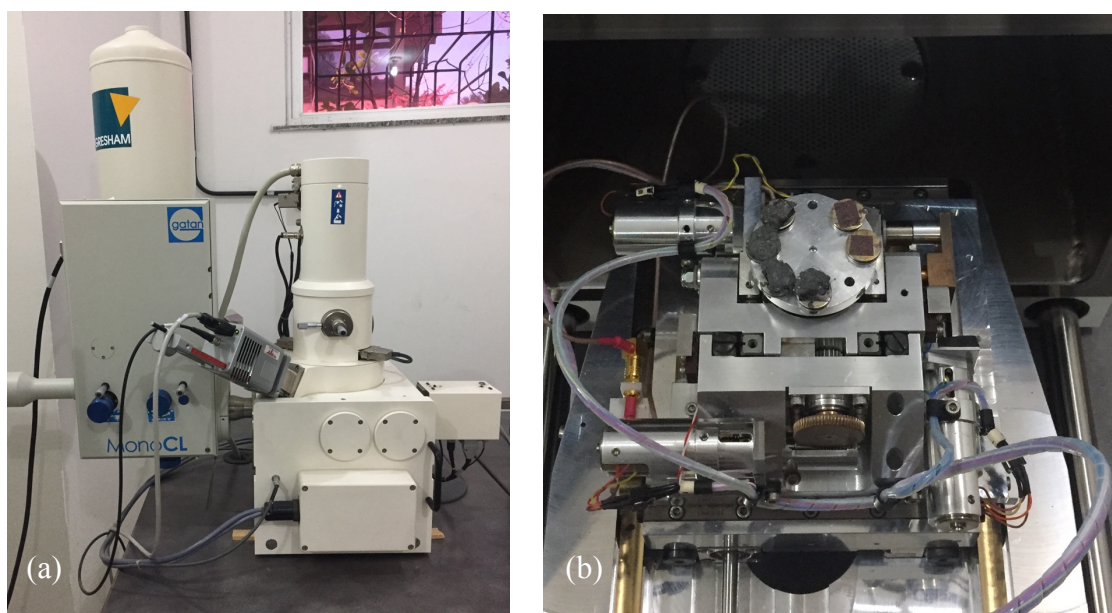


Figura 3.10: Equipamento para análise microestrutural. (a) Microscópio eletrônico de varredura Zeiss LEO-1430, (b) Amostras no interior do microscópio. Fonte: AUTORA, 2019.

3.2.1.9. Índice de Cristalinidade

Foi realizada a análise mineralógica das fibras de curauá por meio da Difratomia de raios-X (DRX) no Laboratório de Física da Universidade Federal do Pará. Com isso foi possível calcular o índice de cristalinidade (IC) da fibra que consiste na relação entre os picos de intensidade máxima, correspondente à região cristalina da celulose ($2\theta = 22,5^\circ$) e o pico de intensidade mínima, referente à região amorfa ($2\theta = 18^\circ$).

Utilizou-se difratômetro D8 Advance da marca Bruker com geometria Bragg-Brentano, detector LynxEye e tubo de cobre. Aplicou-se radiação Cu ($K\alpha_1=1,540598 \text{ \AA}$), faixa angular ($^\circ 2\theta$) de 0-50°; voltagem e corrente do tubo de 40 kV e 40 mA, fenda

divergente de 0,6 mm, fenda Soller de 2,5° e filtro K β de Ni, passo angular de 0,02° e o tempo por passo 0,3 s. O índice de cristalinidade foi calculado por meio da equação 3.7, conforme descrito por Wei (2014).

$$IC = \frac{I_{m\acute{a}x} - I_{m\acute{i}n}}{I_{m\acute{a}x}} \times 100 \quad \text{Equação 3.7}$$

Onde:

IC= índice de cristalinidade, em porcentagem;

I_{máx}= pico de intensidade máxima 2 θ = 22,5°, (região cristalina);

I_{mín}= pico de intensidade mínima 2 θ = 18°, (região amorfa).

3.2.2. Produção dos Compósitos Cimentícios

3.2.2.1. Estudo piloto

A primeira etapa da produção dos compósitos consistiu em desenvolver um estudo piloto para determinar o traço da argamassa, como também as características do reforço com as fibras de curauá (comprimento e fração volumétrica). Buscou-se empregar um traço econômico baseado em outras pesquisas que utilizavam fibras vegetais como reforço de argamassas, Chakraborty *et al.* (2013), utilizaram um traço de 1:3 (proporção de cimento e areia) para desenvolver argamassas cimentícias reforçadas com fibra de juta. Hamzaoui *et al.* (2014), também aplicaram o traço de 1:3 em sua análise de argamassa modificada usando fibras de cânhamo e nanotubos de carbono.

Para argamassas reforçadas com fibra de curauá, Lima *et al.* (2011), também utilizou a proporção de 1:3 para os materiais secos. Com isso, no presente trabalho, tanto as argamassas de referência quanto àquelas com adição das fibras empregaram o traço 1:3 em massa. De forma a definir a relação água/cimento das argamassas, baseou-se o índice de consistência na norma NBR 13276:2016. A argamassa plena (sem adição de fibras) foi produzida com quantidade de água necessária para obter um índice de consistência de 260 $\pm$ 5 mm, o que correspondeu a uma relação água/cimento de 0,61, a qual foi aplicada em toda a pesquisa.

De posse do traço, a próxima etapa foi determinar o comprimento e a fração volumétrica das fibras que seriam adicionados na argamassa. Na literatura é possível encontrar trabalhos que adotaram diferentes valores para estas variáveis, conforme pode ser observado na tabela 3.5.

Tabela 3.5: Parâmetros utilizados em argamassas com fibras de curauá Fonte: AUTORA, 2019.

Referência	Tipo de Fibra	Traço	Comprimento da Fibra (mm)	Fração Volumétrica de Fibra (%)
D’Almeida, Toledo Filho e Melo Filho (2010)	Curauá	1:1:0,50	25 e 50	2, 4 e 6
Lima <i>et al.</i> (2011)		1:3:0,53	5, 10 e 15	0,4; 0,6 e 0,8
Sales (2015)		1:1:0,50	10 e 20	1 e 2,5
Pimentel <i>et al.</i> (2016)		1:1:0,59	25 e 45	2 e 3

Sendo assim, durante o estudo piloto essas características foram definidas por meio da avaliação da resistência à tração do compósito. Primeiramente as fibras de curauá foram cortadas nos comprimentos de 10, 15 e 25 mm (figuras 3.11a, 3.11b, 3.11c) e utilizou-se fração volumétrica de 1 e 2% de fibra, além de ser produzida uma mistura de referência, sem adição das fibras, possibilitando avaliar a variação na resistência dos compósitos

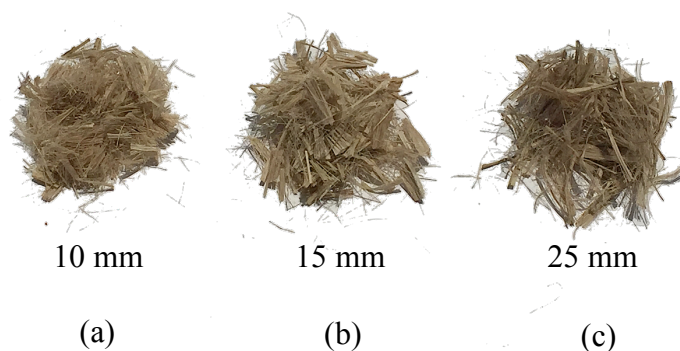


Figura 3.11: Fibras de curauá cortadas. (a) 10 mm, (b) 15 mm e (c) 25 mm. Fonte: AUTORA, 2019.

Para esta análise foram produzidos corpos de prova cilíndricos de 50x100 mm com sete tipos de mistura de argamassas, todas adotaram o traço 1:3:0,61 (proporção de cimento e areia e relação água/cimento) e empregaram o cimento do tipo CP-IV 32 RS na sua composição. Na tabela 3.6 podemos verificar a composição de cada mistura.

Tabela 3.6: Misturas para determinar o comprimento e a fração volumétrica das fibras. Fonte: AUTORA, 2019.

Nomenclatura	Traço	Índice de Consistência	Comprimento da Fibra	Fração Volumétrica de Fibra
ND0-0%			-	0
FC10-1%			10 mm	1%
FC10-2%			10 mm	2%
FC15-1%	1:3:0,61	260 ± 5 mm	15 mm	1%
FC15-2%			15 mm	2%
FC25-1%			25 mm	1%
FC25-2%			25 mm	2%

Após 28 dias de cura na água, os corpos de prova, previamente secos em estufa, foram ensaiados quanto a sua resistência à tração por compressão diametral em uma máquina de ensaios universal EMIC modelo DL200. Foi identificada a mistura que proporcionou maior aumento na resistência em função da argamassa de referência, empregando-se assim nos compósitos fibras de 25 mm de comprimento com fração volumétrica de 2%.

3.2.2.2. Preparo das argamassas

Após definidas as variáveis traço, comprimento e fração volumétrica da fibra por meio do estudo piloto, iniciou-se o desenvolvimento das argamassas a serem estudadas. Como o intuito desta pesquisa foi avaliar as propriedades dos compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá impregnadas com pasta de sílica ativa, foi produzido um compósito com as fibras sem tratamento e uma argamassa de referência, sem a inserção das fibras, de forma a possibilitar uma análise comparativa dos resultados.

Para possibilitar a avaliação da influência da composição química do cimento, utilizado nos compósitos na durabilidade das fibras, todas as misturas foram realizadas em duplicata, empregando em cada uma o cimento com material pozolânico CP-IV e o cimento composto com escória de alto forno CP-II E.

Foram produzidas seis famílias de argamassas (tabela 3.7), duas de referência (REF), sem adição de fibra, duas com a incorporação das fibras de curauá *in natura* (AFC) com 25 mm de comprimento e 2% de fração volumétrica e duas famílias com as fibras de curauá impregnadas com a pasta de sílica ativa (AFCS), na mesma dosagem volumétrica e comprimento da fibra.

Tabela 3.7: Programa experimental das misturas. Fonte: AUTORA, 2019.

Nomenclatura	Traço	Tipo de Cimento	Reforço com Fibras de Curauá	Tratamento das Fibras
REF:IV		CP-IV	-	-
REF:II		CP-II E	-	-
AFC:IV	1:3:0,61	CP-IV	25 mm e 2%	-
AFC:II		CP-II E	25 mm e 2%	-
AFCS:IV		CP-IV	25 mm e 2%	Pasta de Sílica Ativa
AFCS:II		CP-II E	25 mm e 2%	Pasta de Sílica Ativa

REF: Argamassa de referência;
AFC: Argamassa com fibra de Curauá;
AFCS: Argamassa com fibra de Curauá e Sílica.

Durante a produção das argamassas a primeira etapa foi realizar o tratamento das fibras. Segundo Neville (2016), as pastas de sílica são geralmente constituídas de partes iguais de sílica e de água. Sendo assim, foi produzida uma pasta com 50% de sílica ativa Silmix® da marca Dow Corning misturada com água (figura 3.12a).

A metodologia para a impregnação das fibras foi descrita por Tolêdo Filho *et al.* (2003), as fibras cortadas com comprimento de 25 mm foram imersas na pasta de sílica e misturadas manualmente durante 10 minutos, até que todas as fibras inseridas estivessem cobertas pela pasta, em seguida as fibras foram secas ao ar em temperatura ambiente durante 15 minutos (figura 3.12b), com o término desse processo, as fibras impregnadas foram adicionadas nas argamassas.

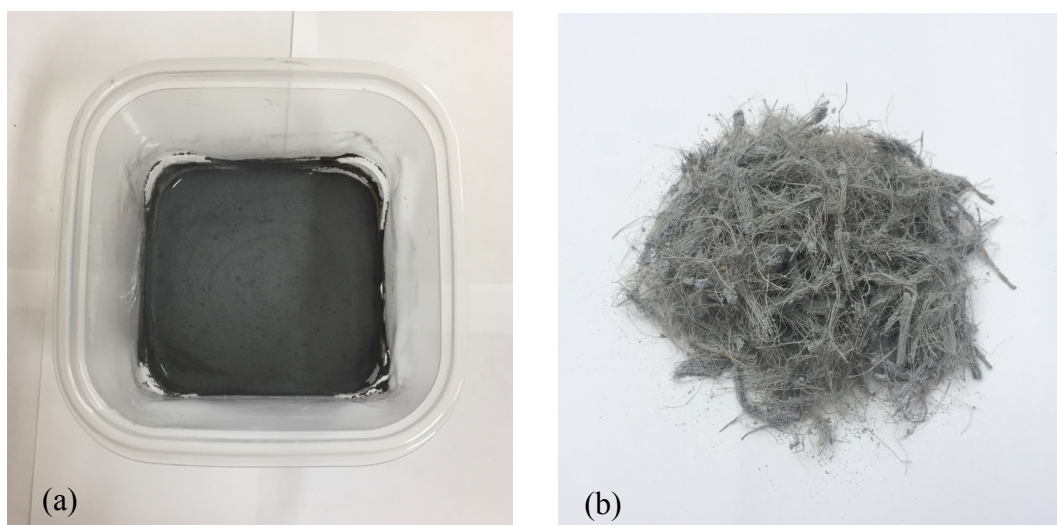


Figura 3.12: Processo de impregnação das fibras. (a) Pasta de Sílica Ativa, (b) Fibras impregnadas.

Fonte: AUTORA, 2019.

De posse dos elementos de cada mistura, a produção das argamassas foi realizada em um misturador com capacidade para 20 litros, dotado de 3 velocidades (figura 3.13), a metodologia da mistura foi adaptada da utilizada por Oliveira (2015). Primeiramente a cuba e a pá do misturador foram umedecidas, em seguida colocou-se os materiais sólidos (areia e cimento) para serem homogeneizados durante 30 segundos na velocidade 1. A partir de testes prévios, foi adicionada 80% da água com o aditivo diluído durante 30 segundos de mistura na velocidade 1.



Figura 3.13: Misturador utilizado na produção das argamassas. Fonte: AUTORA, 2019.

A argamassa foi homogeneizada durante 60 segundos na velocidade 2. O misturador foi parado e foi realizada a raspagem das laterais da cuba e limpeza da pá do misturador. Iniciou-se a adição das fibras de forma lenta, mantendo a velocidade 1 da máquina. As fibras foram adicionadas aos poucos, juntamente com o restante da água, de maneira a evitar a formação de grumos na mistura.

Novamente, com o misturador desligado, foi realizada a limpeza da pá e raspagem da cuba. Por fim, a argamassa foi misturada por 120 segundos na velocidade 2, possibilitando a melhor distribuição das fibras no compósito. Após a mistura das argamassas foi determinado os seus índices de consistência, de acordo com a norma NBR 13276:2016.

3.2.2.3. Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

Seguindo a metodologia preconizada no laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, para cada mistura, foram moldados 18 corpos de prova

cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura para serem ensaiados à compressão simples e à tração por compressão diametral após 28 dias de cura na água e após o envelhecimento natural. Para o ensaio de módulo de elasticidade foram moldados 3 corpos de prova de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura para cada mistura. Utilizou-se moldes de aço que foram revestidos com óleo mineral antes da colocação da argamassa.

Os corpos de prova cilíndricos foram moldados seguindo o estabelecido na norma NBR 7215:1996 (Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão), os moldes foram preenchidos em quatro camadas de alturas aproximadas aplicando 30 golpes com soquete em cada camada. A moldagem foi finalizada com a rasadura do topo dos moldes. Após 48 horas de cura inicial ao ar os corpos de prova foram desmoldados e permaneceram imersos em tanque com água (figura 3.14) até serem ensaiados aos 28 dias.



Figura 3.14: Corpos de prova cilíndricos na cura em água. Fonte: AUTORA, 2019.

Para o ensaio de flexão, foram moldados 9 corpos de prova prismáticos com seção transversal de 100 mm x 100 mm e 350 mm de comprimento. Foram produzidas duas formas em madeira, uma com capacidade para 6 (figura 3.15) e a outra para 3 corpos de prova. O preenchimento destas foi similar ao dos corpos de prova cilíndricos, em quatro camadas, mas com a aplicação de 50 golpes por camada. Após 48 horas, as formas foram desmontadas e os prismas foram mantidos imersos em tanque com água até a realização do seu ensaio aos 28 dias.

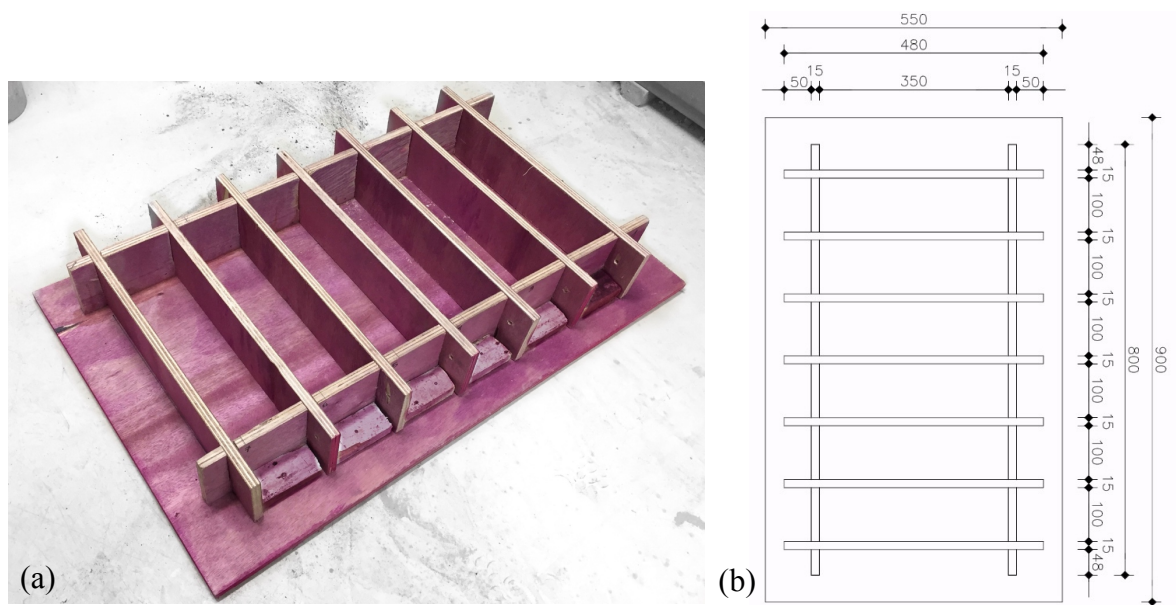


Figura 3.15: Molde para corpos de prova prismáticos. (a) Forma de madeira, (b) Desenho da forma (em milímetros). Fonte: AUTORA, 2019.

3.2.2.4. Envelhecimento Natural

Após 28 dias de cura na água, os corpos de prova cilíndricos e prismáticos que não foram ensaiados nesta data, foram submetidos ao envelhecimento natural. Conforme aplicado por Farrapo (2015), os corpos de prova foram dispostos em uma mesa com inclinação de 45° em relação ao plano horizontal (figura 3.16) voltada para o norte sob a exposição da luz solar e de intempéries a fim de maximizar a incidência de raios solares.



Figura 3.16: Envelhecimento natural dos corpos de prova prismáticos. Fonte: AUTORA, 2019.

Os corpos de prova ficaram sujeitos às condições climáticas da cidade de Belém no estado do Pará, cuja classificação Köppen é do tipo Af (tropical superúmido), onde a temperatura média anual é de 26,7°C, umidade relativa média anual de 84,9 % e apresenta precipitação pluviométrica média anual de 3.000 mm (AGEITEC, 2017). Com isso pode-se avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos após 180 e 270 dias de envelhecimento natural.

3.2.3. Ensaios Mecânicos

As propriedades mecânicas das argamassas foram determinadas por meio dos ensaios de resistência à compressão, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, flexão e da tenacidade do compósito. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, após 28 dias de cura na água e posteriormente ao envelhecimento natural, estes foram ensaiados aos 180 dias e 270 dias. Cada ensaio utilizou três corpos de prova de cada família, para em seguida ser determinada a média das resistências.

3.2.3.1. Resistência à compressão

Foram ensaiados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento (figura 3.17), utilizou-se o método de ensaio descrito na norma NBR 5739:2007 (Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos). A máquina utilizada para o ensaio foi a EMIC modelo DL200, com os valores de carga máxima registrados, a resistência à compressão foi calculada pela equação 3.8.

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2} \quad \text{Equação 3.8}$$

Onde:

f_c = Resistência à compressão, em megapascals;

F = Carga máxima alcançada, em newtons;

D = Diâmetro do corpo de prova, em milímetros.

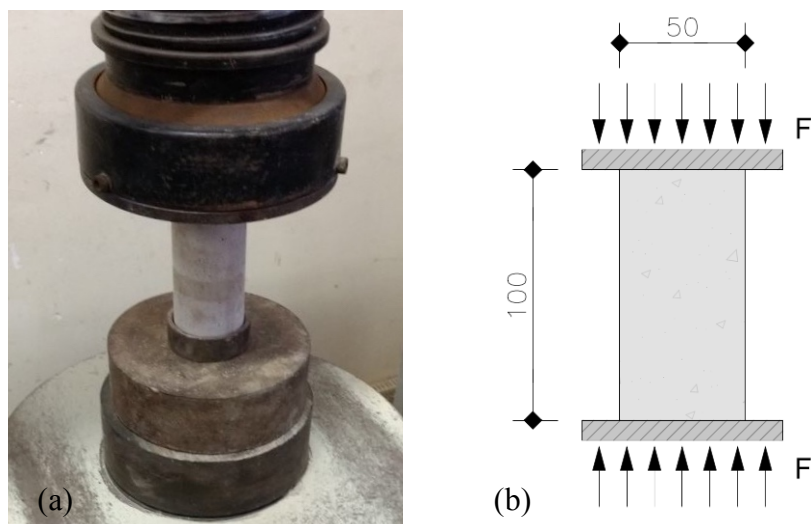


Figura 3.17: Ensaio de resistência à compressão. (a) Posicionamento do corpo de prova, (b) Esquema do ensaio (em milímetros). Fonte: AUTORA, 2019.

3.2.3.2. Tração por compressão diametral

Para avaliar a resistência à tração por compressão diametral seguiu-se os procedimentos da norma NBR 7222:2011 (Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos). Os corpos de prova cilíndricos com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura foram ensaiados na máquina EMIC modelo DL200.

As argamassas foram posicionadas na máquina na direção diametral e por possuírem comprimento superior ao diâmetro dos pratos da máquina, foi utilizado um dispositivo auxiliar na base para facilitar o posicionamento do corpo de prova e foram inseridas tiras de madeira na parte superior e inferior (figura 3.18) de forma a distribuir uniformemente sobre o corpo de prova as cargas aplicadas. O valor da resistência foi calculado por meio da equação 3.9.

$$f_t = \frac{2F}{\pi \times d \times l} \quad \text{Equação 3.9}$$

Onde:

f_t = Resistência à tração por compressão diametral, em megapascals;

F = Carga máxima obtida no ensaio, em newtons;

d = Diâmetro do corpo de prova, em milímetros;

l = Comprimento do corpo de prova, em milímetros.

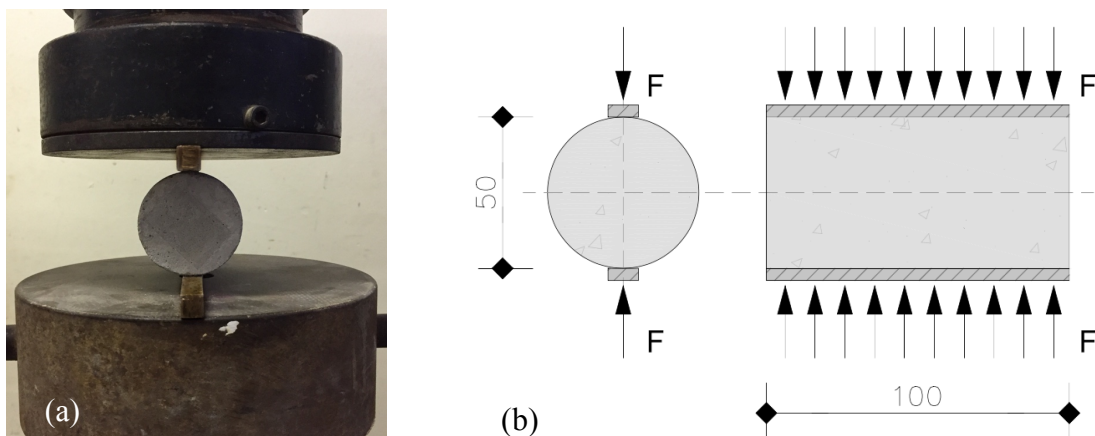


Figura 3.18: Ensaio de resistência à tração. (a) Posicionamento do corpo de prova, (b) Esquema do ensaio (em milímetros). Fonte: AUTORA, 2019.

3.2.3.3. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade das argamassas foi avaliado aos 28 dias. Os corpos de prova cilíndricos ensaiados, possuíam 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura de forma a possibilitar a fixação dos extensômetros (figura 3.19) para medir as deformações. O ensaio foi realizado em conformidade com a norma NBR 8522:2008 (Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão), na máquina de ensaios EMIC modelo DL200.

