



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE
E BIOTECNOLOGIA DA REDE BIONORTE



PLACAS COMPÓSITAS DE GEOPOLÍMERO REFORÇADO COM
FIBRAS DE BAMBU AMAZÔNICO

MARILENE GOMES DE SÁ RIBEIRO

Manaus – AM

2025

MARILENE GOMES DE SÁ RIBEIRO

**PLACAS COMPÓSITAS DE GEOPOLÍMERO REFORÇADO COM
FIBRAS DE BAMBU AMAZÔNICO**

Tese de doutorado apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Biotecnologia da Rede BIONORTE, na Universidade do Estado do Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor em Biodiversidade e Biotecnologia.

Orientador(a): Profa. Dra. Ires Paula de A. Miranda

Coorientador(a): Profa. Dra. Waltraud M. Kriven

Manaus – AM

Julho/2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pela autora.

Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

S111p	Sá Ribeiro, Marilene Gomes de Placas compósitas de geopolímero reforçado com fibras de bambu amazônico / Marilene Gomes de Sá Ribeiro . Manaus : [s.n], 2025. 90 f.: color.; 21,0 cm. Tese - Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Biotecnologia - BIONORTE- Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2025. Inclui Bibliografia. Inclui Apêndice. Inclui Anexo. Orientador: Miranda, Ires Paula de Andrade. Coorientador: Kriven, Waltraud M.. 1. Caulim. 2. Metacaulinita. 3. Material ecológico. 4. Construção sustentável. I. Miranda, Ires Paula de Andrade (Orient.) II . Kriven, Waltraud M. (Coorient.) III. Universidade do Estado do Amazonas. IV. Título CDU(1997)604(043)
-------	--

MARILENE GOMES DE SÁ RIBEIRO

**PLACAS COMPÓSITAS DE GEOPOLÍMERO REFORÇADO COM
FIBRAS DE BAMBU AMAZÔNICO**

Tese de doutorado apresentada ao Curso de
Doutorado do Programa de Pós-Graduação em
Biodiversidade e Biotecnologia da Rede
BIONORTE, na Universidade do Estado do
Amazonas, como requisito parcial para a obtenção do
Título de Doutor em Biodiversidade e Biotecnologia.

Aprovada em 08/07/2025

Banca examinadora

Documento assinado digitalmente
 IRES PAULA DE ANDRADE MIRANDA
Data: 06/08/2025 19:51:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Ires Paula de A. Miranda (Orientadora)
INPA

Documento assinado digitalmente
 ANA CAROLINA CONSTANCIO TRINDADE
Data: 02/08/2025 21:23:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Ana C. C. Trindade
USP

Documento assinado digitalmente
 ANSELMO FORTUNATO RUIZ RODRIGUEZ
Data: 05/08/2025 13:18:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Anselmo F. R. Rodriguez
UFAC

Documento assinado digitalmente
 DIMAS JOSE LASMAR
Data: 06/08/2025 09:54:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Dimas J. Lasmar
UFAM

Documento assinado digitalmente
 LUCIETTA GUERREIRO MARTORANO
Data: 04/08/2025 21:41:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Lucietta G. Martorano
EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO

Eu, Marilene Gomes de Sá Ribeiro, (X) autorizo () não autorizo a publicação da versão final aprovada de minha Tese de Doutorado intitulada “PLACAS COMPÓSITAS DE GEOPOLÍMERO REFORÇADO COM FIBRAS DE BAMBU AMAZÔNICO” no Portal do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Biotecnologia – Rede BIONORTE (PPG-BIONORTE), bem como no repositório de Teses da CAPES ou junto à biblioteca da Instituição Certificadora.

Local/Data: Manaus (AM), 21 de julho de 2025

Documento assinado digitalmente
 MARILENE GOMES DE SA RIBEIRO
Data: 07/08/2025 00:46:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Marilene Gomes de Sá Ribeiro

CPF: 160410032-04

RG : 1267-D CREA-AM

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi resultado parcial do Programa de Doutorado Sanduíche Bionorte-UIUC em Placas Compostas Geopoliméricas Nanoestruturadas. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo INPA-Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Manaus, AM, Brasil) e pela Universidade de Illinois em Urbana-Champaign (UIUC, IL, EUA) sob o contrato número US Army W9132T-21-C-0005 AH571, bem como Keanetech, LLC de Champaign, IL, EUA. A coleta, preparação e condicionamento das fibras de bambu foram realizadas no Laboratório de Engenharia e Construção Verde (LECVerde-INPA) no Brasil. MEV/EDS e DRX foram realizados no Materials Research Laboratory (MRL), UIUC. Testes físicos e mecânicos foram realizados nos Laboratórios de Geopolímeros da Universidade de Illinois em Urbana-Champaign e no LECVerde-INPA. Portanto, estendo minha gratidão a todas as partes acima mencionadas.

Agradeço ao meu marido e filhos que me incentivaram e me apoiaram de todas as formas nessa caminhada. Gratidão aos doutores Ali Ozer, Ana C. C. Trindade e Devon M. Samuel pelo suporte durante a fase de desenvolvimento do trabalho na UIUC. Agradeço principalmente a minha orientadora Profa. Dra. Ires P. A. Miranda e coorientadora Profa. Dra. Waltraud (Trudy) M. Kriven por terem acreditado no meu potencial, tornando possível a realização deste trabalho, com paciência, amizade e valiosos ensinamentos.

RESUMO

O crescimento urbano acelerado tem intensificado a demanda por materiais mais sustentáveis na construção civil. Nesse contexto, soluções de baixa emissão de dióxido de carbono podem desempenhar um papel significativo para ajudar a mitigar a escassez global de moradias. Este trabalho investigou o bambu *Guadua angustifolia*, uma espécie lenhosa nativa da América Central e América do Sul, especialmente da Colômbia, Venezuela e Equador. Foram cortados colmos de bambu que foram secos em estufa e transformados em feixes de fibras, tratadas com álcali. O bambu, sendo um recurso renovável, possui grande potencial como matéria-prima para materiais de construção à base de celulose. Argila natural do solo tropical da região amazônica foi empregada após aplicação de um método clássico adaptado de extração da caulinita. Para diminuir a demanda por cimento Portland e as emissões associadas de dióxido de carbono, este estudo propõe o desenvolvimento de um compósito geopolimérico reforçado com fibras de bambu, priorizando o uso de materiais regionais. O módulo experimental foi composto por três camadas: uma somente de matriz geopolimérica e duas com reforço de bambu orientado transversalmente e longitudinalmente, visando otimizar o desempenho mecânico. As propriedades mecânicas desses compósitos, à base de metacaulim amazônico e reforçados com bambu e partículas minerais, foram avaliadas através de ensaios de resistência à flexão em quatro pontos. Os resultados foram analisados estatisticamente por meio da distribuição de Weibull, e a microestrutura investigada por microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia de energia dispersiva e difração de raios X. Entre as configurações testadas, os compósitos de geopolímero à base de metacaulim e sódio, reforçados com 20% em massa de areia fina e 5% de fibras de bambu, apresentaram a maior resistência à flexão, atingindo 19,0 MPa. Além da caracterização mecânica dos compósitos, este estudo desenvolveu e avaliou placas geopoliméricas reforçadas com areia e bambu, analisando suas propriedades físicas e mecânicas. Os testes abrangeram resistência à flexão, densidade aparente, absorção de água e envelhecimento acelerado por imersão em água quente. Entre as formulações testadas, as placas compostas por metacaulim e silicato de sódio, 20% em massa de areia fina e 5% de fibra de bambu, apresentaram a maior resistência à flexão (10,3 MPa) na condição de equilíbrio. Essas placas foram classificadas na categoria A-II/3 conforme as normas ASTM/ABNT. Mesmo após saturação em água, mantiveram essa classificação, demonstrando potencial para aplicações em ambientes externos.

Palavras-chave: Caulim; Metacaulinita; Material ecológico; Construção sustentável.

ABSTRACT

The accelerated urban growth has intensified the demand for more sustainable construction materials. In this context, low-carbon dioxide emission solutions can play a significant role in helping to mitigate the global housing shortage. This study investigated the bamboo *Guadua angustifolia*, a woody species native to Central and South America, particularly Colombia, Venezuela, and Ecuador. Bamboo culms were cut, dried in an oven, and transformed into bundles of fibers, treated with alkali. Bamboo, being a renewable resource, has great potential as a raw material for cellulose-based building materials. Natural clay from the tropical soil of the Amazonian region was used, after applying a classic method adapted for kaolinite extraction. To reduce the demand for Portland cement and the associated carbon dioxide emissions, this study proposes the development of a reinforced geopolymeric composite with bamboo fibers, prioritizing the use of regional materials. The experimental module consisted of three layers: one solely of the geopolymer matrix and two reinforced with bamboo oriented transversely and longitudinally, aiming to optimize mechanical performance. The mechanical properties of these composites, based on Amazonian metakaolin and reinforced with bamboo and mineral particulates, were evaluated through four-point flexural strength tests. The results were statistically analyzed via Weibull distribution, and the microstructure was examined through scanning electron microscopy, energy dispersive spectroscopy, and X-ray diffraction. Among the configurations tested, geopolymer composites based on metakaolin and sodium, reinforced with 20 wt.% fine sand and 5 wt.% bamboo fibers, exhibited the highest flexural strength, reaching 19.0 MPa. In addition to the mechanical characterization of the composites, this study developed and evaluated geopolymer plates reinforced with sand and bamboo, analyzing their physical and mechanical properties. The tests included flexural strength, apparent density, water absorption, and accelerated aging by immersion in hot water. Among the formulations investigated, the plates composed of sodium silicate and metakaolin-based geopolymer, reinforced with 20% by mass of fine sand and 5wt% of bamboo fiber, exhibited the highest flexural strength (10.3 MPa) in the equilibrium condition. These plates were classified in the A-II/3 category according to ASTM/ABNT standards. Even after saturation in water, they maintained this classification, demonstrating potential for applications in outdoor environments.

Keywords: Kaolinite; Metakaolin; Ecological material; Sustainable construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Plantio de pesquisa em Manaus de bambu <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.	13
Fonte: Autora.	
Figura 2.1 - Propriedades de resistência à flexão de quatro pontos mais altas aos 7 dias de GRFNs tratados. Fonte: Autora.	32
Figura 2.2 - Placas compósitas de GRFN reforçadas com fibra de basalto e camadas de malha de carbono com maior resistência à flexão de quatro pontos aos 28 dias. Fonte: Autora.	33
Figura 2.3 - Placas de GRFN à base de sódio MK100% e MK60%-EAF40% reforçadas com partículas de areia e fibras de juta (Na-Ar-Juta, Na-EAF40-Ar-J) [28]. Fonte: Autora.	34
Figura 3.1 - Representação esquemática da placa geopolimérica reforçada com bambu. Fonte: Autora.	38
Figura 3.2 - Representação esquemática do processamento das fibras de bambu. Fonte: Autora.	39
Figura 3.3 - Argila caulinita processada em metacaulim. Fonte: Autora.	41
Figura 3.4 - Processamento do geopolímero à base de sódio e metacaulim. Fonte: Autora.	42
Figura 4.1 - Distribuição do tamanho de partículas de (a) metacaulim amazônico produzido em laboratório e (b) argila caulinita amazônica. PNCF (%) = Porcentagem de número cumulativo mais fino. Fonte: Autora.	48
Figura 4.2 - Padrões de DRX da argila caulinita amazônica e do metacaulim amazônico (MKA). Fonte: Autora.	50
Figura 4.3 - Micrografia MEV e imagem digital de fibras de bambu <i>Guadua</i> (a) tratadas com água (BH), revelando amido (pequenas partículas redondas) e lignina nas células parenquimatosas; (b) tratadas alcalinamente (BA), revelando a eliminação de amido e lignina. Fonte: Autora.	51
Figura 4.4 - Resistência à flexão de (a) matriz de geopolímero NaMK 1:1:4:11 e compósitos à base de GPKMK 1:1:4:11 ou GPNaMK 1:1:4:13 reforçado com partículas de areia (ArM, ArF) e fibras de bambu (BH5, BA5, B5); (b) trabalhos anteriores [1,12,16,34,35]. Fonte: Autora.	55
Figura 4.5 - Curvas de carga-deflexão típicas, padrões de fissuras e modos de falha da matriz geopolimérica NaMK e compósitos baseados em GPKMK ou GPNaMK reforçados com partículas de areia (ArM, ArF) e fibras de bambu (BH5, BA5, B5). Fonte: Autora.	56
Figura 4.6 - Comportamento de absorção de água da matriz de geopolímero NaMK 1:1:4:11 e compósitos à base de GPKMK 1:1:4:11 ou GPNaMK 1:1:4:13 reforçados com partículas de areia (ArM, ArF) e fibras de bambu (BH5, BA5, B5). Fonte: Autora.	57
Figura 4.7 - Micrografias de MEV e EDS das superfícies de fratura dos compósitos geopolímeros reforçados com fibras de bambu: (a) NaBH5, (b) NaBA5, (c) KArM28B5, (d) KArF28B5, (e) KArF20B5 e (f) NaArF20B5. Fonte: Autora [98].	59
Figura 4.8 - Mapas EDS de superfícies de fratura da amostra NaArF20B5 onde B é fibra de bambu e GP é matriz geopolimérica. Fonte: Autora [98].	60
Figura 4.9 - Padrões de DRX dos compósitos geopoliméricos reforçados com partículas de areia e fibras de bambu: NaBH5, NaBA5, KArM28B5, KArF28B5, KArF20B5 e NaArF20B5. Fonte: Autora.	62
Figura 4.10 - Resistência à flexão de GPNaMK reforçado em massa com 5% de bambu (B5), 20% de chamote e 5% de bambu (C20B5), e 20% de areia fina e 5% de bambu (ArF20B5); nas condições de equilíbrio (EQ), saturado em água (SA) e envelhecimento acelerado (EA). Fonte: Autora.	64

Figura 4.11 - Comportamento de absorção de água das placas geopoliméricas GPNaMK reforçadas com bambu (B5), chamote e bambu (C20B5) e areia e bambu (ArF20B5), com as respectivas visualizações observadas de microfissuras em padrão de mapa (MPM), fissuras de secagem (FS) e sem defeitos de secagem e saturação em água (ND). Fonte: Autora. **66**

Figura 4.12 - DRX das placas geopoliméricas NaMK reforçadas com fibras de bambu (B5-EQ, B5-SA), partículas de chamote e fibras de bambu (C20B5-EQ) e partículas de areia e fibras de bambu (ArF20B5-EQ, ArF20B5-SA, ArF20B5-EA), revelando a ausência da formação de novas fases cristalinas. EQ = testada na condição de equilíbrio, SA = testada na condição saturada em água, EA = testada na condição de envelhecimento acelerado. **69**

Figura 4.13 - Micrografias MEV das superfícies de fratura das placas geopoliméricas NaMK reforçadas com fibras de bambu: (a) B5-EQ, (b) B5-SA, (c) C20B5-EQ, (d) ArF20B5-EQ, (e) ArF20B5-SA e (f) ArF20B5-EA. **70**

Figura 4.14 - Mapas EDS de superfícies de fratura da amostra da placa NaArF20B5-EQ onde a região 1 engloba a matriz de geopolímero e partículas de areia e a região 2 destaca as fibras de bambu. **72**

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química (massa%) de metacaulim (MK) de diferentes pesquisadores.	21
Tabela 2.2 - Características e sínteses dos materiais GMK.	22
Tabela 2.3 - Composição química (massa%) de fibras biológicas naturais.	22
Tabela 2.4 - Tratamento alcalino de fibras biológicas naturais por imersão em solução de NaOH.	23
Tabela 2.5 - Propriedades físicas e de resistência à compressão de GRFN à base de metacaulim.	28
Tabela 2.6 - Propriedades físicas e de resistência à flexão de quatro pontos de GRFN à base de metacaulim.	30
Tabela 2.7 - Propriedades físicas e de resistência à flexão de três pontos de GRFN à base de metacaulim.	31
Tabela 2.8 - Placas de GRFN-MK tratadas, normalizadas na resistência à flexão de três pontos, em comparação com as placas de fibrocimento (FC).	37
Tabela 3.1 - Nomenclatura das amostras da matriz e compósitos de geopolímeros (reforço em massa%).	43
Tabela 3.2 - Nomenclatura e descrição das placas de geopolímeros reforçadas (reforço em massa%).	44
Tabela 3.3 - Requisitos de resistência à flexão de acordo com as normas ASTM e ABNT.	46
Tabela 4.1 - Composição de óxidos em % em massa e razão Si/Al para amostras de argila e metacaulim da Amazônia.	49
Tabela 4.2 - Resistência à flexão média de 4 pts. e densidade aparente da matriz geopolimérica (NaMK) e compósitos com partículas de areia (ArM, ArF) e fibras de bambu (BH5, BA5, B5) e parâmetros de Weibull.	53
Tabela 4.3 - Nomenclatura de amostras de matriz geopolimérica e compósitos de trabalhos anteriores.	54
Tabela 4.4 - Resultados médios de absorção de água de compósitos geopoliméricos.	57
Tabela 4.5 - Resistência à flexão média de 3 pts., densidade aparente e classe das placas geopoliméricas reforçadas com fibras de bambu (B5), chamote e bambu (C20B5) e com partículas de areia e fibras de bambu (ArF20B5).	63
Tabela 4.6 - Absorção de água (AA) das placas geopoliméricas reforçadas com fibras de bambu (B5), chamote e bambu (C20B5) e com partículas de areia e fibras de bambu (ArF20B5).	65
Tabela 4.7 - Descrição das placas geopoliméricas GPNaMK reforçadas, submetidas aos ensaios de DRX e MEV.	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1C-10x15	1 camada de malha têxtil de carbono 10x15 mm
3C-10x15	3 camadas de malhas têxteis de carbono 10x15 mm
6Bas	fibras de basalto com comprimento de 6 mm
12Bas	fibras de basalto com comprimento de 12 mm
24Bas	fibras de basalto com comprimento de 24 mm
ACV	Análise de Ciclo de Vida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ar	areia
ArF	areia fina
ArF20B5	reforço com 20% em massa de areia fina e 5% de fibra de bambu
ArG	areia grossa
ArM	areia micro fresada ou média
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATP	análise de tamanho de partícula
B	fibras de bambu
B1A	microfibra de bambu tratada com álcali
B4	fibra curta de bambu sem tratamento
B4A	fibra curta de bambu tratada com álcali
B4H	fibra curta de bambu tratada com água
B5	5% em massa de fibras de bambu tratadas com álcali (placas e barras finais)
BA5	5% em massa de fibras de bambu tratadas com álcali (barras iniciais sem partículas minerais)
Bas	fibra de basalto revestida com silano
BES	imagem de elétron retro espalhado
BH5	5% em massa de fibras de bambu tratadas com água
BT	tira de bambu
BTA	tira de bambu tratada com álcali
BTH	tira de bambu tratada com água
C20B5	reforço com 20% em massa de chamote e 5% de fibra de bambu
CP	cimento Portland

CPC	cimento Portland comum
CV	cinzas volantes
DA	densidade aparente
DRX	difração de raios-X
DTG	termogravimetria diferencial
EAF40	escória de alto forno, 40% em massa
EDXRF	fluorescência de raios-X por energia dispersiva
EDS	espectroscopia de energia dispersiva
F1	fibras de fique unidirecionais
F2	fibras de fique em tramas 2-D
FC	placas de fibrocimento
GBx	matriz geopolimérica reforçada com fibras de bambu alinhadas longitudinalmente
GBy	matriz geopolimérica reforçada com fibras de bambu alinhadas transversalmente
GMK	geopolímero à base de metacaulim
GP	geopolímero
GPKMK	geopolímero à base de potássio e metacaulim
GPNaMK	geopolímero à base de sódio e metacaulim
GRFN	geopolímero reforçado com fibras naturais
KGMK	matriz de geopolímero de potássio
KGRFN	geopolímero à base de potássio reforçado com fibras naturais
K75Na25	silicato misto de 75% de potássio e 25% de sódio
KNa-B1A-BTA	composto híbrido de micro bambu e tira de bambu reforçado
MEV	microscopia eletrônica de varredura
M _f	fração de massa de fibra
MK	metacaulim
MKA76	metacaulim amazônico 76% amorfo
NaMK-Ar	geopolímero de sódio-metacaulim reforçado com areia
NaMK60-EAF40-Ar	GP sódio-metacaulim 60% - EAF 40% reforçado com areia
NaMK80-SA20-Ar	GP sódio-metacaulim 80% - sílica amorfa 20% reforçado com areia
PD	picnômetro de densidade
PSA	particle size analysis
SA	sílica amorfa

SS	solução de silicato
SSA	área superficial específica
TGA	análise termogravimétrica
TMP	tamanho médio da partícula

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	15
1.2 HIPÓTESE	16
1.3 OBJETIVO GERAL	16
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 RELEVÂNCIA DAS FIBRAS PARA COMPOSIÇÃO DE PLACAS	18
2.2 MATRIZ DE GEOPOLÍMERO DE METACAULIM	21
2.3 REFORÇO DE FIBRAS E PARTÍCULAS NATURAIS	22
2.4 GEOPOLÍMEROS REFORÇADOS COM BAMBU	24
2.4.1 Trabalhos de caracterização que produziram placas	24
2.4.2 Trabalhos de caracterização que não produziram placas	24
2.5 TESTE DE PLACAS DE COMPÓSITOS DE GEOPOLÍMEROS	27
2.5.1 Resistência à compressão e flexão	27
2.5.2 Caracterização da microestrutura	31
2.6 PLACAS DE COMPÓSITOS DE GEOPOLÍMEROS REFORÇADOS	31
2.7 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA	34
2.8 PLACAS GRFN EM COMPARAÇÃO COM PLACAS DE FIBROCIMENTO	36
3 MATERIAL E MÉTODOS	38
3.1 DESIGN DA PLACA	38
3.2 PROCESSAMENTO DAS FIBRAS DE BAMBU, ARGILA E AREIA	39
3.3 PROCESSAMENTO DO GEOPOLÍMERO	41
3.4 RESISTÊNCIA À FLEXÃO E ABSORÇÃO DE ÁGUA PARA BARRAS COMPÓSITAS	42
3.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL	44
3.6 ENSAIOS DE CONFORMIDADE DAS PLACAS GEOPOLIMÉRICAS	44
3.6.1 Resistência à flexão	45
3.6.2 Densidade aparente	46
3.6.3 Absorção de água	46
3.6.4 Envelhecimento acelerado por imersão em água quente	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PRECURSORES	48
4.2 TRATAMENTO DAS FIBRAS DE BAMBU	50
4.2.1 Sustentabilidade e viabilidade em campo do tratamento	51
4.3 RESISTÊNCIA À FLEXÃO E ABSORÇÃO DE ÁGUA DE COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS	53

4.4 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS COMPÓSITOS	58
4.5 AVALIAÇÃO DE CONFORMIDADE DAS PLACAS GEOPOLIMÉRICAS.....	62
4.5.1 Resistência à flexão das placas	62
4.5.2 Absorção de água das placas	64
4.5.3 Razões de resistência das placas.....	66
4.6 ANÁLISE MICROESTRUTURAL DAS PLACAS GEOPOLIMÉRICAS.....	66
4.6.1 DRX das placas	66
4.6.2 MEV das placas	70
4.7 APLICAÇÕES POTENCIAIS	72
4.8 DESAFIOS PARA A VIABILIZAÇÃO COMERCIAL	73
4.8.1 Estudos Robustos de Análise de Ciclo de Vida (ACV).....	73
4.8.2 Normas Específicas e Bancos de Dados Confiáveis	74
5 CONCLUSÕES.....	75
5.1 COMPÓSITOS DE GEOPOLÍMERO REFORÇADO COM BAMBU.....	75
5.2 CLASSIFICAÇÃO DAS PLACAS GEOPOLIMÉRICAS.....	76
5.3 PERSPECTIVAS FUTURAS	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
APÊNDICES	85
APÊNDICE I. RELATÓRIO EDS DA PLACA NaArF20B5-EQ	85
ANEXOS	90
ANEXO I. ARTIGO PUBLICADO EM PERIÓDICO QUALIS-A1.....	90

1 INTRODUÇÃO

A busca por tornar o setor da construção civil mais econômico e ambientalmente sustentável tem impulsionado o desenvolvimento de novos materiais e técnicas construtivas alternativas. A adoção de estratégias como a redução do consumo de materiais, o aprimoramento do design para melhor desempenho e o uso de matérias-primas locais pode contribuir significativamente para a diminuição dos custos. Além disso, a escolha de materiais regionais ajuda a reduzir as despesas com transporte, enquanto a provisão adequada de infraestrutura e serviços essenciais deve ser considerada na viabilidade dos empreendimentos.

Neste contexto, propõe-se a utilização do bambu amazônico como reforço para placas geopoliméricas. A espécie escolhida, *Guadua angustifolia* Kunth, é amplamente empregada na construção civil, especialmente na Colômbia e no Equador. A seleção dessa espécie se justifica, em parte, por seu rápido crescimento, em comparação com a madeira comercial, que requer um tempo significativamente maior para se tornar viável como matéria-prima industrial. Além disso, os colmos maduros de bambu podem ser extraídos da touceira sem a necessidade de replantio, oferecendo também uma alternativa viável de renda para a produção familiar de varas, cavacos e fibras.

Figura 1.1 - Plantio de pesquisa em Manaus de bambu *Guadua angustifolia* Kunth.



Fonte: Autora.

O cimento Portland é amplamente utilizado na construção civil, porém sua produção está associada a elevadas emissões de dióxido de carbono. Como alternativa mais sustentável, este estudo propõe a substituição do cimento por um aglutinante à base de geopolímero formulado com metacaulinita (caulim calcinado). Os geopolímeros têm demonstrado potencial promissor como materiais estruturais, e a incorporação de fibras de bambu visa aprimorar as propriedades mecânicas do compósito, buscando uma elevação tanto na resistência quanto na tenacidade do material resultante [1,2].

As reservas nacionais de caulim (pó precursor do geopolímero) são de tal quantidade e qualidade, que justificam a sua escolha. As reservas brasileiras de caulim, aproximadamente 93%, estão localizadas no Rio Capim (no Pará), Jari (Amapá), e no Estado do Amazonas, no município de Manaus onde se concentram 68% das reservas conhecidas. Estes são considerados os três maiores distritos caulíniferos do país. No período 2010-2030, o crescimento da indústria brasileira de caulim dependerá essencialmente da conquista de fatias sempre maiores do mercado internacional. Essa tendencia deverá continuar a ser o principal foco de atenção das grandes empresas produtoras, conforme o Plano Duodecenal (2010-2030) de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, a cargo do Ministério de Minas e Energia com o apoio do Banco Internacional para a Reconstrução e Desenvolvimento – BIRD (Banco Mundial) [3].

Geopolímeros são materiais cerâmicos feitos à temperatura ambiente, a partir de alumino-silicatos, como a metacaulinita e soluções aquosas altamente cáusticas, de sódio, potássio ou cério metassilicato. São silicatos de alumínio rígidos, inorgânicos, géis hidratados, possuindo carga balanceada pela presença do Grupo I de cátions tais como Na^+ , K^+ , Cs^+ ou Li^+ . A microestrutura intrínseca é nanoporosa e em nanopartículas (20-40 nm de tamanho) [4,5]. Quando feitos a partir de metacaulinita natural, geopolímeros têm um diâmetro de poro médio de $\sim 6,8$ nm, onde a porosidade constitui $\sim 40\%$ em volume do material. Quando o geopolímero é feito a partir de metacaulinita sintética, alumino-silicato, em que o átomo de Al está em coordenação de cinco vezes, a dimensão média dos poros diminui para aproximadamente 0,8 nm. DUXSON *et al.* [6,7] realizaram uma extensa pesquisa sobre as relações entre composição, processamento, microestrutura e propriedades de geopolímeros à base de metacaulinita. RASHAD [8] apresentou uma revisão aprofundada sobre geopolímeros à base de metacaulim alcali-ativado. SÁ RIBEIRO *et al.* [2] apresentaram uma extensa revisão sobre geopolímeros à base de metacaulim reforçados com partículas e fibras para aplicações estruturais.

Este trabalho tem como base as pesquisas e tecnologias empreendidas na última década com arquitetura e construção verde e a necessidade de promover tecnologias sustentáveis e de alta performance para habitação, voltada principalmente para a população menos favorecida. Propõe-se o estudo das fibras de bambu para adição em placas geopoliméricas à base de metacaulinita usando produtos regionais. Experiências anteriores comprovam o potencial destes materiais compósitos na construção [1,2,9-17].

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A utilização do bambu na construção de estruturas tem diversas vantagens. Por ser um material de comprovada versatilidade, eficiência e rápido crescimento, se apresenta ainda como um excelente sequestrador de carbono. Com características agro-silvo-culturais, de simples cultivo e manejo, o bambu passou a ser considerado um produto agrícola com direito a linhas de crédito, taxas de juros e prazos de pagamento diferenciados, conforme estabelece a Lei no. 12.484, de 8 de setembro de 2011 que criou a Política de Incentivo ao cultivo do bambu [18]. Leve e resistente, o bambu tem boa adaptabilidade a climas e diferentes tipos de solos. Se faz presente na economia de inúmeros países, gerando bilhões de dólares anuais na economia mundial produzindo pisos laminados, revestimentos, estruturas, moveis, dentre outros usos. Considerada como uma das espécies prioritárias, fazendo parte da lista de espécies recomendadas pela INBAR (Rede Internacional de Bambu e Rattan) [19], a espécie *Guadua angustifolia* foi escolhida para este trabalho. Diferente de outras espécies, forma uma aglomeração de colmos menos cerrada, com espaçamento natural variando de 30 a 100 cm, o que facilita o manejo.

No contexto mundial atual, a busca por fontes de matéria-prima renovável para a obtenção de produtos de elevado desempenho tecnológico, com menor emissão de gás carbônico para a atmosfera, tornou-se inevitável. Neste particular, as fibras de celulose têm sido de grande interesse por ser abundante e possuir destacadas propriedades mecânicas.

Polissialatos ou geopolímeros são materiais tipo cerâmico nanoestruturado, que pode ser feito à temperatura ambiente sem a queima, como acontece com as cerâmicas convencionais. Eles são uma possível alternativa ao cimento Portland comum (CPC) para amenização do aquecimento global. A produção de 1 tonelada de CPC libera aproximadamente 1 tonelada de CO₂ na atmosfera, resultante da decomposição de carbonatos, além de custos de energia associados [5-7,20-22]. A formação de geopolímeros, por outro lado, libera cerca de ~ 0,25 toneladas de CO₂ [5-7,20-23]. Pode estimar-se que a resistência à compressão das composições de geopolímero reforçado é de ~ 100 MPa enquanto a resistência do CPC é de ~ 40-60 MPa; a resistência à flexão de ~ 20 MPa, sendo quase quatro vezes a do CPC (4-6 MPa); compósitos geopoliméricos representam quase metade da densidade do CPC (~ 1,4 g/cm³, contra ~ 2,7 g/cm³), podendo atingir a resistência total em um dia, em vez de ~ 28 dias para CPC [24].

Com menor custo de energia na produção de compósitos geopoliméricos e propriedades semelhantes às das cerâmicas, esta proposta visa expandir o conhecimento sobre geopolímeros

como uma possível alternativa para o CPC. Os geopolímeros reforçados com bambu devidamente tratado visam alavancar o desenvolvimento sustentável na indústria da construção e da economia local. Para este fim, será aplicada ao bambu, a tecnologia de compósitos geopoliméricos à base de metacaulinita [1,2,11-15]. O presente trabalho visa fornecer elementos de conformidade para uso futuro na construção pré-fabricada com um sistema de painel modular.

1.2 HIPÓTESE

H0: As placas compósitas de geopolímero reforçadas com fibras de bambu atendem as normas vigentes para placas de fibrocimento.

H1: As placas compósitas de geopolímero reforçadas com fibras de bambu não atendem as normas vigentes para placas de fibrocimento.

1.3 OBJETIVO GERAL

Desenvolver placas compósitas de geopolímero reforçado com bambu para aplicação como material de construção.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Desenvolver um tratamento alcalino nas fibras de bambu para melhorar a aderência entre a matriz do geopolímero e a fibra de reforço.
- b) Examinar as microestruturas produzidas nas fibras tratadas, especialmente para compreender e maximizar a eficiência na interface bambu-matriz geopolimérica.
- c) Determinar as características de massa dos biocompósitos de fibras-geopolímero em termos de propriedades padrão e durabilidade, tais como densidade e absorção de água.
- d) Avaliar as propriedades mecânicas dos compósitos geopoliméricos através de testes de resistência à flexão de quatro pontos, e analisar essas propriedades através do método estatístico de Weibull.
- e) Correlacionar as microestruturas observadas com as propriedades mecânicas medidas, usando microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS) e difração de raios-X (DRX).
- f) Projetar uma placa geopolimérica reforçada com fibras de bambu conforme normas estabelecidas. Avaliar as propriedades físicas e mecânicas e as microestruturas da placa de geopolímero à base de metacaulinita reforçada com bambu após o tratamento de imersão em

água deionizada e tratamento em meio alcalino, assim definidas: resistência à flexão, densidade aparente, absorção de água e envelhecimento acelerado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma diversidade de matrizes de geopolímeros à base de metacaulim (GMK) tem sido usada para produzir compósitos de geopolímeros reforçados com fibras naturais (GRFN) [1,2,13,15,16,25-36]. Alguns desses trabalhos de GRFN produziram placas [1,12,13,25,26,16,28-33,36] e farão parte desta revisão. Os trabalhos encontrados na literatura tratam apenas da caracterização do compósito e não da sua aplicação, sendo esta uma das contribuições do presente estudo. Desenvolvimentos recentes na tecnologia de placas usando compósitos de geopolímeros reforçados com fibras naturais vegetais e minerais são discutidos e comparados com placas de fibrocimento [37-40].