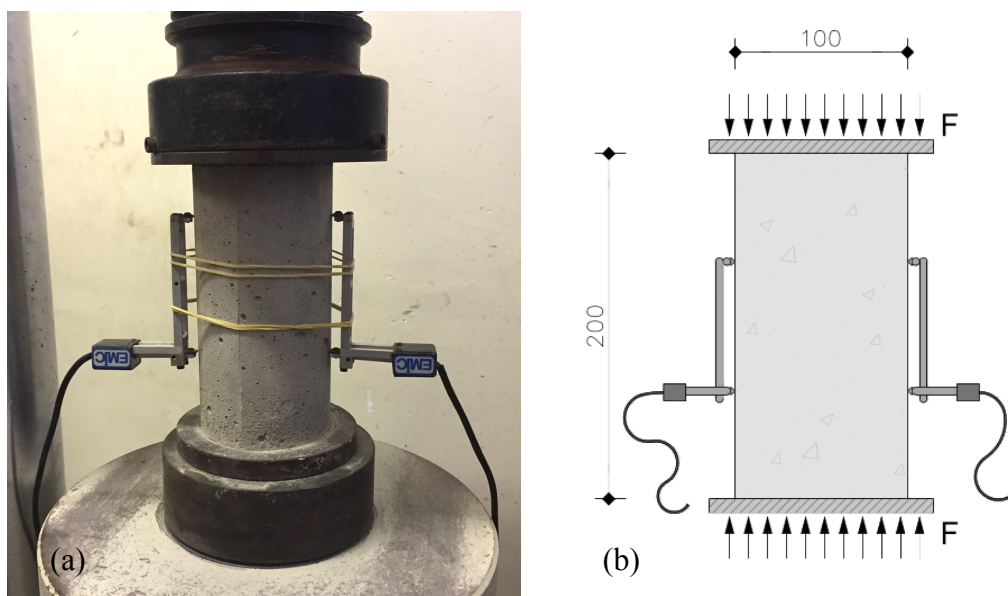


Figura 3.19: Determinação do módulo de elasticidade (a) Posicionamento do corpo de prova, (b) Esquema do ensaio (em milímetros). Fonte: AUTORA, 2019.

Para a determinação do módulo de elasticidade, utilizou-se 30% da tensão de ruptura obtida no ensaio de compressão. Com isso, iniciou-se os ciclos de carregamento, mantidos por 60 segundo, seguido pelo descarregamento, até 0,5% desta tensão, durante 60 segundos. Este ciclo foi realizado três vezes, até que a instrumentação foi retirada e o corpo de prova carregado até à ruptura. O valor do módulo de elasticidade pode ser obtido pela tangente da reta tensão *versus* deformação ($\text{tg}\theta = E$) ou calculado por meio da equação 3.10.

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \times 10^{-3} \quad \text{Equação 3.10}$$

Onde:

E = módulo de elasticidade, em gigapascais;

$\Delta\sigma$ = variação de tensão, em megapascais;

$\Delta\varepsilon$ = variação de deformação unitária, em milímetros por milímetros.

3.2.3.4. Flexão

A resistência à flexão das argamassas foi ensaiada em corpos de prova prismáticos com seção transversal de 100 mm x 100 mm e 350 mm de comprimento, conforme estabelecido na norma ASTM C78, 2002 (*Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete - Using Simple Beam with Third-Point Loading*). A máquina de ensaio utilizada, foi do tipo *Computer Controlled Electro-Hydraulic Servo Universal Testing Machine*, modelo WAW-1000C e os corpos de prova foram instrumentados com medidor de deformação (LVDT - *Linear Voltage Differential Transducer*).

Os corpos de prova foram posicionados na máquina sob dois roletes na face inferior, que funcionam como apoios, afastados entre si a uma distância de 300 mm. Na parte superior do prisma foram dispostos dois roletes nos terços do corpo de prova (figura 3.20a), na figura 3.20b pode-se observar o esquema do ensaio conforme descrito na norma. O valor da resistência à flexão foi calculado por meio da equação 3.11.

$$f = \frac{FL}{bd^2} \quad \text{Equação 3.11}$$

Onde:

f = Resistência à flexão, em megapascais;

F = Carga máxima obtida no ensaio, em newtons;
 L = Distância entre os apoios de suporte, em milímetros;
 b = Largura média do corpo de prova na seção de ruptura, em milímetros;
 d = Altura média do corpo de prova na seção de ruptura, em milímetros.

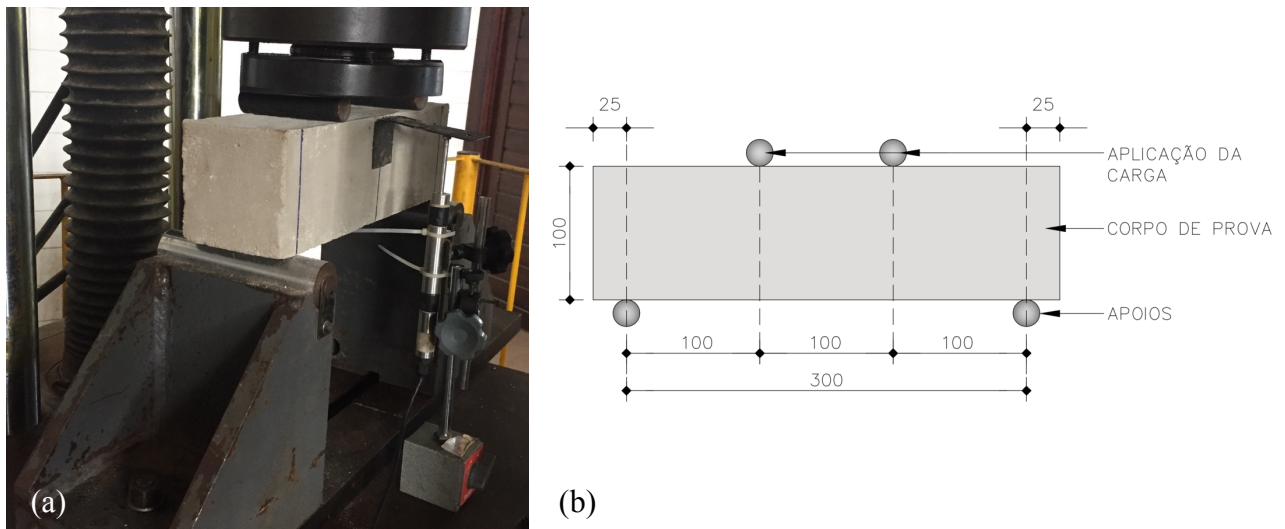


Figura 3.20: Ensaio de flexão (a) Posicionamento do prisma, (b) Esquema do ensaio (em milímetros). Fonte: AUTORA, 2019.

3.2.3.5. Tenacidade

De posse dos dados obtidos no ensaio de flexão dos corpos de prova prismáticos, foi traçado o diagrama carga-deslocamento. Com isso, a tenacidade dos compósitos foi calculada seguindo a metodologia da norma ASTM C1018, 1997 (*Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete - Using Beam With Third-Point Loading*).

A tenacidade, determinada em termos da área sob a curva carga-deslocamento, é um indicativo da capacidade de absorção de energia do compósito. Por meio desse método foi determinado os índices de tenacidade que identificam o padrão de comportamento do material até determinado deslocamento. Estes índices foram obtidos dividindo a área sob a curva de carga-deslocamento até determinado deslocamento, pela área até o deslocamento onde ocorreu a primeira fissura.

Com a análise da curva carga-deslocamento (figura 3.21), determinou-se o deslocamento correspondente a primeira fissura e a área sob a curva nessa porção do gráfico ($O'AB$). Em seguida, a área até o deslocamento 3 vezes àquele da primeira fissura

($O'ACD$) foi dividida pela área até a primeira fissura ($O'AB$) obtendo-se o índice de tenacidade I_5 .

Para obter o índice de tenacidade I_{10} , determinou-se a área do gráfico até o deslocamento correspondente a 5,5 vezes àquele da primeira fissura ($O'AEF$) a qual foi dividida pela área até a primeira fissura ($O'AB$). Por sua vez, o índice I_{20} foi obtido dividindo-se a área correspondente ao deslocamento 10,5 vezes o da primeira fissura ($O'AGH$) pela área da primeira fissura ($O'AB$).

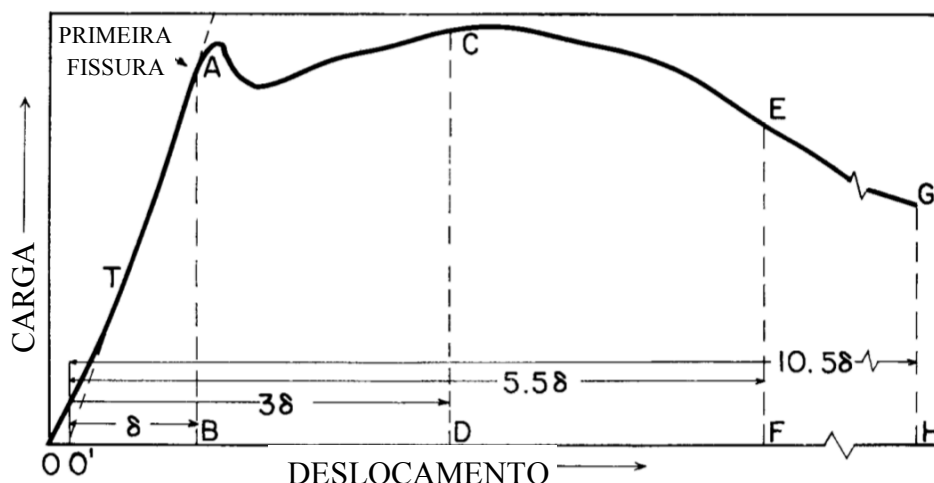


Figura 3.21: Curva carga-deslocamento segundo a norma ASTM C1018. Fonte: Adaptado ASTM C1018, 1997.

3.2.4. Análise microestrutural

Para verificar as características morfológicas dos compósitos, foram retirados fragmentos das argamassas após o ensaio de tração por compressão diametral, que foram secos em estufa e fixados em porta amostras para se realizar a microscopia eletrônica de varredura. Esta foi conduzida no Laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará e no Laboratório de Metalurgia do Instituto Federal do Pará, utilizando um microscópio eletrônico de varredura Zeiss modelo LEO-1430 e um microscópio eletrônico de Varredura modelo VEJA 3 LMU da marca TESCAN, respectivamente.

Foi aplicada as mesmas condições de operação empregadas nas análises morfológicas das fibras de curauá *in natura*: análise de elétrons secundários, corrente do feixe de elétrons de 90 μA , voltagem de aceleração constante de 10 kV e distância de trabalho de 15 mm. A análise por meio do MEV foi realizada nos compósitos reforçados com fibras de curauá sem tratamento prévio e naqueles com fibras impregnadas com pasta

de sílica ativa (AFC:IV, AFC:II, ACFS:IV e AFCS:II). Foram verificados os compósitos após 28 dias de cura na água e após o envelhecimento natural aos 180 dias e 270 dias de idade.

3.2.5. Análise mineralógica

A caracterização mineralógica dos compósitos foi realizada com a técnica de difratometria de raios-X (DRX), no Laboratório de Física da Universidade Federal do Pará. Foi verificada as argamassas com fibras *in natura* (AFC:IV e AFC:II) e as argamassas com reforço das fibras impregnadas com sílica ativa (AFCS:IV e AFCS:II), aos 28 dias de cura na água e aos 180 dias e 270 dias de envelhecimento natural. Para a realização do DRX, foram coletadas as argamassas submetidas aos ensaios mecânicos e fragmentadas, em seguida, as porções de argamassa foram moídas e peneiradas em peneira metálica número 200 com abertura da malha de 75 μm .

As amostras foram analisadas no difratômetro D8 Advance da marca Bruker com geometria Bragg-Brentano, detector LynxEye e tubo de cobre (figura 3.22). Os parâmetros do ensaio foram: Radiação Cu ($K\alpha_1=1,540598 \text{ \AA}$), faixa angular (2θ) de $10-100^\circ$; $5-75^\circ$, voltagem do tubo de 40 kV, corrente do tubo de 40 mA, fenda divergente de 0,6 mm, fenda Soller de $2,5^\circ$ e filtro $K\beta$ de Ni. A coleta dos difratogramas foi realizada com passo angular de $0,02^\circ$ e o tempo por passo 0,3 s.

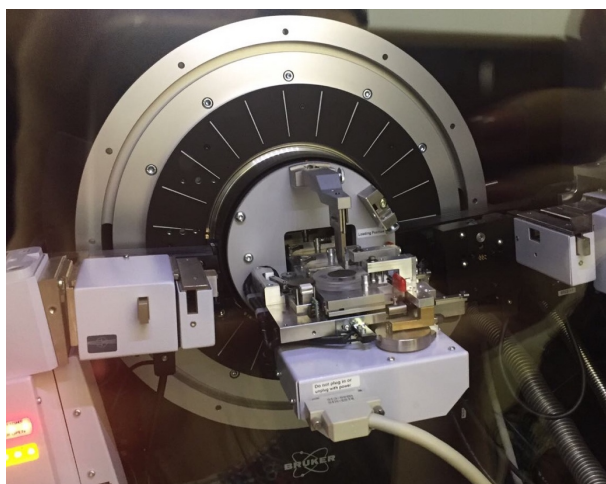


Figura 3.22: Difratômetro de raios-x. Fonte: AUTORA, 2019.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização da Fibra de Curauá

As fibras de curauá *in natura* foram caracterizadas quanto as suas propriedades físicas, químicas, mecânicas e morfológicas. Por meio destes resultados é possível verificar uma tendência de comportamento das fibras quando utilizadas como reforço de compósitos cimentícios, como também comparar os resultados obtidos com outras fibras lignocelulósicas.

4.1.1. Massa Específica

O resultado obtido para a massa específica da fibra de curauá é de 1,33 g/cm³, é condizente com o encontrado na literatura (GOMES *et al.*, 2007; SALES, 2015; PIMENTEL *et al.*, 2016). O valor da massa específica esta diretamente relacionado com a quantidade de vazios e poros encontrados nas espécies vegetais, como pode ser verificado na tabela 4.1 este valor diverge para cada espécie.

Tabela 4.1: Massa Específica de fibras vegetais. Fonte: AUTORA, 2019.

Espécie	Fonte	Massa Específica
Fibra de Curauá	Autora (2019)	1,33 g/cm ³
Fibra de Juta	Fidelis (2014)	1,61 g/cm ³
Fibra de Coco	Cunha (2012)	1,29 g/cm ³
Fibra de Sisal	Martins (2012)	1,45 g/cm ³

A fibra de curauá apresentou uma massa específica próxima a da fibra de coco e inferior quando comparada com as fibras de juta e sisal. O resultado obtido para a fibra de curauá indica que a mesma apresenta grande volume em relação ao peso e quando utilizada como reforço de matrizes cimentícias permite produzir compósitos mais leves (BILCATI, 2015).

4.1.2. Absorção de água

Na tabela 4.2 temos os valores de absorção de água referentes aos intervalos de tempo descritos na metodologia. Pode-se verificar que a taxa de absorção é mais elevada

até a primeira hora de ensaio (figura 4.1), após os primeiros 60 minutos de imersão das fibras de curauá, estas já absorveram cerca de 72% de sua capacidade total, atingindo saturação após absorverem cerca de 360% da sua massa seca.

Tabela 4.2: Absorção de água das fibras de Curauá. Fonte: AUTORA, 2019.

Tempo	5 min	30 min	1 h	2 h	24 h	48 h	72 h	96 h	144 h	192 h
P_{ht} (g)	26,05	33,76	36,62	38,66	40,35	42,78	44,51	46,50	46,83	46,83
A (%)	160,50	237,60	266,20	286,60	303,50	327,80	345,10	365,00	368,30	368,30

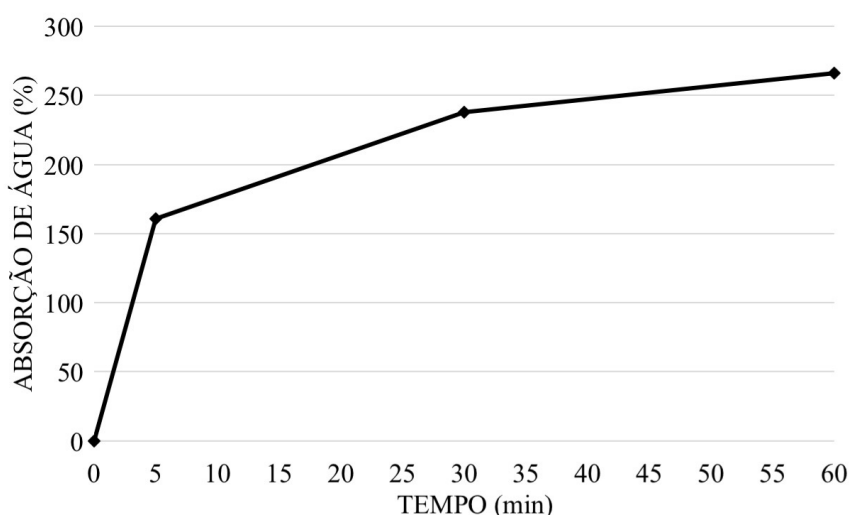


Figura 4.1: Primeira hora de absorção de água das fibras de curauá. Fonte: AUTORA, 2019.

Por meio da análise da curva de absorção de água para as fibras de curauá durante todo o período de imersão (figura 4.2), pode-se verificar que as fibras necessitam de um intervalo grande de tempo para chegar ao seu teor máximo de absorção, após cerca de 144h, mas a taxa de absorção é mais alta nas primeiras 24 h de imersão. A elevada capacidade de absorção de água pela fibra se justifica pela grande presença de poros permeáveis provenientes de lacunas e dos lúmens da fibra, a umidade provoca inchaço da parede celular da fibra até que a mesma esteja saturada, após este ponto, a umidade pode ser encontrada como água livre nos espaços vazios da fibra (LOPES, 2009).

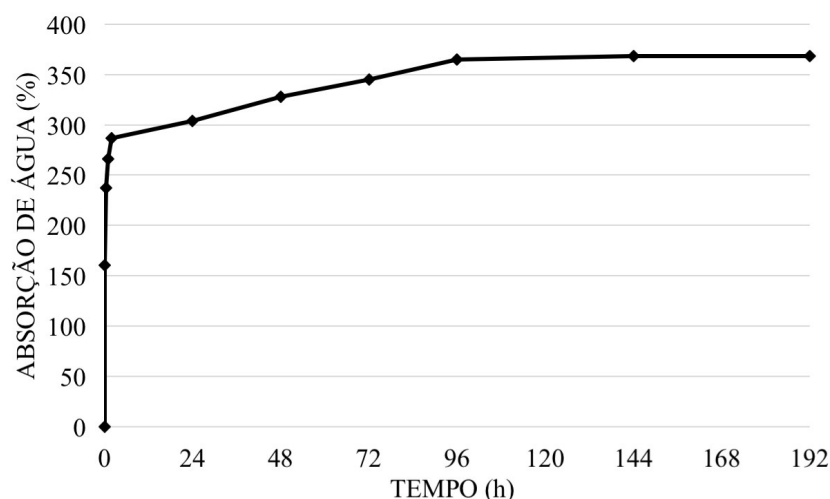


Figura 4.2: Absorção de água das Fibras de Curauá. Fonte: AUTORA, 2019.

A presença de vazios e lacunas conferem às fibras vegetais um menor peso e menor condutibilidade térmica. Entretanto, a elevada capacidade de absorção de água pelas fibras de curauá, faz com que estas sofram considerável expansão transversal e retração volumétrica quando inseridas em matrizes cimentícias, isto que pode influenciar negativamente na aderência fibra e matriz, além de afetar a trabalhabilidade da mistura uma vez que parte da água adicionada acaba sendo absorvida pelas fibras (PICANÇO, 2005).

4.1.3. Teor de umidade

O teor de umidade presente na fibra de curauá *in natura* obtido nesta pesquisa é de 7,5% (tabela 4.3), similar ao descrito por outros autores (BILCATI, 2015), as fibras de curauá são higroscópicas uma vez que sofrem variação na dimensão em função da umidade. Quando comparada com outras fibras lignocelulósicas comumente estudadas, a fibra de curauá apresenta menor teor de umidade em relação as fibras de juta, coco e sisal.

Tabela 4.3: Teor de Umidade de fibras vegetais. Fonte: AUTORA, 2019.

Espécie	Fonte	Teor de Umidade
Fibra de Curauá	Autora (2019)	7,5 %
Fibra de Juta	Picanço e Ghavami (2008)	11,37 %
Fibra de Coco	Cunha (2012)	13,00 %
Fibra de Sisal	Esmeraldo (2006)	11,00 %

O teor de umidade influencia no grau de cristalinidade da fibra, na resistência à tração e na porosidade, o aumento da umidade está diretamente ligado ao aumento da capacidade de biodegradação facilitando o ataque microbiano (SANTOS, 2016a). Segundo Cardoso (2014), o teor de umidade das fibras vegetais é influenciado pelas condições atmosféricas, pela espécie da fibra, sua idade e características do solo em que a espécie foi retirada. Apesar das fibras de curauá apresentarem baixo teor de umidade, a umidade prejudica a adesão da fibra na matriz. Sendo assim, é necessária a remoção da água presente nas fibras por meio de secagem em estufa antes das mesmas serem inseridas em compósitos cimentícios.

4.1.4. Diâmetro das fibras

Como pode ser verificado na tabela 4.4 foi obtido o diâmetro médio de 103,51 μm para a fibra de curauá, aferido por meio da média das 15 amostras avaliadas. O elevado desvio padrão observado é justificado devido a heterogeneidade do material vegetal estudado. O diâmetro das fibras vegetais influencia nas propriedades mecânicas do material. Maiores diâmetros podem estar relacionados com a variação do ângulo helicoidal, o volume de células e os defeitos estruturais. Tais fatores podem acarretar uma diminuição da resistência das fibras (TOMCZAK, 2010).

Tabela 4.4: Resultado do diâmetro médio das fibras de Curauá. Fonte: AUTORA, 2019.

Variáveis de Análise	Diâmetro (μm)
Diâmetro Médio (μm)	103,51
Desvio Padrão	25,56
Valor Máximo	142,81
Valor Mínimo	40,91

Na tabela 4.5 podemos realizar uma comparação do diâmetro médio da fibra de curauá com outras fibras vegetais. Pode-se observar que as fibras de curauá apresentam menos da metade do diâmetro encontrado para as fibras de coco e de sisal, enquanto que o seu valor é similar ao obtido para a fibra de juta.

Tabela 4.5: Diâmetro médio de fibras vegetais. Fonte: AUTORA, 2019.

Espécie	Fonte	Diâmetro (µm)
Fibra de Curauá	Autora (2019)	103,51
Fibra de Juta	Picanço e Ghavami (2008)	90,00
Fibra de coco	Monteiro <i>et al.</i> (2006)	250,00
Fibra de sisal	Spinacé <i>et al.</i> (2011)	235,00

Existe uma relação entre as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras e o fator de forma das fibras *in natura*, este fator consiste na relação entre o comprimento das fibras utilizadas no reforço e o seu diâmetro (GEHLEN, 2014). Fibras que apresentam um alto fator de forma tendem a possuir maior resistência à tração, levando a uma melhor ancoragem na matriz e consequentemente contribuindo para a resistência à flexão do compósito (CORRADINNI, 2014). As fibras de curauá empregadas na presente pesquisa com um comprimento de 25 mm apresentam fator de forma de 241,52, o que pode proporcionar eficiência no reforço como também propriedades mecânicas elevadas no compósito.

4.1.5. Teor de lignina

A composição química das fibras lignocelulósicas apresenta relação direta com as suas propriedades mecânicas, as fibras são compostas basicamente por celulose, hemicelulose e lignina, sendo que esta última tem influência sobre a rigidez das fibras (LOPES, 2009). A fibra de curauá apresenta teor de lignina de 6,48% como pode ser observado na tabela 4.6. Em comparação com outras fibras vegetais como de juta, coco e sisal, o curauá apresenta menor teor enquanto que a fibra de coco é composta por cerca de um terço de lignina.

Tabela 4.6: Teor de Lignina de fibras vegetais. Fonte: AUTORA, 2019.

Espécie	Fonte	Teor de Lignina
Fibra de Curauá	Autora (2019)	6,48%
Fibra de Juta	Fidelis (2014)	8,10%
Fibra de Coco	Fidelis (2014)	32,90%
Fibra de Sisal	Fidelis (2014)	11,90%

Geralmente fibras que apresentam altos teores de lignina tem propriedades mecânicas inferiores em relação a fibras com altos teores de celulose, além de apresentarem alta rigidez (SANTANA, 2016). Compósitos que utilizam como reforço fibras vegetais com elevado teor de lignina são mais suscetíveis ao envelhecimento natural, uma vez que a lignina e a hemicelulose são mais propensas ao ataque alcalino e são dissolvidas pela água presente nos poros do material (FIDELIS, 2014).

Diversos autores determinaram a composição química das fibras de curauá, como pode ser verificado na tabela 4.7. O resultado obtido nesta pesquisa condiz com os valores obtidos por Castro *et al.* (2015). Podemos observar também que a fibra de curauá apresenta alto teor de celulose, encontrada pelos autores em teores compreendidos entre 58% a 73%, sendo a celulose o principal constituinte responsável pela resistência e pelo módulo de elasticidade da fibra.

Tabela 4.7: Composição química da fibra de curauá. Fonte: PEREIRA, 2015.

Fibra de curauá	Castro <i>et al.</i>, (2015)	Corrêa <i>et al.</i>, (2010)	Silva <i>et al.</i>, (2008)	Beltrami <i>et al.</i>, (2014)
Hemicelulose (%)	28-32	17,5-19,1	9,9	10
Celulose (%)	58-68	69,5-70,9	70,7-73,6	73
Lignina (%)	4-6	9,1-9,5	7,5-11,11	9

4.1.6. Índice de Cristalinidade

Por meio da difratometria de raios-X foi possível identificar a mineralogia da fibra de curauá expressa pelo seu difratograma (figura 4.3). A investigação da mineralogia das fibras vegetais permite compreender as propriedades mecânicas obtidas para determinada espécie, pois as fases cristalinas e amorfas da celulose afetam diretamente estas propriedades (BILCATI, 2015).

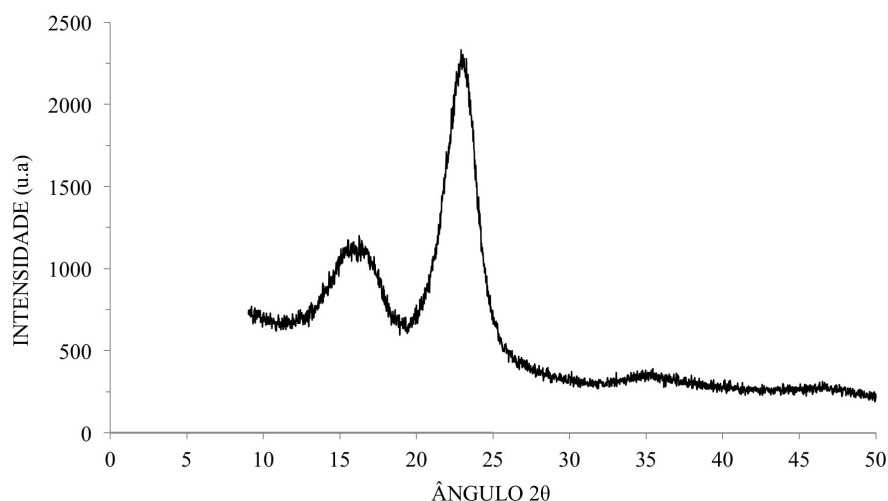


Figura 4.3: Difratograma da fibra de Curauá. Fonte: AUTORA, 2019.