2.1 RELEVÂNCIA DAS FIBRAS PARA COMPOSIÇÃO DE PLACAS

As fibras naturais precisam passar por diferentes tratamentos químicos para modificar as características superficiais e melhorar a interação com a matriz geopolimérica. Resultados de testes confirmam que o tratamento químico das fibras de bambu [1] e cânhamo de Manila [41] remove a lignina e hemicelulose, bem como torna a superfície mais rugosa. Isso melhora a ligação interfacial entre a matriz geopolimérica e a fibra, resultando em maior resistência à flexão, enquanto o geopolímero protege a fibra tratada da degradação térmica [1,41]. Outra pesquisa sobre fibras de lã também demonstrou que a modificação da superfície de tal fibra melhora sua resistência em meio alcalino, resultando em uma resistência à flexão melhorada, de um geopolímero de metacaulim reforçado em comparação com a matriz geopolimérica sem reforço [25]. Em contraste, um trabalho exploratório [42] não relatou diferenças significativas na resistência à flexão entre o geopolímero à base de cinza volante e o geopolímero reforçado com fibra de coco, algodão ou fibras de sisal não tratadas. Isto sugere que um estudo mais aprofundado na modificação da superfície dessas fibras seria essencial para melhorar tal desempenho.

Em geral, a matriz e as fibras retêm suas identidades físicas e químicas em compósitos reforçados por fibras, formando interfaces [43]. A eficácia do reforço de fibras em compósitos depende do grau ou mecanismo de ligação na interface fibra-matriz e da capacidade de transferir a tensão da matriz para a fibra [44]. A interface desenvolvida entre a fibra e a matriz é um fator crucial da estabilidade do compósito, permitindo a transmissão de carga entre os componentes. O tratamento de superfície, que pode modificar ou introduzir grupos químicos que podem ajudar na ligação, é frequentemente aplicado para tornar a fibra mais compatível com a matriz. Enquanto isso, a presença de grupos hidroxila e carboxílicos na estrutura natural das fibras celulósicas as torna intrinsecamente hidrofílicas e polares [45].

Alguns dos componentes orgânicos das fibras naturais podem inibir sua compatibilidade com a matriz inorgânica. Como a qualidade da interface e a ligação entre a matriz e a fibra são insuficientes, a modificação de superfície dessas fibras por tratamento químico e outras técnicas têm sido buscadas há anos, como tratamentos com álcali, acoplamento químico, oxidação, plasma, ultrassom e enzima [43,46]. O tratamento mais comum para as fibras naturais discutido na literatura é o tratamento alcalino, onde a fibra é impregnada por imersão em solução de hidróxido de sódio (NaOH), a fim de retirar alguns minerais inibidores da ligação compósita, como ceras, hemicelulose e lignina. A natureza hidrofílica de alguns componentes da fibra pode levar a uma fraca ligação interfacial com as matrizes hidrofóbicas [47,48]. Além disso, dilatação pode ocorrer quando uma fibra hidrofílica dentro de uma matriz hidrofóbica absorve umidade dentro da matriz, tornando-a suscetível a enfraquecimento e deterioração [49]. Isso pode ocorrer no caso de absorção de água devido ao rompimento das ligações de hidrogênio entre a fibra e a matriz ou entre as próprias fibras. Além disso, o tratamento alcalino induz superfícies mais rugosas, melhorando a adesão entre a fibra e a matriz e consequente elevação da resistência à flexão do compósito.

A degradação de fibras naturais quando usadas em cimentos ou geopolímeros devido ao ambiente hostil é outra preocupação; fato também observado em fibras de bambu, quando usadas como reforço em matrizes alcalinas [50]. Portanto, o tratamento das fibras naturais para melhorar a compatibilidade do reforço com sua matriz, também precisa evitar ou retardar sua degradação, assegurando que sua função como reforço seja sustentável. O tratamento com sulfato de alumínio em fibras naturais é uma técnica potencial para abordar a possível deterioração de fibras à base de plantas expostas à matriz cimentícia [51]. MALENAB *et al.* [41] obteve êxito investigando o efeito do tratamento químico sucessivo através do pré-tratamento com NaOH, seguido de um tratamento com sulfato de alumínio.

A mercerização ou tratamento alcalino, pode produzir os efeitos de torção e encolhimento nas fibras e torná-las mais macias devido ao intumescimento intracristalino e à modificação das células cristalográficas da celulose nativa I para a celulose II. A eficácia do processo depende do grau de conversão e descristalização da rede cristalina [52]. Alguns autores [53-56] relataram suas investigações sobre o tratamento de tiras de bambu (100 x 10-15 x 1-1,5 mm) com soluções de NaOH em diferentes concentrações (de 2 a 50%) e descobriram que durante o tratamento com álcali ocorreu uma transformação da celulose I para a celulose II.

DAS *et al.* [53] estudaram o efeito da mercerização de tiras de bambu nas propriedades mecânicas e na morfologia de compósitos de resina de bambu-novolac. Os compósitos de resina de novolac foram reforçados com tiras de bambu, tratadas por 1 h com concentrações variáveis (2, 5, 10, 15, 20, 25 e 50%) de solução de hidróxido de sódio. As características físicas, como a capacidade de umedecimento dos reforços tratados com álcali, aumentaram. O aumento das concentrações de álcalis, causou uma maior perda percentual de peso. As propriedades mecânicas foram aumentadas com o aumento da concentração. Porém, acima de 20% houve degradação em todas as propriedades de resistência devido a falhas nas propriedades mecânicas dos reforços.

Para TRIPATHY *et al.* [57], a mercerização também foi aplicada com sucesso para melhorar a adesão fibra-matriz em diferentes sistemas, como materiais compósitos de resina de poliéster reforçada com juta-epóxi.

Tiras de bambu (100 x 15 x 1,1-1,5 mm) foram mercerizadas com concentrações variáveis de NaOH (10, 15, 20 e 25% em massa) [55]. Segundo os referidos autores, teste de impacto foi feito em compósitos de matriz fenólica feitos a partir das tiras não tratadas, bem como das tiras mercerizadas. Ensaio de fratura para todos os compósitos foram avaliados e observou-se que a energia de fratura aumentou a partir dos compósitos feitos de tiras de bambu não tratadas para aqueles feitos de tiras de bambu mercerizado. A mercerização remove material sensível a álcalis da matriz de bambu, levando mais fibras de celulose aos compósitos lignocelulósicos, o que desempenha um papel importante na melhoria da sua tenacidade.

Tiras de bambu (100 x 10 x 2,5-3,5 mm) tratadas com soluções cáusticas nas concentrações de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 50% em massa, foram submetidas a testes mecânicos, resultando em tensões na resistência à tração, porcentagem de alongamento na ruptura, resistência à flexão, módulo de flexão e tenacidade [56]. As propriedades mecânicas das tiras de bambu aumentaram gradativamente com o aumento da concentração de solução cáustica, mostrando um incremento de resistência entre 15% e 20% de solução, e acima disso, exibindo uma queda gradual. Os incrementos máximos de resistência à flexão e à tração das amostras tratadas, comparadas com as amostras sem tratamento, foram de 100 a 380 MPa e 27 a 200 MPa, respectivamente.

Foram feitas tentativas para utilizar adequadamente as fibras lignocelulósicas, tais como juta, sisal, coco, bambu, folhas de abacaxi, piaçava [58-64], como agentes de reforço para compósitos. Estas fibras naturais são de fácil disponibilidade se comparadas às fibras sintéticas, além de serem biodegradáveis.

OKUBO *et al.* [65] apresentaram o desenvolvimento de compósitos para fins ecológicos (eco compósitos) usando fibras de bambu e suas propriedades mecânicas básicas. O processo de explosão a vapor foi usado e mostrou-se um método eficaz para extrair fibras de bambu para o reforço de termoplásticos, com resistência específica equivalente à fibra de vidro.

O presente trabalho utilizará o tratamento com água para remoção do amido, seguido de um tratamento alcalino para remoção da lignina, a fim de promover melhor compatibilidade com a matriz geopolimérica. A fibra e a matriz devem trabalhar juntas para que o compósito seja um sistema de suporte de carga eficaz. Essa cooperação entre as fibras e a matriz na interface exerce um papel fundamental no controle das propriedades mecânicas do compósito.

2.2 MATRIZ DE GEOPOLÍMERO DE METACAULIM

Pesquisadores usaram metacaulins distintos para sintetizar matrizes GMK para fabricação de placas [1,12,13,16,26,27,29-33,36]. A Tabela 2.1 lista a composição química desses metacaulins. Os principais componentes são sílica (SiO_2 , 40,0% - 67,8%) e alumina (Al_2O_3 , 29,6% - 43,8%). O tamanho médio de partícula (TMP) do metacaulim e a área superficial específica (SSA) variaram de 1,3 - 10 μm e de 8,4 - 13 m^2/g , respectivamente (Tabela 2.2).

Tabela 2.1 - Composição química (massa%) de metacaulim (MK) de diferentes pesquisadores.

MK Id.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	K_2O	Na_2O	CaO	MgO	LOI ^a
Metamax Alem [12,16,26,27,36]	53.00	43.80	0.43	1.70	0.19	0.23	0.02	0.03	-
MKA76 Brasil [1,13]	67.80	29.60	0.70	0.98	0.24	0.01	0.01	-	0.02
Metacaulim Brasil [28-30]	40.02	34.00	2.00	1.00	1.70	0.10	0.10	0.60	-
MK-CV Tcheca [31-33]	47.40	29.70	0.50	1.80	0.30	1.00	14.50	2.60	-

^a LOI: perda de ignição

Fonte: Autora.

A solução de silicato de potássio e/ou sódio foi feita principalmente misturando sílica pirogênica com pastilhas de hidróxido de potássio e/ou sódio dissolvidas em água deionizada. A Tabela 2.2 lista as diversas formulações de solução de silicato (SS) e GMK e suas respectivas relações SS/MK utilizadas por diversos pesquisadores [1,12,13,16, 26,27,29-33,36]. A história térmica de calcinação do metacaulim variou de 700 °C até 750 °C. O tempo de manutenção da calcinação variou de 1 h a 10 h. A relação SS/MK variou de 1,42 a 1,91. A velocidade e o tempo de mistura do GMK variaram de 281 rpm a 1800 rpm e de 8 min a 5 min, respectivamente. O tempo de cura GMK foi constante em 24 horas, enquanto a temperatura de cura e a umidade relativa variaram de 25 a 50 °C e de 65 a 55%, respectivamente.

Tabela 2.2 - Características e sínteses dos materiais GMK.

MK Id.	GMK	TMP	d_{50}	SSA	Hist. Térmica MK			GMK m%					SS/MK	Vel. Mix	T. Mix	Temp Cura	U. Cura	T. Cura
	Si/Al	(μm)	(m^2/g)	($^{\circ}\text{C}$)	(h)	($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	Na_2O	K_2O	Al_2O_3	SiO_2	H_2O		(rpm)	(min)	($^{\circ}\text{C}$)	(%)	(h)	
Metamax Alem [12,16,26,36]	2.00	1.30	13.00	750	-	-	0.0	14.8	16.1	37.9	31.2	1.91	1600	5	50	55	24	
Metamax Alem [27]	2.00	1.30	13.00	750	-	-	10.3	0.0	16.9	39.9	32.9	1.72	1600	5	50	55	24	
MKA76 Brasil [1,13]	2.00	4.74	8.40	700	1	10.0	2.5	11.3	16.3	38.4	31.6	1.42	1800	5	50	55	24	
Metacaulim Brasil [28,29]	1.54	10.00	-	-	-	-	9.8	0.0	20.9	38.0	31.3	1.44	281	8	25	-	24	
Metacaulim Brasil [30]	2.00	10.00	-	-	-	-	11.4	0.0	18.8	33.2	36.5	1.44	281	8	25	-	24	
MK-CV Tcheca [31-33]	2.00	-	-	750	10	-	8.6	0.0	14.1	31.0	46.3	-	-	8	26	65	24	

Fonte: Autora.

2.3 REFORÇO DE FIBRAS E PARTÍCULAS NATURAIS

Reforços de partículas e fibras naturais têm sido usados para aumentar a resistência mecânica e tenacidade de placas GMK. Partículas naturais de areia [28-33] e fibras celulósicas de fique [26], juta [27,28-30], bambu [1,12,13,16,66], sisal [29,30,67], curauá [30,36,68] e malva [36,69], assim como fibras minerais de basalto [31-33], foram investigados. As diferentes composições químicas de várias fibras naturais são mostradas na Tabela 2.3. As fibras lignocelulósicas eram compostas de celulose, hemicelulose, lignina e minerais, com uma ampla variação percentual de massa respectiva de 47,0-73,8, 9,9-28,0, 7,5-22,9 e 1,6-9,7 [1,12,13,16,26,27,28-30,36,66-69]. O bambu (*Guadua angustifolia*) possui o menor teor de celulose e o maior teor de lignina, enquanto o fique (*Furcraea macrophylla*) apresentou o maior teor de celulose e o curauá (*Ananas erectifolius*) o menor teor de lignina. As fibras de juta brasileiras contêm maior teor de celulose e menor teor de lignina do que as chinesas. Essas composições químicas distintas para as mesmas espécies de fibras vegetais devem-se principalmente à região geográfica, tipo de solo e parte da planta utilizada para a fibra.

Tabela 2.3 - Composição química (massa%) de fibras biológicas naturais.

Fibra Natural	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Minerais
Fique Colombia [26]	73.8	10.5	11.3	4.4
Tecido de juta China [27]	63.0	20.0	15.0	2.0
Bambu Brasil [1,12,13,16,66]	47.0	16.6	22.9	4.0
Tecido de juta Brasil [28-30]	72.0	12.8	8.1	7.1
Sisal Brasil [28,29,67]	63.8	15.2	11.3	9.7
Curauá Brasil [30,36,68]	73.6	9.9	7.5	8.1
Malva Brasil [36,69]	58.8	28.0	11.0	1.6

Fonte: Autora.

A Tabela 2.4, lista as rotas de tratamento alcalino com hidróxido de sódio para as fibras biológicas naturais relatadas. Na busca de maior resistência, as fibras de fique unidirecionais (F1) e tramas 2-D (F2) foram tratadas com álcali por imersão em solução de NaOH a 5% em massa por 4 h com uma proporção solução-fibra de 4:1 [26]. A difração de raios-X (DRX) em

fibra de fique tratada com álcali revelou a presença de apenas celulose I [26]. Análise termogravimétrica (TGA) e termo gravimetria diferencial (DTG) em fibra de fique tratada com álcali indicaram a remoção de hemicelulose amorfa e lignina [26]. A morfologia da superfície da fibra de fique por microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelou uma superfície mais áspera e um diâmetro de fibra reduzido após o tratamento alcalino [26].

Tecidos de juta foram tratados em solução de NaOH a 0,5% em massa por 24 h com uma proporção solução-fibra de 30:1 [27]. DRX em fibra de juta chinesa tratada com álcali produziu apenas a formação de celulose I. TGA e DTG na fibra tratada confirmou a remoção da hemicelulose. A morfologia da superfície da fibra de juta chinesa por MEV mostrou uma superfície mais rugosa após o tratamento alcalino [27].

Tiras de bambu (BT) e fibras (B) foram tratadas em solução de NaOH 5% em massa por 4 h com uma relação solução-fibra de 4:1 [1,13].

Fibras de curauá e malva foram embebidas, respectivamente, em solução de NaOH 10 e 5% em massa por 4 h com uma relação solução-fibra de 15:1 [30,36]. DRX de fibras de curauá e malva tratadas com álcali resultou apenas na formação de celulose I, com picos duplos para curauá e picos mais agudos e amplificados para malva [36]. TGA e DTG em fibras de curauá e malva tratadas com álcali revelaram a remoção de hemicelulose e lignina para malva, mas apenas remoção parcial de hemicelulose para curauá [36]. A morfologia da superfície de fibras de curauá e malva tratadas com álcali por MEV mostrou uma superfície mais áspera após o tratamento alcalino e confirmou a remoção de hemicelulose e lignina para malva e uma degradação parcial da hemicelulose para curauá [36].

Tabela 2.4 - Tratamento alcalino de fibras biológicas naturais por imersão em solução de NaOH.

Fibra Natural	Sol. : Fibra	Tempo Imersão (h)	NaOH (massa%)
Fique Colombia [26]	4	4	5.0
Tecido de juta China [27]	30	24	0.5
Bambu Brasil [1,13]	4	4	5.0
Curauá Brasil [30,36]	15	4	10.0
Malva Brasil [36]	15	4	5.0

Fonte: Autora.

Partículas naturais de areia de rio ($d_{50} = 500 \mu\text{m}$) foram usadas como agregados miúdos da matriz GMK com densidade de $2,68 \text{ g/cm}^3$ e diâmetro máximo de $1180 \mu\text{m}$. A razão de massa ligantes/agregado foi de 1:1 [28-30]. Outras matrizes GMK usaram dois tipos de areias de quartzo como agregados miúdos [31-33]: areia grossa (ArG) com tamanho de grão de 600-

1250 μm e areia micro fresada (ArM) com tamanho de grão máximo de 63 μm . Um tipo de fibra de basalto picada revestida com silano (Bas) com 6,4 mm de comprimento, 13 μm de diâmetro e densidade de 2,67 g/cm^3 foi usada para reforçar placas finas GMK [31,32]. Três tipos de fibras de basalto cortadas com comprimentos de 6 mm, 12 mm ou 24 mm foram usados para reforçar placas finas compósitas de GMK [33].

2.4 GEOPOLÍMEROS REFORÇADOS COM BAMBU

2.4.1 Trabalhos de caracterização que produziram placas

SÁ RIBEIRO *et al.* [1] utilizaram um geopolímero misto de potássio-sódio e polissialato de siloxo reforçado com fibras e tiras de bambu. O geopolímero composto reforçado com fibras de bambu foi usado como aglutinante para as tiras de bambu (200 x 25 x 5,5 mm). O geopolímero foi sintetizado usando metacaulim produzido a partir de caulinita extraída do solo amazônico e microscopicamente comparado a um geopolímero produzido com Metamax, um metacaulim comercial altamente reativo. Os testes de compressão e flexão a quatro pontos do geopolímero foram realizados de acordo com as normas ASTM C1341-13 e C1424-10. A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para investigar a microestrutura e a interface. Além disso, DRX foi usado para confirmar a formação de geopolímero. O geopolímero de metacaulim da Amazônia reforçado com bambu mostrou-se um potencial material de construção sustentável com resistência à compressão variando de 23 a 38 MPa para microfibras de bambu tratado alcalinamente. Os valores de resistência à flexão variaram de 7 a 8 MPa para fibras de bambu tratadas com álcali e de 21 a 30 MPa para reforços mistos de fibras e tiras de bambu tratados com álcali.

O bambu é um material natural prontamente disponível, de crescimento rápido, com resistência específica à tração equivalente à do aço (250-625 MPa/g/cm^3). Na busca por materiais de construção sustentáveis, um compósito foi confeccionado com geopolímero polissialato de siloxo de potássio como matriz e 5% em massa de fibras de bambu *Guadua* sem tratamento, orientadas aleatoriamente como reforço. O teste de resistência à flexão a quatro pontos do compósito geopolimérico resultante foi realizado de acordo com a norma ASTM C78 / C78M-10^{e1} e teve como resultado 7,5 MPa, 67% mais resistente do que a matriz compósita sem o reforço [16].

2.4.2 Trabalhos de caracterização que não produziram placas

Fibras curtas de bambu (6 ± 1 mm de comprimento e 0,8–2,0 mm de espessura) tratadas sem a fração parenquimatosa em uma solução de NaOH 0,1 N foram dispersas aleatoriamente (1, 2, 3 ou 4% em massa) em geopolímero à base de metacaulim e silicato de sódio [34]. Três

prismas ($15 \times 20 \times 75$ mm) por composição foram preparados para testes de flexão de três pontos com vão de 70 mm e velocidade de 0,5 mm/min. Seis corpos de prova cúbicos ($50 \times 50 \times 50$ mm) por composição foram utilizados para testes de compressão, e cilindros (25 mm de diâmetro, 60 mm de altura) foram utilizados para testes de absorção de água e permeabilidade à água. Os corpos de prova compósitos foram mantidos em sacos de polietileno a 23 ± 2 °C por 24 horas. Após a desmoldagem, foram armazenados em sacos de polietileno lacrados a 23 ± 2 °C e $90 \pm 5\%$ UR até o teste após 28 dias de cura. Após a adição de fibras, o comportamento mecânico mudou de completamente frágil para pseudoplástico com maior tenacidade. A resistência à flexão aumentou em até 80% (7,8 MPa) quando 4% em massa de fibra de bambu foram adicionados, enquanto a resistência à compressão teve uma pequena redução (25 MPa) [34]. A adição de fibras não alterou significativamente a forma como o material interagiu com a umidade. A absorção de água das amostras modificadas foi comparável à das amostras não modificadas, e os compósitos mostraram uma taxa diminuída de difusão de água à medida que a quantidade de fibra aumentava [34].

A influência da quantidade de raspas de bambu (0, 0,5, 1, 1,5 ou 2% em massa) nas propriedades físicas e mecânicas e na microestrutura do geopolímero à base de sódio e metacaulim foi estudada [35]. A densidade dos resíduos de bambu de uma oficina de trabalho foi de 0,68 g/cm³ e o teor de umidade foi de 5,89%. Os principais constituintes químicos do bambu foram 41% em massa de celulose, 28% em massa de lignina e 10% em massa de hemicelulose. A solução de silicato de sódio continha 26,5% em massa de SiO₂ e 8,3% em massa de Na₂O (módulo de 3,3). O módulo Si/Na foi ajustado para 1,7 dissolvendo NaOH sólido na solução de silicato de sódio. Corpos de prova cúbicos foram utilizados em ensaios de resistência à compressão ($40 \times 40 \times 40$ mm) cortados a partir dos ensaios de resistência à flexão de três pontos ($40 \times 40 \times 160$ mm). Os ensaios foram realizados com velocidade de carregamento de 2,4 kN/s e 50 N/s para os ensaios de compressão e flexão, respectivamente. Seis e três corpos de prova foram medidos aos 3, 7 e 28 dias de cura para testes de resistência à compressão e flexão, respectivamente. Foram determinados a trabalhabilidade, tempo de pega, densidade aparente, porosidade aparente, condutividade térmica, resistência à compressão, resistência à flexão, MEV e DRX do compósito geopolimérico. A trabalhabilidade, o tempo de pega, a densidade e a condutividade térmica diminuíram com o aumento do teor de bambu. O teor de bambu foi proporcional à porosidade aparente, e foi encontrada uma boa relação linear entre a porosidade aparente e o teor de bambu. As maiores resistências à compressão (55 MPa) e à flexão (9,2 MPa) aos 28 dias foram alcançadas com um teor ideal de bambu de 1% em massa. A análise microestrutural mostrou que o bambu atua

como fase de reforço na matriz, reduzindo fissuras e levando à adesão satisfatória dos compósitos e propriedades mecânicas superiores às do geopolímero não reforçado. No entanto, quando o teor de bambu excedeu 1% em massa, houve menor ligação interfacial entre o bambu e a matriz geopolimérica. A análise de XRD revelou que o bambu teve pouco efeito na composição mineral do geopolímero à base de sódio e metacaulim, e nenhuma nova fase foi formada [35].

Os efeitos das fibras de bambu (0, 1, 2 ou 3% em massa) na densidade aparente, porosidade aparente, absorção de água e resistência à compressão e flexão de geopolímeros à base de sódio e metacaulim foram investigados [70]. A solução industrial de silicato de sódio continha 27,3% em massa de SiO_2 e 8,54% em massa de Na_2O (módulo de 3,3). O módulo Si/Na foi ajustado para 1,6 por NaOH sólido. A composição precisa foi 89,63% de solução de silicato de sódio e 10,37% de NaOH em massa. As propriedades físicas das fibras industriais de bambu Moso foram de 20 mm de comprimento, 22 μm de diâmetro e densidade de 0,69 g/cm^3 . Os corpos de prova foram selados em filme preservativo de polietileno e curados em condições ambientes (20 ± 5 °C e 45–65% de umidade relativa) por 24 horas. Foram desmoldados e armazenados em câmara com temperatura e umidade constantes de 60 °C e umidade relativa igual ou superior a 80% por 6 dias. Seis amostras de resistência à compressão (40 x 40 x 40 mm) foram cortadas das três amostras de resistência à flexão de três pontos (40 x 40 x 160 mm) para cada composição. Os testes de resistência à compressão e flexão foram realizados a uma velocidade de carregamento respectiva de 2,4 kN/s e 50 N/s. A densidade aparente do compósito geopolimérico diminuiu com o teor de fibra, enquanto a porosidade aparente e a absorção de água aumentaram. A resistência à compressão dos compósitos diminuiu com o teor de fibra (0% = 50,1 MPa, 1% = 36,3 MPa, 2% = 33,1 MPa, 3% = 32,2 MPa). A resistência à flexão no sétimo dia de cura atingiu o valor máximo de 9,3 MPa com 1% de fibra de bambu. Comparado com o geopolímero não reforçado (8,1 MPa), a melhoria máxima na resistência à flexão foi de 15,8% para compósitos reforçados com fibra de bambu [70]. Parâmetros como estabilidade térmica, composição química e fase amorfa de geopolímeros foram investigados. A distribuição das fibras e a interface fibra-matriz foram observadas por microscopia ótica e eletrônica de varredura. Os resultados contribuem para o conhecimento de compósitos de geopolímeros reforçados com fibras e oferecem orientação para investigações futuras de geopolímeros à base de metacaulim reforçados com fibras de bambu.

A resistência à flexão de geopolímeros à base de sódio e metacaulim foi melhorada usando fibra de bambu (1, 3 ou 5% em volume) como material de reforço [71]. A mistura de

soluções de silicato de sódio (Na_2SiO_3) e hidróxido de sódio (NaOH) 15 M na proporção em massa de 2:1 foi utilizada como endurecedor alcalino. A proporção de massa sólido-líquido foi de 1:1,5 para fornecer trabalhabilidade adequada para a mistura geopolímero-fibra. O colmo do bambu foi cortado em pedaços de 10 x 100 mm com espessura de 0,5 mm. Os pedaços de bambu foram lavados com água destilada e secos a 80 °C por 24 horas. Os pedaços de bambu secos foram tratados quimicamente por imersão em solução de NaOH nas concentrações de 1,25, 2,5, 3,75, 10 ou 15 M durante 3, 7 e 14 dias. Os feixes de fibras de bambu tratados foram lavados em água destilada e secos a 80 °C por 24 horas. Os feixes de fibra de bambu foram então cortados em liquidificador elétrico por 30 s e peneirados em peneira de malha número 60. As amostras de teste de compressão (50 x 50 x 50 mm) e de resistência à flexão (15 x 15 x 150 mm) foram seladas em folhas de vinil para evitar a evaporação da umidade durante a cura à temperatura ambiente (27–30 °C) por 7 dias. Os testes de resistência à compressão e à flexão de três pontos dos compósitos geopolímero-fibra curados foram medidos seguindo ASTM C109 e ASTM C1161, respectivamente. A velocidade da cruzeta de carga foi de 0,5 mm/min para testes de resistência à compressão e flexão. Uma concentração de NaOH de 15 M e um tempo de imersão de 14 dias foram utilizados para preparar fibras de bambu para reforço da matriz geopolimérica. Os resultados mostraram que a ligação da interface entre as fibras de bambu e a matriz geopolimérica afetou as resistências à flexão e à compressão dos compósitos. As resistências à compressão do geopolímero reforçado com 0, 1, 3 e 5 vol% de fibras de bambu foram 33,2, 45,0, 46,5 e 44,1 MPa, respectivamente. As resistências à flexão dos compósitos geopoliméricos aumentaram 1,9 (7,3 MPa), 2,5 (9,8 MPa) e 2,6 (10 MPa) vezes ao adicionar 1, 3 e 5 vol% de fibra de bambu, respectivamente, em comparação com o geopolímero não reforçado (3,9 MPa). A superfície áspera da fibra de bambu tratada com álcali promoveu o intertravamento físico e a ligação entre a matriz geopolimérica e as fibras [71].

2.5 TESTE DE PLACAS DE COMPÓSITOS DE GEOPOLÍMEROS

2.5.1 Resistência à compressão e flexão

O teste de resistência à compressão tem sido usado para a caracterização GMK de compósitos GRFN [1,13,31-33] conforme descrito na Tabela 2.5. Seis amostras cilíndricas (25 mm de diâmetro por 50 mm de altura) de compósitos álcalis mistos K75Na25-GMK e GRFN foram preparadas para cada 5% em massa de fibra de bambu (microfibra de bambu B1A tratada com álcali, fibra curta de bambu B4A tratada com álcali, ou fibra curta de bambu tratada com água B4H) [1,13]. As amostras de resistência à compressão foram testadas no dia 7 de acordo com ASTM C1424-10 [72]. A velocidade do travessão de teste foi de 0,010 mm/s.

Tabela 2.5 - Propriedades físicas e de resistência à compressão de GRFN à base de metacaulim.

MK Id.	GRFN Tipo	Partícula 1		Partícula 2		Fibras				Resistência à Compressão						Norma
		d ₅₀ (µm)	m (%)	d ₅₀ (µm)	m (%)	L (mm)	t (µm)	m (%)	Ø (mm)	h (mm)	b (mm)	Amostra	r (mm/s)	7d (MPa)	28d (MPa)	
MKA76 Brasil [1,13]	K75Na25	-	-	-	-	-	-	-	25.0	50.0	-	6	0.0100	55.7	-	C1424
	micro bambu-álcali KNa-B1A	-	-	-	-	-	-	5.00	25.0	50.0	-	6	0.0100	29.7	-	
	curto bambu-álcali KNa-B4A	-	-	-	-	26.25	-	5.00	25.0	50.0	-	6	0.0100	23.9	-	
	curto bambu-água KNa-B4H	-	-	-	-	26.25	-	5.00	25.0	50.0	-	6	0.0100	26.9	-	
MK-CV Tcheca [31]	Na-SA-ArG-ArM	925	29.0	60	5.0	-	-	-	-	30.0	30.0	6	-	-	64.4	EN196-1
	fibra de basalto picada 3%	Bas	925	29.0	60	5.0	6.40	13	3.00	-	30.0	30.0	6	-	70.1	
	fibra de basalto picada 5%	Bas	925	29.0	60	5.0	6.40	13	5.00	-	30.0	30.0	6	-	78.5	
	fibra de basalto picada 7,5%	Bas	925	29.0	60	5.0	6.40	13	7.50	-	30.0	30.0	6	-	80.5	
MK-CV Tcheca [32]	Na-SA-ArG-ArM	925	29.0	60	5.0	-	-	-	-	30.0	30.0	6	-	60.8	78.6	EN196-1
	fibra de basalto picada 2,5%	Bas	925	29.0	60	5.0	6.40	13	2.50	-	30.0	30.0	6	-	70.1	
	fibra de basalto picada 5%	Bas	925	29.0	60	5.0	6.40	13	5.00	-	30.0	30.0	6	-	78.9	
	fibra de basalto picada 7,5%	Bas	925	29.0	60	5.0	6.40	13	7.50	-	30.0	30.0	6	-	78.9	
MK-CV Tcheca [33]	Na-SA-ArG-ArM	925	29.0	60	5.0	-	-	-	-	30.0	30.0	6	-	-	79.6	EN196-1
	6 mm basalto 0,25%	6Bas	925	29.0	60	5.0	6.40	13	0.25	-	30.0	30.0	6	-	80.1	
	6 mm basalto 0,5%	6Bas	925	29.0	60	5.0	6.40	13	0.50	-	30.0	30.0	6	-	77.0	
	6 mm basalto 0,75%	6Bas	925	29.0	60	5.0	6.40	13	0.75	-	30.0	30.0	6	-	76.6	
	6 mm basalto 1%	6Bas	925	29.0	60	5.0	6.40	13	1.00	-	30.0	30.0	6	-	75.2	
	12 mm basalto 0,25%	Na-SA-ArG-ArM	925	29.0	60	5.0	12.00	13	0.25	-	30.0	30.0	6	-	77.2	EN196-1
	12 mm basalto 0,5%	12Bas	925	29.0	60	5.0	12.00	13	0.50	-	30.0	30.0	6	-	83.4	
	12 mm basalto 0,75%	12Bas	925	29.0	60	5.0	12.00	13	0.75	-	30.0	30.0	6	-	83.8	
	24 mm basalto 0,25%	Na-SA-ArG-ArM	925	29.0	60	5.0	24.00	13	0.25	-	30.0	30.0	6	-	81.8	EN196-1
	24 mm basalto 0,5%	24Bas	925	29.0	60	5.0	24.00	13	0.50	-	30.0	30.0	6	-	82.5	
	24 mm basalto 0,75%	24Bas	925	29.0	60	5.0	24.00	13	0.75	-	30.0	30.0	6	-	78.5	

L = comprimento (mm); t = espessura (mm); m = massa percentual de partículas e fibras (%)

Fonte: Autora.

O teste de resistência à flexão tem sido utilizado para caracterização GMK de compósitos GRFN conforme definido nas Tabelas 2.6 [1,12,13,16,26,27,29,31-33,36] e 2.7 [28]. Na Tabela 2.6, dez amostras (200 x 30 x 12 mm) de GRFN foram cortadas de cada uma das quatro configurações de placa (203,2 x 152,4 x 12 mm) K75Na25-GMK contendo 5% em massa de reforços (B1A, B4H, B1A-BTH tira de bambu tratada com água, e B1A-BTA tira de bambu tratada com álcali) para teste de resistência à flexão de quatro pontos [1,13]. As amostras de resistência à flexão foram testadas no dia 7 de acordo com a norma ASTM C1341-13 [73]. A taxa de deslocamento do travessão de teste foi de 0,47 mm/s, e a relação vão-profundidade foi de 13:1.