Por meio do difratograma o índice de cristalinidade da fibra de curauá foi calculado como pode ser verificado na tabela 4.8, obtendo o valor de 65,30 %, condizente ao valor obtido em outros estudos (TOMCZAK; SATYANARAYANA; SYDENSTRICKER, 2007). Este valor foi semelhante ao encontrado para a fibra de sisal e superior aos das fibras de juta e coco. O índice de cristalinidade relaciona a proporção entre as cadeias de celulose ordenadas e as não ordenadas (amorfas), é diretamente proporcional a resistência da fibra, uma vez que a cristalinidade afeta a extensão das ligações intermoleculares entre os segmentos de cadeias adjacentes (WEBER, 2018).

Tabela 4.8: Índice de Cristalinidade de fibras vegetais. Fonte: AUTORA, 2019.

Espécie	Fonte	Índice de Cristalinidade
Fibra de Curauá	Autora (2019)	65,30 %
Fibra de Juta	Esmeraldo (2006)	55,31 %
Fibra de coco	Machado (2011)	40,10 %
Fibra de sisal	Oliveira <i>et al.</i> (2009)	68,00 %

4.1.7. Resistência à tração

Na tabela 4.9 são apresentados os resultados para a média da resistência à tração das fibras de curauá, como também o desvio padrão e valores mínimos e máximos obtidos no ensaio. A resistência à tração média obtida para o curauá empregado nesta pesquisa foi de 422,89 MPa, este resultado se encontra abaixo dos valores encontrados por outros autores,

que obtiveram resultados na faixa de 500 MPa a 700MPa (SALES, 2015; SANTANA, 2016). Uma vez que as propriedades mecânicas das fibras vegetais são dependentes de fatores como a origem do material, variação do índice pluviométrico, incidência UV, composição química, idade do vegetal e o método de extração, é possível entender as diferenças nas propriedades obtidas nesta pesquisa e em trabalhos de outros autores sobre a fibra de curauá (TOMCZAK, 2010).

Tabela 4.9: Resultado da Resistência à Tração das fibras de Curauá. Fonte: AUTORA, 2019.

Variáveis de Análise	Resistência à tração (MPa)
Resistência média (MPa)	422,89
Desvio Padrão	154,41
Valor Máximo (MPa)	701,11
Valor Mínimo (MPa)	202,52

Na tabela 4.10 pode-se verificar um comparativo entre a resistência à tração da fibra de curauá com outras fibras amplamente estudadas. O curauá apresenta resistência média próxima a da fibra de sisal e superior as da fibra de juta e coco, sendo uma fibra viável para ser utilizada como reforço de compósitos cimentícios. Como descrito anteriormente, algumas características da fibra de curauá explicam o seu elevado comportamento mecânico, sendo estas principalmente o seu diâmetro e a composição química da fibra (SILVEIRA, 2018).

Tabela 4.10: Comparativo da Resistência à tração de fibras vegetais. Fonte: AUTORA, 2019.

Espécie	Fonte	Resistência à tração (MPa)
Fibra de Curauá	Autora (2019)	422,89
Fibra de Juta	Fidelis (2014)	249,00
Fibra de Coco	Fidelis (2014)	90,00
Fibra de Sisal	Fidelis (2014)	484,00

Como foi verificado na seção 4.1.6 a fibra de curauá apresentou índice de cristalinidade de 65,30 %, similar ao obtido pela fibra de sisal de 68,00%, enquanto que a

fibra de juta e coco apresentaram índices mais baixos de 55,31% e 40,10%, respectivamente. Como afirmado por Fidelis (2014), quanto maior o índice de cristalinidade, maior é a resistência da fibra, dessa forma podemos observar no resultado da tração direta nas fibras de curauá que sua resistência foi superior as fibras de juta e coco que apresentam baixo índice de cristalinidade e ligeiramente inferior ao da fibra de sisal cujo índice supera o da fibra de curauá.

4.1.8. Módulo de elasticidade

O resultado para o módulo de elasticidade e a deformação de ruptura das fibras de curauá estão descritos na tabela 4.11, foi calculado o desvio padrão e identificados os valores mínimos e máximos obtidos no ensaio. A fibra de curauá apresentou módulo de elasticidade de 28,83 GPa e deformação média de 2,04 %. Outros autores obtiveram valores divergentes para o módulo de elasticidade desta fibra, Picanço (2005) e Silveira (2018), encontraram valores inferiores de 11,54 GPa e de 10,00 GPa, respectivamente, enquanto que Fidelis (2014) e Bilcati (2015) obtiveram valores superiores, respectivamente, de 63,70 GPa e 50,40 GPa,

Tabela 4.11: Resultado do Módulo de elasticidade das fibras de Curauá. Fonte: AUTORA, 2019.

Variáveis de Análise	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (%)
Média	28,83	2,04
Desvio Padrão	13,57	0,71
Valor Máximo	48,66	2,96
Valor Mínimo	13,28	0,72

A divergência do resultado obtido para o módulo de elasticidade da fibra de curauá nesta pesquisa e em outros trabalhos descritos acima pode ser justificada devido o módulo de elasticidade ser sensível a variações no comprimento da fibra ensaiada, uma vez que quanto maior for o comprimento da fibra maior é a probabilidade de existirem defeitos ou falhas que afetem a sua resistência (SANTANA, 2016; SILVEIRA; 2018).

Na figura 4.4 podemos verificar o gráfico tensão-deformação obtido para as fibras de curauá e o valor médio obtido. É grande a dispersão dos resultados, mas esta é uma característica usual das fibras vegetais que pode ser justificada pela não uniformidade

dimensional ao longo do seu comprimento, a variação na forma de sua seção transversal, como também no ângulo das microfibrilas (CARDOSO, 2014). Para as fibras vegetais, Spinacé *et al.* (2009), afirmam que seu comportamento tensão-deformação não pode ser descrito como um modelo linear de elasticidade devido a sua complexidade.

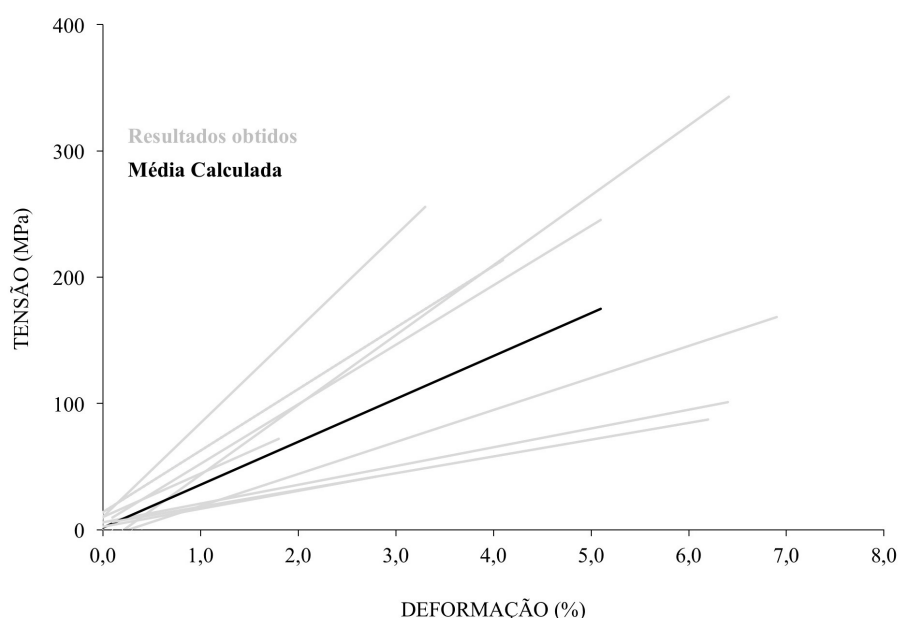


Figura 4.4: Gráfico tensão-deformação da fibra de curauá. Fonte: AUTORA, 2019.

Quando comparada com outras fibras vegetais (tabela 4.12) o curauá apresenta maior módulo de elasticidade e menor deformação do que as fibras de coco e de sisal, estas características juntamente com os valores obtidos para a resistência à tração fazem com que a fibra de curauá seja mais rígida e resistente que as outras fibras lignocelulósicas descritas. Segundo Silveira (2018), altos valores de resistência à tração e baixa capacidade de deformação podem ser justificados devido ao alto teor de celulose encontrados nas fibras de curauá (58-73%).

Tabela 4.12: Comparativo do Módulo de Elasticidade de fibras vegetais. Fonte: AUTORA, 2019.

Espécie	Fonte	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (%)
Fibra de Curauá	Autora (2019)	28,83	2,04
Fibra de Juta	Fidelis (2014)	43,90	0,60
Fibra de Coco	Fidelis (2014)	2,60	18,80
Fibra de Sisal	Fidelis (2014)	19,50	3,30

4.1.9. Análise Morfológica

As fibras de curauá *in natura* tiveram sua morfologia analisada em microscópio eletrônico de varredura (MEV). Pode-se observar na figura 4.5a a superfície longitudinal da fibra de curauá, esta apresenta um aspecto rugoso e irregular, Peres (2010) afirma que podem ser provenientes do processo de beneficiamento das fibras. Também são encontradas impurezas, possivelmente mucilagem, cera ou resíduos de tecido foliar associadas a superfície do feixe fibroso que podem interferir na interface entre a fibra e a matriz cimentícia levando a perda de aderência (SANTANA, 2016).

Ao verificar a seção transversal da fibra (figura 4.5b) nota-se que as fibras são compostas por feixes de microfibrilas, os lúmens são pouco aparentes o que indica uma menor área, além de paredes celulares mais espessas o que proporciona a esta fibra uma maior resistência à tração e módulo de elasticidade (FIDELIS *et al.*, 2013). Segundo Cunha (2012), as irregularidades presentes na seção transversal das fibras como também seu aspecto fibrilado influenciam positivamente na sua ancoragem em matrizes cimentícias.

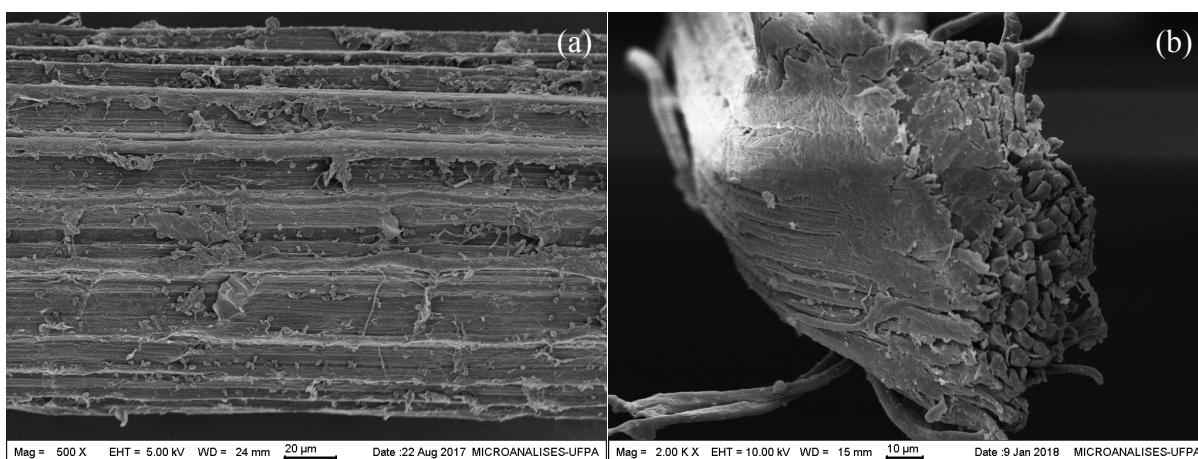


Figura 4.5: Micrografia da fibra de Curauá. (a) Superfície longitudinal da fibra, (b) Seção transversal da fibra. Fonte: AUTORA, 2018.

Na figura 4.6a podemos visualizar a superfície da fibra de curauá, após a impregnação com pasta de sílica ativa. Este processo de tratamento uma vez que manual, pode causar modificações na superfície da fibra eliminando alguns resíduos encontrados no material natural, além disso, pode-se verificar que as micropartículas da sílica aderiram a superfície da fibra resultando em um aspecto visual arenoso. Na seção transversal da fibra (figura 4.6b), quase não é possível visualizar os lúmens e as paredes celulares, uma vez que a sílica se encontra preenchendo estas lacunas.

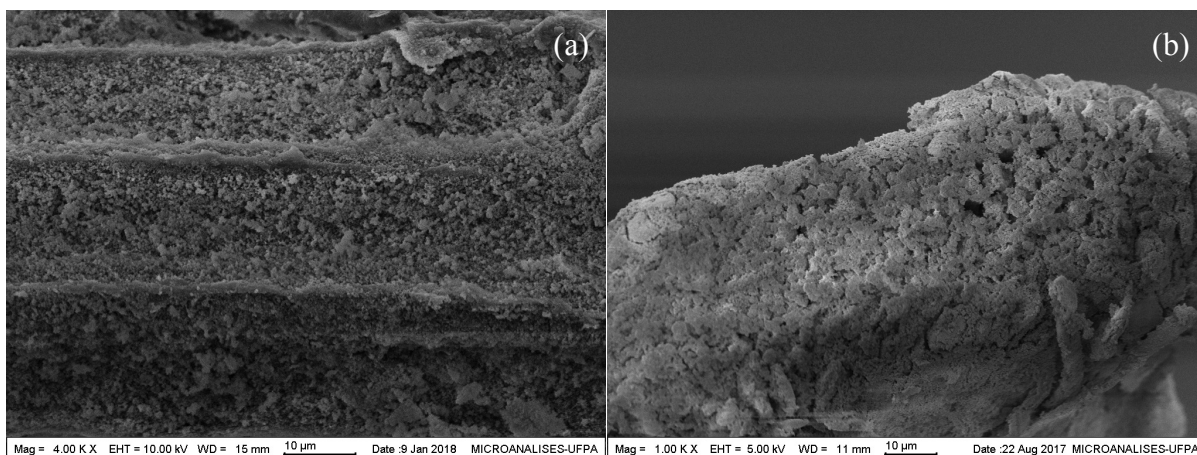


Figura 4.6: Micrografia da fibra de curauá impregnada com Sílica Ativa. (a) Superfície longitudinal da fibra, (b) Secção transversal da fibra. Fonte: AUTORA, 2018.

Após o ensaio de tração nas fibras de curauá, as amostras foram submetidas a análise microestrutural. Ao examinar as fibras rompidas por tração no microscópio eletrônico de varredura (MEV) (figura 4.7), pode-se observar que estas foram rompidas em diferentes pontos ao longo do comprimento. Pode ser verificado um modo de ruptura fibrilar para a fibra de curauá, cada microfibrila constituinte do feixe da fibra apresenta resistência à tração diferente, em decorrência da sua composição química, espessura da parede celular e ângulo helicoidal, demonstrando a heterogeneidade das propriedades mecânicas das fibras vegetais (TOMCZAK, 2010; SILVEIRA, 2018).

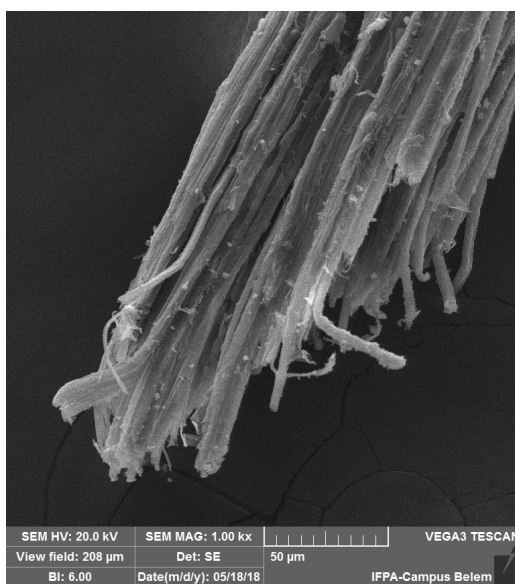


Figura 4.7: Microscopia da fibra de Curauá após ruptura por tração. Fonte: AUTORA, 2018.

4.2. Estudo Piloto

O estudo piloto teve como objetivo definir as características das fibras de curauá a serem utilizadas como reforço nas argamassas cimentícias. Optou-se por avaliar a resistência à tração dos compósitos uma vez que a adição de fibras visa melhorar a baixa resistência à tração da matriz cimentícia. O resultado para o ensaio de tração por compressão diametral para as sete misturas após 28 dias de cura pode ser verificado na tabela 4.13.

Tabela 4.13: Resultado da resistência à tração do estudo piloto. Fonte: AUTORA, 2019.

Nomenclatura	Comprimento da Fibra	Fração Volumétrica de Fibra	Resistência à tração (MPa)	Desvio Padrão	Incremento na Resistência
ND0-0%	-	0	1,91	0,09	-
FC10-1%	10 mm	1%	2,10	0,07	9,87%
FC10-2%	10 mm	2%	2,31	0,08	21,02%
FC15-1%	15 mm	1%	1,94	0,08	1,67%
FC15-2%	15 mm	2%	2,62	0,01	37,17%
FC25-1%	25 mm	1%	2,36	0,12	23,64%
FC25-2%	25 mm	2%	2,92	0,07	52,88%

As propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras são diretamente relacionadas com as características do reforço, sendo o comprimento e o teor de fibras adicionadas elementos determinantes. A elevação no teor de fibra provoca o aumento da capacidade de absorção de energia e resistência do compósito, entretanto essa correlação é estabelecida até alcançar o teor ótimo de fibra (SILVEIRA, 2018).

Ao comparar as argamassas com os dois teores estudados, de 1 e 2 %, nota-se que as misturas com 2% proporcionaram maior incremento na resistência à tração, por sua vez, os compósitos que apresentaram menor resistência foram àqueles com fração volumétrica de 1%, levando a um aumento máximo na resistência à tração de 23,65% (FC25-1%). Um estudo mais aprofundado com teores mais altos de fibra poderia determinar o teor máximo de adição.

Em relação ao comprimento das fibras, comprimentos maiores proporcionam aumento na resistência do compósito devido a uma melhor ancoragem na matriz. Fibras mais curtas são mais numerosas na argamassa e após a ruptura podem ser facilmente arrancadas, dessa forma, fibras mais longas possibilitam o aumento da ductilidade e da absorção de energia do compósito (SILVEIRA, 2018). Neste estudo piloto foi observado que as misturas com 2% de teor de fibra FC10-2%, FC15-2% e FC25-2% apresentaram um aumento proporcional na resistência de 21,02 %, 37,17 % e 52,88 %, respectivamente, em função do aumento do comprimento das fibras.

A mistura FC25-2% constituída de 2 % de fibra de curauá com 25 mm de comprimento proporcionou ao compósito maior resistência à tração, de 2,92 MPa, levando a um aumento de 52,88 % na resistência em relação a argamassa de referência sem adição das fibras, este traço por ter obtido melhor resultado foi empregado no desenvolvimento desta pesquisa. Izquierdo (2011) afirma que elevado teor de fibras é favorável para as propriedades mecânicas do compósito, pois aumenta a capacidade de interceptação de microfissuras na matriz. As fibras proporcionaram um aumento na ductilidade do compósito após a fissuração da matriz, aumentando a capacidade do mesmo de absorver energia.

4.3. Índice de Consistência

Na produção das argamassas foi determinado, durante seu estado fresco, o índice de consistência das misturas. As argamassas utilizaram o mesmo traço de 1:3 (cimento e areia) com relação água/cimento de 0,61, o valor do a/c foi definido de forma que a argamassa de referência obtivesse índice de consistência de 260 ± 5 mm, conforme descrito na metodologia. Na figura 4.8 podemos ver o índice de consistência das argamassas de referência REF:IV, com cimento CP-IV, e para a REF:II, com cimento CP-II E, nas quais foram encontrados os valores de 260 mm e 255 mm, respectivamente.

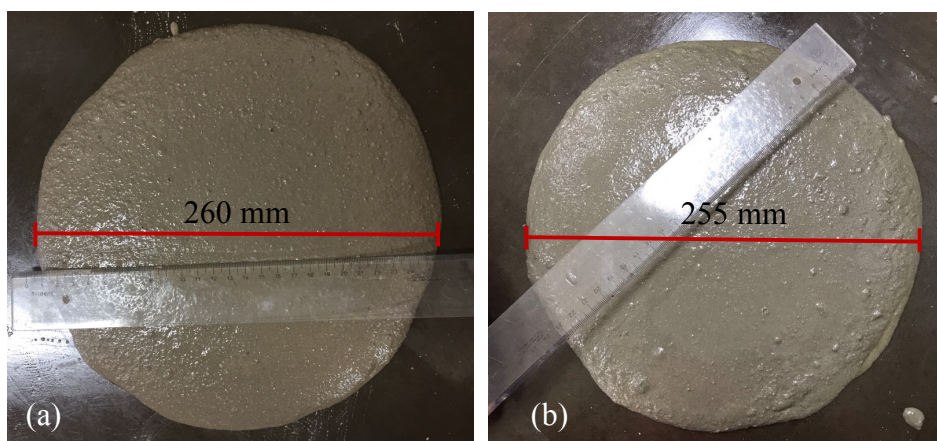


Figura 4.8: Índice de consistência das argamassas de referência. (a) REF:IV, (b) REF:II. Fonte: AUTORA, 2019.

Durante a adição da fibra de curauá na argamassa notou-se uma grande perda na trabalhabilidade, fato justificado pela alta capacidade de absorção de água das fibras de curauá (360% do seu peso seco). Para possibilitar a moldagem e adensamento dos corpos de prova foi adicionado na mistura aditivo superplastificante de forma a preservar a mesma relação água/cimento, o aditivo foi empregado com uma dosagem de 0,9% sobre a massa de cimento utilizada.

Apesar de ter sido adotada a dosagem máxima do aditivo conforme especificado pelo fabricante, ainda foi verificada uma considerável redução no índice de consistência das argamassas, mesmo assim, decidiu-se não adicionar água na mistura evitando diferenças na relação água/cimento que poderiam comprometer as propriedades mecânicas dos compósitos. O índice de consistência das argamassas com adição das fibras *in natura* pode ser visto na figura 4.9, a mistura AFC:IV apresentou índice de 165 mm e a mistura AFC:II de 160 mm.

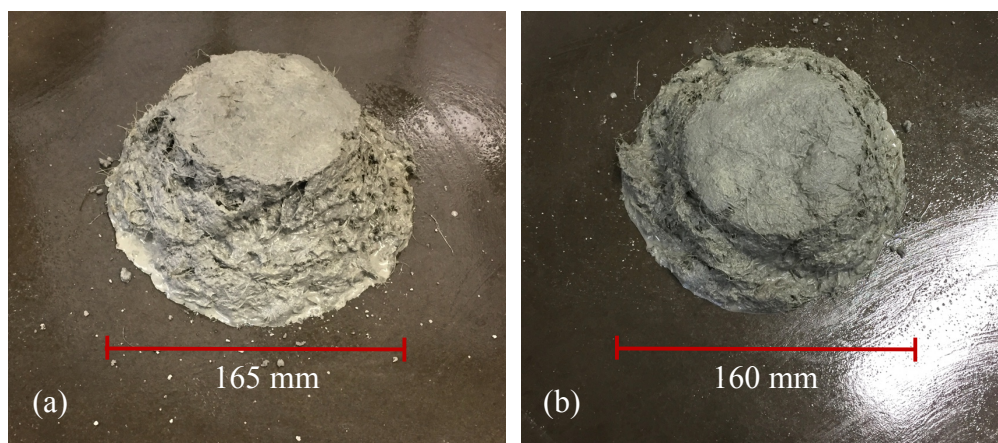


Figura 4.9: Índice de consistência das argamassas com fibras *in natura*. (a) AFC:IV, (b) AFC:II.

Fonte: AUTORA, 2019.

Por sua vez, foi verificada que nas argamassas com reforço das fibras de curauá após o processo de impregnação com pasta de sílica ativa houve uma melhora na trabalhabilidade da mistura em relação àquelas com fibras *in natura*. A argamassa AFCS:IV apresentou índice de consistência de 220 mm enquanto que a argamassa AFCS:II obteve 210 mm como pode ser visto na figura 4.10.

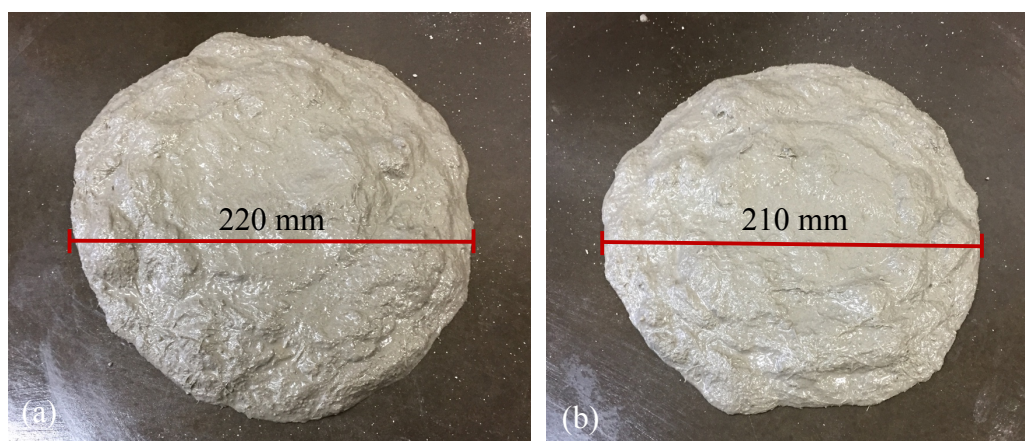


Figura 4.10: Índice de consistência das argamassas com fibras impregnadas com sílica ativa. (a) AFCS:IV, (b) AFCS:II. Fonte: AUTORA, 2019.

É possível que o preenchimento das lacunas e dos lúmens – principais responsáveis pela higroscopia das fibras naturais – pelas partículas de sílica ativa tenha reduzido a capacidade da fibra de absorver a água da argamassa. Outra hipótese é que durante a mistura dos materiais a sílica ativa presente nas fibras de curauá foi parcialmente incorporada na argamassa. Apesar da sílica possuir superfície específica elevada esta apresenta partículas com forma esférica que podem agir na mistura como um rolamento proporcionando um aumento na trabalhabilidade da argamassa (CARMO, 2006).

4.4. Propriedades Mecânicas dos Compósitos

4.4.1. Resistência à compressão

Na figura 4.11 pode-se verificar o resultado da resistência à compressão das argamassas com cimento CP-IV na sua composição. A argamassa de referência (REF:IV) apresentou resistência inicial de 31,83 MPa, após 180 dias de envelhecimento natural a mistura teve um ganho de resistência de 12,61 % (35,84 MPa) e na verificação final, aos 270 dias, a REF:IV alcançou a resistência de 43,03 MPa representando um incremento de 35,18 % em relação a resistência inicial.

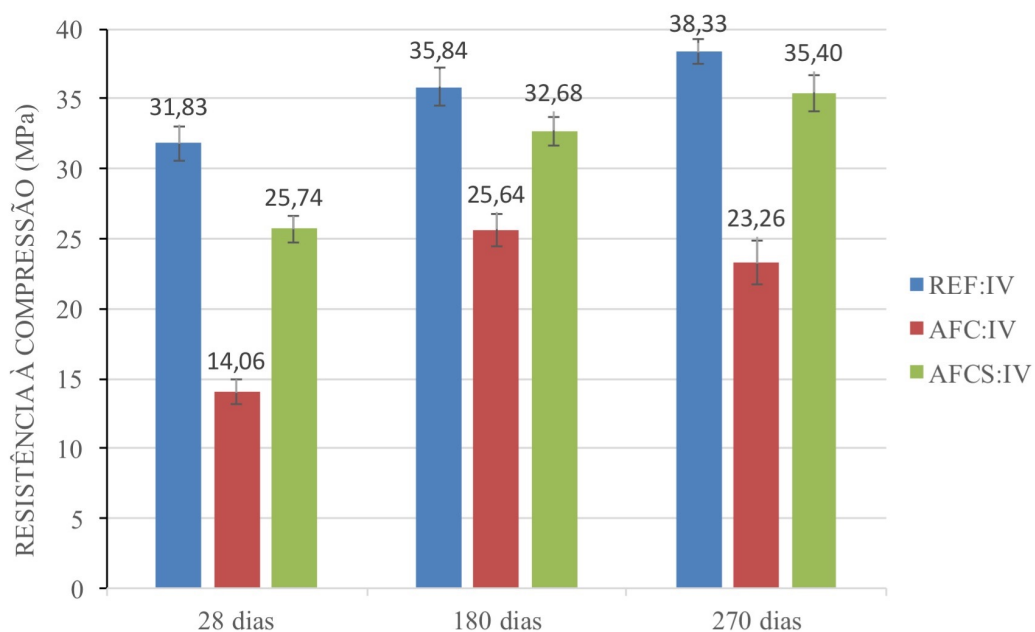


Figura 4.11: Resistência à compressão dos compósitos com cimento CP-IV. Fonte: AUTORA, 2019.

Esta análise se fez necessária para entender o comportamento da argamassa de referência após o envelhecimento natural e considerar eventuais ganhos de resistência como consequência do material pozzolânico presente no cimento. Cimentos com baixo calor de hidratação e baixo teor de C_3S como o CP-IV desenvolvem resistência mais lentamente, o que proporciona uma resistência final mais elevada (NEVILLE, 2016).

Em relação ao compósito reforçado com fibra de curauá *in natura* (AFC:IV), após a cura na água aos 28 dias a resistência à compressão inicial foi de 14,06 MPa, indicando um decréscimo de 55,84% em relação a argamassa de referência. Após 180 dias, este compósito apresentou um ganho na sua resistência (25,64 MPa), entretanto ainda 28,47% inferior ao valor obtido para a argamassa plena na mesma idade. Na verificação final, aos 270 dias, o compósito obteve resistência de 23,26 MPa indicando redução na resistência.

A diminuição da resistência à compressão com a incorporação das fibras *in natura* pode ser justificada, uma vez que, sob tensões de compressão, as fibras inseridas nas matrizes cimentícias se comportam como falhas do material. Além disso, a inserção das fibras ocasiona aumento na porosidade da argamassa e redução da sua trabalhabilidade (SILVA *et al.*, 2014).

A argamassa reforçada com fibras de curauá impregnadas com pasta de sílica ativa (AFCS:IV) obteve resistência aos 28 dias de 25,74 MPa sendo superior ao valor da argamassa com fibras sem tratamento (AFC:IV). Após 180 dias esta mistura apresentou comportamento similar ao da argamassa com cimento CP-IV. Sua resistência teve um

aumento de 27 % em relação aos 28 dias. Após o período total de envelhecimento natural, aos 270 dias, este compósito obteve resistência média de 35,40 MPa.

Pode-se pressupor que a sílica ativa presente na superfície das fibras foi englobada pela argamassa durante a mistura dos materiais. A sílica ativa por ser um material pozolânico, proporciona aumento na resistência da argamassa, uma vez que é responsável pelo consumo de hidróxido de cálcio (CH) e formação de silicato de cálcio hidratado, além de reduzir a porosidade da matriz devido a seu efeito *filler*, o que melhora a aderência fibra-matriz (LIMA; TOLEDO FILHO, 2008; MELO FILHO, 2012; FERREIRA *et al.*, 2012). Dessa forma podemos verificar que apesar da inserção de fibras reduzir a resistência à compressão das argamassas, o tratamento proposto por meio da impregnação das fibras de curauá com sílica ativa consegue reduzir este efeito deletério obtendo resultados mais próximos aos da argamassa de referência.

Na figura 4.12 temos o resultado da resistência à compressão das argamassas com cimento tipo CP-II E na sua constituição. A argamassa de referência (REF:II) obteve resistência à compressão inicial de 25,08 MPa e houve pouco acréscimo na sua resistência ao longo do envelhecimento natural chegando a uma porcentagem máxima de 15,61 % de acréscimo em relação aos 28 dias. Isso é devido a composição química do cimento tipo CP-II E que, por apresentar maior velocidade de hidratação, alcança a maior parte da sua resistência aos 28 dias (NEVILLE, 2016).

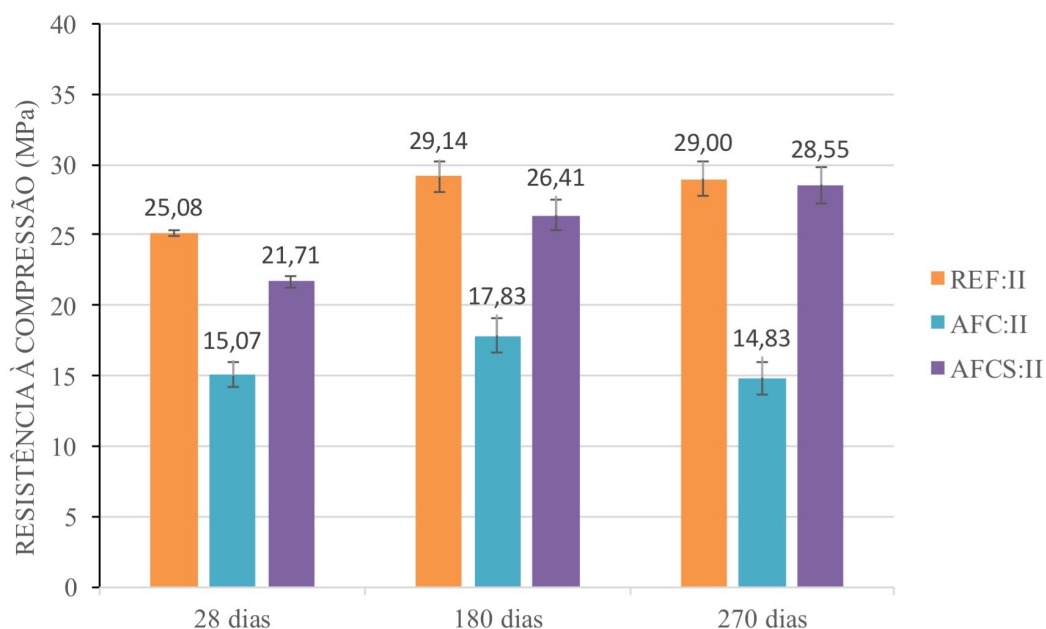


Figura 4.12: Resistência à compressão dos compostos com cimento CP-II E. Fonte: AUTORA, 2019.

O compósito com fibras de curauá sem tratamento (ACF:II) obteve resistência à compressão aos 28 dias de 15,07 MPa demonstrando uma redução de 40 % em relação a argamassa de referência. Após 180 dias foi verificada um acréscimo de 18 % na sua resistência, mas este valor permaneceu consideravelmente inferior ao resultado obtido para a argamassa de referência. Na verificação da resistência aos 270 dias este compósito apresentou uma perda de resistência na ordem de 16,82 % em relação aos 180 dias obtendo valor próximo ao da sua resistência inicial. Este decréscimo na resistência à compressão aos 270 dias pode ser um indicativo da degradação das fibras inseridas na matriz. O cimento utilizado, tipo CP-II E induz a formação de uma matriz com elevado pH e maior teor de álcalis, dessa forma, ocorre a decomposição da lignina presente na fibra reduzindo a sua capacidade de reforço tornando-a inerte no compósito (LOPES, 2009).

Em relação ao compósito com as fibras de curauá tratadas (AFCS:II), sua resistência aos 28 dias foi de 21,71 MPa, 44 % superior àquela obtida para as fibras sem tratamento. Após 180 dias, este compósito obteve resistência de 26,41 MPa mostrando um aumento de 21,67 % em relação aos 28 dias. Na verificação final aos 270 dias o compósito AFCS:II apresentou resistência de 28,55 MPa tendo seu resultado próximo ao obtido para a argamassa de referência. Esse comportamento foi similar ao verificado pelas argamassas com cimento CP-IV, isso pode ser um indicativo da reação pozolânicos e do efeito *filler* da sílica ativa que melhoraram a resistência à compressão do compósito (ALMEIDA, 2007).

Ao se comparar os resultados obtidos para os dois tipos de cimento, entre as argamassas de referência, a REF:IV apresentou maior resistência aos 28 dias como também maior incremento na resistência ao longo do envelhecimento natural com total de 20,43%, enquanto que para a argamassa REF:II este incremento foi de 15,61%. Para os compósitos com fibras *in natura* a argamassa AFC:IV apresentou maior redução na resistência em relação a referência, na ordem de 55,84%, enquanto que o compósito AFC:II apresentou redução de 40%. Entretanto, em ambos (AFC:IV e AFC:II) foi possível verificar uma diminuição na resistência aos 270 dias, de 9,28% para o compósito AFC:IV e de 16,82% para o compósito AFC:II. Quanto aos compósitos com fibras previamente tratadas (AFCS:IV e AFCS:II), foi possível verificar uma melhora considerável na resistência à compressão em comparação aos compósitos com fibras sem tratamento não sendo observados indicativos da degradação das fibras.

4.4.2. Tração por compressão diametral

O resultado para a determinação da resistência à tração das argamassas com cimento tipo CP-IV pode ser visto na figura 4.13. A argamassa de referência REF:IV obteve resistência de 1,99 MPa aos 28 dias. Aos 180 dias, apresentou um acréscimo de resistência de 23,77 % em relação a primeira verificação. Após 270 dias a argamassa obteve resistência à tração de 2,66 MPa indicando que ao longo das medições a argamassa REF:IV teve um ganho total de 33,87 %.

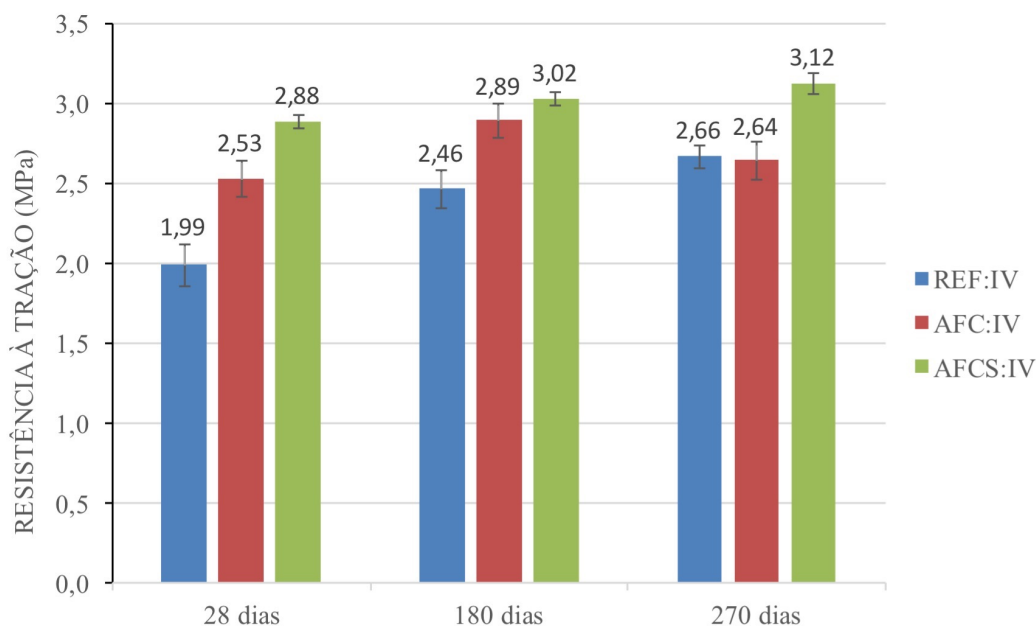


Figura 4.13: Resistência à tração dos compósitos com cimento CP-IV. Fonte: AUTORA, 2019.

Argamassas cimentícias apresentam baixa resistência à tração quando comparadas a sua resistência à compressão, na ordem de 7 a 11 %, isso é devido a incapacidade da matriz inibir a rápida propagação de fissuras (FIGUEIREDO, 2011; SALVADOR, 2013). Assim como observado para a resistência à compressão, a argamassa com cimento tipo CP-IV não atinge sua resistência máxima aos 28 dias apresentando um ganho de resistência gradativo ao longo das idades, podendo chegar ao seu limite máximo somente após 5 anos de envelhecimento (NEVILLE, 2016).

Por sua vez, o compósito com fibras de curauá *in natura* (AFC:IV), obteve resistência à tração aos 28 dias de 2,53 MPa, cerca de 27 % superior a argamassa de referência. Aos 180 dias a argamassa AFC:IV obteve resistência de 2,89 MPa, entretanto, aos 270 dias foi verificada uma redução na sua resistência à tração de 8,69 % em comparação ao resultado obtido aos 180 dias. Diferentemente da argamassa de referência, a argamassa com reforço de fibras apresenta melhor resistência à tração, isso é devido a

ancoragem das fibras na matriz que por sua vez restringem a propagação das fissuras aumentando assim a resistência última suportada pelo compósito antes da sua ruptura (CUNHA, 2007).

Melo Filho, Silva e Toledo Filho (2013), explicam que os compósitos reforçados com fibras vegetais apresentam baixa durabilidade, uma vez que as fibras inseridas na matriz sofrem degradação devido a alta alcalinidade da argamassa, como também são sujeitas a mineralização, uma vez que os produtos na hidratação do cimento se depositam nas lacunas das fibras. Estes processos levam a redução das propriedades mecânicas da fibra e consequentemente reduzem sua capacidade de transferir tensões. Wei, (2014), afirma que um dos maiores indicativos da degradação das fibras vegetais consiste na redução das propriedades mecânicas dos compósitos, após 180 dias já é possível verificar os efeitos desta degradação (TOLÊDO FILHO *et al.*, 2003).

A argamassa com reforço das fibras de curauá previamente tratadas (AFCS:IV) obteve resistência à tração aos 28 dias de 2,88 MPa, superando a referência em 44,75 % e a argamassa com fibras não tratadas em 14 %. Aos 180 dias foi verificado o aumento da resistência do compósito devido ao processo de hidratação do cimento CP-IV. Na última idade avaliada, aos 270 dias, o compósito AFCS:IV apresentou resistência de 3,12 MPa, totalizando um aumento de 8,35 % em relação aos 28 dias. Diferentemente da argamassa com fibras sem tratamento, para o AFCS:IV não observou-se perda de resistência após o envelhecimento natural, o que é um indicativo da eficácia do tratamento prévio das fibras de curauá para aumentar a durabilidade do compósito.

Na figura 4.14 temos o resultado da resistência à tração das argamassas com cimento tipo CP-II E. Para a argamassa de referência (REF:II) obteve-se resistência de 1,87 MPa, 2,05 MPa e 2,13 MPa aos 28, 180 e 270 dias, respectivamente. Foi verificado um aumento da sua resistência total de 13,87 %, mas ainda inferior ao encontrado para as argamassas com cimento tipo CP-IV. Por sua vez, a argamassa com fibras de curauá sem tratamento (AFC:II) apresentou resistência à tração de 2,54 MPa aos 28 dias, proporcionando um incremento de cerca de 36 % em relação a referência. O compósito aos 180 dias apresentou resistência de 2,73 MPa e aos 270 dias foi verificada uma considerável redução da sua resistência na ordem de 28,61 % atingindo o valor de 1,95 MPa. Este resultado reafirma a baixa durabilidade dos compósitos constituídos de fibras vegetais como reforço de matrizes cimentícias.

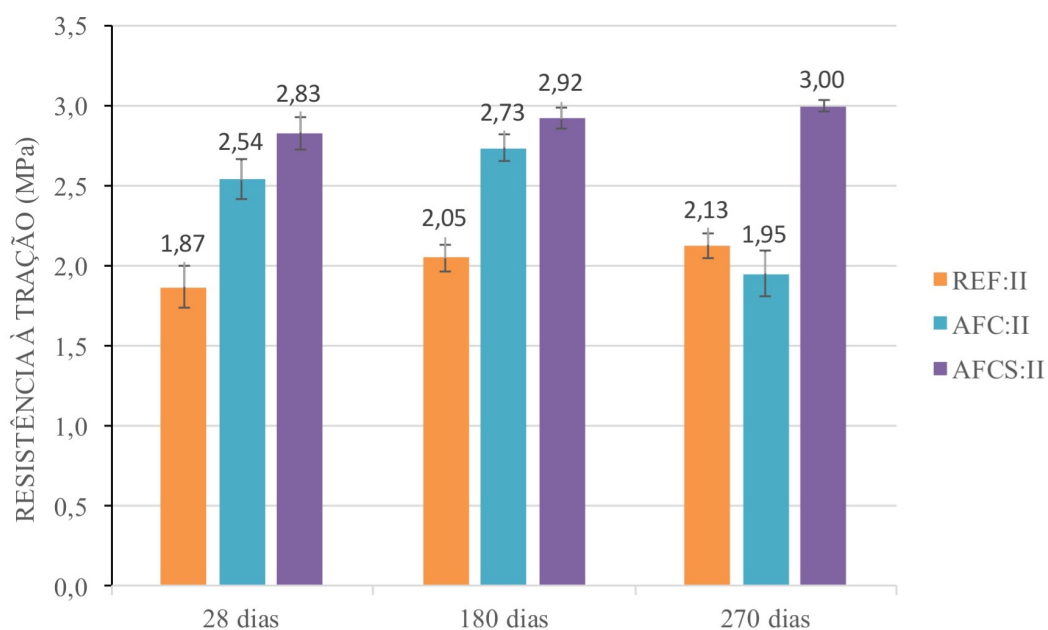


Figura 4.14: Resistência à tração dos compósitos com cimento CP-II E. Fonte: AUTORA, 2019.

Por sua vez, a argamassa com fibras tratadas por meio da impregnação com sílica ativa (AFCS:II) apresentou melhor resultado de resistência à tração aos 28 dias do que a argamassa de referência (REF:II) e a argamassa com fibras *in natura* (AFC:II) atingindo o valor de 2,83 MPa. Aos 180 dias esta apresentou resistência de 2,92 MPa, cerca de 42,29 % superior ao valor obtido para a argamassa de referência. Após o envelhecimento natural, aos 270 dias a argamassa AFCS:II apresentou resistência de 3,00 MPa.

Observando-se os resultados obtidos durante o ensaio de tração das argamassas constituídas por cimento CP-IV e CP-II E, pode-se verificar que os compósitos reforçados com fibras não tratadas apresentaram um decréscimo na resistência aos 270 dias, na ordem de 8,69 % para a argamassa AFC:IV e de 28,61% para a argamassa AFC:II, essa diferença de valores pode ser explicada por meio da composição química avaliada para cada tipo de cimento na seção 3.1.1, onde foi identificado que o cimento tipo CP-II E apresenta mais do que o triplo do teor de álcalis encontrado no cimento CP-IV, essa diferença de concentração pode ser um indicativo de que a matriz composta de CP-II E tem maior alcalinidade, o que poderia acelerar os processos de degradação das fibras vegetais.

Quanto as argamassas com as fibras submetidas ao tratamento prévio, não foi verificada redução da resistência para os compósitos AFCS:IV e AFCS:II após o envelhecimento natural, indicando que o tratamento das fibras foi eficaz em preservar as propriedades mecânicas dos compósitos.

4.4.3. Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade foi verificado para as argamassas aos 28 dias. O resultado obtido pode ser verificado na tabela 4.14. Para a argamassa de referência com cimento CP-IV o valor encontrado foi de 26,85 GPa e para a argamassa REF:II o resultado foi superior, de 29,22 GPa.

Pode ser observado que a adição das fibras de curauá nas argamassas reduziu o seu módulo de elasticidade, para o compósito AFC:IV observou-se uma redução de 51,22 % em relação a sua referência e para o compósito AFC:II essa redução foi de 57,12 %. No caso dos compósitos reforçados com fibras tratadas foi identificado um comportamento similar ao dos compósitos com fibras sem tratamento, houve uma redução de 47,94 % para o AFCS:IV e de 53,83 % para o AFCS:II em relação a suas referências. Entretanto, ao comparar o módulo de elasticidade dos compósitos com fibras tratadas e fibras *in natura*, pode-se verificar que o tratamento prévio das fibras proporcionou um pequeno aumento no módulo dos compósitos, de 6,72% para o AFCS:IV e de 7,66 % para o AFCS:II.

Tabela 4.14: Resultado do Módulo de elasticidade das argamassas. Fonte: AUTORA, 2019.

Argamassas	Módulo de Elasticidade (GPa)	Desvio Padrão
REF:IV	26,85	2,21
REF:II	29,22	2,99
AFC:IV	13,10	2,90
AFC:II	12,53	0,82
AFCS:IV	13,98	1,47
AFCS:II	13,49	0,29

Para os compósitos, o módulo de elasticidade compreende o somatório dos módulos isoladamente da matriz e da fibra, multiplicados pelo seu volume. Uma vez que o volume das fibras é consideravelmente inferior ao da matriz, o módulo do compósito depende principalmente do módulo da matriz. Para matriz com módulo elevado é necessário um grande volume de fibras para proporcionar ao compósito o comportamento elasto-plástico perfeito (SALVADOR, 2013).

A redução do módulo de elasticidade observado com a adição das fibras de curauá pode ser decorrente de um aumento no volume dos poros na matriz o que reduziu a rigidez

das argamassas (MELO FILHO, 2012). Dessa forma, pode-se supor que durante a mistura das fibras impregnadas com sílica ativa na argamassa, uma porção desse material pozolânico reagiu com a matriz proporcionando uma redução na sua porosidade, com isso, estes compósitos apresentaram maior rigidez do que os compósitos com fibras sem tratamento. Apesar destes compósitos terem apresentado uma redução drástica no seu módulo de elasticidade, isto pode proporcionar um aumento considerável na capacidade de deformação do material (ELSAID *et al.*, 2011).

4.4.4. Flexão

Na figura 4.15 temos os resultados para a resistência à flexão das argamassas produzidas com o cimento tipo CP-IV e avaliadas aos 28, 180 e 270 dias. Para a argamassa de referência REF:IV aos 28 dias foi obtido o valor de 2,84 MPa, aos 180 dias houve um incremento desse valor obtendo-se 3,71 MPa e ao final do envelhecimento a argamassa apresentou uma redução de 15,15 % resultando em 3,15 MPa. A adição das fibras de curauá *in natura* (AFC:IV) proporcionou um acréscimo de 42,06 % nesta propriedade do compósito em relação à matriz plena obtendo uma resistência à flexão de 4,03 MPa. Entretanto, aos 180 dias, houve uma redução de 5,59 % na resistência, se mostrando próxima àquela obtida pela argamassa sem reforço. Por fim, aos 270 dias, o compósito obteve resistência de 3,51 MPa, totalizando um decréscimo de 12,85 % na sua resistência.

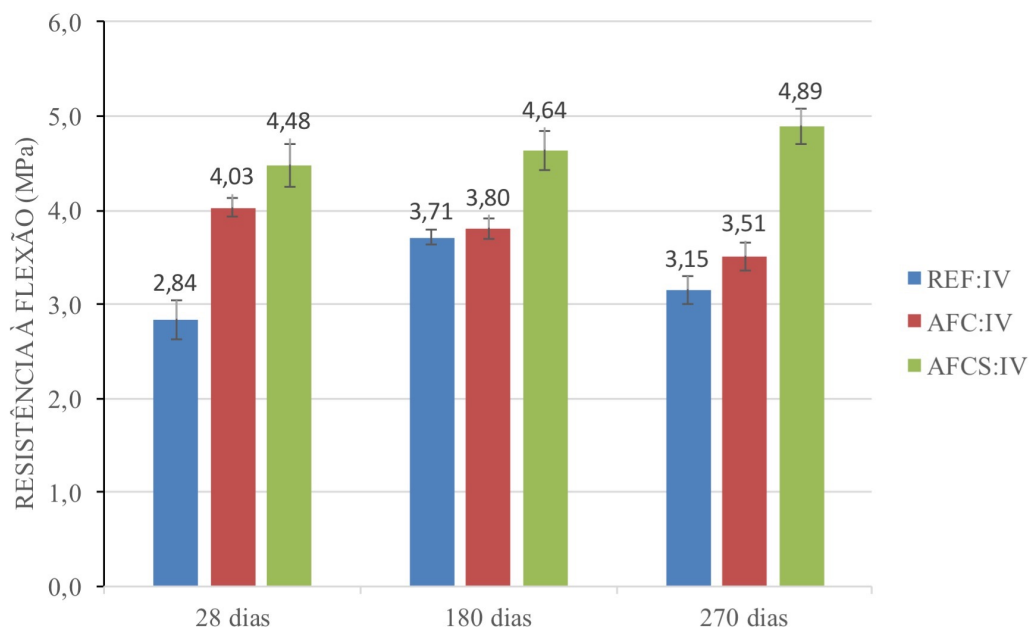


Figura 4.15: Resistência à flexão dos compósitos com cimento CP-IV. Fonte: AUTORA, 2019.