Sete amostras (155 x 25 x 4 mm) compostas de geopolímero reforçado com 5% em massa de bambu fibra curta (K-B4) foram submetidas a testes de resistência à flexão de quatro pontos no dia 7 de acordo com a norma ASTM C1341-13. A taxa de deslocamento do travessão de teste foi de 0,10 mm/s e a relação vão-profundidade foi de 25:1 [12].

Trinta amostras (55 x 10 x 10 mm) de compósito K-B4 GRFN reforçado com 5% em massa (correspondente a 8 vol%) de fibra de bambu foram submetidas a testes de resistência à flexão de quatro pontos no dia 7 de acordo com a norma ASTM C78M [74]. A taxa de tensão do teste foi 1 MPa/min [16].

Cinco amostras (200 x 25 x 6 mm) de GRFN foram cortadas de cada uma das duas configurações de placa (203,2 x 152,4 x 6 mm) unidirecional (K-Fique-1D-A) e bidirecional (K-Fique-2D-A), contendo uma fração de massa de fibra (M_f) de 0,3 reforços de fique tratados com álcali para teste de resistência à flexão de quatro pontos [26]. As amostras de resistência à

flexão foram testadas no dia 7 de acordo com a norma ASTM C1341-13 [73]. O comprimento do vão de suporte foi de 192 mm e a relação vão-profundidade foi de 30:1.

Cinco amostras (200 x 25 x 7,5-4,6 mm) de GRFN foram cortadas de cada uma das três configurações de placa (203,2 x 152,4 x 7,5-4,6 mm) não prensadas e não tratadas (Na-Juta), não prensadas e tratadas com álcalis (Na-Juta-A) e prensadas e tratadas com álcali (Na-Juta-P-A). As amostras Na-Juta, Na-Juta-A e Na-Juta-P-A, contendo uma M_f respectiva de 0,3, 0,3 e 0,5 reforços de tecido de juta para teste de resistência à flexão de quatro pontos [27]. Estas amostras foram testadas no dia 7 de acordo com a norma ASTM C1341-13 [73]. O comprimento do vão de suporte foi de 192 mm e a relação entre vão e profundidade foi de 30:1.

Três amostras de placa (450 x 60 x 12 mm) de matriz NaMK-Ar reforçada com cinco camadas alternadas de fibras de juta ou sisal (10 vol%) foram testadas no dia 7 em flexão em quatro pontos. A taxa de deslocamento de teste foi de 0,017 mm/s com um vão de 300 mm entre os suportes de extremidade [29].

Três amostras prismáticas (150 x 30 x 30 mm) de matriz NaMK-Ar e compósitos GRFN foram preparadas para um teste de flexão de quatro pontos, seguido por um teste de compressão, de acordo com a norma EN 196-1 [76], para cada conjunto de 0, 3, 5 ou 7,5% em massa [31], 0, 2,5, 5 ou 7,5% em massa [32] e 0, 0,25, 0,5, 0,75, 1,0% em massa [33] de fibra de basalto picada (Bas). Três tipos de fibras de basalto cortadas foram usados com comprimentos de 6 mm (6Bas) [31-33], 12 mm (12Bas) [33] e 24 mm (24Bas) [33]. O vão do suporte de teste foi de 100 mm e a taxa de deslocamento foi de 0,033 mm/s. Seis amostras cúbicas (30 mm³) para testes de resistência à compressão foram cortadas de ambas as peças residuais testadas nos dias 7-28 em testes de resistência à flexão de quatro pontos [31-33,76]. Três amostras de placas (400 x 100 x 15 mm) foram preparadas para teste de flexão de quatro pontos no dia 28 de cada conjunto de matriz NaMK-Ar reforçada. Os reforços envolveram 1, 2 ou 3 camadas de malhas têxteis de carbono (C-10x15, C-21x21, C-34x34 mm) e 0, 3, 5 ou 7,5% em massa [31], 0, 2,5, 5 ou 7,5% em massa [32] e 0, 0,25, 0,5, 0,75 ou 1,0% em massa [33] de 13 μ m fibras de basalto cortadas de diâmetro 6Bas [31-33], 12Bas [33] e 24Bas [33]. O vão do suporte de teste foi de 300 mm e a taxa de deslocamento foi de 0,033 mm/s [31] ou 0,067 mm/s [32,33].

Cinco amostras (200 x 25,4 x 7,5-4,6 mm) de GRFN foram cortadas de cada uma das seis configurações de placa (203,2 x 152,4 x 7,5-4,6 mm) não prensadas e não tratadas (Na-Malva), prensadas e não tratadas (Na-Malva-P, K-Curauá), tratada com álcali prensada (Na-Malva-A, K-Curauá-A) e tratada com álcali de tração prensada (K-Curauá-TA). As amostras Na-Malva, Na-Malva-P, K-Curauá, Na-Malva-A, K-Curauá-A e K-Curauá-TA, contendo uma

M_f respectiva de 0,215, 0,055, 0,083, 0,052, 0,075 e 0,060 reforços de fibra para teste de resistência à flexão de carregamento no terço do vão [36]. As amostras de resistência à flexão foram testadas no dia 7 de acordo com a norma ASTM C78/C78M [74]. O comprimento do vão de suporte foi de 101,6 mm.

Tabela 2.6 - Propriedades físicas e de resistência à flexão de quatro pontos de GRFN à base de metacaulim.

MK Id.	GRFN Tipo	Fibras					Resistência à Flexão 4Pt								Norma
		L (mm)	t (µm)	m (%)	vol (%)	M _f	L _s (mm)	h (mm)	b (mm)	Amostra	r (mm/s)	7d (MPa)	28d (MPa)	ASTM/EN	
MKA76 Brasil [1,13]															
	micro bambu-álcali KNa-B1A	-	-	5.00	-	-	160.0	12.0	30.0	10	0.47	6.07	-	C1341	
	curto bambu-água KNa-B4H	26.25	-	5.00	8.3	-	160.0	12.0	30.0	10	0.47	7.09	-		
	tira bambu-água KNa-B1A-BTH	-	-	-	-	-	160.0	12.0	30.0	10	0.47	24.95	-		
	tira bambu-álcali KNa-B1A-BTA	-	-	-	-	-	160.0	12.0	30.0	10	0.47	24.55	-		
Metamax Alem [12]	bambu K-B4	-	-	5.00	-	-	100.0	4.0	25.0	7	0.100	4.63	-	C1341	
Metamax Alem [16]	bambu K-B4	-	-	5.00	8.0	-	50.0	10.0	10.0	30	-	7.50	-	C78M	
Metamax Alem [26]	fique K-Fique-1D-A	203.00	-	30.00	-	0.300	192.0	6.0	25.0	5	-	11.40	-	C1341	
	fique-tecido K-Fique-2D-A	203.00	-	30.00	-	0.300	192.0	6.0	25.0	5	-	7.10	-		
Metamax Alem [27]	juta Na-Juta	-	-	30.00	-	0.300	192.0	7.5	25.0	5	-	20.50	-	C1341	
	juta-tecido Na-Juta-A	-	-	30.00	-	0.300	192.0	7.5	25.0	5	-	19.30	-		
Metacaulim Brasil [29]	juta Na-Ar-Juta	-	-	-	10.0	-	300.0	12.0	60.0	3	0.017	15.21	-		
	sisal Na-Ar-Sisal	-	-	-	10.0	-	300.0	12.0	60.0	3	0.017	17.68	-		
MK-CV Tcheca [31]	Na-SA-ArG-ArM	-	-	-	-	-	100.0	30.0	30.0	3	0.033	-	11.23	EN196-1	
	fibra de basalto picada 7,5%	Bas	6.40	13.00	7.50	-	100.0	30.0	30.0	3	0.033	-	13.05		
	1C-10x15, Bas7,5%	Bas	6.40	13.00	7.50	-	300.0	15.0	100.0	3	0.033	-	34.24		
	3C-10x15, Bas0%	Na-SA-ArG-ArM	-	-	-	-	300.0	15.0	100.0	3	0.033	-	47.21		
	1C-10x15-2 mm, Bas5%	Bas	6.40	13.00	5.00	-	300.0	15.0	100.0	3	0.033	-	47.72		
MK-CV Tcheca [32]	Na-SA-ArG-ArM	-	-	-	-	-	100.0	30.0	30.0	3	0.033	9.46	11.78	EN196-1	
	Bas7,5%	Bas	6.40	13.00	7.50	-	100.0	30.0	30.0	3	0.033	12.77	14.92		
	3C-10x15, Bas5%	Bas	6.40	13.00	5.00	-	300.0	15.0	100.0	3	0.067	-	86.30		
	1C-10x15, Bas7,5%	Bas	6.40	13.00	5.00	-	300.0	15.0	100.0	3	0.067	-	43.79		
MK-CV Tcheca [33]	6Bas0,5	Bas0,5%	6.40	13.00	0.50	-	100.0	30.0	30.0	3	0.033	-	13.43	EN196-1	
	24Bas0,75%	Bas	24.00	13.00	0.75	-	100.0	30.0	30.0	3	0.033	-	14.10		
	1C-10x15, Bas0%	Na-SA-ArG-ArM	-	-	-	-	300.0	15.0	100.0	3	0.067	-	30.14		
	1C-10x15, 6Bas1%	Bas	6.40	13.00	1.00	-	300.0	15.0	100.0	3	0.067	-	41.33		
Metamax Alem [36]	Na-Malva-P	203.00	-	5.50	3.6	0.055	101.6	4.6	25.0	5	-	31.55	-	C78M	
	Na-Malva-P-A	203.00	-	5.20	3.6	0.052	101.6	4.6	25.0	5	-	12.52	-		
	K-Curauá	203.00	-	8.30	5.0	0.083	101.6	7.5	25.4	5	-	18.86	-		
	K-Curauá-TA	203.00	-	6.00	5.0	0.060	101.6	4.6	25.0	5	-	12.76	-		

L_s = comprimento do vão de suporte (mm); L = comprimento das fibras (mm); vol = volume percentual de fibras (%)

Fonte: Autora.

Na Tabela 2.7, três amostras (270 x 60 x 12 mm) de GRFN foram cortadas de cada uma das quatro configurações de placa (450 x 60 x 12 mm), normalmente condicionadas e em envelhecimento acelerado (a), sódio-MK-areia (Na-Ar-Juta, Na-Ar-Juta-a) e sódio-MK60-EAF40-areia (Na-EAF40-Ar-Juta, Na-EAF40-Ar-Juta-a), contendo 5 camadas (10 vol%) de reforços de juta para teste de resistência à flexão de carregamento simples [28]. As amostras de resistência à flexão foram testadas no dia 7 e em condições de envelhecimento acelerado de 15 ciclos de umedecimento (24 h/ciclo) e secagem (48 h/ciclo) de acordo com [77,78]. O comprimento do vão de suporte foi de 200 mm e a taxa de deslocamento do travessão foi de 0,0167 mm/s.

Tabela 2.7 - Propriedades físicas e de resistência à flexão de três pontos de GRFN à base de metacaulim.

MK Id.	GRFN Tipo	Fibras				Resistência à Flexão 3Pt						Norma
		L (mm)	t (μm)	m (%)	vol (%)	L _s (mm)	h (mm)	b (mm)	Amostra	r (mm/s)	7d (MPa)	
Metacaulim Brasil [28]	Na-Ar-Juta	270.0	1000	-	-	200	12.0	60.0	3	0.0167	12.33	C1341
MK60EAF40-Ar100-Juta	Na-EAF40-Ar-J	270.0	30	-	10.0	200	12.0	60.0	3	0.0167	18.36	
Metacaulim Brasil [28]15c/us	Na-Ar-Juta-a	270.0	1000	-	-	200	12.0	60.0	3	0.0167	11.32	
MK60EAF40-Ar100-Juta	Na-EAF40-Ar-J-a	270.0	30	-	10.0	200	12.0	60.0	3	0.0167	17.09	

Fonte: Autora.

Discussão e conclusão sobre os resultados de todos esses estudos são apresentadas na seção 2.6.

2.5.2 Caracterização da microestrutura

Imagem e fractografia dos compósitos GRFN pós-teste foram realizadas por MEV e espectroscopia por dispersão de energia (EDS) [1,12,13,16,26,27,29,30,32,36]. Em geral, as amostras compostas de geopolímero foram polidas manualmente e colocadas em um dessecador conectado a uma bomba de vácuo sob um vácuo de 30 pol Hg por pelo menos 24 horas para evitar a desgaseificação no MEV. Em seguida, as amostras foram revestidas por pulverização de Au/Pd antes da análise para evitar qualquer carga no MEV.

A caracterização de fase do GRFN foi realizada por DRX, com um comprimento de onda de radiação Cu K-alfa de 0,15418 nm usando um suporte de cristal de quartzo com fundo zero. O DRX foi realizado de acordo com os seguintes parâmetros: velocidade de varredura acoplada 2 θ grau.min⁻¹ com incrementos de 0,05 graus [12,16,26-29].

TGA/DTG foi realizado para investigar o efeito do tratamento alcalino da fibra (fique, juta, malva, curauá) no GRFN. Foi realizada em atmosfera de nitrogênio com vazão de 40-75 mL/min e taxa de rampa de 5 °C/min até 600 ou 850 °C, utilizando cadinho de alumina [26,27,36].

2.6 PLACAS DE COMPÓSITOS DE GEOPOLÍMEROS REFORÇADOS

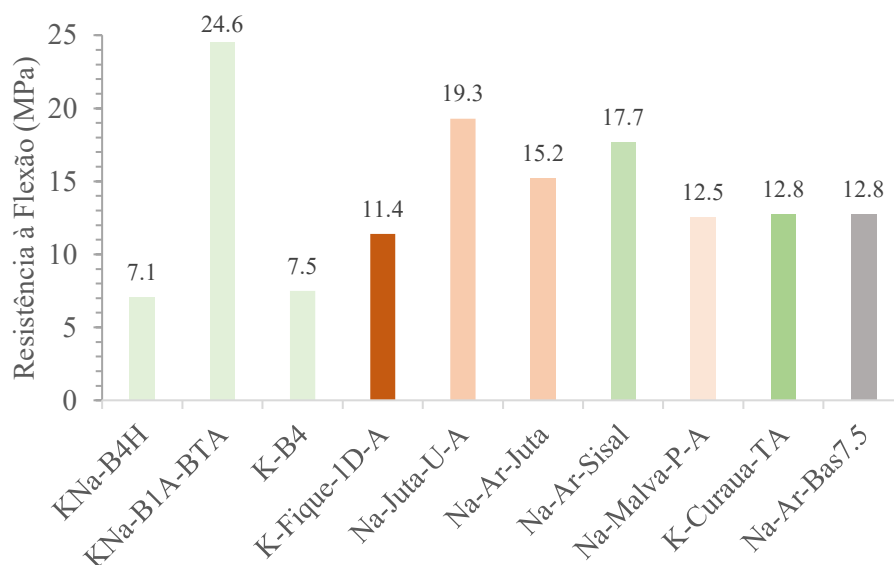
As propriedades físicas e mecânicas das matrizes GMK e placas compostas GRFN [1,12,13,16,26-33,36] estão resumidas a seguir.

Enquanto matrizes GMK com resistência à compressão de 7 dias variaram de 55,7 a 60,8 MPa, aquelas testadas no dia 28 foram de 64,4 a 79,6 MPa [1,13,31-33]. A matriz GMK à base de sódio reforçada com sílica ativa, 29% em massa de partículas de areia grossa e 5% de areia média revelou a maior resistência à compressão respectiva de 7 ou 28 dias de 60,8 ou 79,6 MPa entre as matrizes analisadas [32,33]. A adição de areia à matriz promoveu densidade de empacotamento e maior desenvolvimento de resistência. A matriz GMK mista de álcalis à base de potássio e sódio reforçada com 5% em massa de micro bambu tratado com álcali ou fibra

curta de bambu de 26 mm tratada com água, resultou em resistência à compressão de 7 dias de 29,7 e 26,9 MPa [1,13]. A matriz GMK à base de sódio com a adição de sílica ativa e 34% em massa de areia reforçada com 7,5% em massa de fibra de basalto picada de 6 mm ($\varnothing$ 13 μ m) revelou a maior resistência à compressão respectiva de 7 ou 28 dias de 78,9 ou 99,0 MPa entre os compósitos GRFN [32]. Além da adição de partículas de areia à matriz, o comprimento e a dosagem das fibras desempenharam um papel importante na obtenção de maior resistência à compressão do GRFN [31-33].

As propriedades físicas e de resistência à flexão de quatro pontos de compósitos GRFN reforçados com fibras de bambu [1,12,13,16], fique [26], juta [27,29], sisal [29], malva [36], curauá [36] e basalto [31-33] são resumidas na Fig. 2.1 para comparação geral. A maior resistência à flexão de quatro pontos alcançada em 7 dias para cada tipo de compósito GRFN é mostrada. Entre todos os tipos e composições de fibra GRFN, o composto híbrido à base de potássio e sódio reforçado com micro bambu e tira de bambu KNa-B1A-BTA [1,13] revelou a maior resistência à flexão de 7 dias de 24,6 MPa.

Figura 2.1 - Propriedades de resistência à flexão de quatro pontos mais altas aos 7 dias de GRFNs.

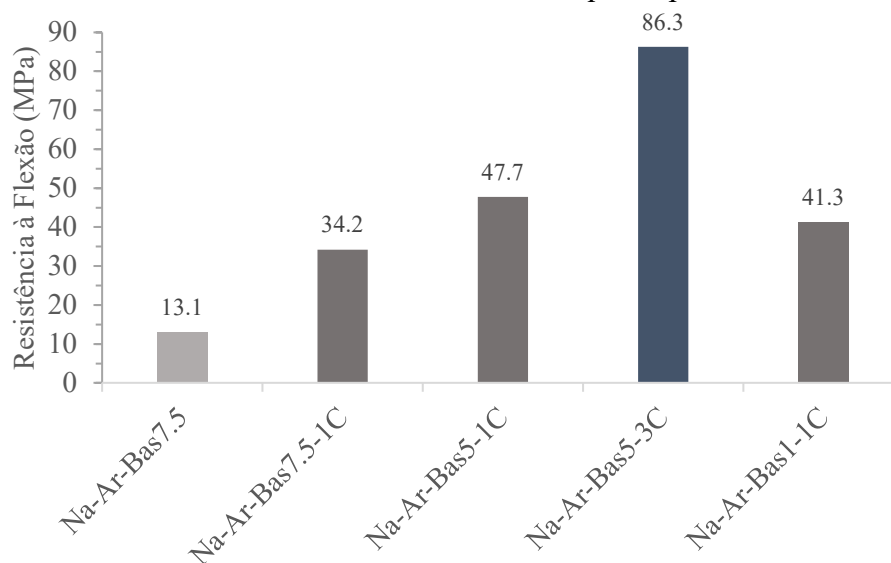


Fonte: Autora.

A Fig. 2.2 ilustra as maiores resistências à flexão de quatro pontos de 28 dias para placas compostas de fibra de basalto GRFN e camadas de malha de carbono [31-33]. Todas as placas compostas com 1 a 3 camadas de malha de carbono (Na-Ar-Bas7.5-1C [30], Na-Ar-Bas5-1C [31], Na-Ar-Bas1-1C [33] e Na-Ar-Bas5-3C [32]) foram cerca de 3 a 7 vezes mais fortes do que com 7,5% em massa de fibra de basalto e sem malha de carbono (Na-Ar-Bas7.5 [31]). A

placa composta com 5% em massa de fibra de basalto e 3 camadas de malha de carbono Na-Ar-Bas5-3C [32] revelou a maior resistência à flexão de 28 dias de 86,3 MPa. Entre as placas compostas reforçadas com 1 camada de malha de carbono, Na-Ar-Bas5-1C reforçada com 5% em massa de fibra de basalto revelou a maior resistência à flexão de 47,7 MPa. Portanto, 5% em massa foi a dosagem ideal de fibra de basalto para placas compostas de alta resistência à flexão reforçadas com 1 ou 3 camadas de malha de carbono.

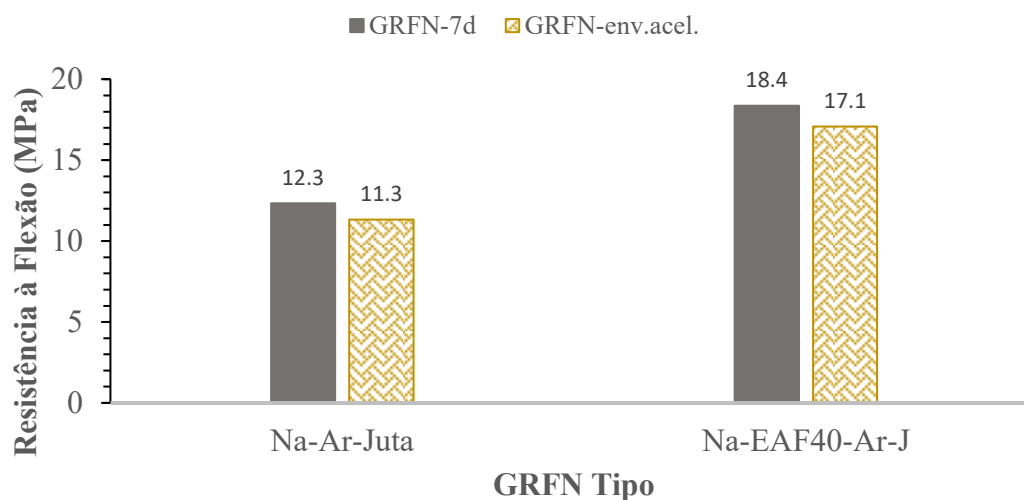
Figura 2.2 - Placas compósitas de GRFN reforçadas com fibra de basalto e camadas de malha de carbono com maior resistência à flexão de quatro pontos aos 28 dias.



Fonte: Autora.

A Fig. 2.3 mostra a resistência à flexão de três pontos das placas compostas de geopolímero MK100% e MK60%-EAF40% à base de sódio reforçadas com partículas de areia e fibras de juta (Na-Ar-Juta, Na-EAF40-Ar-J) [28]. Os testes de durabilidade por um processo de envelhecimento acelerado de ambos os tipos de placas compósitas revelaram degradação de resistência insignificante de 7 a 8%, conforme ilustrado na Fig. 3.

Figura 2.3 - Placas de GRFN à base de sódio MK100% e MK60%-EAF40% reforçadas com partículas de areia e fibras de juta (Na-Ar-Juta, Na-EAF40-Ar-J) [28].



Fonte: Autora.

Vários autores estudaram as propriedades físicas e de resistência à tração de placas compostas de GRFN à base de MK reforçadas com fibras de fique [26], juta [27-30], sisal [29,30] ou curauá [30]. As placas compostas de Na-Juta-P-A [22] e Na-Ar-Curauá [30] GRFN revelaram as maiores resistências à tração de 14,5 e 14,3 MPa, respectivamente.

2.7 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA

Imagens e fractografia de GRFN pós-teste (fique [26], juta [27,30], bambu [1,12,13,16], curauá [36], malva [36], basalto [32]) foram realizadas por MEV para investigar a interface fibra-matriz. A caracterização da fase do GRFN reforçado com fique [26], juta [27] ou bambu [12,16] foi realizada por DRX. TGA/DTG foi realizado para investigar o efeito do tratamento alcalino da fibra (fique [26], juta [27], malva [36], curauá [36]) no GRFN.

Imagens MEV de compósitos K-Fique [26] e Na-Juta [27] revelaram espaços entre a fibra e a matriz, o que era característico de uma interface fraca. Os espaços de interface resultaram da propagação da trinca através da matriz defletida em torno das fibras [26,27]. O atrito fibra-matriz na interface resultou em alta absorção de energia antes da falha por tração [26,27]. A morfologia da superfície das fibras de fique [26] e juta [27] tornou-se rugosa após tratamento alcalino, aumentando o atrito fibra-matriz. Isso explica a porção não linear estendida alcançada nas curvas de tensão-deformação de placas compostas de GRFN de fique ou juta tratadas com álcali. A interface fibra-matriz melhorou nas fibras fique ou juta tratadas com álcali, pois elas se tornaram hidrofóbicas com o tratamento alcalino. Isso resultou em menos retração durante a cura para compósitos GRFN de juta ou fique tratados com álcali quando

comparados aos compósitos reforçados com fibras não tratadas [26,27]. A análise EDS revelou que as proporções atômicas de K : Al : Si ou Na : Al : Si das matrizes envolvendo o tecido fique [26] ou juta [27] tratado com álcali nos respectivos compósitos foram 1K : 0,744 : 1,629 ou 1Na : 1,18 : 2,86 que não estava longe das razões de matrizes não reforçadas 1K : 0,724 : 1,734 ou 1Na : 1,11 : 2,92. Isto implica que a adição de fibras de fique ou juta tratadas com álcali NaOH não alterou extensivamente a composição da matriz de geopolímero circundante [26,27]. Padrões DRX de pós de geopolímero triturados retirados das placas compósitas GRFN-fique [26] ou -juta [27] revelaram uma protuberância amorfa a 2θ 28°, o que confirmou a formação do geopolímero. As curvas DTG da matriz de geopolímero de potássio (KGMK) ou sódio (NaGMK) mostraram um mínimo a 149 °C [26,27], correspondente à remoção de água aprisionada [79]. As curvas DTG dos compósitos GRFN-fique [26] ou -juta [27] mostraram três respectivos picos mínimos distintos. Os respectivos primeiros picos a cerca de 120 °C ou 110 °C corresponderam à remoção de água retida dos compósitos GRFN-fique ou -juta. Os respectivos segundos picos a 273 °C ou 275 °C e os terceiros picos a 460 °C ou 430 °C indicaram a respectiva remoção de celulose e lignina das fibras de fique [26] ou juta [27]. Imagens MEV de amostras testadas de TGA revelaram que as fibras carbonizaram quando os compósitos foram submetidos a 1000 °C [26,27]. Portanto, esses compósitos GRFN não devem ser usados em temperaturas acima de 250 °C, pois a celulose da fibra fique [26] ou juta [27] já começa a se degradar.

Micrografias de MEV e imagens digitais dos compósitos geopoliméricos de potássio-sódio (GRFN) reforçados com fibras de bambu, após ensaios de flexão em quatro pontos, evidenciaram marcas de extração das fibras na matriz [1,13]. Esse mecanismo de arrancamento das fibras contribui para o endurecimento do compósito, funcionando como dissipador de energia por fricção na interface fibra-matriz, indicando também um bom umedecimento interfacial. Por outro lado, imagens de MEV das seções transversais de barras compostas de GRFN à base de potássio com bambu revelaram a presença de lacunas na interface fibra-matriz [12,16]. A propagação de trincas na matriz foi desviada em torno das fibras, caracterizando um comportamento típico de interface fraca. A análise por DRX mostrou que os compósitos GRFN reforçados com bambu apresentaram padrão amorfo, com uma protuberância característica em $2\theta = 28^\circ$, confirmando a formação de uma estrutura geopolimérica sem fases cristalinas detectáveis à temperatura ambiente [12,16].

A caracterização por MEV de placas de compósitos de potássio-GRFN reforçados com fibras de curauá revelou canais vazios deixados na matriz após o arrancamento das fibras, com superfícies de fratura parcial [36]. Imagens de elétrons retro espalhados (BES) das seções

transversais verticais desses compósitos, tanto com fibras de curauá tratadas quanto não tratadas com álcali, não evidenciaram lacunas entre a fibra e a matriz, diferentemente do observado em compósitos GRFN reforçados com fique [26] e juta [27], indicando bom umedecimento interfacial [36]. Contudo, imagens BES das seções transversais horizontais mostraram fissuras nas fibras resultantes do arrancamento durante a aplicação de carga. Além disso, foi observada distribuição não uniforme das fibras e a presença de trincas na interface, fatores que podem contribuir para a variação das propriedades mecânicas [36]. As curvas DTG dos compósitos KGRFN-curauá ou NaGRFN-malva com fibras não tratadas ou tratadas apresentaram dois picos distintos [36]. O primeiro, próximo a 110 °C, correspondeu à perda de água adsorvida [79], e o segundo, em torno de 265 °C, à degradação da hemicelulose nas fibras não tratadas. Nas fibras tratadas com álcali, esse segundo pico foi deslocado até 10 °C, indicando a remoção parcial da hemicelulose [36]. Os compósitos KGRFN-curauá, independentemente do tratamento das fibras, apresentaram perda de massa semelhante (30%), enquanto o compósito NaGRFN-malva tratado com álcali demonstrou maior estabilidade térmica, reduzindo a perda de massa de 26% para 22% a 850 °C [36].

Imagens MEV de amostras compostas de fibras de basalto GRFN e camadas de malha de carbono revelaram que a adição de fibras de basalto ofereceu melhor ligação com a matriz [32]. Essa evidência é consistente com a resistência à flexão adquirida e o modo de falha das placas compósitas GRFN-MK reforçadas com malha de carbono juntamente com a fibra de basalto [32].

2.8 PLACAS GRFN EM COMPARAÇÃO COM PLACAS DE FIBROCIMENTO

Placas de GRFN à base de MK reforçadas com bambu tratado [1,13,16], fique [26], juta [27,29], sisal [29], malva [36], curauá [36] ou fibras de basalto [32] normalizadas na resistência à flexão de três pontos foram comparáveis às placas de fibrocimento (FC) reforçadas com sisal [37], casca de arroz [38], curauá [39], abacá [40], celulose industrial [80-83] ou fibras de bambu [84] (Tabela 2.8). A normalização dos resultados da resistência à flexão de três pontos em função daquela de quatro pontos foi obtida pela média estatística dos resultados de vários estudos [85-87]. Todas as placas GRFN e placas FC atenderam aos requisitos de resistência à flexão conforme ASTM C1186-08 [88] para placas planas de fibrocimento destinadas a aplicações como revestimentos, fachadas, paredes cortina, intradorsos e assim por diante. O padrão para os requisitos de grau de resistência à flexão de equilíbrio são $I \geq 4$, $II \geq 10$, $III \geq 16$ e $IV \geq 22$ MPa. A placa híbrida de fibra e tira de bambu GRFN KNa-B1A-BTA [1,13] e as

placas FC-Ar-Curauá [39], FC-Abacá [40], FC-Ar-CeluloseEH [80], FC-Ar-CeluloseS [81] e FC-Ar-Bambu [84] alcançaram o mais alto grau padrão IV.

Os valores da resistência à flexão das placas foram bastante variados (70%), em razão das diferentes composições da matriz e reforços. A placa menos resistente foi a FC-CascArroz [38] com 7,0 MPa (classe I) e a mais resistente FC-Abacá [40] com 71,9 MPa (classe IV). A placa GRFN Na-Ar-Sisal [29] com resistência de 19,9 MPa (classe III) comparou-se à FC-Ar-Sisal [37] com 21,1 MPa (classe III), enquanto a GRFN K-Curauá-TA [36] com 14,4 MPa (classe II) mostrou-se menos resistente que a FC-Ar-Curauá [39] com 39,2 MPa (classe IV).

Os estudos publicados que se conhece envolvendo placas de GRFN trataram apenas da caracterização, sem avaliar aplicação para o produto. Por conseguinte, faz parte da presente tese o desenvolvimento de placa de GRFN-bambu para potencial aplicação como forro removível e revestimentos de paredes e fachadas na construção sustentável.

Tabela 2.8 - Placas de GRFN-MK tratadas, normalizadas na resistência à flexão de três pontos, em comparação com as placas de fibrocimento (FC).