A redução na resistência à flexão do compósito após o envelhecimento natural é um grande indicativo da possível degradação das fibras naturais inseridas na matriz. Essa propriedade mecânica está sensivelmente relacionada à ligação fibra-matriz e a resistência mecânica das fibras. Com a exposição dos compósitos a intempéries, as fibras responsáveis pelo reforço da matriz, possivelmente apresentaram variação dimensional devido à absorção de água do compósito, o que reduziu sua aderência à matriz, como também podem ter sido mineralizadas pela presença dos produtos da hidratação do cimento, em especial do hidróxido de cálcio, que reduzem as propriedades mecânicas das fibras (SILVA; MARQUES; FORNARI JUNIOR, 2012).

Por sua vez, o compósito com fibras previamente impregnadas com sílica ativa (AFCS:IV), apresentou resistência à flexão aos 28 dias de 4,48 MPa, sendo 57,95 % superior à referência e 11,17 % superior ao compósito AFC:IV. Com o envelhecimento natural, aos 180 dias e 270 dias, o compósito apresentou resistências médias de 4,64 MPa e 4,89 MPa, respectivamente. Diferente do observado para os compósitos com fibras sem tratamento, o tratamento proposto foi eficaz em preservar a resistência à flexão do compósito mesmo após o envelhecimento natural.

A sílica ativa, por ser um material pozzolânico está associado ao consumo do hidróxido de cálcio livre e a produção de novos compósitos hidratados mais resistentes, além de diminuir a porosidade da matriz. Dessa forma, o tratamento proposto dificulta a percolação da água presente nos poros para as fibras, além de proteger as fibras de curauá da mineralização causada pela presença do hidróxido de cálcio. Com isso é possível reduzir ou evitar a fragilização dos compósitos (FARIAS FILHO; TOLEDO FILHO; LIMA, 2010).

A resistência à flexão para os compósitos com cimento CP-II E na sua composição pode ser verificada na figura 4.16. A argamassa de referência REF:II apresentou resistência de 2,86 MPa aos 28 dias, houve um aumento aos 180 dias obtendo 3,92 MPa e na avaliação final, aos 270 dias a resistência à flexão foi de 3,80 MPa. O compósito reforçado com fibras de curauá sem tratamento (AFC:II) apresentou aos 28 dias resistência de 4,06 MPa, 42,13 % superior àquela verificada para a argamassa plena. Aos 180 dias, houve um pequeno decréscimo resultando em uma resistência de 3,85 MPa. Enquanto que ao fim do envelhecimento natural, houve um decréscimo total de 24,10 % na sua resistência.

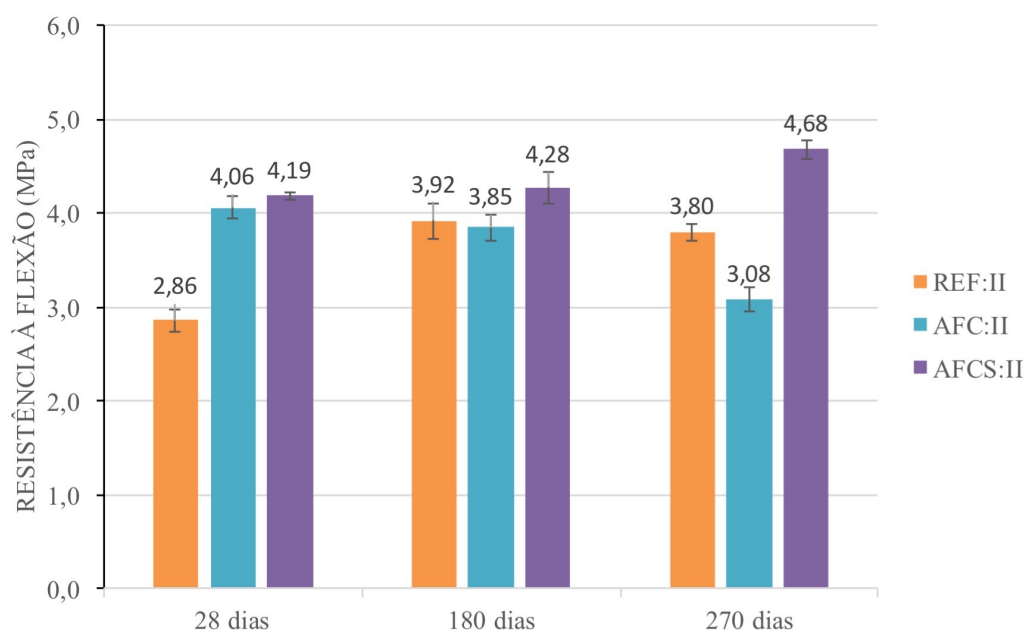


Figura 4.16: Resistência à flexão dos compósitos com cimento CP-II E. Fonte: AUTORA, 2019.

Assim como na argamassa AFC:IV, esse decréscimo pode ser relacionado com a degradação da fibra de curauá, entretanto, para a matriz de CP-II E essa degradação foi mais acentuada. A composição química desse cimento, indicou um maior teor de álcalis, o que pode acarretar uma matriz de maior alcalinidade, o que é um dos maiores responsáveis pela degradação da fibra natural. O meio alcalino, leva a degradação da lignina presente nas fibras o que ocasiona a separação dos seus filamentos e reduz a sua capacidade de reforço, como também é responsável pela hidrólise alcalina da celulose que causa degradação nas suas cadeias moleculares e redução no seu grau de polimerização o que diminui as propriedades mecânicas da fibra (LOPES, 2009).

O compósito AFCS:II com as fibras de curauá previamente tratadas, obteve aos 28 dias resistência de 4,19 MPa, próxima ao valor obtido para o AFC:II e 46,46 % superior ao da referência para a mesma idade. Aos 180 dias, o compósito apresentou resistência à flexão de 4,28 MPa e aos 270 dias com o fim do envelhecimento natural, o compósito evidenciou um acréscimo de 11,83 % na sua resistência. Este comportamento foi similar ao verificado para a argamassa ACFS:IV reforçada com fibras impregnadas. Da mesma forma, não foi verificado efeitos da degradação da fibra na resistência à flexão do compósito.

Na figura 4.17 podemos verificar os gráficos carga-deslocamento representativos obtidos com o ensaio de flexão para as amostras aos 28 dias. Nas figuras 4.17a e 4.17b temos o resultado para a argamassa de referência com matriz de cimento CP-IV e CP-II E,

respectivamente. Nota-se o comportamento frágil da argamassa cimentícia que perde sua capacidade de deformação após atingir o carregamento máximo suportado. Por sua vez, os compósitos AFC:IV e AFC:II (figuras 4.17c e 4.17d), apresentaram um comportamento pós-pico diferente, a adição das fibras de curauá retardou a fratura total do material, proporcionando maior deformação resultando em uma maior absorção de energia.

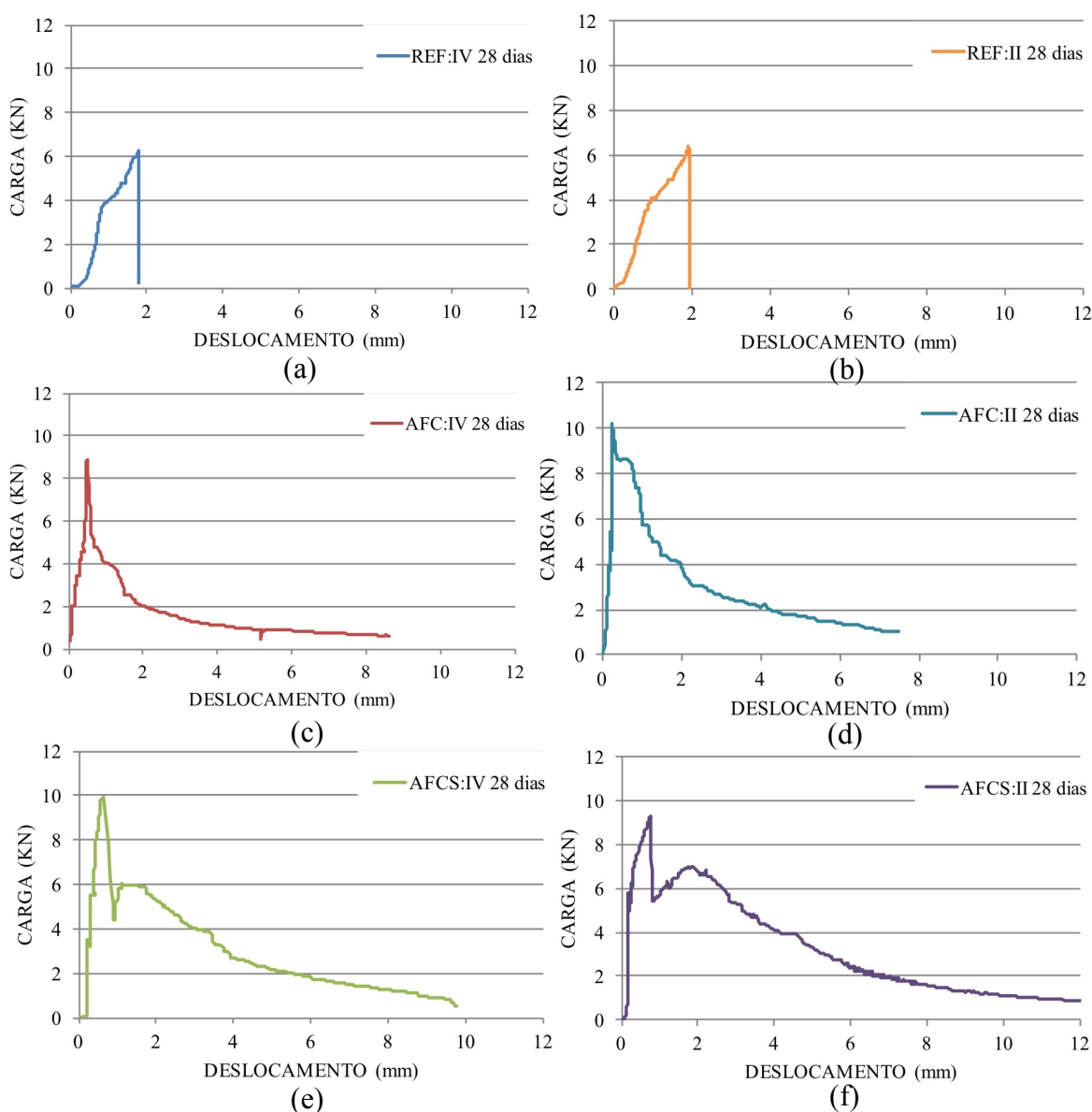


Figura 4.17: Gráfico Carga x Deslocamento dos compósitos aos 28 dias. (a) REF:IV, (b) REF:II, (c) AFC:IV, (d) AFC:II, (e) AFCS:IV, (f) AFCS:II. Fonte: AUTORA, 2019.

No caso dos compósitos com fibras previamente tratadas AFCS:IV e AFCS:II (figuras 4.17e e 4.17f), nota-se duas fases distintas, a primeira corresponde a zona elástica restringida até a primeira fissura, nesta fase a carga é suportada pela matriz cimentícia devido ao baixo módulo das fibras. Na segunda fase, a inelástica, as fibras são

responsáveis por suportar a carga. Primeiramente ocorre o decréscimo na carga após a primeira fissura que consiste na etapa de transmissão da carga da matriz para a fibra, em seguida pode-se verificar que as fibras aumentam a capacidade de carregamento do compósito e por fim, ocorre o deslizamento ou a ruptura das fibras reduzindo a capacidade de suportar o carregamento até resultar na fratura do compósito (CUNHA, 2007).

Após a primeira etapa do envelhecimento natural, aos 180 dias (figura 4.18), os compósitos reforçados com fibras *in natura* AFC:IV e AFC:II (figura 4.18c e 4.18d), mantiveram a capacidade de retardar a fratura do material, desacelerando o descarregamento em função de um maior deslocamento. Quanto as argamassas com fibras impregnadas, o compósito AFCS:IV (figura 4.18e), ainda apresentou um pequeno aumento na capacidade de carregamento da argamassa antes das fibras serem arrancadas ou fraturadas, o mesmo comportamento não pode ser observado para o compósito AFCS:II (figura 4.18f), cuja gráfico se assemelhou aqueles encontrados para as argamassas com fibras *in natura*, demonstrando que as fibras de curauá conseguiram apenas restringir a ruptura frágil do material.

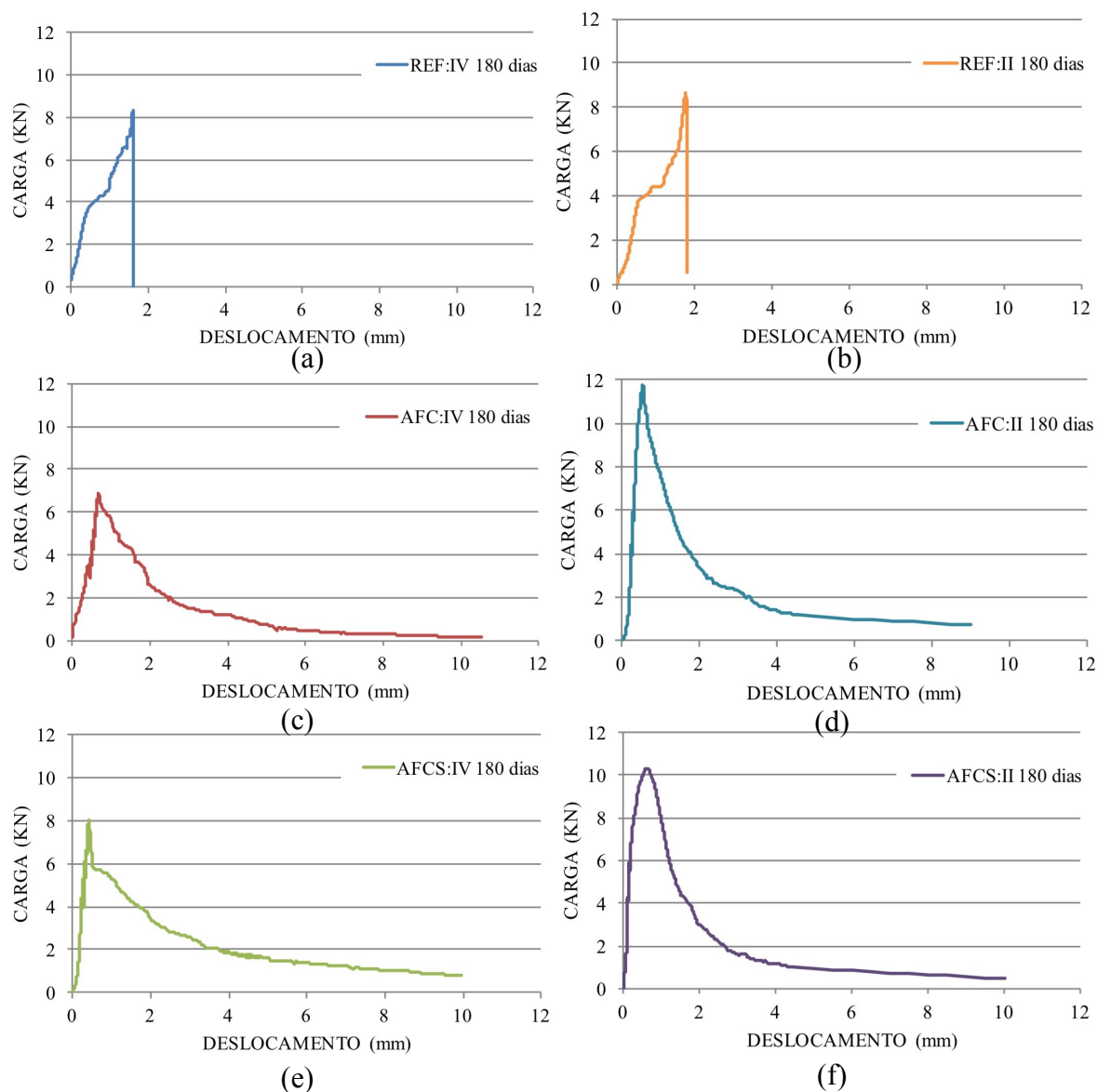


Figura 4.18: Gráfico Carga x Deslocamento dos compósitos aos 180 dias. (a) REF:IV, (b) REF:II, (c) AFC:IV, (d) AFC:II, (e) AFCS:IV, (f) AFCS:II. Fonte: AUTORA, 2019.

Ao final do envelhecimento natural aos 270 dias como pode ser visto na figura 4.19, as fibras inseridas no compósito AFC:IV (figura 4.19c) apresentaram uma redução na capacidade de suportar o carregamento, levando a uma ruptura do material com menor deformação. Para o compósito AFC:II (figura 4.19d) esse efeito foi mais significativo, as fibras de curauá perderam totalmente a sua capacidade de suportar tensões levando o compósito a uma ruptura brusca, similar ao observado para a argamassa de referência sem adição das fibras (figuras 4.19a e 4.19b). Esse comportamento pode ser justificado pela baixa durabilidade das fibras vegetais na matriz cimentícia. As fibras estão expostas a três formas de degradação que ocorrem simultaneamente na matriz: O ataque alcalino dos

constituintes amorfos da fibra, a hidrólise alcalina da celulose e a mineralização do lúmen. Estes processos resultam no enrijecimento da fibra que restringe a sua deformação e a capacidade de absorver energia, levando a um comportamento frágil (LOPES, 2009; WEI, 2014).

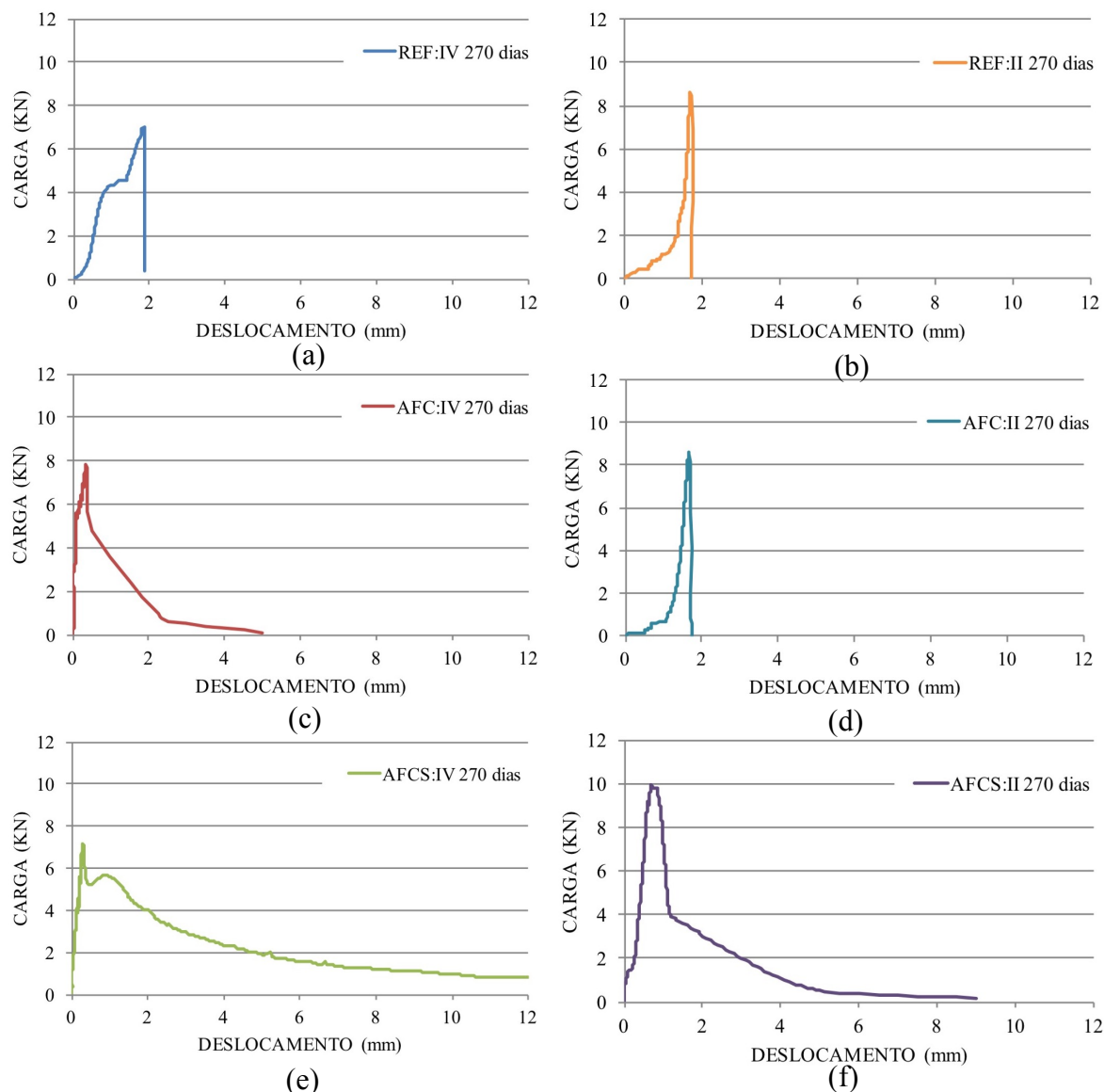


Figura 4.19: Gráfico Carga x Deslocamento dos compósitos aos 270 dias. (a) REF:IV, (b) REF:II, (c) AFC:IV, (d) AFC:II, (e) AFCS:IV, (f) AFCS:II. Fonte: AUTORA, 2019.

Por sua vez, para o compósito com fibras tratadas AFCS:IV (Figura 4.19e), mesmo após o envelhecimento natural, as fibras de curauá ainda mantiveram a sua capacidade de transferir tensões na matriz e pode ser verificado que as mesmas foram responsáveis por um aumento no carregamento seguido por uma redução gradual na capacidade de suportar cargas. Para o compósito AFCS:II (figura 4.19f), identificou-se um resultado similar ao obtido para o compósito aos 180 dias (figura 4.18f), apesar do material apresentar um

comportamento inelástico e alcançar uma elevada carga para a primeira fissura, as fibras inseridas não conseguiram elevar a capacidade de carregamento, mas foram eficazes em retardar a ruptura total do compósito.

4.4.5. Tenacidade

A partir dos gráficos carga x deslocamento obtidos no ensaio de flexão dos compósitos, calculou-se os índices de tenacidade para cada mistura avaliadas aos 28, 180 e 270 dias (figura 4.20). Como pode ser visto na figura 4.20a, o compósito AFC:IV obteve aos 28 dias índices de tenacidade I_5 , I_{10} e I_{20} iguais a 3,53; 4,92; 6,63; respectivamente. Durante o envelhecimento natural, aos 180 dias, apesar da pequena redução na resistência à flexão, o compósito preservou a sua tenacidade. Entretanto, aos 270 dias, a redução da resistência à flexão foi acompanhada da redução dos índices de tenacidade I_5 , I_{10} e I_{20} para 2,21; 3,76; 4,30; respectivamente.

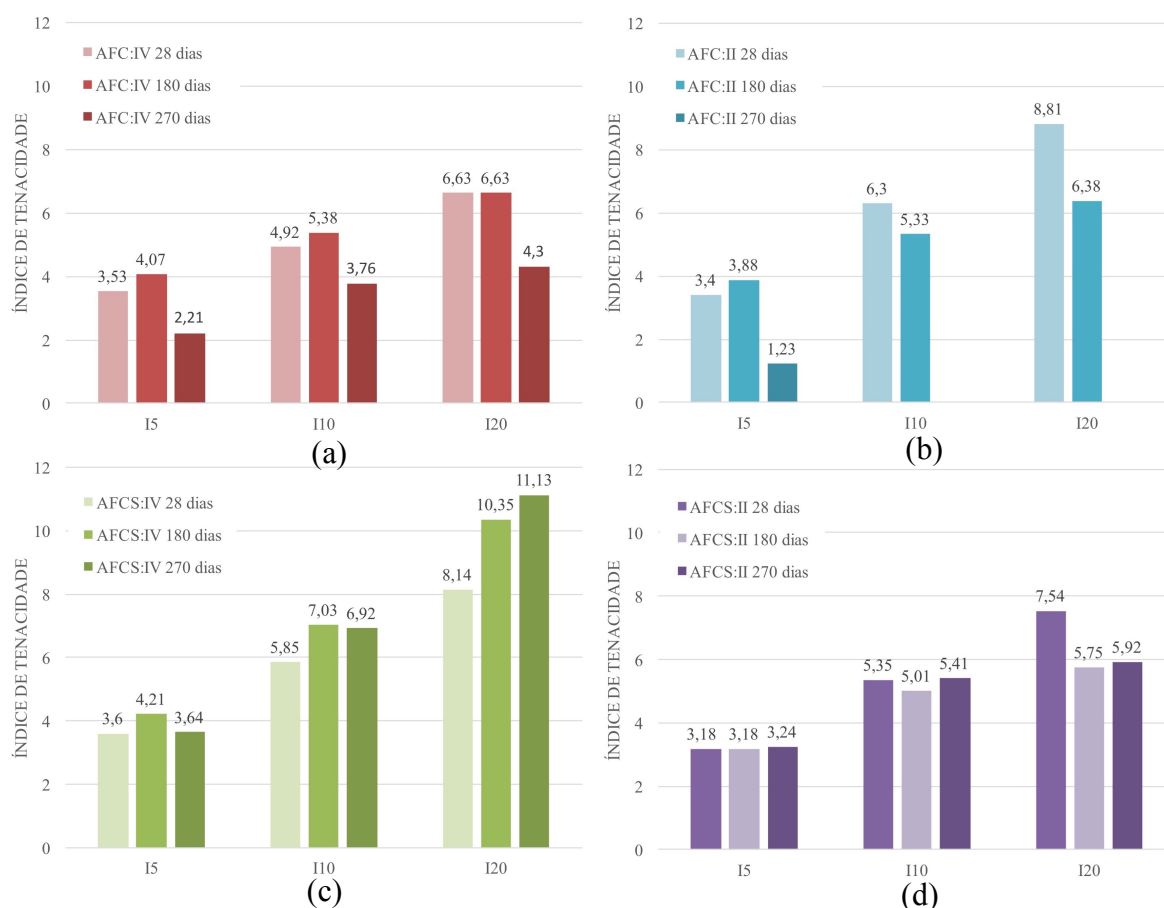


Figura 4.20: Índices de Tenacidade para os compósitos. (a) AFC:IV, (b) AFC:II, (c) AFCS:IV, (d) AFCS:II Fonte: AUTORA, 2019.

O compósito AFC:II (figura 4.20b), apresentou aos 28 dias índices de tenacidade I_5 , I_{10} e I_{20} iguais a 3,40; 6,30; 8,81; respectivamente. Nota-se que o índice I_5 foi inferior

àquele obtido para o compósito AFC:IV, entretanto, os índices I_{10} e I_{20} foram consideravelmente superiores, isso indica que o compósito AFC:II teve um melhor desempenho para grandes deformações em relação às deformações baixas. Por sua vez, aos 180 dias, o índice I_5 apresentou um acréscimo de 14,11%, porém os índices I_{10} e I_{20} demonstraram redução na tenacidade do compósito. Por fim, aos 270 dias, o material teve uma severa redução na tenacidade, como identificado pelo seu gráfico carga x deslocamento (figura 4.19d), que apresentou um comportamento praticamente frágil, além disso, essa redução foi acompanhada da queda na resistência à flexão do compósito.

As principais vantagens da adição de fibras vegetais em argamassas cimentícias estão relacionados aos ganhos de resistência à tração, à flexão e a tenacidade do compósito. Sendo assim, estas propriedades mecânicas serão mais sensíveis aos efeitos da degradação da fibra de curauá. No caso das matrizes frágeis com adição de fibras de baixo módulo de elasticidade, a aderência fibra-matriz tem maior influência sobre a tenacidade do compósito, uma vez que o arrancamento das fibras predomina sobre a sua ruptura (SAVASTANO JÚNIOR, 2000). Dessa forma, a redução na tenacidade dos compósitos AFC:IV e AFC:II são indicativos da degradação da fibra como também da redução da ligação fibra-matriz, sendo estes efeitos mais evidentes no compósito com matriz de cimento CP-II E.

O compósito com fibras tratadas AFCS:IV (figura 4.20c), apresentou aos 28 dias índices de tenacidade I_5 , I_{10} e I_{20} de 3,6; 5,85; 8,14, sendo superiores aos obtidos para o compósito com fibras *in natura* (figura 4.20a) para a mesma idade. Com o envelhecimento natural, aos 180 dias, pode ser verificado um ganho na tenacidade do compósito para todos os índices. Aos 270 dias, verificou-se uma pequena redução nos índices I_5 e I_{10} , porém um aumento considerável no índice I_{20} , dessa forma, observa-se que o compósito conseguiu preservar as suas propriedades mecânicas apesar do envelhecimento natural, tendo um melhor desempenho quando submetido a grandes deformações.

No caso do compósito AFCS:II (figura 4.20d), com o cimento tipo CP-II E, foi observado um comportamento diferente. Mesmo com o envelhecimento natural, os índices de tenacidade I_5 e I_{10} foram similares para todas as idades avaliadas, enquanto que o índice relacionado a grandes deformações I_{20} apresentou uma redução de 23,74% aos 180 dias, porém foi preservado até a avaliação final aos 270 dias. Apesar dessa variação, o compósito manteve sua capacidade de suportar carga como foi observado pelo resultado para o ensaio de resistência à flexão.

4.5. Análise Mineralógica

Foi identificada a mineralogia das argamassas com adição das fibras de curauá, sendo avaliadas quatro famílias: AFC:IV e AFC:II cujas fibras foram adicionadas *in natura*; AFCS:IV e AFCS:II onde a argamassa foi reforçada pelas fibras impregnadas com sílica ativa. Devido a utilização de argamassas com grande proporção de agregado miúdo (Traço 1:3), em todos os difratogramas o pico de quartzo de maior intensidade correspondente a areia, portanto foi seccionado permitindo a visualização dos outros elementos cristalinos encontrados. Na figura 4.21 temos os difratogramas obtidos para a argamassa AFC:IV nas três idades avaliadas, 28, 180 e 270 dias.

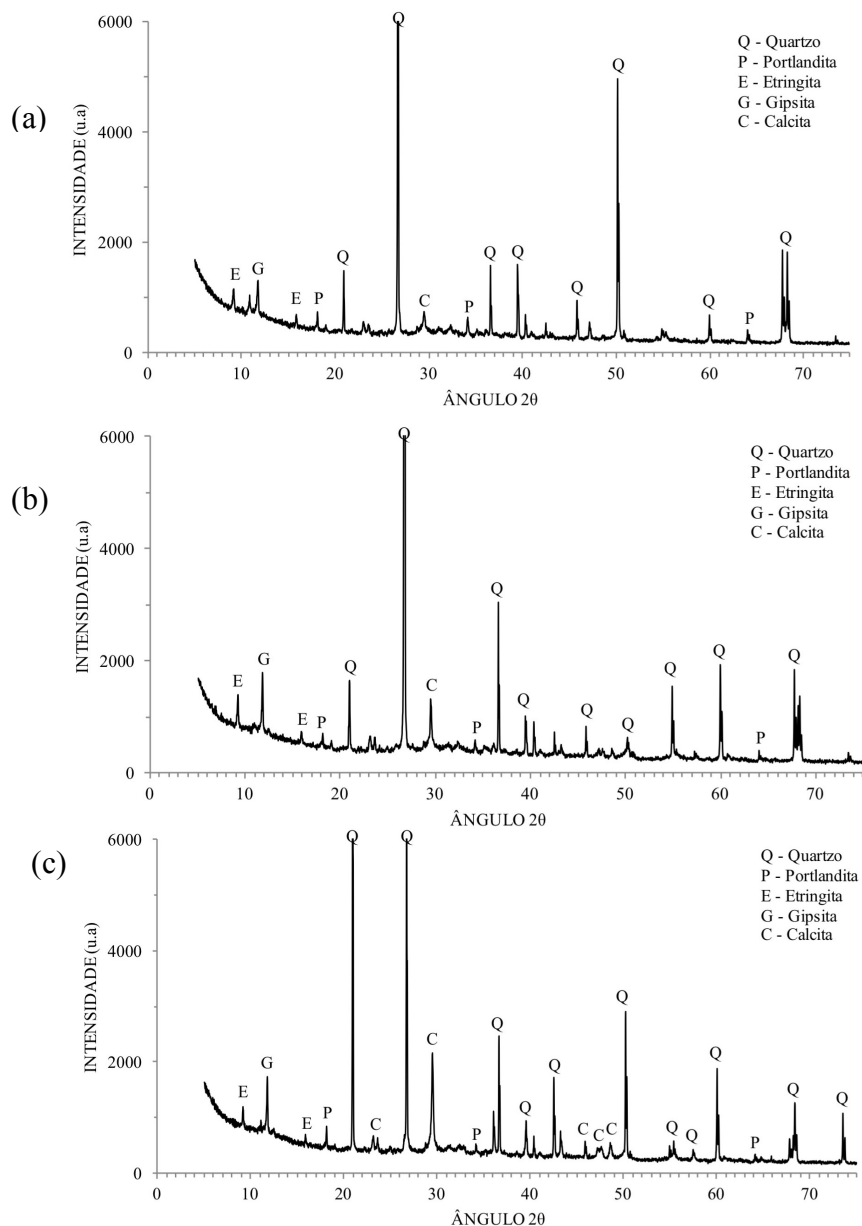


Figura 4.21: Difratogramas das argamassas AFC:IV. (a) 28 dias, (b) 180 dias, (c) 270 dias. Fonte: AUTORA, 2019.

Observando a figura 4.21a, verifica-se a mineralogia da argamassa AFC:IV aos 28 dias, dentre os principais picos encontrados temos: a portlandita, a etringita, a gipsita e a calcita. Após o envelhecimento natural, aos 180 dias (figura 4.21b), essa argamassa apresentou um aumento nos picos de etringita, gipsita e calcita, para a portlandita não foi verificado aumento significativo. Aos 270 dias (figura 4.21c), podemos ver a tendência de crescimento para o pico de gipsita, além do surgimento de diversos picos de calcita. Em relação a portlandita, pode-se verificar um leve aumento na sua intensidade.

A presença da calcita, identificada logo após os 28 dias de cura na água da argamassa, pode ser indicativo de uma rápida carbonatação da matriz. Este processo poderia ser justificado pela adição de fibras que acarreta um aumento na incidência de poros capilares. A carbonatação pode proporcionar o decréscimo da alcalinidade da água presente nos poros da matriz o que poderia contribuir para a preservação das fibras de curauá nas primeiras idades, mantendo suas propriedades mecânicas aos 28 e 180 dias. Por sua vez, foi observada a presença de gipsita, possivelmente originada da carbonatação da etringita. A etringita encontrada na argamassa é um componente expansivo que pode levar a fissuração e a perda da resistência mecânica (BALBINO, 2012; JOHN *et al.*, 2005).

Na figura 4.22, temos as difratometrias para os compósitos com fibras de curauá tratadas com impregnação com sílica ativa (ACFS:IV). Aos 28 dias (figura 4.22a), pode-se identificar picos de etringita e de calcita. Com o envelhecimento natural, aos 180 dias (figura 4.22b), houve uma intensificação dos picos de etringita e de calcita. Aos 270 dias (figura 4.22c), no final do envelhecimento natural, o difratograma do compósito não apresentou mais picos de etringita, enquanto que se observou a tendência do aumento da intensidade dos picos de calcita e o surgimento de novos.

Na argamassa AFCS:IV foi identificado maiores picos de calcita, que pode ser proveniente da reação da portlandita presente na matriz com o dióxido de carbono (CO_2) disponível na atmosfera (FARRAPO, 2015). A carbonatação da matriz proporciona um meio mais favorável para as fibras vegetais, uma vez que diminui a sua alcalinidade pelo consumo dos compostos alcalinos da pasta como hidróxido de potássio (KOH), hidróxido de sódio (NaOH) e a portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) aumentando a durabilidade do compósito.

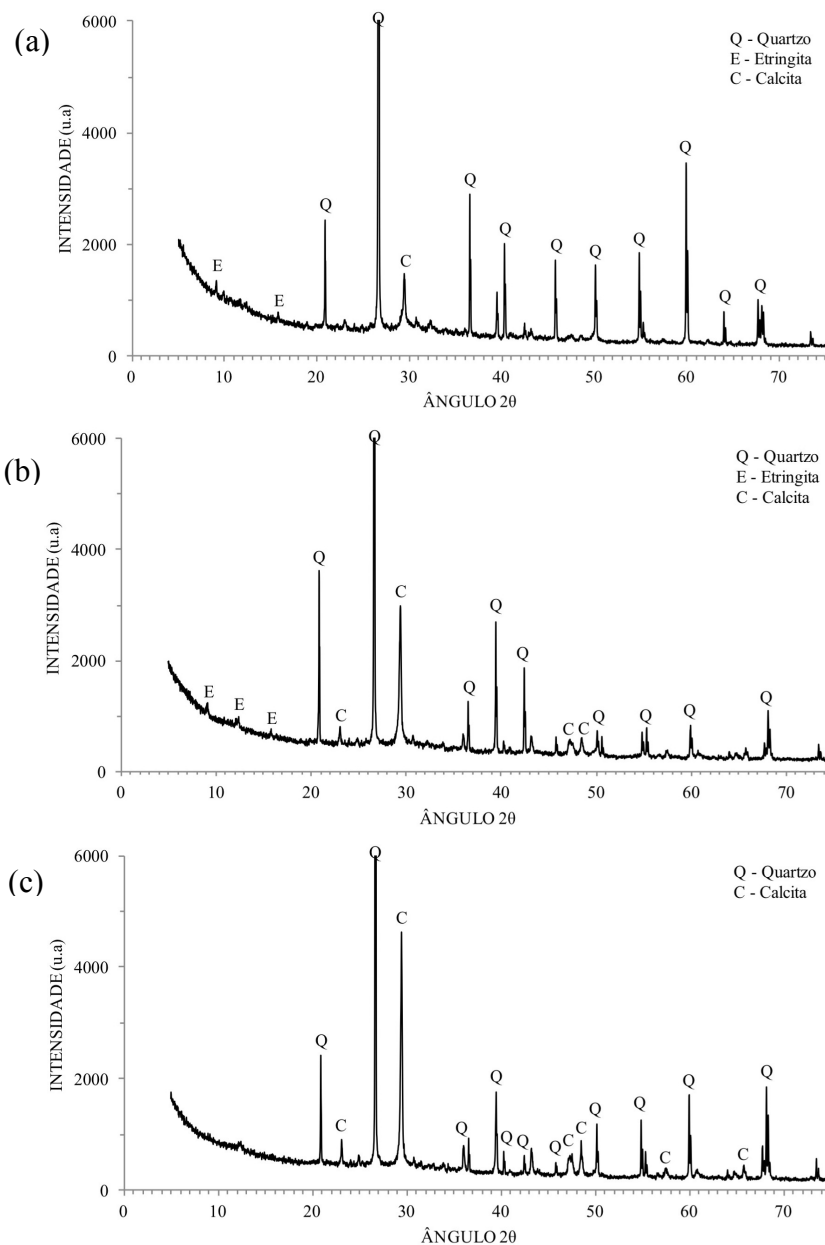


Figura 4.22: Difratomogramas das argamassas AFCS:IV. (a) 28 dias, (b) 180 dias, (c) 270 dias. Fonte: AUTORA, 2019.

A presença da sílica ativa na argamassa pode ter proporcionado um aumento na carbonatação do material, pois durante a reação pozolânica ocorre a diminuição do teor de álcalis devido a reação da sílica com a portlandita (KULAKOWSK, 2002). A diminuição e decomposição dos picos de etringita pode estar relacionado com a reação pozolânica, uma vez que a formação da etringita depende do teor de portlandita presente na pasta (BALBINO, 2012).

Dessa forma, a reação pozolânica na matriz e o processo de carbonatação, podem ter proporcionado uma argamassa livre de portlandita e possivelmente menos alcalina. Esses dois fatores poderiam contribuir para a preservação das fibras de curauá que

mantiveram sua capacidade de reforço mesmo após o envelhecimento natural do compósito. Isso corrobora com os resultados das propriedades mecânicas obtidas para este compósito que não apresentou redução na sua resistência nas idades avaliadas.

Ao analisar diretamente o pico de portlandita para a argamassa com fibras *in natura* AFC:IV (figura 4.23a), observa-se que até os 180 dias a evolução desse pico foi restringida, possivelmente devido ao processo de carbonatação da matriz, entretanto, não foi suficiente para conter o processo de formação da portlandita, levando a uma aumento na sua intensidade aos 270 dias. Por sua vez, para a argamassa com fibras tratadas AFCS:IV (figura 4.23b), não foi identificado picos de portlandita mesmo após o envelhecimento da matriz, isso pode ter sido proporcionado por dois mecanismos ocorrendo simultaneamente na argamassa: a carbonatação e a reação pozolânica da sílica ativa que podem ter consumido o hidróxido de cálcio existente na argamassa, entretanto seria necessária uma investigação mais aprofundada para quantificar e constatar essa hipótese.

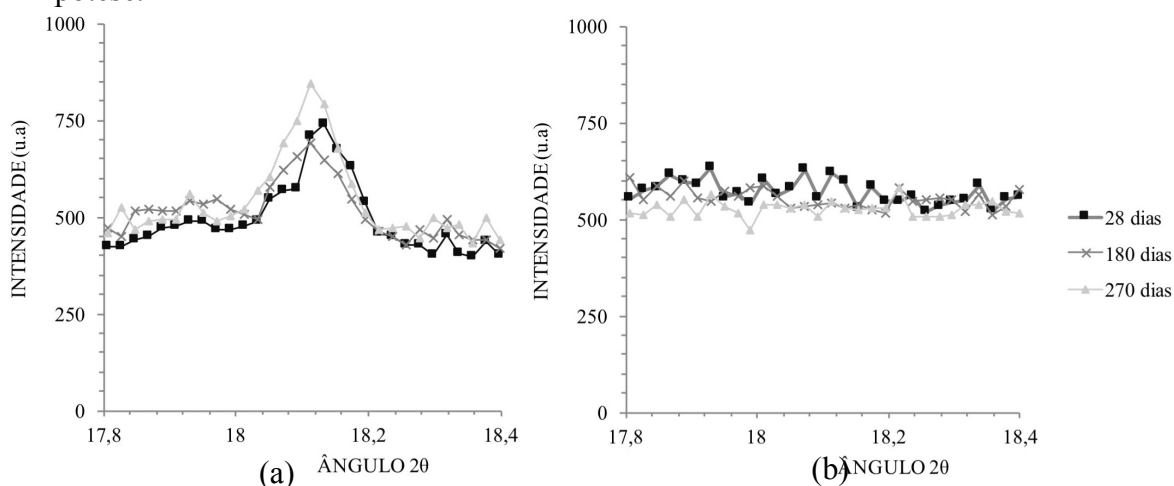


Figura 4.23: Portlandita em $18,1^{\circ}2\theta$ em argamassa com cimento CP-IV. (a) AFC:IV, (b) AFCS:IV.

Fonte: AUTORA, 2019.

Os compósitos produzidos com cimento tipo CP-II E também tiveram a sua mineralogia avaliada, como pode ser verificado na figura 4.24. Aos 28 dias (figura 4.24a) na argamassa AFC:II foram encontrados picos de portlandita, de calcita e de etringita, com menor intensidade. Para a análise aos 180 dias (figura 4.24b), pode-se identificar um aumento na intensidade dos picos de portlandita e de calcita, como também o surgimento de um pico de gipsita. Por fim, aos 270 dias (figura 4.24c) a argamassa manteve a tendência de aumento da intensidade da calcita e da portlandita, entretanto, não foi mais identificada a etringita e a gipsita.

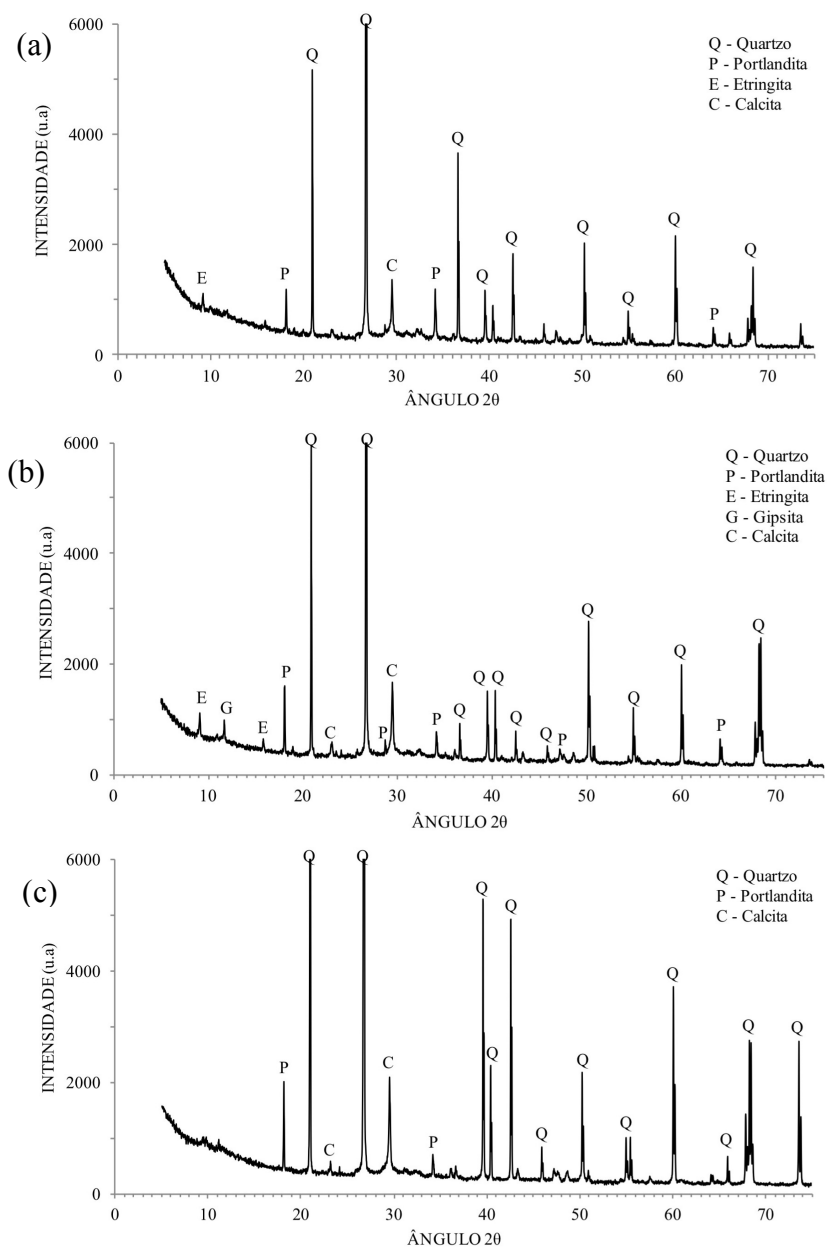


Figura 4.24: Difratomogramas das argamassas AFC:II. (a) 28 dias, (b) 180 dias, (c) 270 dias. Fonte: AUTORA, 2019.

A argamassa AFC:II, após o envelhecimento natural apresentou redução nas suas propriedades mecânicas. Por meio da análise do seu difratograma nota-se a presença de elevados picos de portlandita, esses grandes cristais são responsáveis por provocar a decomposição das fibras vegetais, em especial da porção de lignina, reduzindo a sua capacidade de reforço em idades mais avançadas. Essa decomposição é facilitada pela alta alcalinidade da água presente nos poros da matriz, proveniente da composição química do cimento CP-II E que apresenta maior teor de álcalis (SILVA; MARQUES; FORNARI JUNIOR, 2012).

Outro fator que pode ter contribuído para a redução da resistência identificada aos 270 dias é o processo de mineralização da fibra, onde os produtos hidratados do cimento se formam nos vazios da fibra levando a sua ruptura frágil. Esse processo pode acontecer mesmo em ambientes suscetíveis à carbonatação, devido a redução do pH e o aumento na solubilidade dos produtos de hidratação (SAVASTANO JÚNIOR, 2000).

Para o compósito com fibras tratadas AFCS:II, o difratograma aos 28 dias de idade da argamassa (figura 4.25a) indicou a presença de picos de etringita e de calcita. Na análise aos 180 dias (figura 4.25b), foi verificado o aumento na intensidade da calcita, como também o surgimento de outros picos desse mineral. No final do envelhecimento natural, aos 270 dias (figura 4.25c) manteve-se a tendência do aumento da intensidade da calcita como também o surgimento de novos picos, enquanto que houve uma redução na presença de picos de etringita.

Mesmo a argamassa AFCS:II ser constituída de um cimento com maior teor de álcalis, a carbonatação da matriz pode ser acentuada uma vez que a sua porosidade, decorrente da adição das fibras vegetais, facilita a penetração do CO_2 levando a formação de carbonato de cálcio no seu interior. Pode ser considerado que o seu efeito é favorável ao compósito, uma vez que esse processo consome os álcalis presentes nos poros reduzindo o seu pH (SILVA, 2002).

Juntamente com a carbonatação da matriz, a reação pozolânica, originada pelo tratamento das fibras de curauá com a pasta de sílica ativa, podem ter reagido com a portlandita formada pela hidratação do cimento. Como resultado dessa reação novos compostos de silicato de cálcio hidratado podem ter sido formados proporcionando maior resistência à argamassa. Kulakowsk (2002), identificou que o consumo de portlandita é proporcional a diminuição do pH da argamassa, dessa forma, o tratamento proposto para as fibras foi eficaz em aumentar a durabilidade do compósito preservando assim sua resistência mecânica após o envelhecimento natural.

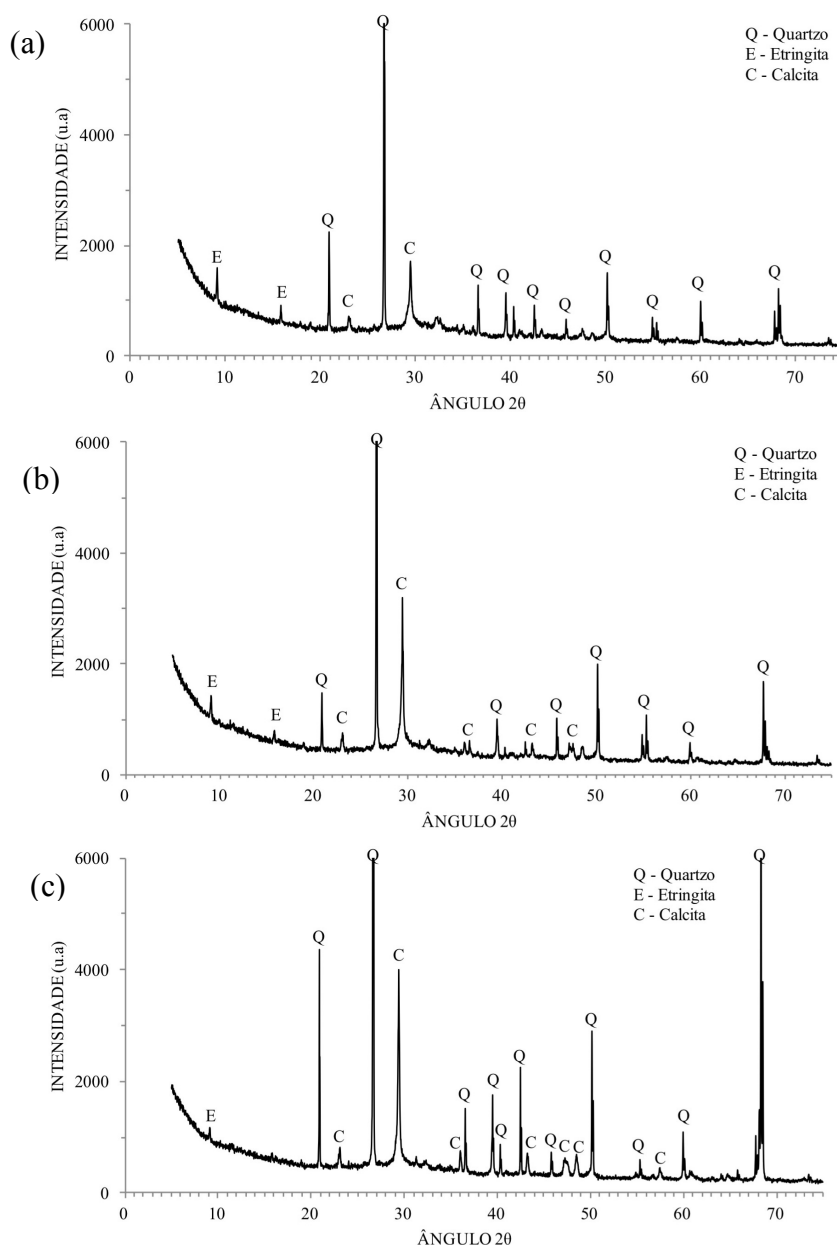


Figura 4.25: Difratoigramas das argamassas AFCS:II. (a) 28 dias, (b) 180 dias, (c) 270 dias. Fonte: AUTORA, 2019.