MK / CP Id.	GRFN / FC	3Pt Flex	ASTM C1186
	Tipo	(MPa)	CLASSE
AMK76 Brasil [1,13] bambu-água	KNa-B4H	8.0	I
bambu-tira-álcali	KNa-B1A-BTA	27.6	IV
Metamax Alemanha [16] bambu	K-B4	8.4	I
Metamax Alemanha [26] fique	K-Fique-1D-A	12.8	II
Metamax Alemanha [27] juta	Na-Juta-U-A	21.7	III
Metacaulim Brasil [29] juta	Na-Ar-Juta	17.1	III
sisal	Na-Ar-Sisal	19.9	III
Metamax Alemanha [36] malva	Na-Malva-P-A	14.1	II
curauá	K-Curauá-TA	14.4	II
MK-CV Tcheca [32] basalto7,5%	Na-Ar-Bas7.5	14.4	II
CPAr-MK Brasil [37] sisal10vol%	FC-Ar-Sisal	21.1	III
CP-PVA Iraque [38] cascarroz5%	FC-CascArroz	7.0	I
CPAr-MK Brasil [39] curauá5vol%	FC-Ar-Curauá	39.2	IV
CP Indonésia [40] abacá5%	FC-Abacá	71.9	IV
CPAr Sorrentino [80] polpa-papel	FC-Ar-PolpaPapel	12.0	II
CPAr HardieBack [81] celulose	FC-Ar-CeluloseH	14.5	II
CPAr Everest [82] celulose	FC-Ar-CeluloseE	11.1	II
CPAr Everest-Heavy [82] celulose	FC-Ar-CeluloseEH	24.0	IV
CPAr Silbonit [83] celulose	FC-Ar-CeluloseS	32.9	IV
CPAr Nigéria [84] bambu20vol%	FC-Ar-Bambu	34.6	IV

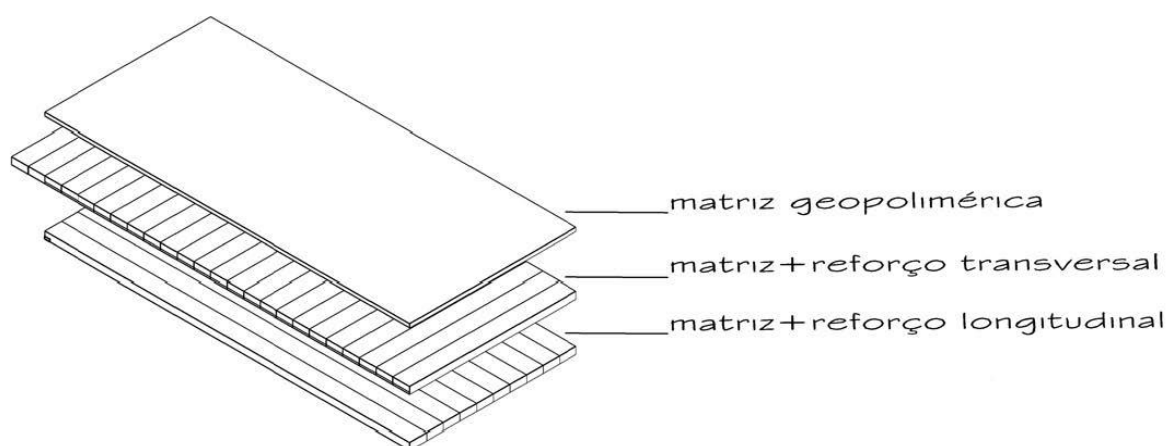
Fonte: Autora.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 DESIGN DA PLACA

Para a criação do módulo experimental do compósito, foi empregada uma matriz geopolimérica composta por silicato de sódio, metacaulinita e fibras de bambu. Durante a moldagem dos corpos de prova, 5% em massa de fibras de bambu foram adicionados manualmente a duas das três camadas do sistema, as quais foram dispostas em moldes plásticos específicos para os ensaios de resistência à flexão. A montagem da placa seguiu o modelo esquemático apresentado na Figura 3.1. A primeira camada consistiu em geopolímero sem adição de fibras, com 2 mm de espessura. Em seguida, foi aplicada uma segunda camada contendo 5% em massa de fibras de bambu orientadas transversalmente ao comprimento do molde, com espessura de 4 mm. Por fim, a terceira camada, também com 5% em massa de fibras de bambu, teve as fibras alinhadas longitudinalmente, igualmente com 4 mm de espessura. A escolha por um design com fibras orientadas transversal e longitudinalmente não foi aleatória. Baseamo-nos no entendimento de que essa configuração tende a conferir uma resistência mecânica superior em compósitos reforçados com fibras, em comparação com fibras dispostas aleatoriamente. Portanto, não exploramos outros designs, como a fibra dispersa, visando otimizar o desempenho estrutural do material para as aplicações propostas. Além das placas, corpos de prova em forma de barras com dimensões de 20 x 20 x 110 mm foram preparadas em moldes plásticos de alta resistência para os testes de flexão. As amostras em forma de placas foram montadas em moldes com dimensões internas de 100 x 10 x 220 mm. Todos os moldes foram tampados, permitindo a aplicação de pressão uniforme sobre as amostras, a fim de garantir a homogeneidade na espessura das placas.

Figura 3.1 - Representação esquemática da placa geopolimérica reforçada com bambu.

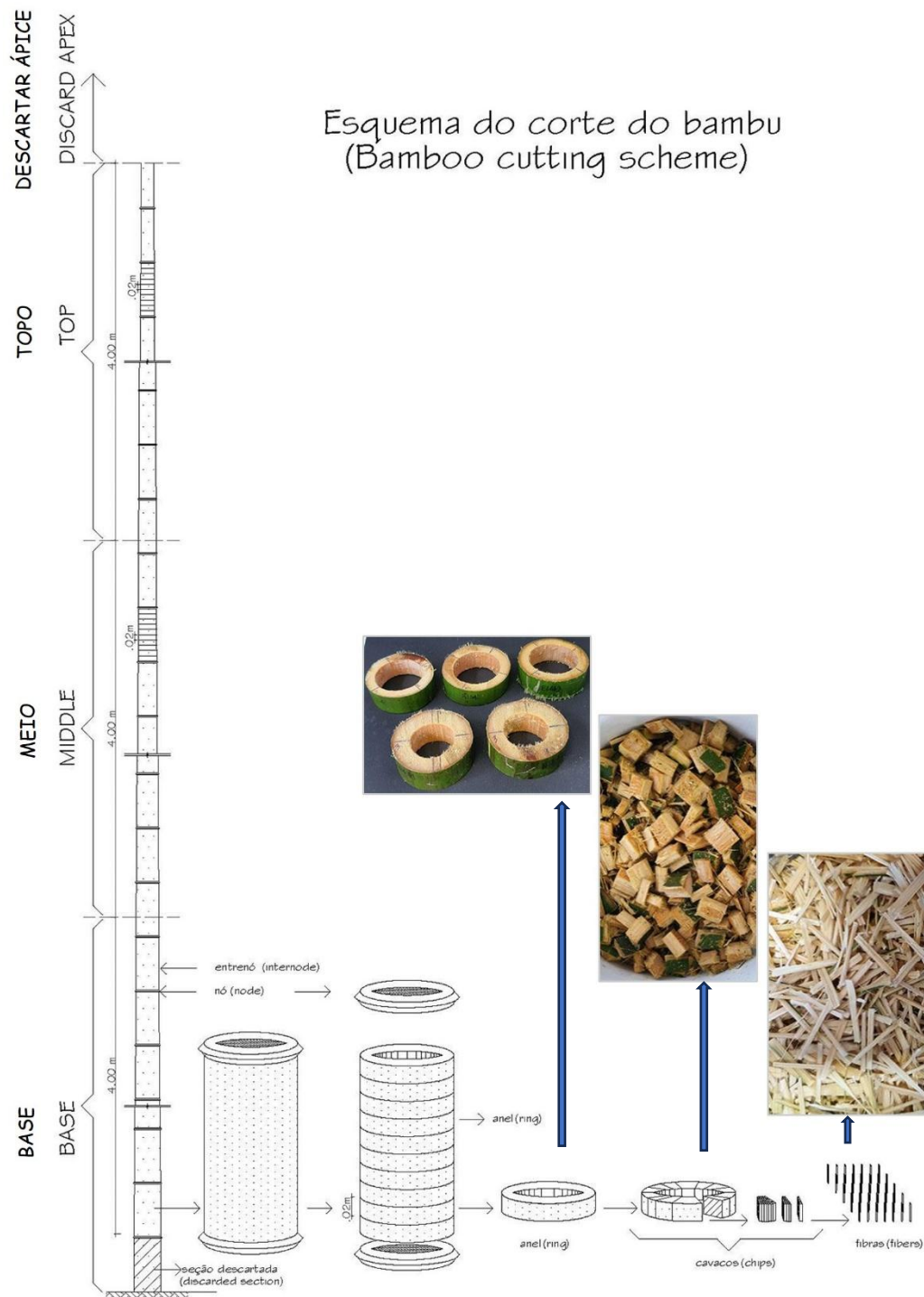


Fonte: Autora.

3.2 PROCESSAMENTO DAS FIBRAS DE BAMBU, ARGILA E AREIA

A Figura 3.2 ilustra o processamento das fibras de bambu. Um colmo de *Guadua* de quatro anos foi coletado em uma área de plantio de pesquisa em Manaus utilizando uma serra recíproca De Walt. O colmo foi dividido em três seções de 4 metros de comprimento cada uma, a contar da base, sendo descartada para esta pesquisa a seção superior, assim como todos os seus nós. As seções foram identificadas como base (B – próxima ao solo), meio (M - central) e topo (T - superior).

Figura 3.2 - Representação esquemática do processamento das fibras de bambu.



Fonte: Autora.

O processamento e tratamento das fibras de bambu tomaram como base vários trabalhos de referência [1,31,43-46,65,89-91]. Os entrenós foram lavados e imersos em água para remoção do amido. Parte das fibras recebeu tratamento adicional em meio alcalino, com concentrações de 0,1 M e 1 M, para remoção da lignina e hemicelulose. O tratamento com o licor de 1 molar apresentou melhor resultado e foi usado neste trabalho. As fibras utilizadas para reforço nas amostras de controle receberam apenas tratamento por imersão em água. Os entrenós de bambu foram cortados em anéis de 20 mm de espessura utilizando uma serra circular de bancada (Makita) e posteriormente processados em um triturador de resíduos orgânicos (TR200-Trapp) para obtenção de cavacos. A separação manual dos feixes de fibras com dimensões superiores a aproximadamente $1,5 \times 1,0 \times 20$ mm foi realizada, com posterior ajuste dimensional utilizando estilete. A densidade básica do bambu *Guadua* foi determinada a partir de amostras coletadas da base, meio e topo dos entrenós, resultando em $0,54 \pm 0,02$ g/cm³. As fibras foram secas em estufa a 104 ± 2 °C por 24 h e armazenadas em sacos selados até a utilização ou realização do tratamento alcalino. A eficácia dos tratamentos foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Para o tratamento alcalino, as fibras secas foram imersas por 30 minutos em solução de NaOH 1 M (Ph 14) em água deionizada. A neutralização foi realizada com solução de ácido acético 0,7 M (pH 6–7) também em água deionizada, com as fibras permanecendo imersas por mais 10 minutos após a lavagem.

A argila caulinita coletada foi dispersa em água e peneirada para remoção de impurezas e partículas de areia acima de 75 µm. O material retido na peneira #200 foi descartado, enquanto o material passante foi calcinado a 750 °C por 1 h, com rampa de aquecimento de 2 °C/min, originando o metacaulim amazônico (MKA86), conforme ilustrado na Figura 3.3, no Laboratório de Engenharia e Construção Verde (INPA). A caracterização do metacaulim incluiu análises de tamanho de partícula (ATP), picnometria de densidade (PD), difração de raios X (DRX) e fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF), realizadas na Universidade de Illinois em Urbana-Champaign (UIUC). A densidade do metacaulim foi determinada em 2,57 g/cm³ utilizando um picnômetro de gás (Micromeritics AccuPyc II 1340, hélio). A análise granulométrica foi conduzida em um analisador de tamanho de partículas por dispersão a laser (Horiba LA-950V2, EUA). Por fim, a composição elementar e de óxidos foi determinada por EDXRF, utilizando um espectrômetro Shimadzu-7000 (50 kV, 100 µA, atmosfera de He e colimador de 10 mm).

Figura 3.3 - Argila caulinita processada em metacaulim.



Fonte: Autora.

Em resumo, as fibras foram caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia de energia dispersiva (MEV/EDS) e por DRX. Além disso, 9 kg de argila caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) proveniente da região Amazônica foram peneirados a úmido em malha #200 (75 μm) e secos em estufa a 104 °C por 24 h, para posterior caracterização por MEV, EDS, DRX e EDXRF, seguida de calcinação e nova análise microestrutural do metacaulim obtido.

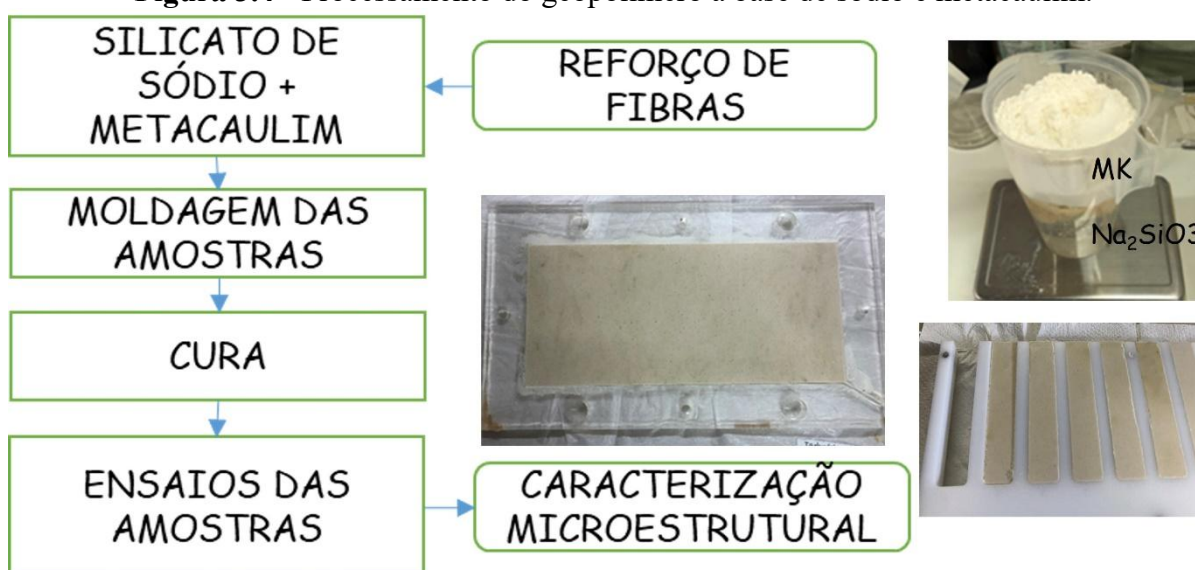
Foram utilizadas duas granulometrias distintas de areia comercial Quikrete® (The Quikrete Companies, LLC, Atlanta, GA, USA), em diferentes proporções, para otimizar a densidade de empacotamento e obter um compósito geopolimérico mais resistente e estável. A análise de tamanho de partícula por sedimentação a laser (Horiba® Laser PSA) indicou um d_{50} de 412 μm para a areia média (ArM), conforme a classificação granulométrica da norma brasileira NBR 6502, e um d_{50} de 407 μm para a areia fina (ArF), conforme a ASTM D2487. Proporções de 28% e 20% em massa de ArM e ArF foram testadas com base na granulometria da argila caulinita e na trabalhabilidade das misturas.

3.3 PROCESSAMENTO DO GEOPOLÍMERO

Os geopolímeros (GPs) com composição teórica $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 11\text{--}13\text{H}_2\text{O}$ foram produzidos (Figura 3.4) com solução comercial de silicato de sódio D® (PQ Corporation, Pensilvania, EUA) $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,06\text{SiO}_2 \cdot 12,8\text{H}_2\text{O}$ (estequiometria nominal 1:2:13) e metacaulim (MK) $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, misturados a 2.000 rpm por 10 min em misturador de alto cisalhamento (IKA). O silicato de sódio $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ foi produzido a partir da transformação estequiométrica do PQ-D® 1:2,06:12,8 para 1:2:11, mediante a adição proporcional de NaOH e SiO_2 . O GP $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ foi preparado com solução comercial de metassilicato de potássio anidro Kasolv® 16 ajustada para $\text{K}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$. Para execução dos corpos de prova, um percentual em massa geopolimérica de 0 ou 5% de fibras de bambu foi adicionado à mistura manualmente em três camadas: (1) Uma primeira camada com 2 mm de espessura foi colocada em moldes plásticos para testes de resistência à flexão. (2) Uma segunda camada de matriz geopolimérica reforçada com fibras de bambu alinhadas transversalmente (GBY) foi

aplicada nas proporções de massa 0-5%. (3) A terceira camada de matriz geopolimérica reforçada com fibras de bambu orientadas longitudinalmente (GBx) foi aplicada com espessura de 4 mm e as mesmas proporções de reforço. (4) A compactação foi realizada por meio de uma tampa de pressão. O molde foi inserido em saco plástico tipo Ziplock, para evitar a perda acelerada de água durante a cura. (5) Em seguida, foi levado ao forno numa temperatura de 50 °C por 24 h. (6) Após a desmoldagem, as amostras continuaram a curar em condições ambientes até o terceiro dia em saco plástico selado. (7) Em seguida, as amostras foram deixadas para secar em condições ambientes até que não houvesse mais perda de massa. Foram avaliadas densidade, perda de massa e resistência à flexão.

Figura 3.4 - Processamento do geopolímero à base de sódio e metacaulim.



Fonte: Autora.

3.4 RESISTÊNCIA À FLEXÃO E ABSORÇÃO DE ÁGUA PARA BARRAS COMPOSTAS

As amostras prismáticas de dimensões 20 × 20 × 110 mm, com vão de suporte (L_s) de 60 mm foram ensaiadas de acordo com a norma ASTM C78/C78M [74] que é equivalente a ABNT NBR 12142. Para a fabricação das amostras, seguiu-se exatamente a forma como a placa foi projetada: a camada inferior sendo apenas a matriz compósita do geopolímero, sendo a camada intermediária e superior a mistura da fibra e do compósito geopolimérico atuando como fração aglutinante. A única diferença entre a segunda e a terceira camada em relação às placas é a orientação das fibras, onde a camada intermediária e a camada final foram orientadas na direção longitudinal. A densidade aparente (DA) foi determinada com base no peso e nas dimensões da amostra imediatamente antes do teste. Para garantir 95% de confiabilidade dos

resultados, de acordo com a distribuição Weibull, um mínimo de 6 amostras por composição foi testado. A análise estatística de Weibull foi baseada na ASTM C1239 [92].

O módulo de ruptura ou resistência à flexão com carga no terço do vão foi calculado como segue:

$$R = \frac{P L_s}{b h^2} \quad (1)$$

onde:

R = módulo de ruptura (MPa),

P = carga máxima aplicada pela máquina de teste (N),

L_s = comprimento do vão (mm),

b = largura média da amostra (mm), na fratura, e

h = altura média da amostra (mm), na fratura.

Testes de conformidade na absorção de água de compósitos de geopolímeros foram realizados de acordo com as normas ASTM C1185 [93] e C1186 [88]. A absorção de água é um teste de rotina com valores relativos. O teste é feito para determinar a tendência de um produto em absorver água e, às vezes, determinar a uniformidade do produto. As amostras de barras retangulares foram usadas como segmentos representativos de placas, além de amostras de seção das placas. A absorção de água (AA) foi calculada usando a seguinte equação:

$$AA = \left(\frac{W_s - W_d}{W_d} \right) \times 100, \text{ massa\%} \quad (2)$$

onde:

W_s = massa saturada (g) da amostra submersa por 48 ± 8 h,

W_d = massa seca (g) da amostra 24 h no forno a $90 \pm 2^\circ\text{C}$.

A nomenclatura das composições geopoliméricas está resumida a seguir na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Nomenclatura das amostras da matriz e compósitos de geopolímeros (reforço em massa%).

GPMK	Descrição
NaMK	Matriz geopolimérica a base de sódio-metacaulim 1:1:4:11
NaBH5	NaMK reforçada c/ 5% fibra de bambu tratada c/ água
NaBA5	NaMK reforçada c/ 5% fibra de bambu tratada c/ álcali (BA)
KMK	Matriz GP a base de potássio-metacaulim 1:1:4:11
KArM28	KMK reforçada c/ 28% areia média (ArM)
KArF28	KMK reforçada c/ 28% areia fina (ArF)
KArF20	KMK reforçada c/ 20% areia fina (ArF)
KArM28B5	KMK reforçada c/ 28% ArM e 5% BA
KArF28B5	KMK reforçada c/ 28% ArF e 5% BA
KArF20B5	KMK reforçada c/ 20% ArF e 5% BA
NaArF20B5	NaMK 1:1:4:13 reforçada com 20% ArF e 5% BA

Fonte: Autora.

3.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

A natureza das interações entre os feixes de fibras e a matriz geopolimérica foi analisada por MEV e EDS (TESCAN® VEGA3, Brno, República Checa) no Laboratório de Microscopia Eletrônica do INPA (Manaus, AM, Brazil). Outras imagens e fractografia de compósitos geopoliméricos pós-testados foram realizadas por MEV e EDS (Thermo Axia ChemSEM, EUA) no *Materials Research Laboratory* (UIUC, Urbana, IL, EUA). As amostras do compósito geopolimérico foram colocadas em dessecador por pelo menos 24 horas para evitar desgaseificação no MEV. Caracterização de fase do geopolímero testado foi realizada por meio de DRX.

A caracterização de fase dos materiais precursores e compósitos geopoliméricos foi realizada por meio de DRX, em um modelo Siemens/Bruker D8 Advance com comprimento de onda de radiação Cu K-alfa de 0,15418 nm usando um suporte de quartzo sem fundo. O DRX foi realizado de acordo com os seguintes parâmetros: geometria Bragg-Brentano acoplada teta-teta com velocidade de varredura de 1 grau min⁻¹ com incrementos de 0,02 graus. Amostras de superfície polida foram preparadas para medições de DRX de compósitos reforçados com bambu. Enquanto amostras não reforçadas de pós geopoliméricos foram usadas para preencher o espaço de medição de DRX com fundo zero.

3.6 ENSAIOS DE CONFORMIDADE DAS PLACAS GEOPOLIMÉRICAS

Ensaio de conformidade de placas de geopolímero reforçadas com bambu foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR 15498-2016 [94] que é equivalente às normas ASTM C1185 [93] e C1186 [88]: a saber, resistência à flexão, densidade aparente, absorção de água, envelhecimento acelerado por imersão em água quente. Diferentes composições de placas geopoliméricas reforçadas com partículas minerais e fibras de bambu tratadas com álcali foram avaliadas para melhor atender os critérios das normas e estão descritas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Nomenclatura e descrição das placas de geopolímeros reforçadas (reforço em massa%).

GPNMK	GP Molar	Descrição da placa reforçada
B5-EQ	1:1:4:11	5% fibra bambu tratada c/ álcali (B); condição de equilíbrio (EQ)
B5-SA	1:1:4:11	5% B; condição saturada (SA)
B5-EA	1:1:4:11	5% B; condição de envelhecimento acelerado (EA)
C20B5-EQ	1:1:4:13	20% chamote (C) e 5% B; condição de EQ
ArF20B5-EQ	1:1:4:13	20% areia fina (ArF) e 5% B; condição de EQ
ArF20B5-SA	1:1:4:13	20% areia fina (ArF) e 5% B; condição SA
ArF20B5-EQ	1:1:4:13	20% areia fina (ArF) e 5% B; condição de EA

Fonte: Autora.

3.6.1 Resistência à flexão

Quatro amostras de placas geopoliméricas compósitas (100 x 10 x 220 mm com vão de suporte de 180 mm) com idade de massa constante (14 dias) foram preparadas para cada condicionamento do teste de resistência à flexão de três pontos. As amostras da condição de equilíbrio (EQ) foram condicionadas durante 4 dias em câmara controlada na temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa de $50 \pm 5\%$, de forma que todas as faces estivessem adequadamente ventiladas. As amostras de teste na condição saturada (SA) foram imersas em água deionizada na temperatura de 23 ± 4 °C por um período mínimo de 48 h. As amostras foram testadas imediatamente após remoção da água. As placas foram testadas no laboratório AMTEL (UIUC, Urbana, IL, EUA) numa máquina INSTRON-1332 com célula de carga de 100 kN, vão de carga de 180 mm e razão de deflexão de 0,15 mm/s (ruptura entre 10 e 30 s). A espessura da amostra de teste foi medida em quatro pontos ao longo da linha de ruptura para um resultado médio.

A resistência à flexão de três pontos com carga no meio do vão foi calculada como segue:

$$R = \frac{3 P L_s}{2 b h^2} \quad (3)$$

onde:

R = resistência à flexão (MPa),

P = carga máxima (N),

L_s = comprimento do vão (mm),

b = largura da amostra (mm), e

h = altura média da amostra (mm).

As placas GRFN devem atender aos requisitos de resistência à flexão padrão ASTM C1186-08 [88] e/ou ABNT NBR15498 [94] para placas planas de fibrocimento destinadas a aplicações como revestimentos, fachadas, paredes cortina, e intradorsos. O padrão ASTM (I a IV) / ABNT (1 a 5) para os requisitos de grau de resistência média à flexão de equilíbrio são $I/2 \geq 4 / 7$, $II/3 \geq 10$, $III/4 \geq 16$ e $IV/5 \geq 22$ MPa (Tabela 3.3). Os requisitos para placas classe A (uso externo) na condição saturada são $I/2 \geq 4$, $II/3 \geq 7$, $III/4 \geq 13$ e $IV/5 \geq 18$ MPa (Tabela 3.3). As placas de classe A podem ser expostas ao sol, calor e altas umidades, enquanto as de classe B são indicadas para áreas internas, ou aplicações externas sem incidência direta de sol, exceto quando protegidas com revestimento ou impregnação. As categorias estão ligadas diretamente aos resultados de resistência à flexão, sendo seus valores diretamente proporcionais à resistência do material, conforme ABNT 15498 [94] e/ou ASTM C1186 [88], com pequenas variações.

Tabela 3.3 - Requisitos de resistência à flexão de acordo com as normas ASTM e ABNT.

Categoria		Classe A/B- R_{EQ} (MPa)		Classe A- R_{SA} (MPa)	
ASTM	ABNT	ASTM	ABNT	ASTM	ABNT
-	1	-	4	-	-
I	2	4	7	4	4
II	3	10	10	7	7
III	4	16	16	13	13
IV	5	22	22	18	18

Fonte: Autora.

3.6.2 Densidade aparente

O teste de densidade aparente foi feito a partir de corpos de prova de 100 x 100 mm retirados das amostras ensaiadas em flexão na condição de equilíbrio. O volume da amostra foi determinado pelo método de deslocamento de água, segundo o princípio de Arquimedes. A massa seca foi determinada após secagem em forno elétrico a 90 ± 2 °C durante 24 h, até que a variação entre duas pesagens consecutivas, com intervalo mínimo de duas horas, fosse inferior a 0,1% da massa [93]. A densidade aparente (DA) foi calculada pela equação:

$$DA = \frac{W_d}{V}, \text{ g/cm}^3 \quad (4)$$

onde:

W_d = massa seca (g), após 24 h em estufa a 90 ± 2 °C,

V = volume da amostra (cm^3).

3.6.3 Absorção de água

O ensaio de absorção de água, de caráter comparativo e indicativo, avalia a tendência do material em absorver água, servindo também para verificar a uniformidade do compósito. Amostras de 100 x 100 mm, extraídas dos corpos de prova de flexão, foram secas até massa constante a 90 ± 2 °C e posteriormente resfriadas a temperatura ambiente em dessecador. Após resfriamento, as amostras foram pesadas em balança com precisão de 0,5% da massa da amostra, e a massa seca registrada. Na sequência, as amostras foram imersas em água deionizada a 23 ± 4 °C durante 48 ± 8 h [93]. A absorção de água foi determinada conforme a equação (2).

3.6.4 Envelhecimento acelerado por imersão em água quente

Este ensaio simula a interação química de longo prazo e os efeitos de envelhecimento em meio úmido e quente, acelerando a degradação potencial dos materiais constituintes. Trata-se de um ensaio comparativo [88,93,94].

Foram preparadas quatro placas geopoliméricas compósitas com dimensões de 100 x 10 x 220 mm e massa constante, destinadas ao envelhecimento acelerado (EA) e aos ensaios de

resistência à flexão, conforme descrito na Seção 3.6.1. Os corpos de prova foram imersos em solução aquosa saturada de NaOH ($\text{pH} > 12$), mantida a 60 ± 2 °C por 56 ± 2 dias. Após esse período, as amostras foram transferidas para câmara de condicionamento a 23 ± 2 °C e $50 \pm 5\%$ de umidade relativa, permanecendo por 48 ± 2 h. Posteriormente, realizou-se inspeção visual para identificação de fissuras, delaminações ou outros defeitos aparentes, registrando-se todas as ocorrências. Os ensaios de resistência à flexão das amostras envelhecidas foram conduzidos conforme a Seção 3.6.1, comparando-se os resultados com os valores obtidos em estado saturado (SA). Para cada par de resultados, a razão individual (r_i) entre a resistência à flexão da amostra envelhecida (R_{Eai}) e da amostra saturada (R_{Sai}) foi calculada utilizando a equação [93,94]:

$$r_i = \frac{R_{Eai}}{R_{Sai}}, (i = 1 \text{ a } 4) \quad (5)$$

onde:

R_{Eai} = resistência à flexão da i-ésima amostra de envelhecimento acelerado (MPa),

R_{Sai} = resistência à flexão da i-ésima amostra controle de condicionamento saturado (MPa).

As amostras não devem apresentar fissuras ou alterações estruturais visíveis que comprometam seu desempenho em serviço. As razões obtidas devem ser reportadas [84]. Por fim, calcula-se a média (r), o desvio padrão (dp) das razões individuais e a estimativa inferior de confiança a 95% (L_{95}), pela expressão [93,94]:

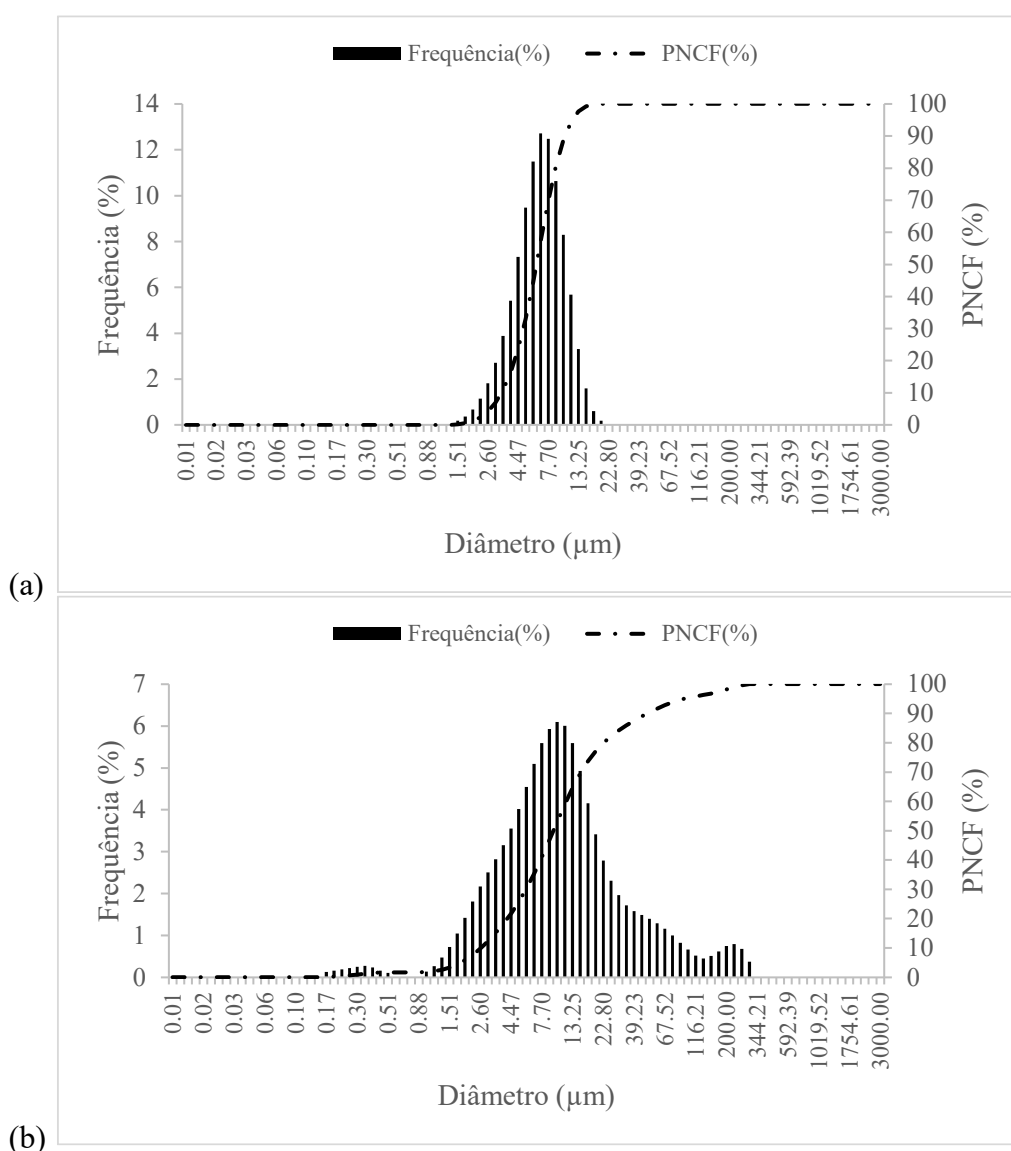
$$L_{95} = r - 0.58 dp \quad (6)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PRECURSORES

A caracterização microestrutural dos materiais precursores utilizados na matriz geopolimérica, incluindo a argila caulinita amazônica e o metacaulim obtido a partir dela, é apresentada a seguir. A análise de tamanho de partícula (ATP) do metacaulim amazônico revelou uma distribuição unimodal, com valores de $d_{10} = 3,32 \mu\text{m}$, $d_{50} = 6,22 \mu\text{m}$ e $d_{90} = 10,43 \mu\text{m}$ (Figura 4.1(a)). Por sua vez, a argila caulinita apresentou tamanho de partícula com $d_{10} = 2,63 \mu\text{m}$, $d_{50} = 9,43 \mu\text{m}$ e $d_{90} = 49,60 \mu\text{m}$ (Figura 4.1(b)).

Figura 4.1 - Distribuição do tamanho de partículas de (a) metacaulim amazônico produzido em laboratório e (b) argila caulinita amazônica.



PNCF (%) = porcentagem de número cumulativo mais fino. Fonte: Autora.

As composições de óxidos das amostras de argila caulinita e metacaulim, determinadas por EDXRF, estão resumidas na Tabela 4.1. O metacaulim amazônico apresentou razão molar Si/Al de 1,25 e teor de ferro de 0,85% em massa. Os cálculos das razões molares de óxidos para

a formulação dos geopolímeros basearam-se nessas análises. A principal composição de óxidos do metacaulim utilizado pode ser representada pela fórmula empírica $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, enquanto óxidos secundários, como TiO_2 , Fe_2O_3 , K_2O e MgO , presentes em teores reduzidos, não desempenharam papel relevante na síntese dos geopolímeros.

Tabela 4.1 - Composição química (% em massa) do caulim da Amazônia. in natura, metacaulim obtido por calcinação, e respectiva razão Si/Al.