Analisando isoladamente o pico da portlandita (figura 4.26) nas argamassas constituídas de cimento tipo CP-II E, pode-se verificar para o compósito AFC:II que o envelhecimento natural levou a um aumento considerável na intensidade do pico de portlandita o que sugere um meio mais agressivo para a degradação das fibras de curauá. Por sua vez, a argamassa cujas fibras tiveram tratamento prévio com pasta de sílica ativa (AFCS:II) não apresentou picos de portlandita que não apresentaram variação de sua intensidade ao longo do envelhecimento, isso demonstrou a eficácia do tratamento em proporcionar uma matriz menos favorável a degradação das fibras de curauá.

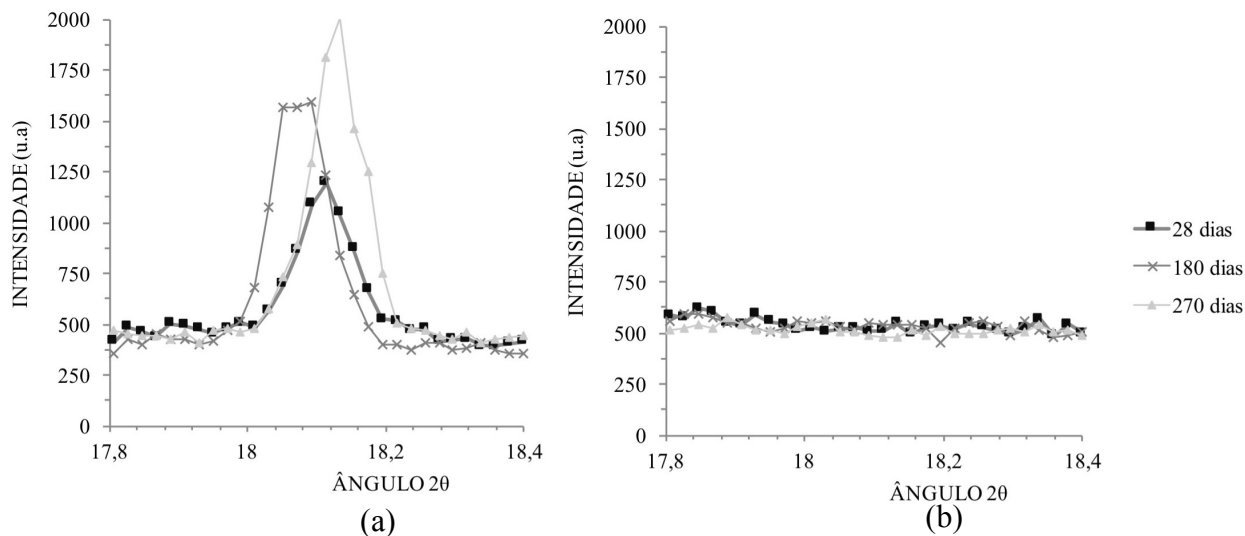


Figura 4.26: Portlandita em $18,1^{\circ}2\theta$ em argamassa com cimento CP-II E. (a) AFC:II, (b) AFCS:II.

Fonte: AUTORA, 2019.

4.6. Análise Microestrutural

Por meio da verificação da superfície da fratura dos compósitos é possível realizar uma análise visual da microestrutura das fibras de curauá e identificar sinais da sua degradação. Na primeira análise, aos 28 dias, pode-se verificar que a fibra de curauá inserida na argamassa AFC:IV (figura 4.27a) manteve a sua morfologia inicial não apresentando precipitação dos produtos da hidratação do cimento, entretanto observou-se algum desprendimento das microfibrilas de celulose, na figura 4.27b podemos ver que apesar de apresentar pequenos vazios que indiquem uma variação dimensional da fibra, foi observada uma boa aderência da fibra na matriz.

Por sua vez, a fibra inserida no compósito AFC:II (figura 4.27c), apresentou indicativos de degradação pela decomposição da lignina que levaram a exposição de algumas microfibrilas de celulose. Observando a região de interface da fibra-matriz (figura 4.27d), observa-se alguns vazios os quais podem ter sido originados da variação do volume da fibra e que a longo prazo podem contribuir para a redução das propriedades mecânicas do compósito, pois geram danos a ligação da fibra na matriz. Também é possível notar que essa matriz apresentou maior porosidade o que pode acelerar o processo de degradação das fibras de curauá (SAVASTANO JÚNIOR, 2000).

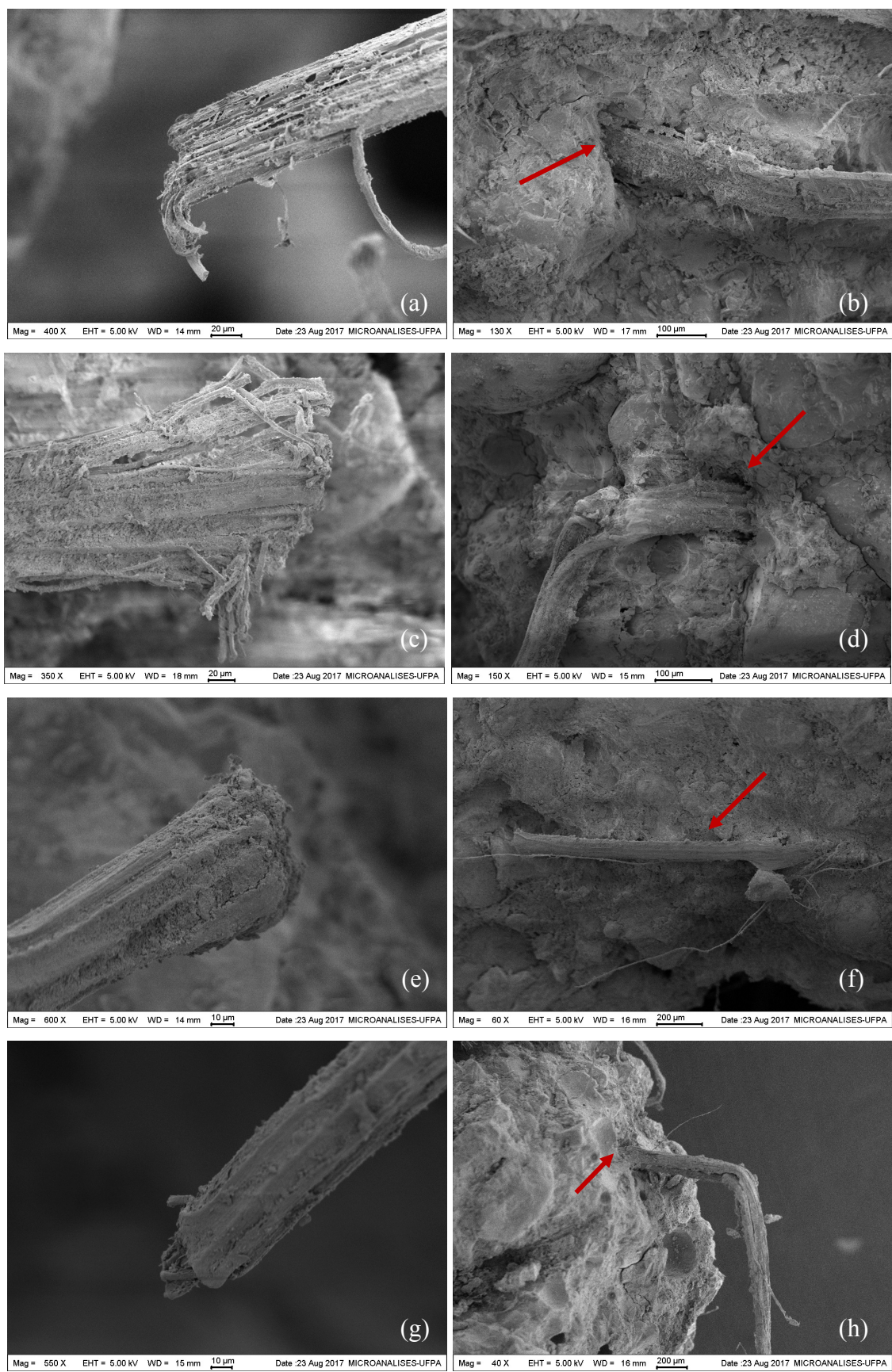


Figura 4.27: Micrografias dos compósitos após 28 dias, (a) e (b) AFC:IV, (c) e (d) AFC:II, (e) e (f) AFCS:IV, (g) e (h) AFCS:II. Fonte: AUTORA, 2017.

Quanto ao compósito AFCS:IV, a superfície da fibra (figura 4.27e) manteve-se intacta após 28 dias sem sinais de mineralização ou de defeitos causados pela degradação, isso é devido a modificação da matriz pelo tratamento com pasta de sílica ativa que proporcionou uma redução no teor de portlandita. Observando a zona de transição (figura 4.27f), nota-se boa aderência da fibra na matriz que por sua vez se apresentou mais densa. Para o compósito AFCS:II a fibra apresentou uma morfologia similar (figura 4.27g), apresentando boa integridade sem sinais da degradação da lignina presente nas fibras. Sua argamassa (figura 4.27h) apresentou pequenas incidência de poros, mas proporcionou uma interação fibra-matriz eficiente como pode ser constatado nos resultados dos ensaios mecânicos.

As imagens obtidas para os compósitos após 180 dias podem ser vistas na figura 4.28. A secção da fibra inserida na argamassa AFC:IV (figura 4.28a) apresentou na sua superfície produtos da hidratação do cimento, apesar disso, manteve sua aparência próxima a inicial, isso pode ser justificado pelo cimento utilizado ter menor teor de álcalis e restringir o desenvolvimento de hidróxido de cálcio. Além disso, foi observada na sua mineralogia a carbonatação da argamassa que nessa situação foi benéfica na preservação das fibras de curauá. Analisando a sua superfície e interação com a argamassa (figura 4.28b) pode ser visto uma menor retração da fibra que manteve a sua ligação na matriz, o que também pode ser resultado do ambiente com menor alcalinidade.

Na figura 4.28c, podemos verificar sinais de degradação da fibra de curauá inserida na argamassa AFC:II, a alcalinidade da argamassa solubiliza a lignina presente na fibra que atua como um ligante das microfibrilas de celulose, tal processo, que pode ser chamado de desfibrilamento, leva a separação das microfibrilas do feixe (LOPES, 2009). Também se nota danos mais severos na zona de transição (figura 4.28d), a exposição do compósito em ambiente natural produziu ciclos de umedecimento (chuva) e de secagem (exposição ao sol) que ocasionaram variação dimensional na fibra levando a uma perda da sua aderência na matriz.

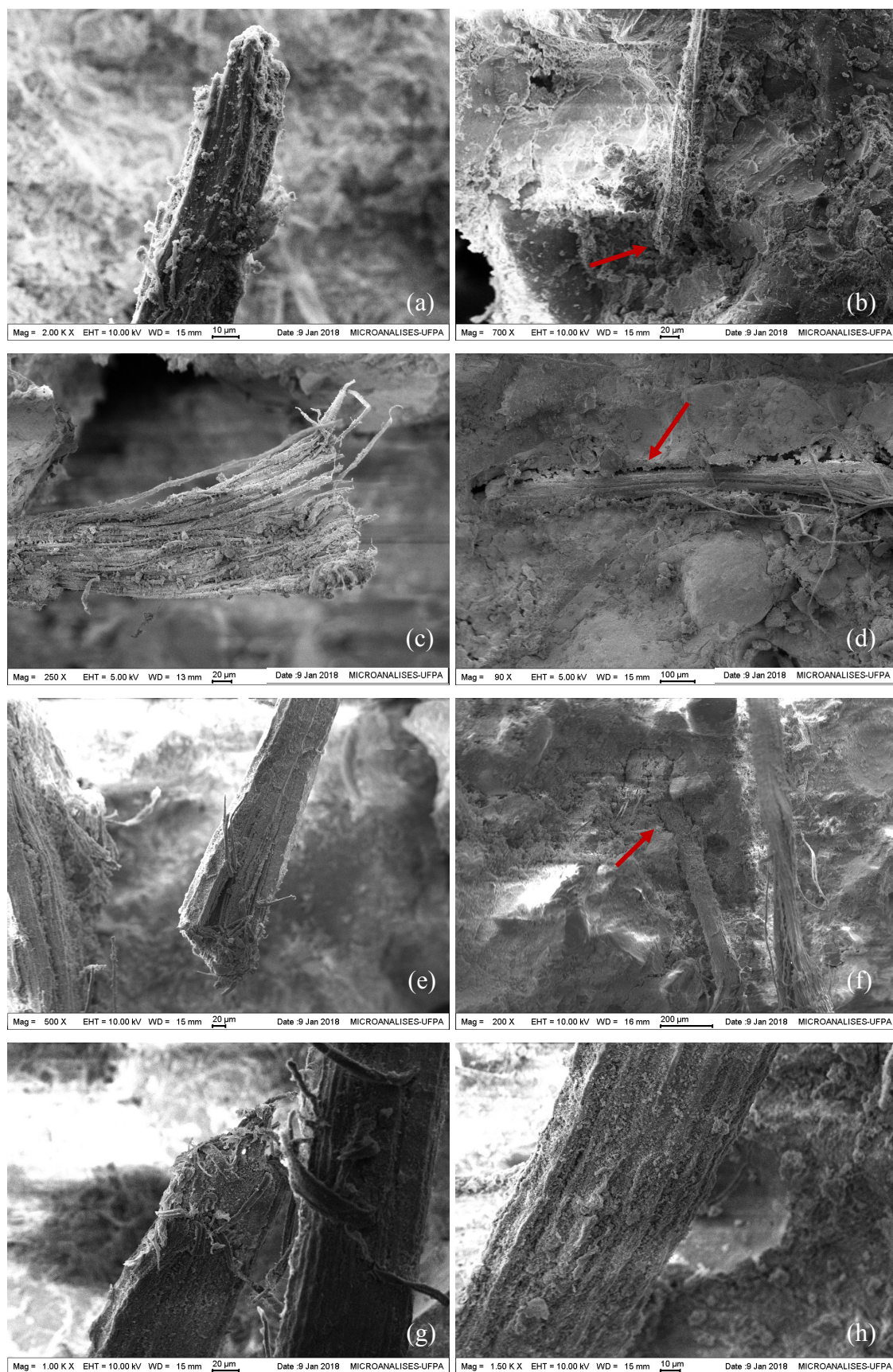


Figura 4.28: Micrografias dos compósitos após 180 dias, (a) e (b) AFC:IV, (c) e (d) AFC:II, (e) e (f) AFCS:IV, (g) e (h) AFCS:II. Fonte: AUTORA, 2018.

Quanto a fibra inserida no compósito AFCS:IV (figura 4.28e) não foi verificada a deposição de produtos da hidratação do cimento na sua superfície, isso pode ser explicado devido a reação pozolânica na argamassa que levou ao consumo do hidróxido de cálcio. Com isso, nota-se que a fibra se manteve quase intacta apenas com alguns sinais de rachadura na sua seção transversal. Na figura 4.28f, pode ser verificado que o espaço entre a fibra e a matriz é menor do que o encontrado para os outros grupos, isso pode ser um indicativo de que o tratamento com sílica ativa levou a uma menor variação dimensional da fibra e proporcionou melhor aderência.

Para a fibra no compósito AFCS:II (figura 4.28g) alguns sinais de desfibrilação parcial foram identificados, apesar da mesma preservar a morfologia próxima da inicial. Na sua superfície (figura 4.28h) não foram identificados produtos da hidratação do cimento o que é um indicativo que a impregnação das fibras com sílica ativa reduziu o hidróxido de cálcio mesmo na argamassa que empregou o cimento com maior teor de álcalis.

Nota-se na figura 4.29a que a fibra inserida na argamassa AFC:IV aos 270 dias apresentou um alargamento na sua seção, indicando um baixo nível da hidrólise alcalina das fases amorfas. Além disso, tanto a sua superfície quanto os seus lúmens encontram-se saturados pelos produtos de hidratação do cimento, em especial pelo hidróxido de cálcio indicando o processo de degradação alcalina da fibra. Na figura 4.29b, podemos ver o processo de expansão da fibra de curauá que tem o aumento progressivo da sua seção o que remete ao processo de decomposição da lignina, hemicelulose e celulose que ocorre progressivamente da superfície para o interior da fibra levando a perda da sua capacidade de reforço.

Observando o compósito AFC:II após o envelhecimento natural (figura 4.29c) a fibra de curauá apresenta suas microfibrilas expostas e recobertas por produtos da hidratação do cimento, que podem indicar a mineralização das paredes celulares, tal processo leva a uma fragilização da fibra perdendo sua capacidade de reforço. Quanto a argamassa (figura 4.29d), verifica-se uma grande incidência de poros, além de grande desfibrilamento do feixe de fibra, um indicativo da alta alcalinidade e de teores de portlandita na matriz, além disso, nota-se uma diminuição da aderência fibra-matriz resultando na perda da capacidade de transferir tensões.

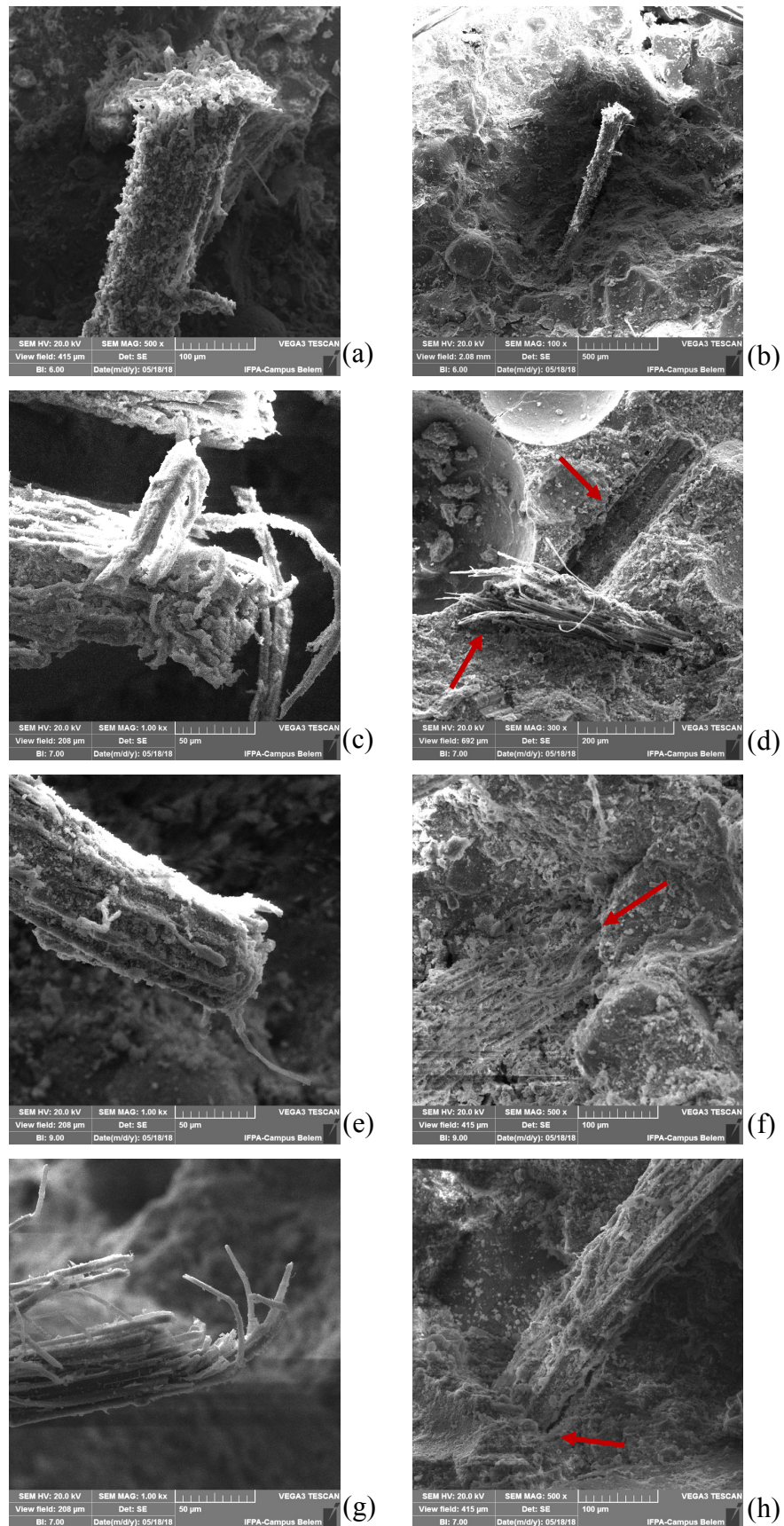


Figura 4.29: Micrografias dos compósitos após 270 dias (a) e (b) AFC:IV, (c) e (d) AFC:II, (e) e (f) AFCS:IV, (g) e (h) AFCS:II. Fonte: AUTORA, 2018.

Pode-se verificar na figura 4.29e, que a impregnação prévia das fibras com pasta de sílica ativa melhorou a durabilidade das fibras de curauá, preservando sua morfologia inicial. É possível que o tratamento proposto restringiu a mineralização das paredes celulares uma vez que reduziu os teores de hidróxido de cálcio. Não é possível identificar produtos da hidratação do cimento na seção da fibra e na sua superfície (figura 4.29f), a interação fibra-matriz foi preservada devido a diminuição da retração da fibra e da redução da alcalinidade da matriz devido a reação pozolânica da sílica ativa. Para as fibras inseridas na argamassa AFCS:II (figura 4.29g) foi observada uma leve desfibrilação causada pela alcalinidade do cimento empregado, entretanto, observando-se a figura 4.29h, nota-se que foi preservada a ligação da fibra com a matriz o que ainda proporcionou o reforço do compósito.

Em suma, a degradação da fibra foi observada em maior intensidade no compósito AFC:II, esse resultado corrobora com a mineralogia observada para esta argamassa que apresentou maiores intensidade de portlandita, essa degradação também pode ser constatada por meio da redução das propriedades mecânicas do material após o envelhecimento natural. Para as fibras inseridas nas argamassas AFC:IV os efeitos da degradação foram menos intensos, podendo ser observados a partir dos 270 dias. Tanto o compósito AFCS:IV quanto o AFCS:II preservaram a morfologia e a interface da fibra na matriz após o envelhecimento natural, com destaque para o compósito AFCS:IV onde não foi observado o desfibrilamento dos feixes fibrosos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusões

- O tratamento proposto para as fibras de curauá com impregnação com sílica ativa teve efeitos favoráveis para as propriedades dos compósitos avaliados;
- A adição das fibras de curauá reduziu a resistência à compressão dos compósitos, contudo, para as argamassas com as fibras previamente tratadas essa redução foi menos significativa;
- Para a resistência à tração, o reforço com fibras tratadas proporcionou um incremento máximo de 44,75% nessa propriedade em relação a argamassa de referência;
- Observou-se que a adição das fibras de curauá reduziu a rigidez do compósito, porém, para as argamassas com fibras previamente tratadas, parte dessa rigidez foi preservada;
- Na resistência à flexão o compósito AFCS:IV apresentou o melhor desempenho, proporcionando um ganho nessa propriedade de 57,95% em relação a referência.
- Foi observada redução na tenacidade dos compósitos AFC:IV e AFC:II com o envelhecimento natural;
- Com o estudo piloto, observou-se que compósitos com maiores teores de fibra e com comprimentos superiores proporcionaram um melhor incremento na resistência à tração, sendo o melhor resultado encontrado para 2% de teor da fibra com 25 mm de comprimento;
- Com o envelhecimento natural, os compósitos com fibras sem tratamento e matriz com cimento CP-II apresentaram degradação mais evidente;
- Por meio dos difratogramas verificou-se a presença da portlandita nos compósitos AFC:IV e AFC:II, sendo possível relacioná-la com a degradação das fibras, não sendo identificada nos compósitos AFCS:IV e AFCS:II;
- Com a análise microestrutural verificou-se que no compósito AFCS:IV as fibras impregnadas com sílica ativa se mantiveram preservadas ao final do envelhecimento natural e no compósito AFCS:II identificou-se pequenos sinais de desfibrilação.