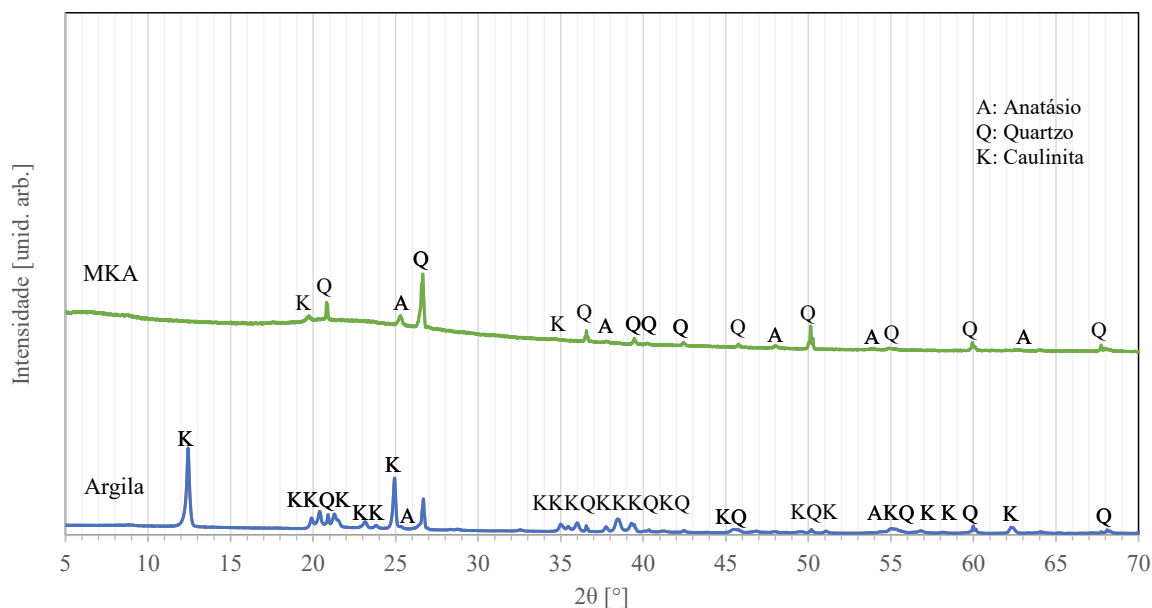
Amostra	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	MgO	K_2O	ZrO_2	Si/Al
Metacaulim	54.00	43.26	0.85	1.22	0.28	0.33	0.06	1.25
Argila	54.40	42.31	1.07	1.44	0.28	0.44	0.07	1.29

Fonte: Autora.

Os difratogramas de DRX (Figura 4.2) mostram os padrões cristalográficos da argila caulinita amazônica e do metacaulim resultante. O baixo teor de ferro ($< 0,9\%$ em massa) na argila, evidenciado também pela coloração esbranquiçada, justificou a ausência de fases minerais de ferro, como hematita (Fe_2O_3), confirmada pelas análises de DRX. A calcinação da argila a 750°C promoveu quase completa decomposição da fase caulinita, evidenciada pelo desaparecimento de seus picos característicos no difratograma do metacaulim (MKA), indicando a transformação bem-sucedida em um metacaulim altamente reativo. Essa conversão resultou na formação de um halo amorfo, perceptível como um espalhamento difuso entre 15° e 30° em 2θ , característico da estrutura desordenada do material calcinado.

As análises quantitativas de fases, realizadas pelo método de Rietveld, apontaram que a argila caulinita amazônica era predominantemente composta por caulinita $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$ (PDF# 00-058-2030), quartzo SiO_2 (PDF# 00-046-1045) e anatásio TiO_2 (PDF# 00-021-1272). Após o processo de calcinação, o metacaulim amazônico apresentou 86% de fase amorfa (MKA) e aproximadamente 14% de fases cristalinas remanescentes, representadas por quartzo e anatásio (Figura 4.2).

Figura 4.2 - Padrões de DRX da argila caulinita amazônica e do metacaulim amazônico (MKA).



Fonte: Autora.

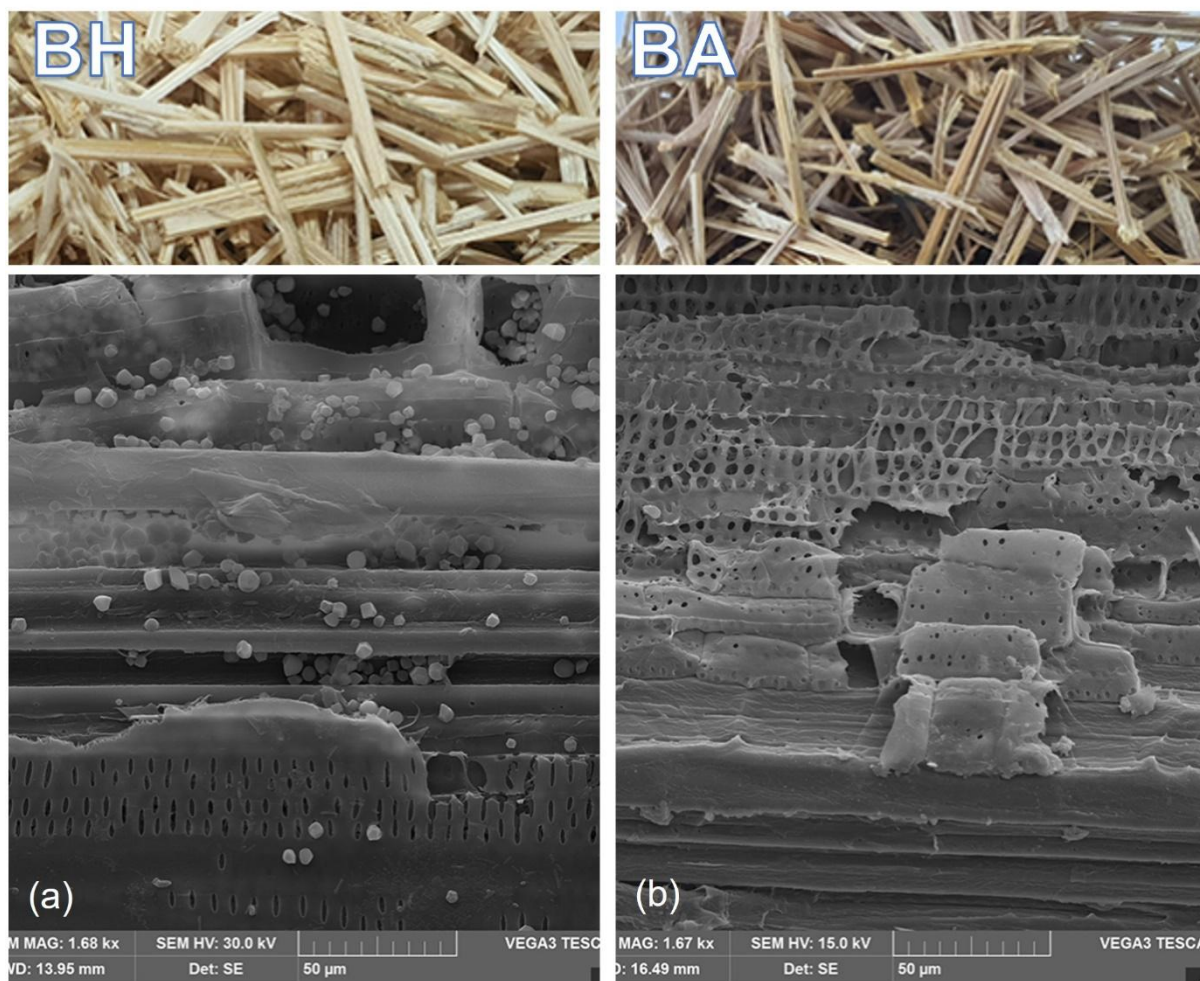
4.2 TRATAMENTO DAS FIBRAS DE BAMBU

A eficácia dos tratamentos das fibras de bambu, realizados em água e em solução alcalina de 1 M NaOH, foi avaliada por meio de MEV. As micrografias obtidas (Figura 4.3) evidenciaram a efetividade do tratamento alcalino na remoção de amido e lignina, preservando a estrutura de celulose das fibras.

Na micrografia das fibras de bambu *Guadua* submetidas apenas ao tratamento com água (Figura 4.3(a)), observam-se ainda vestígios de amido e lignina presentes nas células parenquimatosas. Por outro lado, o tratamento alcalino (Figura 4.3(b)) demonstrou a eliminação eficiente desses componentes, resultando em uma maior proporção relativa de celulose na fibra. Essa purificação contribui para o aumento da resistência mecânica, favorecendo o melhor escoamento e penetração da matriz geopolimérica nos espaços parenquimatosos das fibras. Conforme descrito na literatura, a redução dos teores de lignina e hemicelulose nas fibras celulósicas está associada ao aumento do índice de cristalinidade, o que potencializa suas propriedades mecânicas [95]. Além disso, notou-se que os feixes de fibras tratados com água mantiveram uma superfície mais lisa, devido à menor remoção de constituintes orgânicos. Em contrapartida, as fibras tratadas em solução alcalina apresentaram uma superfície visivelmente mais rugosa e sulcada, resultado da maior extração de materiais amorfos. Esses sulcos e relevos

formados na superfície das fibras alcalinizadas podem contribuir para a melhoria da ancoragem mecânica entre a fibra e a matriz geopolimérica, promovendo melhor aderência e desempenho estrutural do compósito. Tais observações estão de acordo com resultados reportados em estudos anteriores [12,16,34].

Figura 4.3. Micrografia MEV e imagem digital de fibras de bambu *Guadua* (a) tratadas com água (BH), revelando amido (pequenas partículas redondas) e lignina nas células parenquimatosas; (b) tratadas alcalinamente (BA), revelando a eliminação de amido e lignina.



Fonte: Autora.

4.2.1 Sustentabilidade e viabilidade em campo do tratamento

Enxergo o tratamento alcalino das fibras de bambu com solução de 1 M de NaOH por 30 minutos, seguido de enxágue com água para neutralização, como um processo que possui potencial de sustentabilidade e viabilidade, mas que requer considerações importantes:

Sustentabilidade

Do ponto de vista da sustentabilidade, o uso de hidróxido de sódio (NaOH) levanta a questão da origem e produção desse reagente, que geralmente envolve processos industriais

com consumo energético. No entanto, em comparação com outros tratamentos químicos mais agressivos ou o descarte de materiais sem tratamento, a solução de NaOH pode ser vista como uma alternativa mais controlável e com menor impacto residual se o descarte da água de enxágue for gerenciado adequadamente.

A quantidade de NaOH utilizada e o volume de água para enxágue são fatores críticos. A busca por um balanço hídrico otimizado e a possibilidade de reutilização ou tratamento da água de descarte seriam passos importantes para aumentar a sustentabilidade do processo. Além disso, a curta duração do tratamento (30 minutos) contribui para a eficiência energética e para a redução do consumo de recursos.

Viabilidade no Campo

A viabilidade no campo é um desafio que estamos conscientes. O tratamento com NaOH exige:

- **Controle de dosagem e tempo:** É preciso garantir que os operadores em campo possam seguir as instruções de concentração e tempo de imersão para obter resultados consistentes.
- **Segurança:** O NaOH é uma substância corrosiva, o que demanda o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) adequados e treinamento para os trabalhadores, algo que nem sempre é facilmente implementável em todas as realidades de campo.
- **Disponibilidade de água:** O processo de neutralização por enxágue requer um volume considerável de água limpa, o que pode ser um limitante em regiões com escassez hídrica.
- **Infraestrutura para descarte:** A água resultante do enxágue, mesmo que diluída, pode conter resíduos alcalinos e de lignina do bambu, necessitando de um descarte responsável para não contaminar o solo ou cursos d'água.

Acredito que, para tornar esse tratamento amplamente viável no campo, seriam necessárias soluções simplificadas e kits de tratamento, além de treinamento e capacitação para as comunidades ou equipes que o aplicariam. Pesquisas futuras poderiam focar em sistemas de reciclagem da água de enxágue ou na busca por alternativas de neutralização menos dependentes de grandes volumes de água.

Em suma, embora haja pontos a serem aprimorados para otimizar a sustentabilidade e viabilidade em larga escala no campo, os resultados promissores obtidos com o tratamento justificam a continuidade das pesquisas para superar esses desafios.

4.3 RESISTÊNCIA À FLEXÃO E ABSORÇÃO DE ÁGUA DE COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS

Várias configurações de compósitos geopoliméricos foram avaliadas quanto ao desempenho em resistência à flexão e absorção de água. As matrizes geopoliméricas utilizando silicato de sódio ou potássio e metacaulinita foram processadas com uma estequiometria molar de 1:1:4:11. Adicionalmente, um terceiro compósito, denominado GP NaMK (1:1:4:13), foi desenvolvido com o objetivo de alcançar maior resistência. Este compósito foi reforçado com 20% em massa de areia fina e 5% em massa de fibra de bambu tratada com álcali. A escolha por essa composição também se deu pelo uso do silicato de sódio, que representa uma alternativa de menor custo em relação ao silicato de potássio, contribuindo para a viabilidade econômica do material. A Tabela 4.2 resume os valores médios de resistência à flexão de 4 pontos de espécimes de compósito de geopolímero, juntamente com seus parâmetros estatísticos Weibull com intervalos de confiança de 95%. A descrição dos compósitos geopoliméricos encontra-se na Tabela 3.1.

Tabela 4.2 - Resistência à flexão média de 4 pts. e densidade aparente da matriz geopolimérica (NaMK) e compósitos com partículas de areia (ArM, ArF) e fibras de bambu (BH5, BA5, B5) e parâmetros de Weibull.

GPMK	Módulo β Forma	Escala σ (MPa)	σ_{fmed} (MPa)	Desv. Pad. (MPa)	Inf 95% (MPa)	Sup 95% (MPa)	Densidade (g/cm ³)
NaMK	5.656	5.11	4.73	0.97	4.16	5.36	1.58
NaBH5	5.951	8.46	7.85	1.53	6.88	9.01	1.61
NaBA5	6.983	11.39	10.66	1.79	9.54	12.02	1.50
KArM28	-	-	6.23	0.05	-	-	1.75
KArF28	-	-	6.93	1.12	-	-	1.73
KArF20	-	-	7.37	0.18	-	-	1.67
KArM28B5	11.060	12.13	11.59	1.27	10.62	12.73	1.68
KArF28B5	-	-	10.23	0.02	-	-	1.66
KArF20B5	9.270	15.17	14.39	1.86	13.16	15.98	1.56
NaArF20B5	11.070	19.87	18.98	2.07	17.55	20.65	1.52
Inf 95% = limite inferior de 95% de confiança							
Sup 95% = limite superior de 95% de confiança							

Fonte: Autora.

Os resultados indicaram que, de forma geral, os compósitos apresentaram valores de resistência à flexão superiores em relação à matriz geopolimérica de referência NaMK (Figura 4.4(a)). Além disso, verificou-se uma melhora significativa nos módulos de Weibull,

evidenciando maior resistência à falha dos compósitos quando comparados a matrizes geopoliméricas monofásicas, especialmente com o aumento do volume de material [1].

O aprimoramento da resistência à flexão pode ser atribuído à incorporação das fibras de reforço, que introduziram um mecanismo de deflexão de trinca na interface matriz-reforço, caracterizada por ser mais fraca que a matriz, o que contribuiu para o aumento da tenacidade do compósito [1,16]. As fibras de bambu, por sua elevada capacidade de tração, desempenharam papel relevante tanto na sustentação direta de cargas de flexão quanto na restrição da propagação de fissuras.

Observou-se ainda uma diferença expressiva entre os compósitos contendo fibras tratadas com solução alcalina e aqueles com fibras tratadas apenas com água, em termos de resistência à flexão. Tal diferença evidenciou a eficácia do tratamento alcalino com solução 1 M NaOH. A adição de 5% em massa de fibras de bambu tratadas alcalinamente (BA5) elevou a resistência à flexão para $10,7 \pm 1,79$ MPa, valor aproximadamente 1,4 vezes superior ao obtido com fibras tratadas com água (BH5, $7,8 \pm 1,53$ MPa) e cerca de 2,3 vezes superior à resistência da matriz geopolimérica pura (NaMK, $4,7 \pm 0,97$ MPa).

Esse desempenho aprimorado está diretamente relacionado à maior rugosidade superficial das fibras após o tratamento alcalino, conforme observado na Figura 4.3. Essa modificação superficial favoreceu a adesão mecânica entre as fibras e a matriz geopolimérica, resultando em melhores propriedades mecânicas globais do compósito, mesmo em comparação com resultados de trabalhos anteriores, como ilustrado na Figura 4.4(b) [1,12,16,34,35]. A nomenclatura utilizada para as amostras desses estudos anteriores encontra-se detalhada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Nomenclatura de amostras de matriz geopolimérica e compósitos de trabalhos anteriores.

GPMK	Descrição
KNaBH5 [1]	KNaMK 0.75+0.25:1:4:11 ref. 5% fibra de bambu tratada c/ água
KBH5a [12]	KMK 1:1:4:11 ref. 5% fibra de bambu tratada c/ água
KBH5b [16]	KMK 1:1:4:11 ref. 5% fibra de bambu tratada c/ água
NaMK [34]	Matriz geopolimérica a base de sódio-metacaulim 1:1:4:11
NaBA4 [34]	NaMK 1:1:4:11 ref. 4% fibra de bambu tratada c/ álcali*
NaB1 [35]	NaMK 1:1:4:11 ref. 1% fibra de bambu**

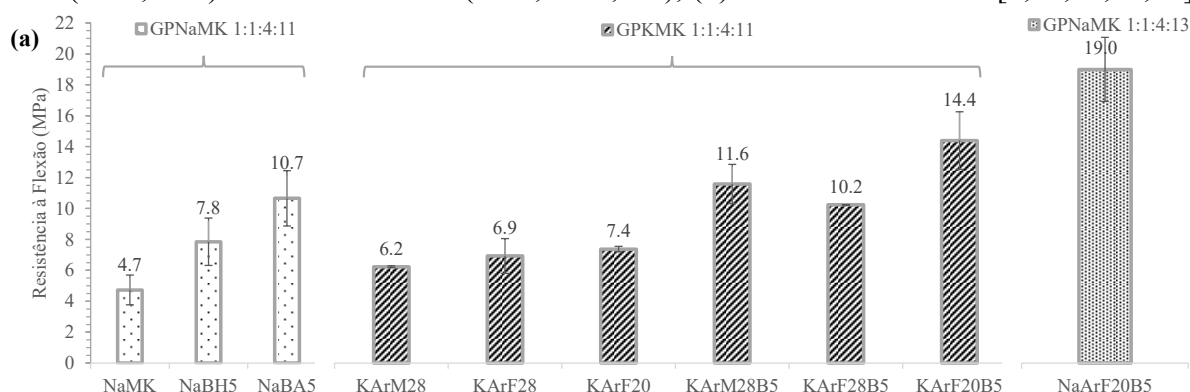
* Fibras de *Phyllostachis iridescens* ($6 \pm 1 \times 0,8-2,0$ mm) tratadas com 0,1 N de solução NaOH.

** Cavacos de bambu obtidos de uma oficina como resíduos, sem tratamento das fibras.

Fonte: Autora.

Entre os três compósitos geopoliméricos reforçados apenas com partículas de areia (KArM28, KArF28, KArF20), o reforçado com 20% em massa de areia fina (KArF20) rendeu a maior resistência. A incorporação de 5% em massa de fibras de bambu tratadas com álcali (B5) aos compósitos geopoliméricos de metacaulim e potássio reforçados com partículas de areia (KArM28B5, KArF28B5, KArF20B5) resultou em valores superiores de resistência à flexão. O compósito contendo 20% em massa de areia fina e 5% em massa de fibra de bambu (KArF20B5 = $14,4 \pm 1,86$ MPa) apresentou resistência aproximadamente duas vezes maior em relação ao compósito contendo apenas 20% em massa de areia fina (KArF20 = $7,4 \pm 0,18$ MPa). Esses resultados sugerem que matrizes geopoliméricas mais robustas, já reforçadas com partículas de areia, podem alcançar uma resistência à flexão superior com a adição de fibras de bambu, devido à eficiente interação mecânica na interface matriz-reforço, que atua na deflexão e na ponte de trincas, dissipando a energia da fissura. Adicionalmente, o compósito de metacaulim e sódio reforçado com 20% em massa de areia fina e 5% em massa de fibra de bambu (NaArF20B5 = $19,0 \pm 2,07$ MPa) demonstrou resistência 1,3 vezes superior à sua contraparte de potássio e aproximadamente o dobro da resistência do compósito geopolimérico de sódio reforçado apenas com 5% em massa de fibra de bambu (NaBA5) (Fig. 4.4(a)).

Figura 4.4 - Resistência à flexão de 4 pts. de (a) matriz de geopolímero NaMK 1:1:4:11 e compósitos à base de GPKMK 1:1:4:11 ou GPNaMK 1:1:4:13 reforçado com partículas de areia (ArM, ArF) e fibras de bambu (BH5, BA5, B5); (b) trabalhos anteriores [1,12,16,34,35].



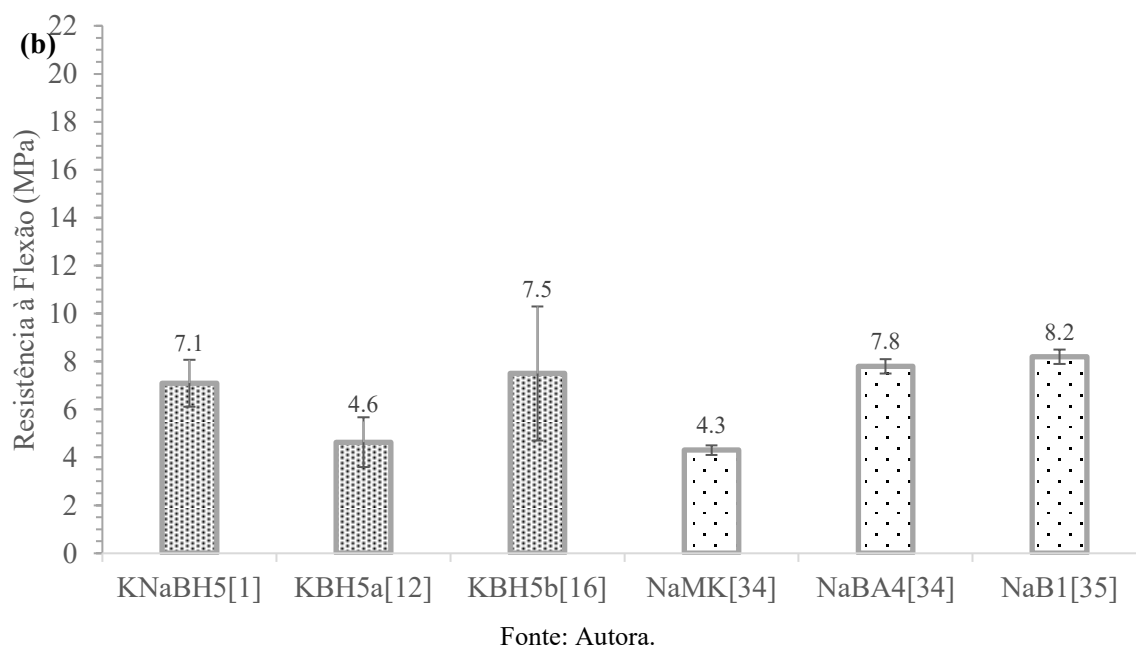
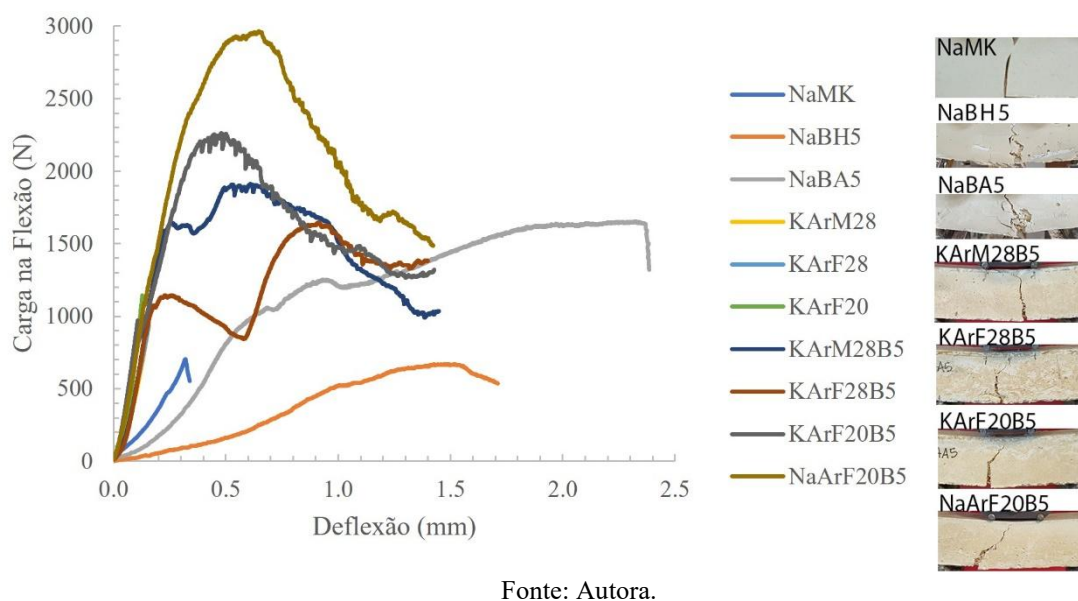


Figura 4.5 - Curvas de carga-deflexão típicas, padrões de fissuras e modos de falha da matriz geopolimérica NaMK e compósitos baseados em GPKMK ou GPNaMK reforçados com partículas de areia (ArM, ArF) e fibras de bambu (BH5, BA5, B5).



A Tabela 4.4, lista os resultados dos testes de conformidade na absorção de água de compósitos de geopolímeros. O comportamento de absorção de água é ilustrado na Fig. 4.6. Os testes de conformidade na absorção de água indicaram que todos os compósitos de geopolímero não reforçados com partículas de areia (NaMK, NaBH5, NaBA5) desenvolveram maior absorção e microfissuras em padrão de mapa. A alta absorção de água do NaBA5 foi comparável ao valor encontrado por outros pesquisadores para geopolímero à base de

metacaulim e sódio reforçado com fibra de bambu de 4% em massa [34]. Por outro lado, todos os compósitos geopoliméricos reforçados com partículas de areia e fibras de bambu (KArM28B5, KArF28B5, KArF20B5, NaArF20B5) produziram absorção de água menor e estavam livres de defeitos de secagem em estufa e saturação de água. Todos esses compósitos de geopolímeros reforçados com fibra de bambu e areia mostraram-se adequados para garantia de qualidade de placas compósitas de uso externo [88,93]. Partículas de areia fina adicionaram mais densidade de empacotamento aos compósitos de geopolímero e forneceram resistências mais altas, menor absorção de água, amostras sólidas/sem-defeitos e estáveis.

Tabela 4.4 - Resultados médios de absorção de água de compósitos geopoliméricos.

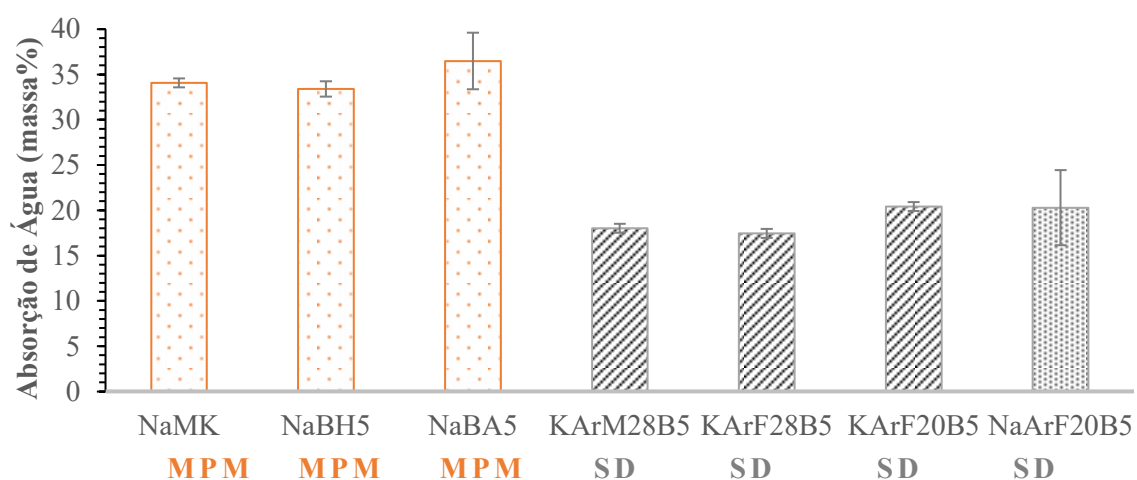
Amostra GPMK	Absorção Água (massa%)	Observação
NaMK	34.1	MPM
NaBH5	33.4	MPM
NaBA5	36.5	MPM
KArM28B5	18.0	SD
KArF28B5	17.5	SD
KArF20B5	20.4	SD
NaArF20B5	20.3	SD

MPM: Microfissuras em padrão de mapa

SD : Sem defeitos de secagem e saturação de água

Fonte: Autora.

Figura 4.6 - Comportamento de absorção de água da matriz de geopolímero NaMK 1:1:4:11 e compósitos à base de GPKMK 1:1:4:11 ou GPNMK 1:1:4:13 reforçados com partículas de areia (ArM, ArF) e fibras de bambu (BH5, BA5, B5).



Fonte: Autora.

Os compósitos geopoliméricos reforçados com fibra de bambu e areia resultaram em menor absorção de água do que a matriz de metacaulim do geopolímero. Geopolímeros intrínsecos foram suscetíveis a rachaduras devido à nano porosidade [5,96,97]. No entanto, quando os geopolímeros foram reforçados com particulados e fibras, a matriz do geopolímero foi mais forte e menos suscetível a microfissuras. Essa redução na absorção de água pode ser atribuída ao fechamento de vazios e poros com boa adesão das fibras orgânicas e da matriz inorgânica e das partículas de areia [34].

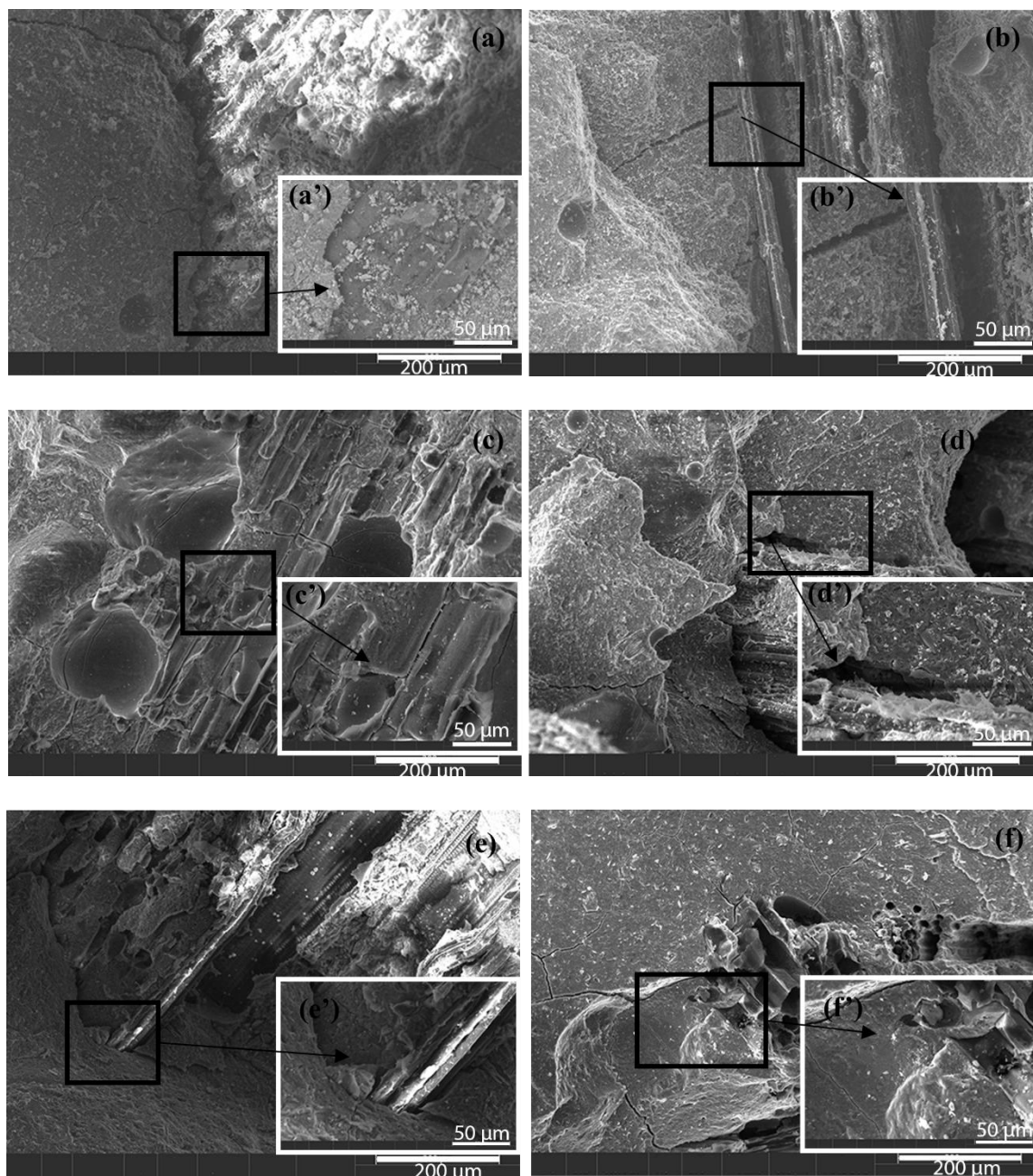
Considerando o bom desempenho na absorção de água e propriedades de resistência à flexão, a trabalhabilidade, e o acabamento mais liso das placas, a composição final do reforço deve consistir em 20% em massa de areia fina e 5% em massa de fibra de bambu tratada com álcali. Um total adicional de 12 placas compostas NaMKArF20B5 para testes de resistência à flexão em 3 pontos (nas condições de equilíbrio, saturado em água, e envelhecimento acelerado em água morna), densidade e absorção de água foram concebidas. Análises e avaliações de todas as placas processadas são descritas na seção 4.5.

4.4 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DOS COMPÓSITOS

As micrografias obtidas por MEV, apresentadas na Figura 4.7, mostram as superfícies de fratura das amostras, evidenciando a morfologia das fibras de bambu e suas interfaces com a matriz geopolimérica. Na Figura 4.7(a), referente ao compósito NaBH5, observa-se que o tratamento com água deionizada removeu parcialmente o amido das fibras de bambu, porém de forma insuficiente para expor de maneira eficaz a superfície das fibras. No detalhe (a'), nota-se ainda a presença de lignina bem definida, com regiões mais lisas, que dificultaram a adesão mecânica fibra-matriz. Por outro lado, a Figura 4.7(b) evidencia melhora significativa na adesão superficial no compósito NaBA5, resultado da remoção de lignina e amido promovida pelo tratamento alcalino. Conforme mostrado no detalhe (b'), a adesão foi mais efetiva, visto que a trinca, ao se aproximar da interface, teve sua energia dissipada, desviando-se ou sendo transferida para a matriz.

As micrografias MEV acompanhadas por análises elementares por EDS dos compósitos geopoliméricos à base de metacaulim reforçados com areia e fibras de bambu tratadas (Figuras 4.7(c)-(f)) confirmaram que a presença das partículas de areia aumentou a densidade de empacotamento da matriz e que as fibras estavam bem distribuídas e incorporadas ao compósito, favorecendo a integridade estrutural e o desempenho mecânico.

Figura 4.7 - Micrografias de MEV das superfícies de fratura dos compósitos geopolímeros reforçados com fibras de bambu: (a) NaBH5, (b) NaBA5, (c) KArM28B5, (d) KArF28B5, (e) KArF20B5 e (f) NaArF20B5.



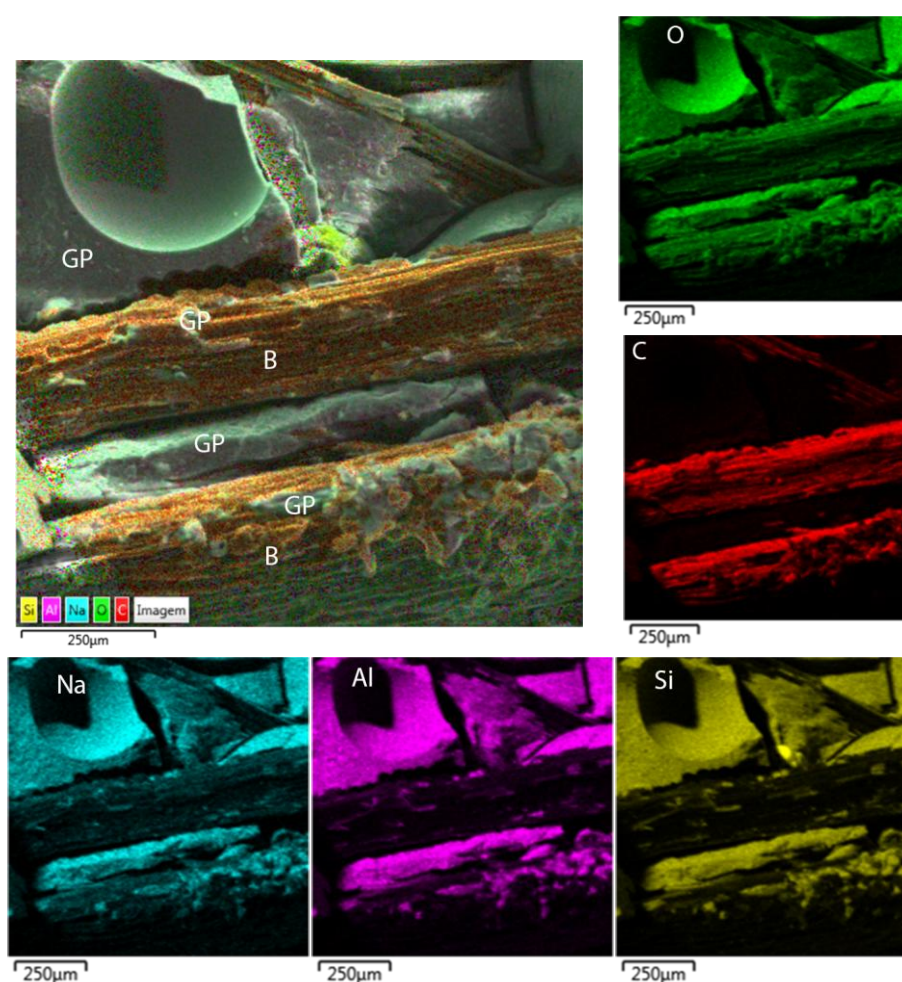
Fonte: Autora [98].

As imagens de mapeamento EDS das camadas na Figura 4.8 demonstraram que o compósito geopolimérico de maior resistência, NaArF20B5, apresentou boa integração mecânica da matriz com a fibra. A matriz GPNaMK, com a adição de partículas de areia fina, incorporou as fibras de bambu, conforme detectado nos mapas de elementos do EDS.

Devido à adesão mecânica matriz-fibra, a carga foi transferida da matriz para as fibras. No entanto, após determinado limite, as fibras não suportaram mais a carga aplicada, levando

à sua separação da matriz. Esse processo resultou em deformação longitudinal das fibras ou em sua fragmentação em fibras mais finas, uma vez que sua resistência máxima foi atingida. Durante o descolamento, as trincas foram desviadas para a interface mais frágil, propagando-se até alcançar outro feixe de fibras, onde a energia foi subsequentemente transferida.

Figura 4.8 - Mapas EDS de superfícies de fratura da amostra NaArF20B5 onde B é fibra de bambu e GP é matriz geopolimérica.



Fonte: Autora [98].

O efeito da incorporação de partículas de areia e fibras de bambu em compósitos geopoliméricos foi analisado, evidenciando a presença de duas fases cristalinas predominantes: quartzo e celulose. Os cristais de quartzo, característicos de compósitos geopoliméricos à base de metacaulim reforçados com areia, permaneceram quimicamente inertes durante o processo de geopolimerização, atuando como agentes de enchimento (*fillers*) na matriz e contribuindo para o aumento da resistência, sobretudo por meio de interações mecânicas com a estrutura do geopolímero. As fibras de bambu, por sua vez, desempenharam um papel fundamental como elementos de ponte para o controle de trincas, favorecendo a melhoria da resistência mecânica

do compósito. Esse comportamento [1,16] foi corroborado pela análise de MEV, conforme apresentado na Figura 4.7.

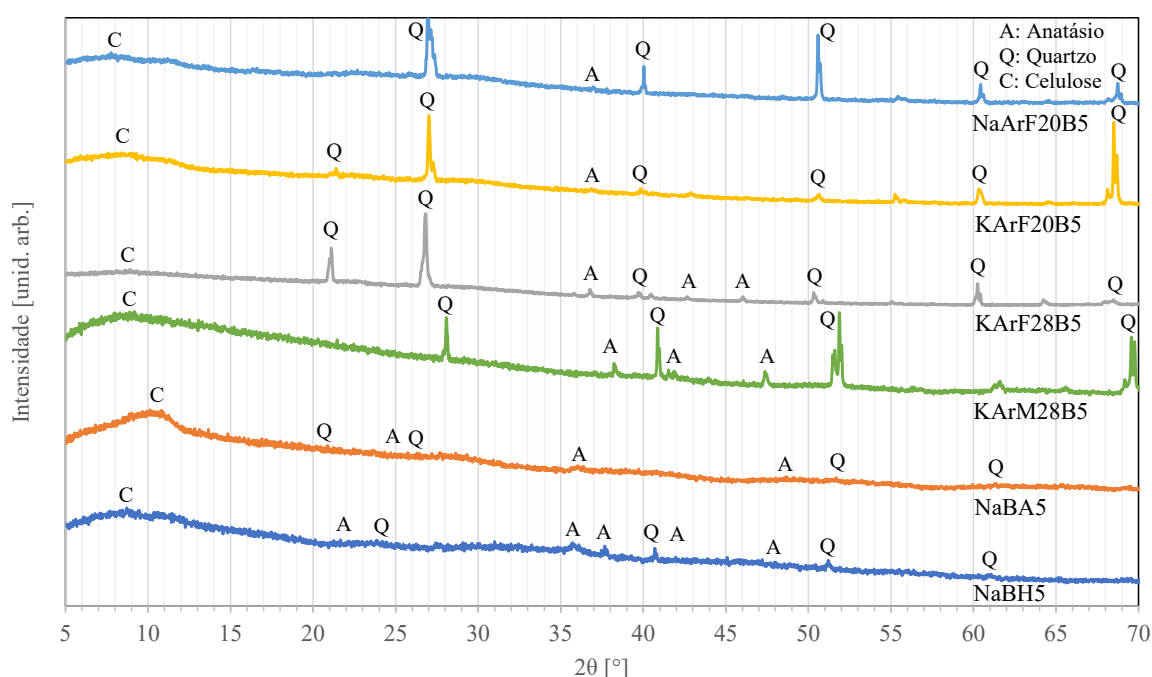
A resistência mecânica desses compósitos foi fortemente influenciada pela proporção da fase amorfa presente na matriz. De acordo com as Figuras 4.4(a) e 4.9, quanto maior o conteúdo amorfo, maior a resistência obtida. Esse efeito está associado à melhoria na ligação mecânica entre a matriz e as fibras, favorecida pela maior rugosidade superficial adquirida pelas fibras após o tratamento alcalino, que promoveu a remoção de lignina, como anteriormente observado na Figura 4.3 na comparação entre as fibras BH (tratadas com água) e BA (tratadas com NaOH).

Na caracterização por DRX (Figura 4.9), os números PDF 075-1537, 046-1045 e 056-1718 foram empregados para identificação das fases anatásio (A), quartzo (Q) e celulose (C), respectivamente. Para as amostras NaBH5 e NaBA5, os difratogramas revelaram picos associados à celulose e à lignina na faixa de 2θ entre 9° e 12° . O pico referente à lignina foi mais evidente na amostra NaBH5, manifestando-se como picos duplos, resultado da menor remoção desse componente no tratamento com água. Por outro lado, a amostra NaBA5 apresentou um pico mais intenso e definido de celulose, sem a presença detectável de picos de lignina na mesma faixa, evidenciando a eficácia do tratamento alcalino. Adicionalmente, o tratamento alcalino não só favoreceu a remoção de lignina e amido, mas também contribuiu para a formação de uma matriz geopolimérica com maior conteúdo amorfo, uma vez que parte do sódio (Na) necessário à reação foi fornecido pelo próprio processo de tratamento das fibras. A amostra NaBH5, por sua vez, manteve-se relativamente mais cristalina, apresentando picos de quartzo mais pronunciados. Isso sugere que, em torno das fibras não tratadas adequadamente, ocorreu a tendência de formação local de quartzo a partir do metacaulim amazônico, prejudicando a geopolimerização nessas regiões.

Os padrões de DRX das amostras KArM28B5, KArF28B5 e KArF20B5 também foram apresentados na Figura 4.9 para fins de comparação. A amostra KArM28B5 exibiu uma variedade de intensidades de picos de quartzo, atribuídas à presença de partículas de areia de tamanho médio. Como essas partículas possuem maior granulometria, não apresentaram orientação preferencial dos cristais, resultando em picos mais dispersos. Por outro lado, as amostras KArF28B5 e KArF20B5, preparadas com areia de granulometria fina, mostraram tendência a uma orientação preferencial em uma ou duas direções específicas, evidenciada pelos picos mais intensos em 2θ 27° (plano (011)) e em 2θ 68° (plano (203)), este último observável como um pico dividido.

A maior intensidade dos picos nas amostras com areia fina se deve à maior contagem volumétrica de partículas presentes na matriz. Dentre elas, a KArF28B5 se destacou, apresentando picos de quartzo mais acentuados, especialmente o principal em 2θ 27° (001), com perfil assimétrico. Nessa amostra, o pico de celulose foi consideravelmente suprimido, consequência do maior conteúdo de areia fina e da predominância dos picos de quartzo.

Figura 4.9 - Padrões de DRX dos compósitos geopoliméricos reforçados com partículas de areia e fibras de bambu: NaBH5, NaBA5, KArM28B5, KArF28B5, KArF20B5 e NaArF20B5.



Fonte: Autora.

Para a amostra NaArF20B5, o padrão de DRX revelou picos intensos e bem definidos de quartzo devido à adição de areia fina, além de um pico de celulose perceptível em 2θ 9° . O pico principal de quartzo, em 2θ 27° , também apresentou assimetria e leve alargamento, característicos da presença de partículas finas na matriz.

4.5 AVALIAÇÃO DE CONFORMIDADE DAS PLACAS GEOPOLIMÉRICAS

4.5.1 Resistência à flexão das placas

Placas de geopolímero à base de sódio e metacaulim (220 x 100 x 10 mm), com proporção estequiométrica de 1:1:4:11 e reforçadas com 5% em massa de fibra de bambu foram testadas em flexão aos 28 dias em condições de equilíbrio (B5-EQ), saturação em água (B5-

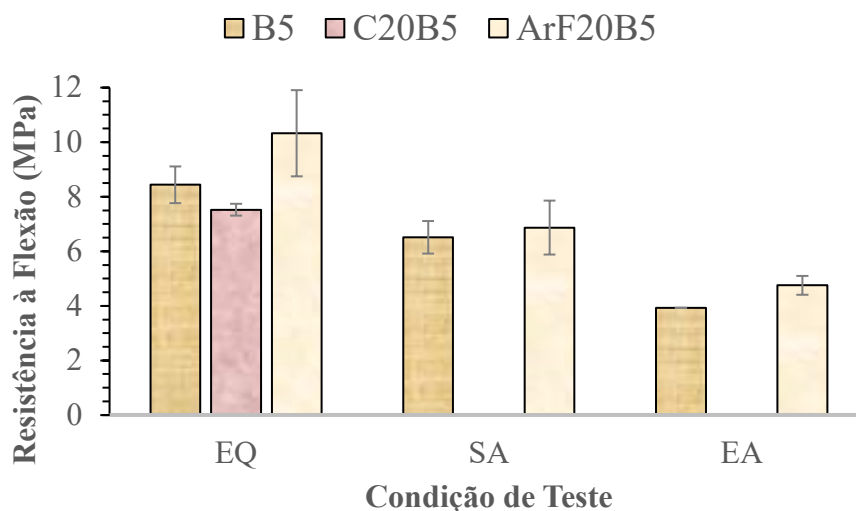
SA) e envelhecimento acelerado (B5-EA). A resistência média à flexão no equilíbrio B5-EQ foi de 8 MPa, enquanto saturada B5-SA foi de 7 MPa e envelhecimento acelerado B5-EA foi de 4 MPa (Tabela 4.5). Após os testes as partes íntegras das amostras de equilíbrio depois de ensaiadas foram cortadas da seção de falha, originando duas placas de 100 x 100 x 10 mm para subsequente teste de absorção de água. A parte central fraturada foi removida para análise da microestrutura. Com base nos resultados obtidos com barras prismáticas na Tabela 4.2 e Fig. 4.4(a) da seção 4.3 [98], optou-se por testar duas novas composições de placas geopoliméricas GPNaMK com estequiometria 1:1:4:13 e reforçadas em massa com: i) 20% de partículas de chamote e 5% de fibras de bambu (C20B5); ii) 20% de partículas de areia fina e 5% de fibras de bambu (ArF20B5). A Fig. 4.10 ilustra os resultados da resistência média à flexão das placas, nas condições de equilíbrio (EQ), saturado em água (SA) e envelhecimento acelerado (EA), de GPNaMK B5 e ArF20B5. As placas C20B5 foram testadas somente na condição de equilíbrio. As análises microestruturais e discussões são abordadas na seção 4.6.

Tabela 4.5 - Resistência à flexão média de 3 pts. (R), densidade aparente (DA), razão de massa silicato de sódio / metacaulim da matriz (GP SS/MK) e classe/categoria das placas geopoliméricas reforçadas com fibras de bambu (B5), chamote e bambu (C20B5) e com partículas de areia e fibras de bambu (ArF20B5).

GPNaMK Placa Tipo	R (MPa)	DP (MPa)	DA (g/cm ³)	GP SS/MK	ASTM/ABNT CLASSE A
B5-EQ	8.4	0.7	1.36	1.661	I / 2
B5-SA	6.5	0.6	1.60	1.661	I / 2
B5-EA	3.9	0.0	1.32	1.661	
C20B5-EQ	7.5	0.2	1.54	1.578	I / 2
ArF20B5-EQ	10.3	1.6	1.44	1.578	II / 3
ArF20B5-SA	6.9	1.0	1.69	1.578	II / 3
ArF20B5-EA	4.8	0.3	1.54	1.578	

Fonte: Autora.

Figura 4.10 - Resistência à flexão de GPNaMK reforçado em massa com 5% de bambu (B5), 20% de chamote e 5% de bambu (C20B5), e 20% de areia fina e 5% de bambu (ArF20B5); nas condições de equilíbrio (EQ), saturado em água (SA) e envelhecimento acelerado (EA).



Fonte: Autora.

As placas ArF20B5 apresentaram a maior resistência à flexão dentre os compósitos testados na condição de equilíbrio, atingindo mais de 10 MPa, o que as enquadrrou na Classe A-II/3, conforme as normas de referência [88,94]. Em contrapartida, as placas B5 e C20B5, com resistência média de 8 MPa, foram classificadas na Classe A-I/2 (Tabela 4.5). Comparativamente, as placas ArF20B5 demonstraram um desempenho superior de mais de 22% em relação às placas B5 e C20B5 na condição de equilíbrio. Na condição de saturação em água, as placas ArF20B5 mantiveram desempenho satisfatório, com resistência de 7 MPa, permanecendo enquadradas na Classe A-II/3 [88,94].

4.5.2 Absorção de água das placas

A Tabela 4.6 apresenta os resultados da absorção de água para as placas geopoliméricas reforçadas com bambu (B5), chamote e bambu (C20B5), e areia fina e bambu (ArF20B5). A placa ArF20B5, que obteve a melhor resistência mecânica, também exibiu uma absorção de água controlada, em torno de 22,5%, sem apresentar defeitos após os ciclos de secagem e saturação. Isso confirma sua adequação para uso em ambientes externos. Em contraste, a placa C20B5, embora tenha registrado a menor absorção de água (20%) entre os compósitos avaliados, apresentou fissuras de secagem, o que pode impactar negativamente seu desempenho em serviço. Por sua vez, a placa B5 teve a maior absorção de água, 38,4%, acompanhada de microfissuras em padrão de mapa. Esse comportamento pode limitar sua aplicação em ambientes mais agressivos, o que não é o foco do presente estudo.

A Figura 4.11 ilustra graficamente o comportamento de absorção de água das diferentes composições de placas geopoliméricas reforçadas.

Tabela 4.6 - Absorção de água (AA) das placas geopoliméricas reforçadas com fibras de bambu (B5), chamote e bambu (C20B5) e com partículas de areia e fibras de bambu (ArF20B5).

GPNaMK Placa Tipo	AA (massa%)	Observação
B5	38.4	MPM
C20B5	20.0	FS
ArF20B5	22.5	SD

MPM: Microfissuras em padrão de mapa

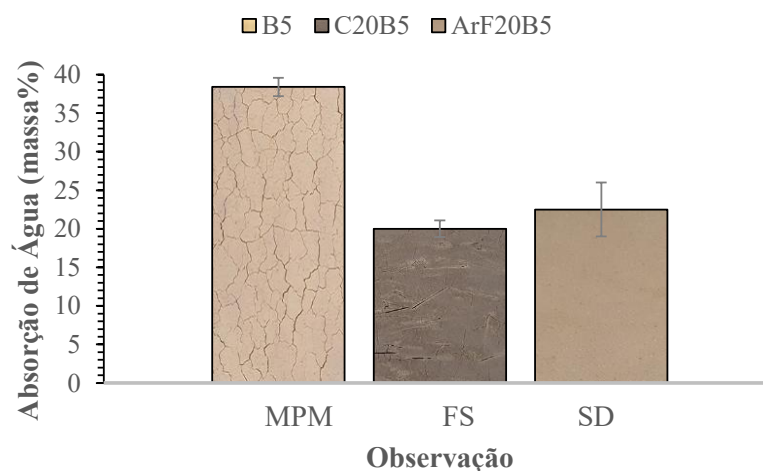
FS: Fissuras de secagem

SD: Sem defeitos de secagem e saturação em água

Fonte: Autora.

As amostras da placa B5 submetidas a secagem acelerada em forno elétrico 90 ou 100 °C por 24 h desenvolveram microfissuras em padrão de mapa (MPM) em toda a superfície, decorrentes da contração térmica contida. Mesmo após imersão em água por 48 h, essas microfissuras permaneceram restritas no mesmo padrão, sem expansão aparente. As causas desta aparente contração térmica poderiam ser mitigadas pela adição de reforços particulados, como areia ou chamote, dentre outros. As amostras da placa C20B5 apresentaram trincas esparsas ocasionadas pelo processo de secagem em forno (FS), as quais não sofreram alterações após imersão em água. Acredita-se que a densificação do compósito com a adição de partículas de chamote tenha contribuído para a menor absorção de água da placa C20B5. Por fim, as amostras ArF20B5 demonstraram desempenho superior no teste de absorção de água, sem apresentar quaisquer defeitos durante as fases de secagem ou saturação (SD). Atribui-se esse resultado à combinação de areia fina e fibras de bambu, que contribuiu para uma maior densificação do compósito geopolimérico [98].

Figura 4.11 - Comportamento de absorção de água das placas geopoliméricas GPNaMK reforçadas com bambu (B5), chamote e bambu (C20B5) e areia e bambu (ArF20B5), com as respectivas visualizações observadas de microfissuras em padrão de mapa (MPM), fissuras de secagem (FS) e sem defeitos de secagem e saturação em água (SD).



Fonte: Autora.

4.5.3 Razões de resistência das placas

Os resultados obtidos no ensaio de envelhecimento acelerado, realizado por imersão das placas geopoliméricas reforçadas com fibras de bambu em água quente por 56 dias, demonstraram que as amostras B5 e ArF20B5 mantiveram sua integridade estrutural, sem apresentar fissuras ou outras alterações prejudiciais ao desempenho esperado em uso. As razões médias (r) entre a resistência à flexão após envelhecimento acelerado e no estado saturado foram de $0,61 \pm 0,05$ para as placas B5 e $0,70 \pm 0,06$ para as placas ArF20B5. Os limites inferiores dos intervalos de confiança a 95% (L_{95}) dessas médias foram calculados em 0,6 para B5 e 0,7 para ArF20B5, confirmando a estabilidade mecânica das placas mesmo após exposição prolongada a condições agressivas.

4.6 ANÁLISE MICROESTRUTURAL DAS PLACAS GEOPOLIMÉRICAS

4.6.1 DRX das placas

A análise por DRX das placas geopoliméricas reforçadas, conforme descrito na Tabela 4.7, permitiu identificar as fases cristalinas presentes, conforme ilustrado na Figura 4.12. Resultados semelhantes foram relatados por SÁ RIBEIRO *et al.* [98] em estudos com barras prismáticas. Para identificação das fases, foram utilizados os números PDF 056-1718, 075-1537, 046-1045 e 015-0776, correspondentes a celulose (C), anatásio (A), quartzo (Q) e mulita (M), respectivamente. A comparação dos difratogramas revelou a presença de picos característicos de celulose entre 2θ 8° e $11,5^\circ$. As fases cristalinas identificadas — mulita

($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), quartzo e celulose — permaneceram inertes durante o processo de geopolimerização, atuando como reforços particulados (areia e chamote) e fibras (bambu) no compósito, contribuindo para a estabilidade estrutural e o desempenho mecânico das placas.

Tabela 4.7 - Descrição das placas geopoliméricas GPNaMK reforçadas, submetidas aos ensaios de DRX e MEV.

Placas GPNaMK	Descrição
B5-EQ-P8	Placa GP sódio-metacaulim amazônico 1:1:4:11 reforçada com 5% em massa de fibras de bambu tratadas com NaOH, testada na flexão (8.4 MPa) na condição de equilíbrio (23 ± 2 °C, $50 \pm 5\%$).
B5-SA-P6	Placa GP Na-MKA 1:1:4:11 reforçada com 5% de fibras de bambu tratadas com NaOH, testada na flexão (6.5 MPa) na condição saturada (imersa por 48h em água a 23 ± 4 °C).
C20B5-EQ-P11	Placa GP Na-MKA 1:1:4:13 reforçada com 20% de partículas de chamote (26.6 μm) e 5% de fibras de bambu tratadas com NaOH, testada na flexão (7.5 MPa) na condição de equilíbrio (23 ± 2 °C, $50 \pm 5\%$).
ArF20B5-EQ-P22	Placa GP Na-MKA 1:1:4:13 reforçada com 20% de partículas de areia fina (407 μm) e 5% de fibras de bambu tratadas com NaOH, testada na flexão (10.3 MPa) na condição de equilíbrio (23 ± 2 °C, $50 \pm 5\%$).
ArF20B5-SA-P20	Placa GP Na-MKA 1:1:4:13 reforçada com 20% de partículas de areia fina (407 μm) e 5% de fibras de bambu tratadas com NaOH, testada na flexão (6.9 MPa) na condição saturada (imersa por 48h em água a 23 ± 4 °C).
ArF20B5-AE-P16	Placa GP Na-MKA 1:1:4:13 reforçada com 20% de partículas de areia fina (407 μm) e 5% de fibras de bambu tratadas com NaOH, testada na flexão (4.8 MPa) na condição de envelhecimento acelerado (60 ± 2 °C, 56 ± 2 days).

Fonte: Autora.

Comparando as placas testadas na condição de equilíbrio, ArF20B5-EQ apresentou partícula finas de areia orientadas em uma ou duas orientações específicas, conforme visto nos picos de maior intensidade em 2θ 27° (101) e 2θ 68° (203) [98]. C20B5-EQ revelou picos de celulose em 2θ $8,3^\circ$ e $11,5^\circ$ e picos reduzidos de quartzo e mulita. ArF20B5-EQ apresentou maior intensidade de altos picos de quartzo, com a adição de partículas de areia fina, e um pico bem definido de celulose em 2θ 8° e outro menor em 2θ $11,5^\circ$. ArF20B5-SA e ArF20B5-EA tiveram a intensidade de picos de quartzo reduzida, devido as respectivas condições de saturada em água (SA) e envelhecimento acelerado (EA). Isso demonstra a redução da densificação do geopolímero compósito nas condições SA (B5-SA, ArF20B5-SA) e EA (ArF20B5-EA), que resultou em menor resistência mecânica [98].

Para B5-EQ, B5-SA, C20B5-EQ e ArF20B5-EQ, como o bambu foi tratado com solução alcalina, a celulose parece ser a única fase a se originar da fibra de bambu, que foi observada com um pico centrado em 2θ $9,5^\circ$ e acompanhado por um pico menor em 2θ $11,5^\circ$. O resto do difratograma para B5-EQ parece amorfo com picos amplos de possível quartzo em 22° , 27° , $37,5^\circ$, $40,2^\circ$, $41,1^\circ$, $43,3^\circ$, $46,6^\circ$, $50,9^\circ$, $55,5^\circ$, $60,8^\circ$, $64,7^\circ$, $68,9^\circ$ que pode ser visto

em outros padrões. A fase anatásio também pode ser vista em 2θ 25,5°, 38° e 48,2°, onde os picos em 50° e 55° só podem ser identificados como ruído. B5-EQ também é tomado como referência para comparação em relação aos picos formados.

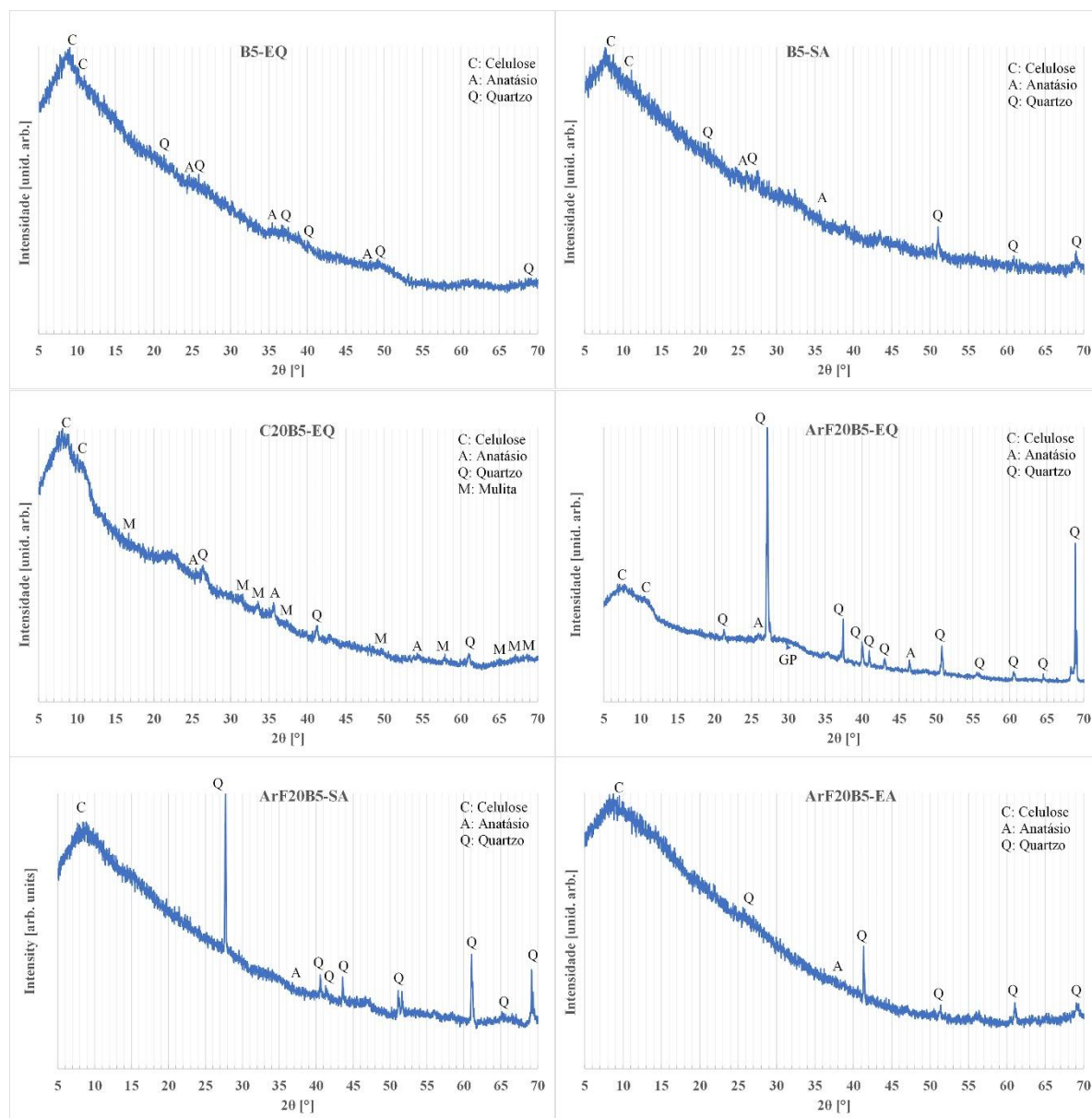
Em B5-SA a ocorrência da fase quartzo pode ser parcialmente atribuída à lixiviação de cátions alcalinos durante a imersão em água por 48 horas, o que retardou a formação completa da estrutura amorfa do geopolímero (GP). Esse fenômeno possivelmente resultou na precipitação de ácido ortossilícico (Si(OH)_4), que, com a redução do pH, se transformou em quartzo (SiO_2) durante o processo de policondensação-geopolimerização. A lixiviação dos cátions teria promovido a migração de poros até a superfície, facilitando o transporte iônico e, consequentemente, reduzindo a resistência geral da estrutura.

Na amostra C20B5-EQ, contendo 20% em massa de chamote e 5% em massa de fibras de bambu tratadas com NaOH, foi identificada a mulita como uma quarta fase cristalina, além de celulose, anatásio e quartzo. O chamote, oriundo da queima de argila com tamanho de partícula médio de 25,6 μm , contribuiu para o aumento dos picos de mulita, enquanto o quartzo interagiu com a matriz geopolimérica formada em meio alcalino (13 M de NaOH). A mulita, por sua estabilidade superior em ambientes alcalinos, permaneceu destacada nos difratogramas, enquanto os picos de quartzo apresentaram redução.

Para as amostras ArF20B5-EQ, ArF20B5-SA e ArF20B5-EA, com adição de 20% em massa de areia e 5% de fibras de bambu tratadas, foram observadas distintas configurações de fases. A areia fina utilizada, com tamanho médio de 407 μm , dispersa em meio de 13 M de NaOH, maturada a 23 °C e 50% de umidade relativa (UR), apresentou, no DRX, uma protuberância amorfa típica da formação de GP, além de picos agudos referentes à areia policristalina. Estas partículas, resistentes à alcalinidade, demonstraram boa aderência à matriz, contribuindo para o aumento da resistência do compósito.

Na amostra ArF20B5-SA, submetida a condicionamento úmido, os difratogramas revelaram redução dos picos de quartzo em determinados planos cristalinos, como (100), (101) e (110), devido à lixiviação de cátions e à dissolução parcial do quartzo em meio alcalino. Por outro lado, planos menos densos, como (112) e (211), permaneceram mais evidentes. Esse condicionamento também propiciou a formação de poros finos na matriz, favorecendo a iniciação e propagação de fissuras por retração, o que pode comprometer a resistência estrutural.