5.2. Sugestões de trabalhos futuros

Por meio da presente pesquisa foi verificado que o tratamento prévio das fibras de curauá por meio da impregnação com sílica ativa melhorou as propriedades mecânicas do compósito, além de prolongar a durabilidade das fibras quando inseridas em compósitos cimentícios. Entretanto, algumas avaliações ainda são necessárias para complementar os estudos sobre esse tema:

- Avaliar o comportamento mecânico dos compósitos com a adição de maiores teores de fibra de curauá empregando comprimentos superiores ao utilizado no desenvolvimento desta pesquisa;
- Realizar caracterizações físicas e mecânicas das fibras de curauá após o tratamento com impregnação com sílica ativa para identificar os efeitos da sílica ativa em propriedades como absorção de água e resistência à tração;
- Verificar os efeitos do envelhecimento natural nas propriedades físicas, mecânicas e na composição química das fibras de curauá *in natura*, de forma a detectar a sua degradação por meio da variação do teor de lignina, índice de cristalinidade, resistência à tração entre outros;
- Comparar a eficácia do tratamento das fibras com impregnação com sílica ativa com outros tratamentos propostos na literatura, por meio das propriedades mecânicas e durabilidade dos compósitos;
- Fazer uma análise para atestar a viabilidade econômica do reforço de matrizes cimentícias reforçadas com fibras de curauá empregando o tratamento proposto em substituição ao uso de fibras industrializadas como as de polipropileno.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREA (São Paulo). Associação Brasileira dos Expostos Ao Amianto (Org.). Amianto no Brasil. Disponível em: <<http://www.abrea.com.br/o-amianto/amianto-no-brasil.html>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

AGEITEC, Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br>>. Acesso em: 22 de setembro de 2017.

ALI, M.; LI, X.; CHOUW, N. Experimental investigations on bond strength between coconut fibre and concrete. **Materials & Design**, [s.l.], v. 44, p.596-605, fev. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.038>.

ALMEIDA, D. C. **Desempenho de argamassas com sílica ativa em ambiente marinho**. 2007. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

ALMEIDA JÚNIOR, J. H. S.; ORNAGHI JÚNIOR, H. L.; AMICO, S. C.; AMADO, F. D. R. Study of hybrid intralaminar curaua/glass composites. **Materials & Design**, [s.l.], v. 42, p.111-117, dez. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.044>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)**. ASTM C1018, West Conshohocken. 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)**. ASTM C78-02, West Conshohocken. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers**. ASTM C1557 – 03. West Conshohocken. 2013.

ANDIÇ-ÇAKIR, Ö.; SARIKANAT, M.; TÜFEKÇİ, H. B.; DEMIRCI, C.; ERDOĞAN, Ü. H. Physical and mechanical properties of randomly oriented coir fiber-cementitious composites. **Composites Part B: Engineering**, [s.l.], v. 61, p.49-54, maio 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.01.029>.

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; GARCÍA-HORTAL, J. A.; BARRA, M. Fiber-matrix interactions in cement mortar composites reinforced with cellulosic fibers. **Cellulose**, [s.l.], v. 18, n. 2, p.281-289, 12 jan. 2011.. <http://dx.doi.org/10.1007/s10570-011-9493-3>.

ARDANUY, M.; CLARAMUNT, J.; TOLEDO FILHO, R. D. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. **Construction And**

Building Materials, [s.l.], v. 79, p.115-128, mar. 2015.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035>.

ARRUDA FILHO, N. T.; DANTAS, C. P.; LEAL, A. F.; BARBOSA, N. P.; SILVA, C. G.; ALEXANDRE, M. V. Resistência mecânica de compósitos cimentícios leves utilizando resíduos industriais e fibras de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 8, p.894-902, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Requisitos**. NBR 16697. Rio de Janeiro. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. NBR 16605. Rio de Janeiro. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)**. NBR 11579. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega**. NBR 16607. Rio de Janeiro. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado miúdo — Determinação da massa específica e massa específica aparente**. NBR NM 52. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado — Determinação da massa unitária e dos espaços vazios**. NBR NM 45. Rio de Janeiro. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados — Determinação da composição granulométrica**. NBR NM 248. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados – Agregados para concreto – Especificação**. ABNT NBR 7211. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. NBR 13276. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. NBR 7215. Rio de Janeiro. 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. NBR 5739. Rio de Janeiro. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. NBR 7222. Rio de Janeiro. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. NBR 8522. Rio de Janeiro. 2008.

AYDIN, S.; BARADAN, B. The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars. **Composites Part B: Engineering**, [s.l.], v. 45, n. 1, p.63-69, fev. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.080>.

BALBINO, T. G. F. **Avaliação da durabilidade de argamassas e pastas de cimentos do tipo portland preparados com um clínquer contendo resíduo de bauxita como matéria-prima**. 2012. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

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. **Polímeros Ciência e Tecnologia**, [s.l.], v. 24, n. 3, p.388-394, 2014. <http://dx.doi.org/10.4322/polimeros.2014.024>.

BILCATI, G. K. **Produção de painéis de cimento portland reforçados com fibra de curauá (*Ananas erectifolius*)**. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 912 p.

CARDOSO, P. H. M. **Efeito do tratamento alcalino/mecânico de fibras de curauá nas propriedades de laminados compósitos de matriz epóxi**. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

CARMO, J. B. M. **Análise comparativa do desempenho de concretos compostos com sílica ativa e metacaulim face à resistência mecânica e à viabilidade econômica**. 2006. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

CASTRO, D. O., FROLLINI, E. e RUVOLO-FILHO, A. “Green Polyethylene” and curauá Cellulose Nanocrystal Based. Nanocomposites: Effect of Vegetable Oils as Coupling Agent and Processing Technique. **Polymer Physics**. 2015.

CEAPAC, Centro de apoio a projetos de ação comunitária. Disponível em: <<http://www.ceapac.org.br>>. Acesso em: 12 de setembro de 2017.

CÉLINO, A.; FRÉOUR, S.; JACQUEMIN, F.; CASARI, P. The hygroscopic behavior of plant fibers: a review. **Frontiers in chemistry**, v. 1, n. January, p. 43, 2013.

CHAKRABORTY, S.; KUNDU, A. P.; ROY, A.; BASAK, R. K.; ADHIKARI, B.; MAJUMDER, S. B. Improvement of the mechanical properties of jute fibre reinforced cement mortar: A statistical approach. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 38, p.776-784, jan. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.067>.

CODISPOTI, R.; OLIVEIRA, D. V.; OLIVITO, R. S.; LOURENÇO, P. B.; FANGUEIRO, R. Mechanical performance of natural fiber-reinforced composites for the strengthening of masonry. **Composites Part B: Engineering**, [s.l.], v. 77, p.74-83, ago. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.021>.

CORRÊA, A. C.; TEIXEIRA, E. D. M. 2010. Cellulose nanofibers from curauá fibers. **Springer Science + Business Media**. 17, 22 de September de 2010, Vol. 10, pp. 1183-1192.

CORRADINI, R. M. **Adição de fibras de cana-de-açúcar tratadas com resina fenólica em matriz cimentícia**. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2014.

CORDEIRO, I. M. C. C.; ANDRADE, A. C. S.; FERREIRA, G. C.; BRAGA, R. S. **Produtos e serviços ambientais do cultivo de curauá (Ananas comosus var. erectifolius (L. B. Sm) Coppins e F. Leal, Bromeliaceae) em plantio florestal**. BDP- Base de dados de Pesquisa Agropecuária, Embrapa, 2009.

COSTA, F. M. S. **Estudo da viabilidade da utilização de cinza de lodo de esgoto como adição em argamassa de cimento portland**. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

COUTINHO, G. T. **Meio ambiente de trabalho saudável: o banimento do amianto crisotila (asbesto branco) no brasil e a responsabilidade civil do empregador por acidente de trabalho**. 2018. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Direito, Universidade do Sul de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

CUNHA, S. S. **Perspectiva de utilização de materiais compósitos com fibras vegetais em habitações de interesse social**. 2007. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2007.

CUNHA, P. W. S. **Estudo sobre as potencialidades de compósitos à base de gesso e fibras de coco seco para aplicação na construção civil**. 120 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

D'ALMEIDA, A.; TOLEDO FILHO, R.; MELO FILHO, J.. **Cement composites reinforced by short curaua fibers**. Revista Matéria, [s.i.], v. 15, n. 2, p.151-156, jan. 2010.

DONADON, B. F.; MASCIA, N. T.; VITOR, R. S.; TRAUTWEIN, L. M. **Avaliação de fibras naturais de curauá e sisal para reforço de vigas de madeira laminada colada**. Congresso Latinoamericano de Estructuras de Madera, Buenos Aires, p.1-12, maio 2017.

DOW CORNING. **Ficha de segurança de produto químico SILMIX®**. Breu Branco: FISPQ No: 03, 2010.

EHRENBRING, H. Z.; TUTIKIAN, B. F. **Concretos reforçados com fibras naturais e fibras recicladas**. In: Fórum internacional de resíduos sólidos, 7., Anais . Porto Alegre, p. 1 - 11. 2016.

ELSAID, A.; DAWOOD, M.; SERACINO, R.; BOBKO, C. Mechanical properties of kenaf fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 4, p.1991-2001, abr. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.052>.

ESMERALDO, M. A. **Preparação de novos compósitos suportados em matriz de fibra vegetal/natural**. 2006. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química Orgânica e Inorgânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

FARIAS FILHO, J.; TOLEDO FILHO, R. D.; LIMA, P. R. L. Efeito da argila calcinada sobre a durabilidade de argamassas reforçadas com fibras curtas de sisal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 10, p.1109-1114, 2010.

FARRAPO, C. L. **Durabilidade de fibrocimento reforçado com polpa de sisal após 10 anos de envelhecimento natural**. 2015. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Biomateriais, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

FERREIRA, S. R.; LIMA, P. R. L.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland. **Matéria**, [s.i.], v. 17, n. 2, p.1024-1034, jan. 2012.

FERREIRA, S. R.; SILVA, F. A.; LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D. Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber-matrix bond in cement based systems. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 101, p.730-740, dez. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.120>.

FIDELIS, M. E. A.; PEREIRA, T. V. C.; GOMES, O. F. M.; SILVA, F. A.; TOLEDO FILHO, R. D. The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. **Journal Of Materials Research And Technology**, [s.l.], v. 2, n. 2, p.149-157, abr. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.003>.

FIDELIS, M. E. A. **Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta**. 290 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

FIDELIS, M. E. A.; TOLEDO FILHO, R. D.; SILVA, F. A.; MECHTCHERINE, V.; BUTLER, M.; HEMPEL, S. The effect of accelerated aging on the interface of jute textile reinforced concrete. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 74, p.7-15, nov. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.09.002>.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**. 256 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GHAVAMI, K. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 27, n. 6, p.637-649, jul. 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.06.002>.

GEHLEN, L. R. **Efeito da utilização de fibras lignocelulósicas (açai e curauá) em compósitos com matriz de resina poliéster insaturado**. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

GOMES, A.; MATSUO, T.; GODA, K.; OHGI, J. Development and effect of alkali treatment on tensile properties of curaua fiber green composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s.l.], v. 38, n. 8, p.1811-1820, ago. 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.04.010>.

GUIMARÃES JUNIOR, M. **Caracterização de fibra e polpas de *Bambusa vulgaris schrad* refinadas e sem refino com modificação química visando sua utilização como agente de reforço em matrizes poliméricas**. 176 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, REDEMAT - Rede Temática em Engenharia de Materiais, Ouro Preto, 2011.

HAGE, F. **Plantas Fibrosas da Amazônia: matéria-prima para inovação**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM DESIGN, São Luís (MA), 2012.

HAMZAOUI, R.; GUESSASMA, S.; MECHERI, B.; ESHTIAGHI, A. M.; BENNABI, A. Microstructure and mechanical performance of modified mortar using hemp fibres and carbon nanotubes. **Materials & Design** (1980-2015), [s.l.], v. 56, p.60-68, abr. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.10.084>.

IZQUIERDO, I. S. **Uso da fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural**. 2011, 128 f. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

JOHN, V.M.; CINCOTTO, M.A.; SJOSTROM, C.; AGOPYAN, V.; OLIVEIRA, C. T. A. Durability of slag mortar reinforced with coconut fibre. **Cement and Concrete Composites**, [s.l.], v. 27, n. 5, p.565-574, maio 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.007>.

KHORAMI, M.; GANJIAN, E. Comparing flexural behaviour of fibre–cement composites reinforced bagasse: Wheat and eucalyptus. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 9, p.3661-3667, set. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.052>.

KHORAMI, M.; GANJIAN, E. The effect of limestone powder, silica fume and fibre content on flexural behaviour of cement composite reinforced by waste Kraft pulp. **Construction And Building Materials**, [s.i.], v. 46, p.142-149. 2013.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. 199 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LECOMPTE, T.; PERROT, A.; SUBRIANTO, A.; LE DUGOU, A.; AUSIAS, G. A novel pull-out device used to study the influence of pressure during processing of cement-based material reinforced with coir. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 78, p.224-233, mar. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.119>.

LIMA, P. R. L.; TOLEDO FILHO, R. D. Uso de metacaulinita para incremento da durabilidade de compósitos à base de cimento reforçados com fibras de sisal. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p.7-19, dez. 2008.

LIMA, B. S.; LENZ, D. M.; VERNEY, J. C. K.; PEREIRA, F. M. Influência da fibra de curauá em compósitos cimentícios: verificação da resistência à flexão e da resistência à compressão. **Revista de iniciação científica da ULBRA**, p. 225–236, 2011.

LIMA, P. R. L.; SANTOS, R. J.; FERREIRA, S.R.; TOLEDO FILHO, R. D. Characterization and treatment of sisal fiber residues for cement-based composite application. **Engenharia Agrícola**, [s.l.], v. 34, n. 5, p.812-825, out. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162014000500002>.

LOPES, F. F. de M. **Desempenho e durabilidade de fibras vegetais modificadas superficialmente e submetidas a meios ácido e alcalino**. 2009. 164 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

LOPES, F. F. M.; ARAÚJO, G. T.; LUNA, S.; NASCIMENTO, J. W. D.; SILVA, V. R. Modificação das propriedades das fibras de curauá por acetilação. **Revista**

Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 15, n. 3, p.316-321, 2011.

MACHADO, B. A. S. **Desenvolvimento e caracterização de filmes flexíveis de amido de mandioca com nanocelulose de coco**. Dissertação (Mestrado). UFB. Salvador, Bahia, 2011.

MARQUES, M. G. S. **Estudo das Propriedades Físicas e Mecânicas e da Durabilidade de Compósitos Cimentícios Reforçados com Fibra Amazônica**. 243 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

MARQUES, M. L.; LUZARDO, F. H. M.; VELASCO, F. G.; GONZÁLEZ, L. N.; SILVA, E. J.; LIMA, W. G. Compatibility of vegetable fibers with Portland cement and its relationship with the physical properties. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.l.], v. 20, n. 5, p.466-472, maio 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n5p466-472>.

MARTINS NETO, S. F. **Material compósito de matriz frágil reforçado com fibras naturais de sisal e malva: caracterização e correlações das propriedades mecânicas**. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

MARTINS, R. L. **Desenvolvimento de compósitos reforçados por fibras naturais para aplicações estruturais**. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MELO FILHO, J. A. **Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal**. 200 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, 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. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 40, p.30-39, jul. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.003>.

MONTEIRO, S. N.; AQUINO, R. C. M. P; LOPES, F. P. D; CARVALHO, E. A.; ALMEIDA, R. M. Comportamento e características estruturais de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas e alinhadas de curauá. **Revista Matéria**, v 11, n 3 p 197 – 203, Rio de Janeiro, 2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 912 p.

NUNES, K. S. **Influência da lama vermelha e fibra de curauá ananas lucidus, mill, nas propriedades físicas e mecânicas em compósitos de poliéster isofitálico**. 54 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

OLIVEIRA, F. B.; TEIXEIRA, E. M.; TEODORO, K. B. R.; MARCONCINI, J. M.; MATTOSO, L. H. C. Obtenção de nanofibras de celulose a partir de fibras de sisal para atuar como reforço em matrizes biodegradáveis. **Congresso Brasileiro de Polímeros**, 2009.

OLIVEIRA, I. R. C. **Propriedades mecânicas, físicas e químicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras longas de juta e de malva**. 2013. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.

OLIVEIRA, A. M. **Fluência a altas temperaturas, aderência fibra-matriz e comportamento mecânico sob ações higrotérmicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA**. 263 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

ORNAGHI JÚNIOR, H. L.; SILVA, H. S. P.; ZATTERA, A. J.; AMICO, S. C. Dynamic mechanical properties of curaua composites. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 125, n. 2, p.110-116, 20 fev. 2012. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/app.36378>.

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: A review. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 25, n. 2, p.575-581, fev. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.024>.

PEMATEC TRIANGEL. Disponível em: <<http://www.pematec.com.br/curaua.htm>> Acesso em: 08 de setembro de 2017.

PERES, M. N. P. B. **Compósito de argamassa de cimento reforçada por fibra de sisal com entalhe definidos: caracterização mecânica e mecanismo de falha**. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

PEREIRA, M. S. **Preparação e caracterização de compósitos de fibras de curauá (*Ananas euructifolius*) e poliuretano obtido a partir do óleo de mamona (*Ricinus communis*)**. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

PICANÇO, M. S. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá**. 2005. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PICANÇO, M. S.; GHAVAMI, K. Comportamento à compressão de argamassas reforçadas com fibras vegetais da Amazônia. **Rem - Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 1, n. 61, p.13-18, mar. 2008.

PIMENTEL, M. G.; BORGES, J. P. C.; PICANÇO, M. S.; GHAVAMI, K. Resposta à flexão e análise de tenacidade de argamassas reforçadas com fibra de Curauá. **Matéria** (Rio de Janeiro), [s.l.], v. 21, n. 1, p.18-26, mar. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620160001.0003>.

PORTEZAN, A. C. **Amianto: trabalho que não dignifica, adoece**. 2013. 140 f. TCC (Graduação) - Curso de Direito, Universidade de Brasília - Unb, Brasília, 2013.

QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 2015. 2016 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RODRIGUES, F. A. **Estudo da influência de diferentes tratamentos (fibra/matriz) nas propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados com fibra de malva**. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade federal do Amazonas, Manaus, 2015.

SALES, C. G. **Fibra de curauá como reforço em matriz cimentícia para fabricação de telhas e placas de fibrocimento**. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SANTANA, P. N. A. **Estudo de matriz cimentícia reforçada com curauá (*Ananas comosus* var. *erectifolius*) e submetida à cura em atmosfera com excesso de dióxido de carbono (CO₂)**. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2016.

SANTOS, P. A.; SPINACÉ, M. A. S.; FERMOSELLI, K. K. G.; DE PAOLI, M. A. Efeito da Forma de Processamento e do Tratamento da Fibra de Curauá nas Propriedades de Compósitos com Poliamida-6. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, [s.i.], v. 19, n. 1, p.31-39. 2009.

SANTOS, S. F.; RODRIGUES, J. A.; TONOLI, G. H. D.; ALMEIDA, A. E. F. S.; SAVASTANO JÚNIOR, H. Effect of colloidal silica on the mechanical properties of fiber–cement reinforced with cellulosic fibers. **Journal of Materials Science**, [s.l.], v. 49, n. 21, p.7497-7506, 25 jul. 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/s10853-014-8455-1>.

SANTOS, S. F.; TONOLI, G. H. D.; MEJIA, J. E. B.; SAVASTANO JÚNIOR, H. Non-conventional cement-based composites reinforced with vegetable fibers: A review of strategies to improve durability. **Materiales de Construcción**, [s.l.], v. 65, n. 317, p.1-20, 26 jan. 2015. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2015.05514>.

SANTOS, L. F. G.; FORMIGA, L. A. S.; RODRIGUES, J. S.; SILVA, C. S. Desenvolvimento de compósitos de amido termoplástico reforçados com fibras de curauá natural da Amazônia eco-compósitos de amido com fibras de curauá. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, [s.l.], v. 17, n. 4, p.230-239, jul. 2016.

SANTOS, R. D. **Estudo da influência de tratamentos na promoção da durabilidade e aderência de fibras de curauá e sisal em matrizes à base de cimento portland**. 147 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016a.

SANTOS, L. P. **Efeito da deposição de nano-sílica (SiO₂) em fibras de celulose sobre a compatibilidade com matriz cimentícia**. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2016b.

SAVASTANO JÚNIOR, H. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: Reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo**. 2000. 152 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SCALIONI, L. V.; GUTIÉRREZ, M. C.; FELISBERTI, M. I. Green composites of poly(3-hydroxybutyrate) and curaua fibers: Morphology and physical, thermal, and mechanical properties. **Journal Of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 134, n. 14, p.1-13, 30 nov. 2016. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/app.44676>.

SEDAN, D.; PAGNOUX, C.; SMITH, A.; CHOTARD, T. Mechanical properties of hemp fibre reinforced cement: Influence of the fibre/matrix interaction. **Journal Of The European Ceramic Society**, [s.l.], v. 28, n. 1, p.183-192, jan. 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.05.019>.

SELLAMI, A.; MERZOUD, M.; AMZIANE, S. Improvement of mechanical properties of green concrete by treatment of the vegetals fibers. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 47, p.1117-1124, out. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.073>.

SILVA, A. C. **Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose**. 2002. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SILVA, R. V.; AQUINO, E. M. F. 2008. curauá Fiber: A new alternative to polymeric composites. **Reinforced Plastics and Composites**. 2008, Vol. 27, 1.

SILVA, T. A. L. **Estudo da estabilidade da enzima bromelina extraída do curauá (ananas erectifolius L. B. Smith)**. 99 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

SILVA, E.; MARQUES, M.; FORNARI JUNIOR, C. Aplicação de fibra de coco em matrizes cimentícias. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [s.i.], v. 8, n. 8, p.1555-1561, dez. 2012. Universidade Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/223611706096>.

SILVA, E. J.; SILVA, P. D.; MARQUES, M. L.; FORNARI JÚNIOR, C. C. M; GARCIA, F. C.; LUZARDO, F. H. M. Resistência à compressão de argamassas em função da adição de fibra de coco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.i.], v. 18, n. 12, p.1268-1273, dez. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n12p1268-1273>.

SILVA, E. J.; MARQUES, M. L.; VELASCO, F. G; FORNARI JÚNIOR, C. C. M; LUZARDO, F. H. M. Degradação da fibra de coco imersa em soluções alcalinas de cimento e NaOH. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s.i.], v. 19, n. 10, p.981-988, out. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n10p981-988>.

SILVEIRA, M. V. **Análise do comportamento mecânico e da durabilidade em compósitos de areia reforçada com fibras naturais de curauá e sisal**. 2018. 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SPINACÉ, M. A. S.; LAMBERT, C. S.; FERMOSELLI, K. K. G.; PAOLI, M. A. Characterization of lignocellulosic curaua fibres. **Carbohydrate Polymers**, [s.l.], v. 77, n. 1, p.47-53, maio 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2008.12.005>.

SPINACÉ, M. A. S.; JANEIRO, L. G.; BERNARDINO, F. C.; GROSSI, T. A.; DE PAOLI, M. A. Poliolefinas Reforçadas com Fibras Vegetais Curtas: Sisal vs. Curauá. **Polímeros**, [s.i.], v. 21, n. 3, p.168-174, 2011.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Acid-insoluble lignin in wood and pulp**. TAPPI T 222 om-02. Peachtree Corners. 2006.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Determination of equilibrium moisture in pulp, paper and paperboard for chemical analysis**. TAPPI T 550 om-08. Peachtree Corners. 2013.

TEIXEIRA, R. S. **Efeito das fibras de curauá e de polipropileno no desempenho de compósitos cimentícios produzidos por extrusão**. 149 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

TESSARO, A. B.; GONÇALVES, M. R. F.; GATTO, D. A.; POLLNOW, E. N.; CARREÑO, N. L. V.; DELUCIS, R. de A. Compósitos cimentícios reforçados com

fibras de eucalipto puras e tratadas com tetraetilortossilicato (TEOS 98%). **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 47-55, jul./set. 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212015000300025>

TOLÊDO FILHO, R. D.; GHAVAMI K.; ENGLAND, G. L.; SCRIVENER, K. Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability. **Cement & Concrete Composites**, [s.i.], v. 25, p.185-196. 2003.

TOMCZAK, F.; SATYANARAYANA, K. G.; SYDENSTRICKER, T. H. M. Studies on Lignocellulosic Fibers of Brazil: Part III – Morphology and Properties of Brazilian Curauá Fibers. **Composites: Part A**, vol. 38, p. 2227–2236, 2007.

TOMCZAK, F. **Estudos sobre a estrutura e propriedades de fibras de coco e curauá do Brasil**. 2010. 150 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

TONOLI, G.H.D.; RODRIGUES FILHO, U.P.; SAVASTANO JR, H.; BRAS, J.; BELGACEM, M.N.; ROCCO LAHR, F.A. Cellulose modified fibres in cement based composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s.l.], v. 40, n. 12, p.2046-2053, dez. 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.09.016>.

TOSUN-FELEKOGLU, K.; FELEKOGLU, B. Effects of fibre hybridization on multiple cracking potential of cement-based composites under flexural loading. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 41, p.15-20, abr. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.115>.

VIAPOL. **Ficha Técnica de Produto PLASTOL® 4685**. Caçapava: Euclid Group, 2013.

WEBER, A. M. **Viabilidade técnica da utilização de fibra de curauá (*Ananas Erectifolius*) como reforço em compósitos cimentícios laminados**. 2018. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

WEI, J. **Durability of Cement Composites Reinforced with Sisal Fiber**. 252 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Columbia University, Nova Iorque, 2014.

WEI, J.; MEYER, C. Improving degradation resistance of sisal fiber in concrete through fiber surface treatment. **Applied Surface Science**, [s.l.], v. 289, p.511-523, jan. 2014a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.11.024>.

WEI, J.; MEYER, C. Degradation rate of natural fiber in cement composites exposed to various accelerated aging environment conditions. **Corrosion Science**, [s.l.], v. 88, p.118-132, nov. 2014b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2014.07.029>.

WEI, J.; MEYER, C. Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 73, p.1-16, jul. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.019>.

WEI, J.; MA, S.; THOMAS, D. G. Correlation between hydration of cement and durability of natural fiber-reinforced cement composites. **Corrosion Science**, [s.l.], v. 106, p.1-15, maio 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.corsci.2016.01.020>.

YAN, L.; SU, S.; CHOUW, N. Microstructure, flexural properties and durability of coir fibre reinforced concrete beams externally strengthened with flax FRP composites. **Composites Part B: Engineering**, [s.l.], v. 80, p.343-354, out. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.011>.