Figura 4.12 - DRX das placas geopoliméricas NaMK reforçadas com fibras de bambu (B5-EQ, B5-SA), partículas de chamote e fibras de bambu (C20B5-EQ) e partículas de areia e fibras de bambu (ArF20B5-EQ, ArF20B5-SA, ArF20B5-EA), revelando a ausência da formação de novas fases cristalinas.



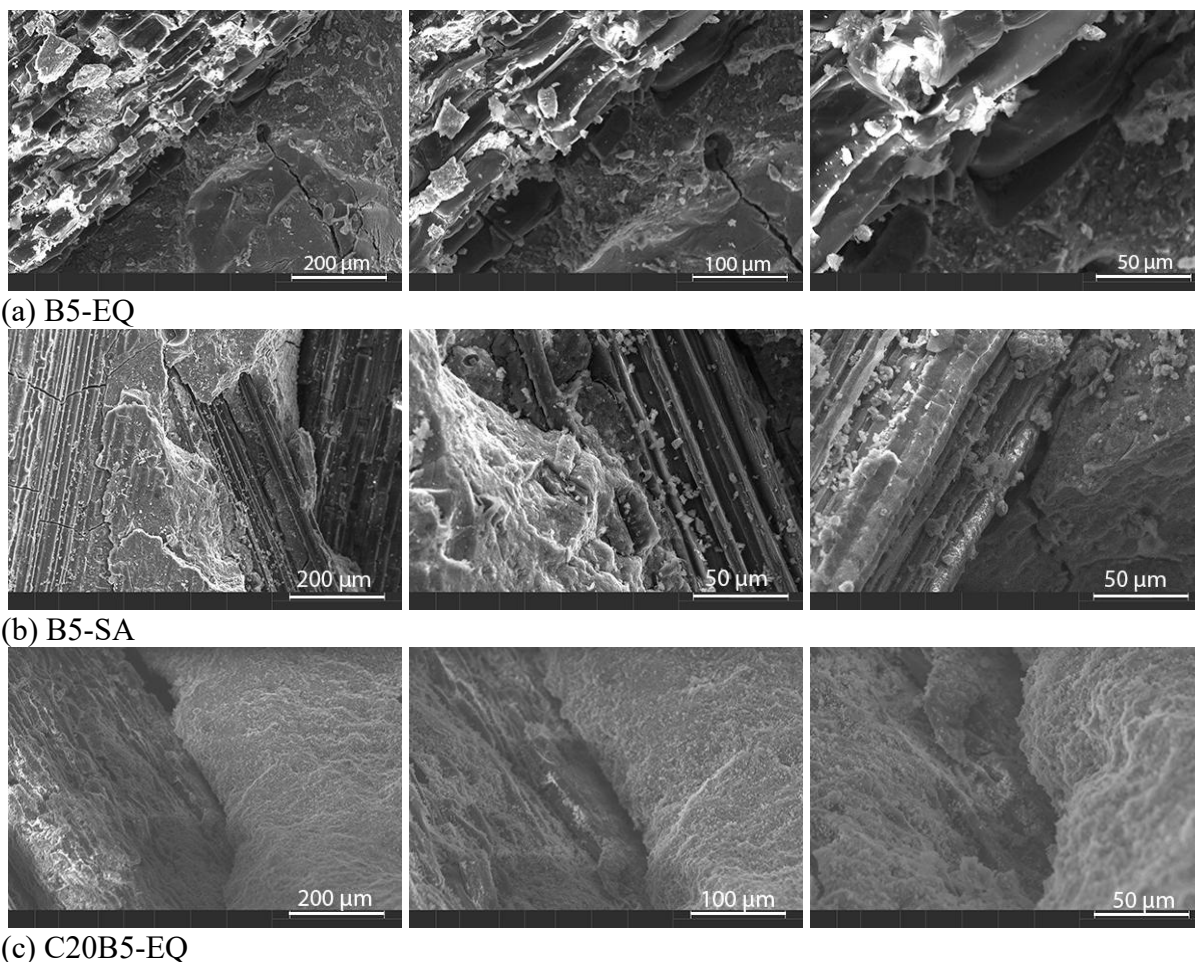
EQ = testada na condição de equilíbrio, SA = testada na condição saturada em água, EA = testada na condição de envelhecimento acelerado. Fonte: Autora.

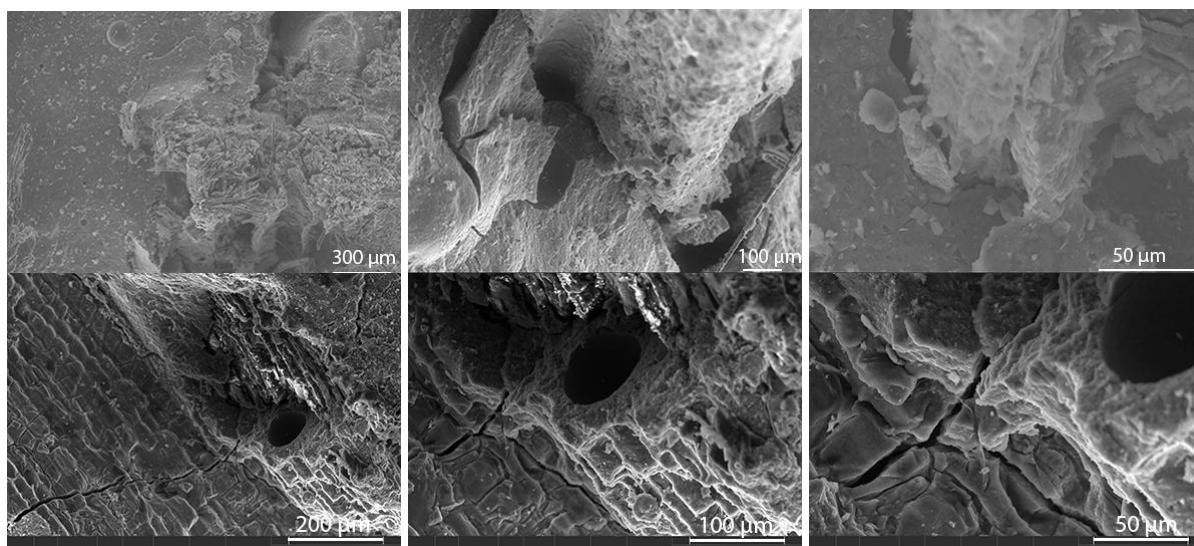
O padrão de DRX da amostra ArF20B5-EA, envelhecida a 60 °C por aproximadamente dois meses, mostrou a interação das partículas de areia de quartzo com a matriz GP sob ambiente altamente alcalino ($\text{pH} > 11$). Nessa condição, parte significativa da areia dissolveu-se, gerando $\text{Si}(\text{OH})_4$ amorfo, que posteriormente precipitou como sílica (SiO_2) livre na matriz geopolimérica. Essa separação pode ter prejudicado a resistência estrutural, devido à diferença nos coeficientes de expansão térmica (CET) entre as fases GP, quartzo, areia e anatásio.

4.6.2 MEV das placas

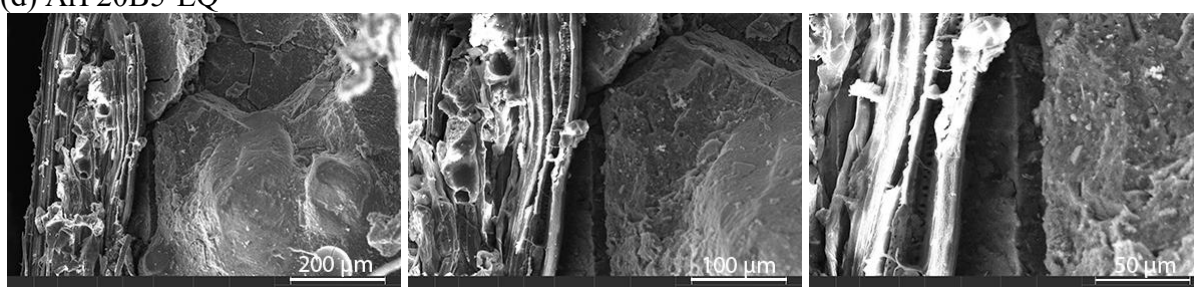
As superfícies de fratura das placas de geopolímero à base de sódio e metacaulim, reforçadas com fibras de bambu, foram analisadas por MEV, conforme apresentado na Figura 4.13. As micrografias evidenciaram a morfologia das fibras e a interface fibra-matriz. As amostras C20B5-EQ e ArF20B5-EQ (Fig. 4.13(c)(d)) destacaram-se pela maior densidade de empacotamento da matriz, proporcionada pelas partículas minerais adicionadas (chamote ou areia) e pela boa distribuição e incorporação das fibras de bambu tratadas [98]. Esse comportamento foi claramente diferenciado em relação à amostra controle B5-EQ e às demais submetidas a condicionamento úmido (SA) ou envelhecimento acelerado (EA).

Figura 4.13 - Micrografias MEV, em diferentes escalas, das superfícies de fratura das placas geopoliméricas NaMK reforçadas com fibras de bambu: (a) B5-EQ, (b) B5-SA, (c) C20B5-EQ, (d) ArF20B5-EQ, (e) ArF20B5-SA e (f) ArF20B5-EA.

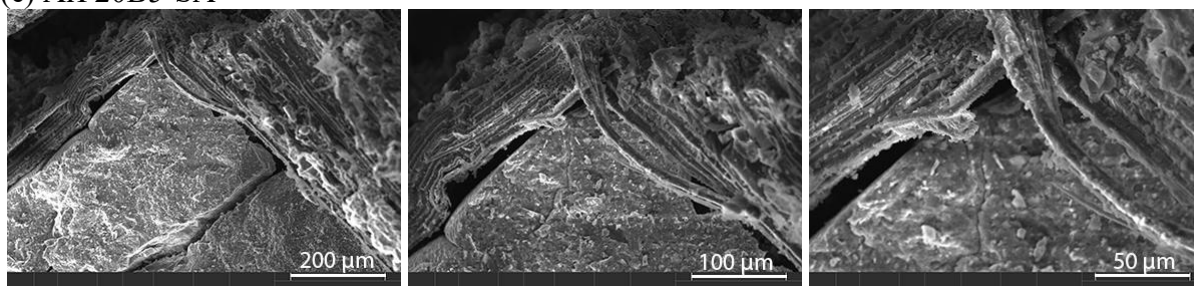




(d) ArF20B5-EQ



(e) ArF20B5-SA

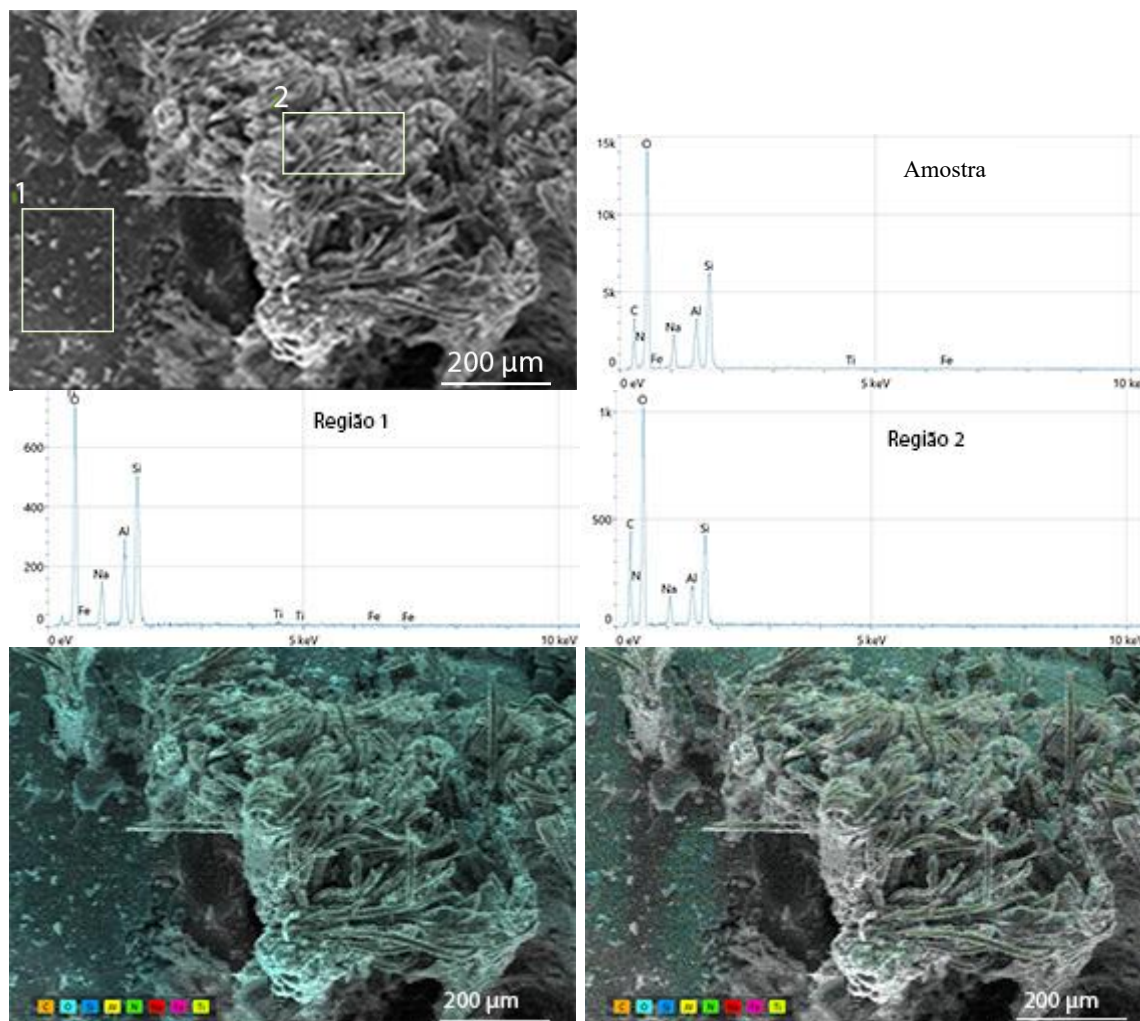


(f) ArF20B5-EA

Fonte: Autora.

A análise por MEV-EDS da amostra ArF20B5-EQ revelou a presença predominante de carbono (C), correspondente à celulose das fibras de bambu, além de silício (Si), alumínio (Al) e sódio (Na), característicos da matriz geopolimérica, com traços de titânio (Ti) e ferro (Fe). Na região 1, foi identificada a matriz geopolimérica composta principalmente por Si, Al e Na, juntamente com pequenas quantidades de Fe e Ti. Já a região 2 evidenciou a fibra de bambu, com alto teor de carbono (celulose), revestida pela matriz geopolimérica contendo Si, Al e Na, indicando boa interação e aderência entre fibra e matriz (Figura 4.14). Relatório EDS detalhado com mapeamentos quantitativos e de contagem dos elementos químicos encontra-se no Apêndice I.

Figura 4.14 - Mapas EDS de superfícies de fratura da amostra da placa NaArF20B5-EQ onde a região 1 engloba a matriz de geopolímero e partículas de areia e a região 2 destaca as fibras de bambu.



Fonte: Autora.

4.7 APLICAÇÕES POTENCIAIS

Com base nos resultados promissores, especialmente o bom desempenho na absorção de água, as propriedades de resistência à flexão, a trabalhabilidade e o acabamento liso das placas, enxergamos um grande potencial para o compósito de geopolímero à base de sódio e metacaulim reforçado com areia fina e fibra de bambu (ArF20B5).

A composição otimizada, que consiste em 20% em massa de areia fina e 5% em massa de fibra de bambu tratada com álcali, destacou-se por atingir mais de 10 MPa de resistência à flexão na condição de equilíbrio. Isso o classifica na Classe A II/3 das normas, um indicativo claro de sua robustez. Além disso, a placa ArF20B5 demonstrou uma absorção de água controlada (aproximadamente 22,5%) e, crucialmente, não apresentou defeitos após os ciclos de secagem e saturação, confirmando sua adequação para uso em ambientes externos.

Este estudo desenvolveu um compósito de engenharia que atende aos requisitos estabelecidos pelas normas ASTM e ABNT para placas de fibrocimento sem amianto. Comparando os resultados com as normas técnicas vigentes, os compósitos geopoliméricos de metacaulim reforçados com partículas de areia e fibras de bambu demonstram potencial para uso em aplicações sujeitas a momentos fletores e ambientes de alta umidade.

Todas as composições foram classificadas como "A" pelas normas ASTM e ABNT, tanto em condição de equilíbrio quanto saturadas, mesmo aquelas placas sem areia (que apresentaram microfissuras no teste de absorção, mas ainda atenderam à classificação).

Os resultados laboratoriais confirmam a versatilidade dos compósitos desenvolvidos, indicando sua aplicabilidade tanto em áreas internas quanto externas, o que inclui, mas não se limita a:

- Forros
- Divisórias
- Revestimentos

A possibilidade de variar as proporções dos componentes também abre um leque para obter placas com diversas tonalidades e resistências, o que aumenta ainda mais as opções de design e uso arquitetônico.

4.8 DESAFIOS PARA A VIABILIZAÇÃO COMERCIAL

Para que o compósito geopolimérico que desenvolvemos se torne uma tecnologia plenamente viável no mercado, identificamos dois pontos cruciais que ainda precisam ser aprimorados:

4.8.1 Estudos Robustos de Análise de Ciclo de Vida (ACV)

Embora tenhamos um material promissor do ponto de vista técnico e com base em recursos locais, falta um aprofundamento em estudos de Análise de Ciclo de Vida (ACV). Esses estudos são essenciais para quantificar o impacto ambiental completo do nosso compósito, desde a extração das matérias-primas e o processamento, passando pela fase de uso, até o descarte ou reciclagem.

Ter um ACV detalhado e comparativo com materiais convencionais (como o fibrocimento tradicional) é vital para:

- Validação da sustentabilidade: Comprovar a real vantagem ambiental do material.

- Acesso a mercados específicos: Muitos mercados, tanto locais quanto internacionais, e projetos de construção sustentável exigem comprovação de baixo impacto ambiental, o que o ACV pode fornecer.
- Identificação de otimizações: O ACV pode apontar onde ainda podemos melhorar o processo para torná-lo ainda mais sustentável e eficiente.

4.8.2 Normas Específicas e Bancos de Dados Confiáveis

Outro desafio significativo é a ausência de normas técnicas específicas para esse tipo de compósito geopolimérico. Acreditamos que a criação e a consolidação de tais normas são cruciais porque elas:

- Geram confiança: O mercado, especialmente a indústria da construção civil, opera com base em padronização e garantia de desempenho. Normas estabelecem esses parâmetros.
- Facilitam a aplicação: Direcionam o uso correto do material e garantem a segurança e a durabilidade das estruturas onde ele será empregado.
- Possibilitam bancos de dados robustos: A padronização via normas permite a coleta e a organização de dados de desempenho consistentes, criando bancos de dados confiáveis. Esses dados são fundamentais para engenheiros, arquitetos e construtoras especificarem o material com segurança.

Em resumo, o que falta para a viabilização de mercado é, em essência, a validação da sustentabilidade em profundidade e a segurança técnica garantida por normas e dados padronizados.

5 CONCLUSÕES

Este estudo desenvolveu um compósito de engenharia à base de geopolímero de metacaulim, reforçado com partículas de areia e fibras de bambu tratadas em solução alcalina, que atende aos requisitos estabelecidos pelas normas ASTM e ABNT para placas de fibrocimento sem amianto.

5.1 COMPÓSITOS DE GEOPOLÍMERO REFORÇADO COM BAMBU

Foram produzidas diferentes formulações de compósitos geopoliméricos à base de metacaulim ativado com soluções de metassilicato de sódio ou potássio, reforçadas com feixes de fibras de bambu *Guadua angustifolia* e partículas de areia ou chamote. Todas as composições apresentaram elevadas resistências à flexão. O tratamento alcalino das fibras em solução de NaOH 1 M foi suficiente para melhorar sua resistência e compatibilidade com a matriz geopolimérica. A incorporação de 5% em massa de fibras de bambu tratadas com álcali resultou em um incremento de aproximadamente 38% na resistência à flexão em relação às fibras tratadas apenas com água e um aumento de 128% comparado à matriz geopolimérica sem reforço.

Entre os compósitos de geopolímero de potássio reforçados exclusivamente com partículas de areia, a formulação contendo 20% em massa de areia fina obteve o melhor desempenho (7,4 MPa). Quando combinada com 5% em massa de fibras de bambu, essa resistência subiu para 14,4 MPa — um ganho de cerca de 95% em relação à formulação sem fibras. Já o compósito de metacaulim e sódio, com 20% de areia fina e 5% de fibras de bambu, alcançou 19,0 MPa, sendo 32% mais resistente que sua contraparte à base de potássio e aproximadamente 78% superior ao compósito só com fibras (10,7 MPa).

A adição de fibras de bambu transformou o comportamento mecânico da matriz geopolimérica, originalmente frágil, para um comportamento inelástico, caracterizado por uma ruptura gradual em vez de colapsos abruptos. A inclusão de partículas de areia favoreceu a densificação da matriz e reduziu a formação de fissuras, resultando em menor absorção de água e ausência de defeitos aparentes em todas as composições reforçadas.

As análises de MEV e EDS confirmaram maior adensamento da matriz e boa ancoragem das fibras de bambu tratadas, evidenciando também a inércia das fases cristalinas de quartzo e celulose durante a geopolimerização. As fibras de bambu atuaram como pontes nas fissuras, comportamento comprovado por MEV. A resistência dos compósitos foi diretamente associada ao aumento da fração amorfa da matriz geopolimérica.

Comparando-se os resultados obtidos com base nas normas técnicas vigentes, os compósitos geopoliméricos de metacaulim reforçados com partículas de areia e fibras de bambu demonstraram potencial para uso em aplicações sujeitas a momentos fletores e ambientes de alta umidade.

5.2 CLASSIFICAÇÃO DAS PLACAS GEOPOLIMÉRICAS

A resistência à flexão em condição de equilíbrio (EQ) indicou que a formulação ArF20B5 (densidade de 1,44 g/cm³), contendo 20% de areia fina e 5% de fibra de bambu tratada, alcançou o melhor desempenho (10,4 MPa), sendo classificada na Classe A-II/3 pelas normas ASTM e ABNT. Essa placa superou em mais de 22% as resistências obtidas para as formulações B5 (1,36 g/cm³) e C20B5 (1,54 g/cm³), ambas classificadas na Classe A-I/2, e manteve essa classificação mesmo na condição saturada.

A placa ArF20B5 exibiu absorção de água controlada (22,5%), sem apresentar defeitos de secagem ou saturação, comprovando sua adequação para aplicações externas. Em contraste, a placa C20B5, embora tenha registrado menor absorção (20%), desenvolveu fissuras de secagem. A placa B5 apresentou a maior absorção (38,4%) e microfissuras em padrão de mapa, associadas à contração térmica, o que poderia comprometer seu desempenho sob condições ambientais extremas.

Após secagem a 90–100 °C por 24 horas e imersão em água por 48 horas, as fissuras observadas nas placas B5 e C20B5 não se propagaram ainda mais. A menor absorção de água da placa C20B5 foi atribuída à maior densificação proporcionada pelas partículas de chamote, enquanto as placas ArF20B5 mantiveram desempenho satisfatório, sem defeitos aparentes, beneficiadas pela compactação promovida pelas partículas de areia fina.

Nos testes de envelhecimento acelerado por imersão em água quente por 56 dias, todas as placas geopoliméricas reforçadas com bambu mantiveram estabilidade estrutural, sem fissuras, empenamentos ou deformações. As razões médias entre as resistências após envelhecimento acelerado e no estado saturado foram de $0,61 \pm 0,05$ para B5 e $0,70 \pm 0,06$ para ArF20B5, com limites inferiores de confiança de 95% de 0,6 e 0,7, respectivamente.

As análises de DRX das placas indicaram as fases cristalinas presentes e seus respectivos planos de difração. As amostras ArF20B5 na condição de equilíbrio apresentaram picos intensos de quartzo e dois picos de celulose (em 2θ 8° e 11,5°). Nas condições saturada e de envelhecimento acelerado, a intensidade dos picos de quartzo diminuiu, refletindo uma redução na densificação e, conseqüentemente, na resistência mecânica.

A caracterização MEV-EDS das placas ArF20B5-EQ mostrou elevados teores de C (indicando a presença de celulose) e de Si, Al e Na, componentes da matriz geopolimérica, com traços de Ti e Fe.

Todas as composições foram classificadas como "A" pelas normas ASTM e ABNT, tanto em condição de equilíbrio quanto saturadas, mesmo as placas sem areia, que apresentaram microfissuras no teste de absorção. Os resultados laboratoriais confirmaram a versatilidade dos compósitos desenvolvidos, indicando sua aplicabilidade em áreas internas e externas, como forros e divisórias. A variação nas proporções dos componentes permitiu obter placas com diversas tonalidades e resistências.

5.3 PERSPECTIVAS FUTURAS

O compósito geopolimérico de metacaulim com areia fina e fibra de bambu (ArF20B5) demonstrou grande potencial, alcançando mais de 10 MPa de resistência à flexão e absorção de água controlada (~22,5%) sem defeitos, classificando-o na Classe A II/3 pelas normas. Isso o torna adequado para uso em ambientes externos, forros, divisórias e revestimentos, atendendo aos requisitos das normas ASTM e ABNT para placas de fibrocimento sem amianto. A capacidade de variar as proporções dos componentes também permite a criação de placas com diversas tonalidades e resistências. No entanto, para sua plena viabilidade no mercado, são cruciais estudos aprofundados de Análise de Ciclo de Vida (ACV) para comprovar a sustentabilidade e o desenvolvimento de normas específicas que gerem confiança e permitam a criação de bancos de dados robustos.

Para o avanço contínuo desta tecnologia, pesquisas futuras devem focar no desenvolvimento de compósitos híbridos com diferentes fibras naturais para otimizar resistência e absorção de água, além de avaliar o coeficiente de expansão térmica para entender seu impacto estrutural. Também é fundamental realizar testes de resistência ao fogo para investigar o comportamento do material sob altas temperaturas, e explorar seu potencial de aplicação em diversos contextos construtivos, validando os resultados laboratoriais conforme os padrões das normas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SÁ RIBEIRO, R.A.; SÁ RIBEIRO, M.G.; SANKAR, K.; KRIVEN, W.M. Geopolymer-bamboo composite - A novel sustainable construction material. *Constr. Build. Mater.*, v. 123, p. 501-507, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.037>
- [2] SÁ RIBEIRO, R.A.; SÁ RIBEIRO, M.G.; KRIVEN, W.M. A Review of Particle- and Fiber-Reinforced Metakaolin-Based Geopolymer Composites. *J. Ceram. Sci. Tech.*, v. 8, p. 307-322, 2017. <https://doi.org/10.4416/JCST2017-00048>
- [3] FARIAS, J.O.G. RT-39 Perfil do Caulim. MME, Agosto 2009.
- [4] KRIVEN, W.M. Inorganic polysialates or ‘geopolymers’. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, v. 89, n. 4, p. 31-34, 2010.
- [5] KRIVEN, W.M. Geopolymer-based composites. In: BEAUMONT, P.W.R.; ZWEBEN, C.H. (eds.). *Comprehensive Composite Materials II*. Oxford Academic Press, 2018. Ch. 5.9, p. 269-280. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09995-1>
- [6] DUXSON, P.; PROVIS, J.L.; LUKEY, G.C.; MALLICOAT, S.W.; KRIVEN, W.M.; VAN DEVENTER, J.S.J. Understanding the Relationship between Geopolymer Composition, Microstructure and Mechanical Properties. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, v. 269, n. 1-3, p. 47-58, 2005.
- [7] DUXSON, P.; MALLICOAT, S.W.; LUKEY, G.C.; KRIVEN, W.M.; VAN DEVENTER, J.S.J. The effect of Alkali and Si/Al Ratio on the Development of Mechanical Properties of Metakaolin-based Geopolymers. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, v. 292, n. 1, p. 8-20, 2007.
- [8] RASHAD, A.M. Alkali-activated metakaolin: A short guide for civil engineer – An overview. *Constr. Build. Mater.*, v. 41, p. 751-765, 2013.
- [9] SÁ RIBEIRO, M.G.; SÁ RIBEIRO, R.A. Green construction of a prototype eco-village in Brazilian Amazonia. In: *Tenth International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies – NOCMAT*, Cali, Colombia, 2008, p. 1-20.
- [10] SÁ RIBEIRO, M.G.; TOLEDO FILHO, R.; DE VASCONCELOS, R.P.; VIEIRA, R.K.; VIEIRA, A.K.; BITTENCOURT, E.; SÁ RIBEIRO, R.A. Building of a sustainable ecological village in the Amazon – related topics. *Chem. Eng. Trans.*, v. 17, p. 343-348, 2009.
- [11] SÁ RIBEIRO, R.A.; SÁ RIBEIRO, M.G.; MIRANDA, I.P.A. Bending strength and nondestructive evaluation of structural bamboo. *Constr. Build. Mater.*, v. 146, p. 38-42, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.074>
- [12] SÁ RIBEIRO, R.A.; SÁ RIBEIRO, M.G.; SANKAR, K.; KRIVEN, W.M. Bamboo-Geopolymer Composite: A Preliminary Study. In: KRIVEN, W.M.; WANG, J.; ZHU, D.; ZHOU, Y.; COSTA, G. (eds.). *Developments in Strategic Materials II*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2017. *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, v. 37, Issue 7, p. 135-143. <https://doi.org/10.1002/9781119321811.ch13>
- [13] SÁ RIBEIRO, R.A.; SÁ RIBEIRO, M.G.; SANKAR, K.; KUTYLA, G.P.; KRIVEN, W.M. Mixed Alkali Regional Metakaolin-Based Geopolymer. In: KRIVEN, W.M.; WANG, J.; ZHU, D.; ZHOU, Y.; COSTA, G. (eds.). *Developments in Strategic Materials II*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2017. *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, v. 37, Issue 7, p. 123-133. <https://doi.org/10.1002/9781119321811.ch12>
- [14] SÁ RIBEIRO, R.A.; SÁ RIBEIRO, M.G.; KUTYLA, G.P.; KRIVEN, W.M. Amazonian metakaolin reactivity for geopolymer synthesis. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, v. 2019, Article ID 8950764, 7 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8950764>

- [15] SÁ RIBEIRO, M.G.; SÁ RIBEIRO, M.G.; KEANE, P.F.; SARDELA, M.R.; KRIVEN, W.M.; SÁ RIBEIRO, R.A. Acid resistance of metakaolin-based, bamboo fiber geopolymer composites. *Constr. Build. Mater.*, v. 302, p. 124194, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124194>
- [16] SANKAR, K.; SÁ RIBEIRO, R.A.; SÁ RIBEIRO, M.G.; KRIVEN, W.M. Potassium-Based Geopolymer Composites Reinforced with Chopped Bamboo Fibers. *J. Am. Ceram. Soc.*, v. 100, n. 1, p. 49-55, 2017. <https://doi.org/10.1111/jace.14542>
- [17] VETTER, R.E.; SÁ RIBEIRO, R.A.; SÁ RIBEIRO, M.G.; MIRANDA, I.P.A. Studies on drying of imperial bamboo. *Holz als Roh- und Werkstoff* (Print) / *Eur. J. Wood Wood Prod.* (Print), v. 73, p. 411-414, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00107-015-0900-6>
- [18] PLANALTO. Lei Nº 12.484 de 8 de setembro de 2011: Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu. Brasília, DF, 2011. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2011/Lei/L12484.htm
- [19] BENTON, A. Priority Species of Bamboo. In: LIESE, W.; KÖHL (eds.). *Bamboo*, Springer International Publishing Switzerland 2015, Tropical Forestry 10, ch. 2, p. 31-41. DOI: 10.1007/978-3-319-14133-6_2
- [20] VAN DEVENTER, J.S.J.; PROVIS, J.L.; DUXSON, P.; BRICE, D.G. Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. *Waste Biomass Valorization*, v. 1, n. 1, p. 145–155, 2010.
- [21] DAVIDOVITS, J. *Geopolymer Cement, A Review*, Institut Géopolymère, St. Quentin, France, 2013. http://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/GPCement2013.pdf
- [22] BARBOSA, V.F.F.; MACKENZIE, K.J.D. Thermal behavior of inorganic geopolymers and composites derived from sodium polysialate. *Mater. Res. Bull.*, v. 38, n. 2, p. 319–331, 2003.
- [23] DAVIDOVITS, J.; MORRIS, M. *The Pyramids: An Enigma Solved*. New York: Dorset Press, 1988.
- [24] DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J.L.; LUKEY, G.C.; PALOMO, A.; VAN DEVENTER, J.S.J. Geopolymer technology: the current state of the art. *J. Mater. Sci.*, v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 2006.
- [25] ALZEER, M.; MACKENZIE, K.J. Synthesis and mechanical properties of new fibre-reinforced composites of inorganic polymers with natural wool fibres. *J. Mater. Sci.*, v. 47, p. 6958–6965, 2012.
- [26] SANKAR, K.; KRIVEN, W.M. Potassium Geopolymer Reinforced with Alkali-Treated Figue, in: W.M. Kriven, D. Zhu, K. IL Moon, T. Hwang, J. Wang, C. Lewinsohn, Y. Zhou (Eds.), *Developments in Strategic Materials and Computational Design V*, Ceram. Eng. Sci. Proc., 2015, p. 61-78.
- [27] SANKAR, K.; KRIVEN, W.M. Sodium Geopolymer Reinforced with Jute Weave, in: W.M. Kriven, D. Zhu, K. IL Moon, T. Hwang, J. Wang, C. Lewinsohn, Y. Zhou (Eds.), *Developments in Strategic Materials and Computational Design V*, Ceram. Eng. Sci. Proc., 2015, p. 39-60.
- [28] TRINDADE, A.C.C.; SILVA, F.A.; ALCAMAND, H.A.; BORGES, P.H.R. On the Durability Behavior of Natural Fiber Reinforced Geopolymers, Eds: W.M. Kriven, N.P. Bansal, M. Kusnezoff et al., *Ceram. Eng. Sci. Proc.* 38 (3) (2018) 215-228. <https://doi.org/10.1002/9781119474746.ch20>

- [29] TRINDADE, A.C.C.; ARÊAS, I.O.M.; ALMEIDA, D.C.T.; ALCAMAND, H.A.; BORGES, P.H.R.; SILVA, F.A. Mechanical Behavior of Geopolymeric Composites Reinforced with Natural Fibers. In: Mechtcherine V., Slowik V., Kabele P. (eds) Strain-Hardening Cement-Based Composites. SHCC 2017. RILEM Bookseries 15 (2018). Springer, Dordrecht. https://doi-org/10.1007/978-94-024-1194-2_45
- [30] TRINDADE, A.C.C.; BORGES, P.H.R.; SILVA, F.A. Evaluation of Fiber–Matrix Bond in the Mechanical Behavior of Geopolymer Composites Reinforced with Natural Fibers, Adv. Civ. Eng. Mater. 8 (3) (2019) 361–375. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.02.017>
- [31] LE CHI, H.; LOUDA, P.; PERIYASAMY, A.P.; BAKALOVA, T.; KOVACIC, V. Flexural Behavior of Carbon Textile-Reinforced Geopolymer Composite Thin Plate, Fibers 6 (87) (2018). <https://doi.org/10.3390/fib6040087>
- [32] LE CHI, H.; LOUDA, P. Flexural Performance Evaluation of Various Carbon Fiber Fabric Reinforced Geopolymer Composite, Ceramics-Silikáty 64 (2) (2020) 215-226. <https://doi.org/10.13168/cs.2020.0010>
- [33] LE CHI, H.; LOUDA, P.; EWA BUCZKOWSKA, K.; DUFKOVA, I. Investigation on Flexural Behavior of Geopolymer-Based Carbon Textile/Basalt Fiber Hybrid Composite, Polymers 13 (2021) 751. <https://doi.org/10.3390/polym13050751>
- [34] SACCANI, A.; MOLARI, L.; TOTARO, G.; MANZI, S. Geopolymers Reinforced with Natural Fibers: A Comparison among Different Sources, Appl. Sci. 11 (2021) 11026. <https://doi.org/10.3390/app112211026>
- [35] ZHANG, J.; LI, Z.; ZHANG, X. Synthesis and Characterization of a Novel Bamboo Shaving Geopolymer Composite, J. Ren. Mater. 10 (11) (2022) 2871-2881. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.019373>
- [36] SANKAR, K.; TRINDADE, A.C.C.; KRIVEN, W.M. The influence of alkaline treatment on the mechanical performance of geopolymer composites reinforced with Brazilian malva and curaua fibers, J. Am. Ceram. Soc. 106 (2023) 339–353. <https://doi.org/10.1111/jace.18716>
- [37] SILVA, F.A.; TOLEDO FILHO, R.D.; MELO FILHO, J.A.; FAIRBAIRN, E.M.R. Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites, Constr. Build. Mater. 24 (2010) 777–785. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.030>
- [38] SHAWIA, N.B.; JABBER, M.A.; MAMOURI, A.F. Mechanical and physical properties of natural fiber cement board for building partitions, Phys. Sci. Res. Int. 2 (3) (2014) 49-53.
- [39] TEIXEIRA, F.P.; SILVA, F.A. On the use of natural curaua reinforced cement based composites for structural applications, Cem. Con. Comp. 114 (2020) 103775. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103775>
- [40] IQBAL, M.; AZAN, S.A.; RAHMADTULLAH, R.; ABHANG, L.B. Flexural Strength and Physical Properties of Cement Board Reinforced with Abaca Fiber, Key Eng. Mater. 930 (2022) 169-178. <https://doi.org/10.4028/p-zn91x1>
- [41] MALENAB, R.A.J.; NGO, J.P.S.; PROMENTILLA, M.A.B. Chemical Treatment of Waste Abaca for Natural Fiber-Reinforced Geopolymer Composite. *Materials*, v. 10, n. 579, 2017. Doi:10.3390/ma10060579
- [42] KORNIEJENKO, K.; FRACZEK, E.; PYTLAK, E.; ADAMSKI, M. Mechanical properties of geopolymer composites reinforced with natural fibers. *Procedia Eng.*, v. 151, p. 388–393, 2016.
- [43] MALLICK, P.K. *Fiber-Reinforced Composites—Materials, Manufacturing and Design*. 3rd ed. CRC Press Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA, 2008. Pp. 19–126.

- [44] PICKERING, K.L.; ARUAN EFENDY, M.G.; LE, T.M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, v. 83, p. 98–112, 2016.
- [45] BALASUBRAMANIAN, M. *Composite Materials and Processing*. CRC Press Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA, 2014. Pp. 2–4.
- [46] JABBAR, A.; MILITKÝ, J.; WIENER, J.; JAVAID, M.U.; RWAWIIRE, S. Tensile, surface and thermal characterization of jute fibres after novel treatments. *Indian J. Fibre Text. Res.*, v. 41, p. 249–254, 2016.
- [47] RAMADEVI, P.; SAMPATHKUMAR, D.; SRINIVASA, C.; BENNEHALLI, B. Effect alkali treatment on water absorption of single cellulosic. *BioResources*, v. 7, p. 3515–3524, 2012.
- [48] ONUAGULUCHI, O.; BANTHIA, N. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. *Cem. Concr. Compos.*, v. 68, p. 96–108, 2016.
- [49] KABIR, M.M.; ARAVINTHAN, H.; WANG, H.; CARDONA, T.; LAU, K.T. Effects of natural fiber surface on composite properties: A review. In: *Proceedings of the 1st International Postgraduate Conference on Engineering, Designing and Developing the Built Environment for Sustainable Wellbeing*, Darling Heights, Australia, 2011. Pp. 94–99.
- [50] LIMA, H.C.; WILLRICH, F.L.; BARBOSA, N.P.; ROSA, M.A.; CUNHA, B.S. Durability analysis of bamboo as concrete reinforcement. *Mater. Struct.*, v. 41, p. 981–989, 2007.
- [51] COOK, J.T.; SCHOGGEN, H.L.; BELL, R.I.; SMITH, D.J.; MORTON, G.H. Cementitious Material Reinforced with Chemically Treated Cellulose Fiber. U.S. Patent No. US7357833, 2008.
- [52] LIU, Y.; HU, H. X-ray Diffraction Study of Bamboo Fibers Treated with NaOH. *Fibers Polym.*, v. 9, n. 6, p. 735–739, 2008.
- [53] DAS, M.; PAL, A.; CHAKRABORTY, D. Effects of mercerization of bamboo strips on mechanical properties of unidirectional bamboo-novolac composites. *J. Appl. Polym. Sci.*, v. 100, n. 238, 2006.
- [54] DAS, M.; CHAKRABORTY, D. Influence of Alkali Treatment on the Fine Structure and Morphology of Bamboo Fibers. *J. Appl. Polym. Sci.*, v. 102, n. 5050, 2006.
- [55] DAS, M.; CHAKRABORTY, D. Role of Mercerization of the Bamboo Strips on the Impact Properties and Morphology of Unidirectional Bamboo Strips–Novolac Composites. *Polym. Compos.*, v. 28, n. 57, 2007.
- [56] DAS, M.; CHAKRABORTY, D. Evaluation of improvement of physical and mechanical properties of bamboo fibers due to alkali treatment. *J. Appl. Polym. Sci.*, v. 107, n. 522, 2008.
- [57] TRIPATHY, S.S.; DILANDRO, L.; FONTANELLI, D.; MARCHETTI, A.; LEVITA, G. Mechanical properties of jute fibers and interface strength with an epoxy resin. *J. Appl. Polym. Sci.*, v. 75, n. 13, p. 1585–1596, 2000.
- [58] VARMA, D.S.; VARMA, M.; VARMA, I.K. Coir Fibers: Part I: Effect of Physical and Chemical Treatments on Properties. *Text. Res. Inst.*, v. 54, p. 349, 1984.
- [59] JAIN, S.; KUMAR, R.; JINDAL, U.C. Mechanical behaviour of bamboo and bamboo composite. *J. Mater. Sci.*, v. 27, n. 17, p. 4598, 1992.
- [60] JAIN, S.; KUMAR, R.; JINDAL, U.C. Development and fracture mechanism of the bamboo/polyester resin composite. *J. Mater. Sci. Lett.*, v. 12, n. 8, p. 558, 1993.

- [61] CHAND, N.; HASMI, S.A.R. Mechanical properties of sisal fibre at elevated temperatures. *J. Mater. Sci.*, v. 28, n. 24, p. 6724, 1993.
- [62] KARMAKER, A.C.; YOUNGQUIST, J.A. Injection molding of polypropylene reinforced with short jute fibers. *J. Appl. Polym. Sci.*, v. 62, n. 8, p. 1147, 1996.
- [63] UMADEVI, V.P.; BHAGAWAS, S.S.; THOMAS, S. Mechanical properties of pineapple leaf fiber-reinforced polyester composites. *J. Appl. Polym. Sci.*, v. 64, n. 9, p. 1739, 1997.
- [64] AVELLA, M.; CASALE, L.; DELL'ERBA, R.; FOCHER, B.; MARTUSCELLI, E.; MARZETTI, A. Broom fibers as reinforcing materials for polypropylene-based composites. *J. Appl. Polym. Sci.*, v. 68, n. 1077, 1998.
- [65] OKUBO, K.; FUJII, T.; YAMAMOTO, Y. Development of bamboo-based polymer composites and their mechanical properties. *Composites Part A*, v. 35, n. 377, 2004.
- [66] SÁNCHEZ-ECHEVERRI, L.A.; AITA, G.; ROBERT, D.; GARCIA, M.E.R. Correlation between chemical compounds and mechanical response in culms of two different ages of *Guadua angustifolia* Kunth, Madera y Bosques 20 (2) (2014) 87-94. DOI: 10.21829/myb.2014.202166
- [67] CASTOLDI, R.S.; SOUZA, L.M.S.; SOUTO, F.; LIEBSCHER, M.; MECHTCHERINE, V.; SILVA, F.A. Effect of alkali treatment on physical–chemical properties of sisal fibers and adhesion towards cement-based matrices, *Constr. Build. Mater.* 345 (2022) 128363. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128363>
- [68] CARASCHI, J.C.; LEÃO, A.L. Characterization of curaua fiber, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 353 (1) (2000) 149-152. <https://doi.org/10.1080/10587250008025655>
- [69] DA CUNHA, J.S.C.; DE OLIVEIRA NETO, H.E.; GIACON, V.M.; MANZATO, L.; DA SILVA, C.G. Study on Mechanical and Thermal Properties of Amazon Fibers on the Polymeric Biocomposites: Malva and Tucum, *Fibers and Polymers* (2021). <https://doi.org/10.1007/s12221-021-0843-y>
- [70] ZHANG, X.; LI, Z.; LI, X.; SHEN, D. Bamboo, basalt, glass, and polypropylene fiber-reinforced metakaolin based geopolymers: a comparative study. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 81 (2023) 1481-1494. <https://doi.org/10.1007/s00107-023-01960-5>
- [71] AYAWANNA, J.; POOWANCUM, A. Enhancing flexural strength of metakaolin-based geopolymer reinforced with different types of fibers. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 37 (2024) 101439. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101439>
- [72] ASTM C1424-10, Standard Test Method for Monotonic Compressive Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International 2015, West Conshohocken, PA.
- [73] ASTM C1341-13, Standard Test Method for Flexural Properties of Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramic Composites. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International 2013, West Conshohocken, PA.
- [74] ASTM C78/C78M, Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading). Annual Book of ASTM Standards, ASTM International 2021, West Conshohocken, PA.
- [75] ASTM C39/C39M-15a, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International 2015, West Conshohocken, PA.
- [76] BS EN. Methods of Testing Cement-Part 1: Determination of Strength. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2005, Volume 169, p. 36.

- [77] TOLEDO FILHO et al., R.D. Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates, *Construction and Building Materials* 23 (6) (2009) 2409-2420.
- [78] MELO FILHO et al., J. Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems, *Cement and Concrete Composites* 40 (2013) 30-39.
- [79] DUXSON, P.; LUKEY, G.C.; VAN DEVENTER, J.S. Thermal evolution of metakaolin geopolymers: Part 1–Physical evolution, *J. Non-Cryst. Solids*. 352 (52–54) (2006) 5541–55.
- [80] GRUPPO SORRENTINO, Technical Specification of Fiber Cement Board. <http://www.sorrentinopannelli.it/wp-content/uploads/2017/06/Technical-Specification-of-Fiber-Cement-Board.pdf>, 2023 (accessed 19 June 2023).
- [81] HARDIE BACKER, Cement Board Comparison Chart. <https://www.jameshardiepros.com/getattachment/ea045b93-30ed-4ff9-aff9-2fdc6e8d0582/comparison-chart-hardiebacker.pdf>, 2023 (accessed 19 June 2023).
- [82] EVEREST, Fibre Cement Board, Heavy Duty Board. <https://www.everest-ind.com/everest-fibre-cement-boards.html>, 2023 (accessed 19 June 2023).
- [83] INTERTEK, Report of Silbonit™ Fiber-Cement Flat Sheets for the selected requirements of ASTM C1186-08 (Reapproved 2012), Standard Specification for Flat Fiber-Cement Sheets, (2013). <https://cementboardfabricators.com/wp-content/uploads/2018/09/ASTM-C1186.pdf>, 2023 (accessed 19 June 2023).
- [84] AKINYEMI, O.P.; OSASONA, C.O. Strength Properties of Bamboo-Fibre Cement Boards Used as Building Partitions. *Cur. J. Appl. Sci. Technol.* 23 (5) (2017) 1-7. <https://doi.org/10.9734/CJAST/2017/36587>
- [85] FISCHER, J.; STAWARCZYK, B.; HAMMERLE, C.H.F. Flexural strength of veneering ceramics for zirconia. *J. Dent.* 36 (2008) 316–321. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2008.01.017>
- [86] RODRIGUES JUNIOR, S.A.; FERRACANE, J.L.; DELLA BONA, A. Flexural strength and Weibull analysis of a microhybrid and a nanofill composite evaluated by 3- and 4-point bending tests. *Dent. Mater.* 24 (2008) 426–431. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2007.05.013>
- [87] RAMFUL, R. Assessing the Suitability of Three-Point and Four-Point Bending Simulation to Investigate the Fracture Mechanisms in Directionally-Reinforced Fibre Composites. In: *IEEE Asia-Pacific Conference on Computer Science and Data Engineering* (2022) 1-4. <https://doi.org/10.1109/CSDE56538.2022.10089287>
- [88] ASTM C1186-08, Standard Specification for Flat Fiber-Cement Sheets. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International 2016, West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/C1186-08R16>
- [89] BAI, T.; LIU, B.; WU, Y.; HUANG, W.; WANG, H.; XIA, Z. Mechanical properties of metakaolin-based geopolymer with glass fiber reinforcement and vibration preparation. *J. NonCry. Sol.* 544 (2020) 120173. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.120173>
- [90] COSTA, M.M.E.; MELO, S.L.S.; SANTOS, J.V.M.; ARAÚJO, E.A.; CUNHA, G.P.; DEUSA, E.P.; SCHMITT, N. Influence of physical and chemical treatments on the mechanical properties of bamboo fibers. *Procedia Engineering* 200 (2017) 457–464.
- [91] SÁ RIBEIRO, R.A. Green Geopolymers for Sustainable Construction (unpublished post doctorate Report UIUC), 2020.
- [92] ASTM International, “C1239–13 (Reapproved 2018) Standard Practice for Reporting Uniaxial Strength Data and Estimating Weibull Distribution Parameters for Advanced Ceramics.” American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2018.

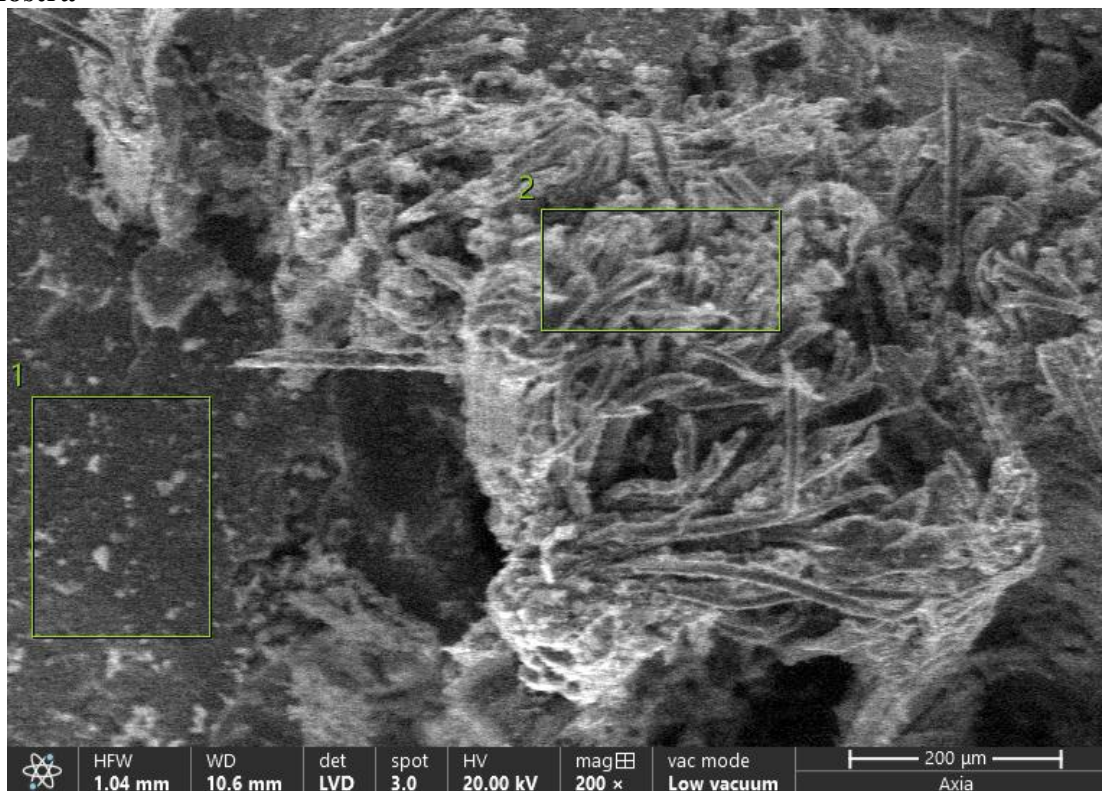
- [93] ASTM C1185-2016. “Standard Test Methods for Sampling and Testing Non-Asbestos Fiber-Cement Flat Sheet, Roofing and Siding Shingles, and Clapboards,” Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [94] ABNT NBR 15498, 2016. Placa de fibrocimento sem amianto – Requisitos e métodos de ensaio. Non-asbestos fiber-cement flat sheets – Specification and test methods.
- [95] RAHMAN, M.M.; NETRAVALI, A.N. Advanced green composites using liquid crystalline cellulose fibers and waxy maize starch based resin, *Comp. Sci. Tech.* 162 (2018) 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.04.023>
- [96] KRIVEN, W.M.; BELL, J.L.; GORDON, M. Microstructure and microchemistry of fully reacted geopolymers and geopolymer matrix composites, *Ceramic Transactions* 153 (2003) 227-250.
- [97] KRIVEN, W.M.; BELL, J.L.; GORDON, M. Microstructure and nanoporosity of as-set geopolymers. *Ceramic Engineering and Science Proceedings* 2008; 27 (2), pp. 491-503.
- [98] SÁ RIBEIRO, M.G.; MIRANDA, I.P.A.; KRIVEN, W.M.; OZER, A.; SÁ RIBEIRO, R.A. High strength and low water absorption of bamboo fiber-reinforced geopolymer composites. *Constr. Build. Mater.*, v. 411, p. 134179, 2024. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134179>

APÊNDICES

APÊNDICE I. RELATÓRIO EDS DA PLACA NaArF20B5-EQ

Relatório EDS de superfícies de fratura da amostra da placa NaArF20B5-EQ onde a região 1 engloba a matriz de geopolímero e partículas de areia e a região 2 destaca as fibras de bambu.

Amostra



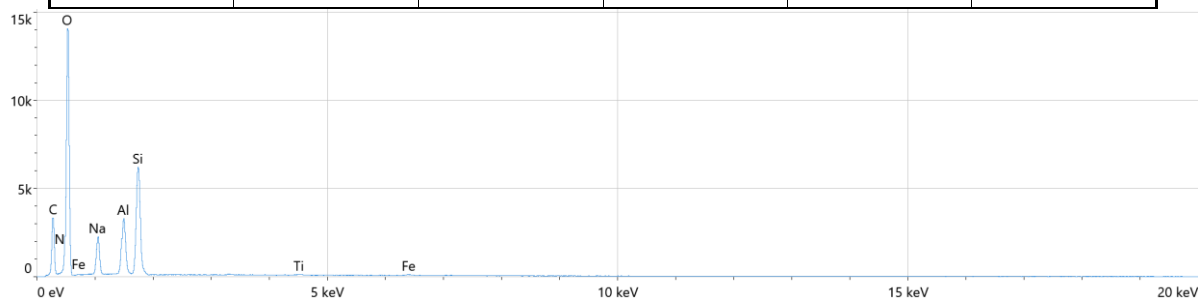
Total Number of Counts: 267 181

Average Count Rate: 306 cps

Acceleration Voltage: 20 kV

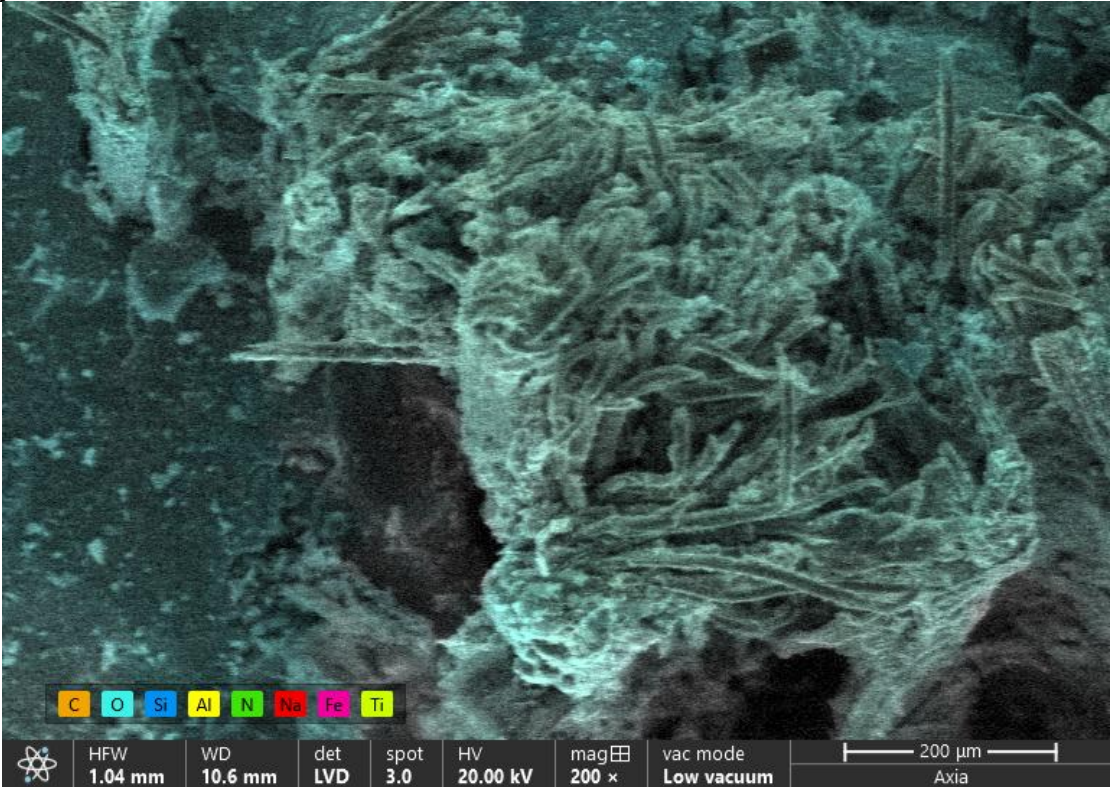
Total Acquisition Time: 301 seconds

Element	Atomic %	Atomic % Error	Weight %	Weight % Error	Net Counts
C	27.7	0.2	20.2	0.2	17 506
N	0.0	---	0.0	---	0
O	56.9	0.3	55.1	0.3	76 174
Na	4.4	0.0	6.1	0.1	14 563
Al	3.7	0.0	6.0	0.1	24 841
Si	7.0	0.0	12.0	0.1	53 881
Ti	0.1	0.0	0.2	0.0	3 316
Fe	0.1	0.0	0.5	0.1	774



Dados de Mapa

Mapa Quantitativo

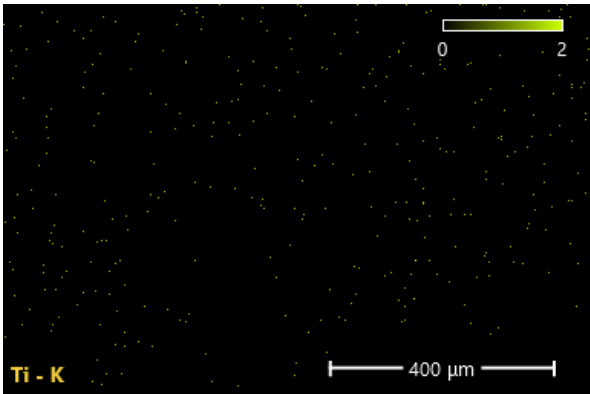
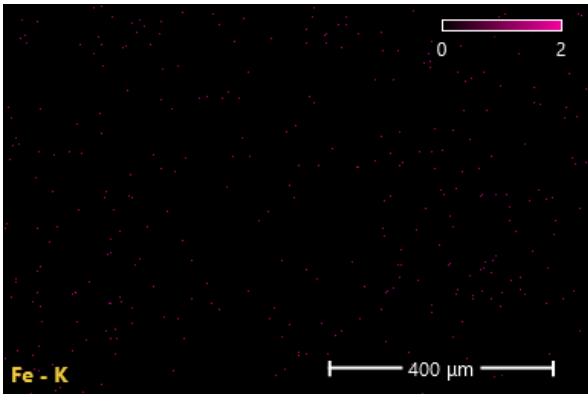
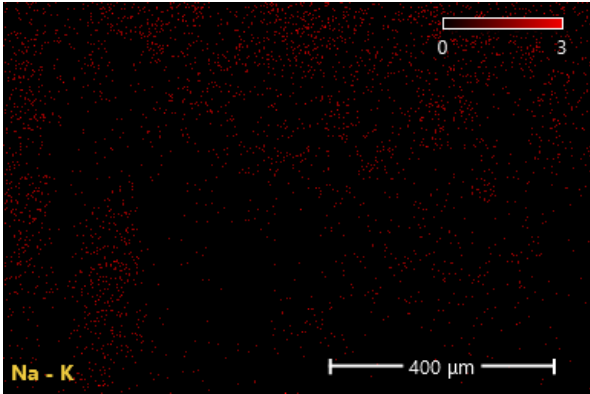
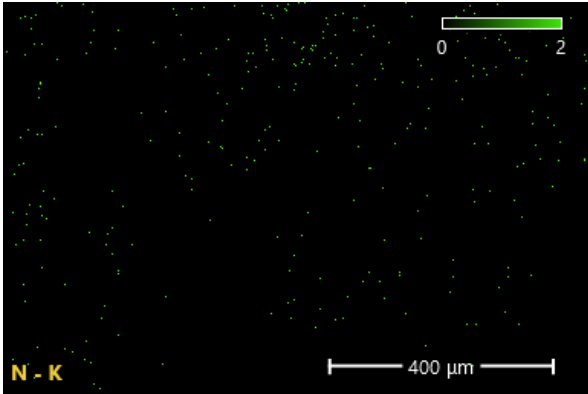
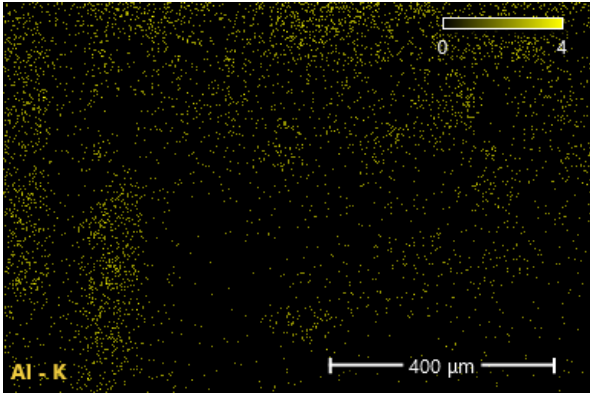
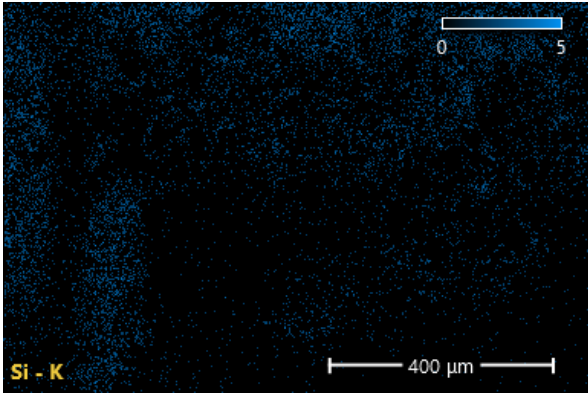
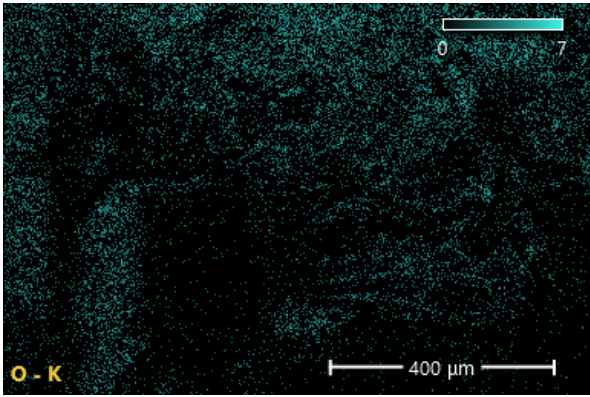
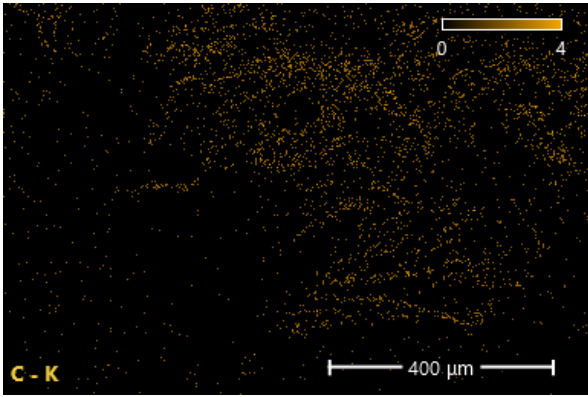


Maps Resolution: 768 x 512

Mapa de Contagem



Maps Resolution: 768 x 512



Resumo: Atômica%

Element	Atomic %	
	Region 1	Region 2
O	65.8	53.6
Na	8.1	3.2
Al	8.8	2.5
Si	16.9	5.2
Ti	0.2	0.0
Fe	0.2	0.0
C	0.0	34.1
N	0.0	1.4

Resumo: Massa%

Element	Weight %	
	Region 1	Region 2
O	53.4	54.5
Na	9.4	4.7
Al	12.1	4.4
Si	24.1	9.2
Ti	0.5	0.0
Fe	0.5	0.0
C	0.0	26.0
N	0.0	1.2

Resumo: Contagens líquidas

Element	Net Counts	
	Region 1	Region 2
O	3 922	5 395
Na	1 018	884
Al	2 101	1 468
Si	4 171	3 453
Ti	56	0
Fe	33	0
C	0	2 175
N	0	70

Região 1

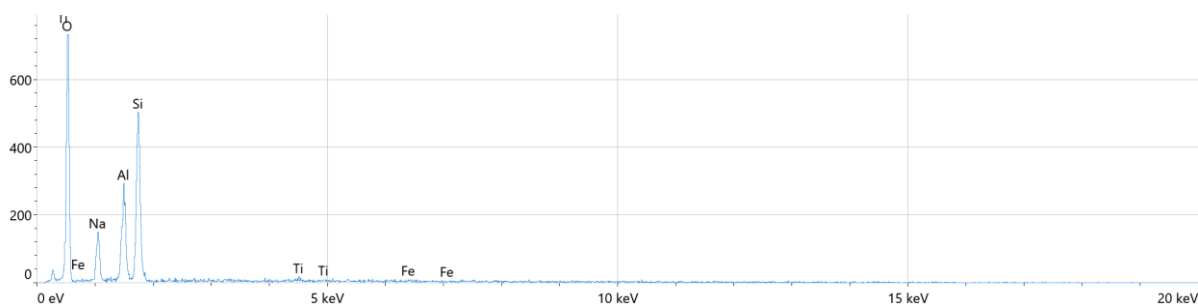
Total Number of Counts: 15 910

Total Acquisition Time: 30 seconds

Average Count Rate: 536 cps

Acceleration Voltage: 20 kV

Element	Atomic %	Atomic % Error	Weight %	Weight % Error	Net Counts
O	65.8	0.9	53.4	0.7	3 922
Na	8.1	0.3	9.4	0.3	1 018
Al	8.8	0.2	12.1	0.2	2 101
Si	16.9	0.3	24.1	0.5	4 171
Ti	0.2	0.1	0.5	0.2	56
Fe	0.2	0.1	0.5	0.3	33

**Região 2**

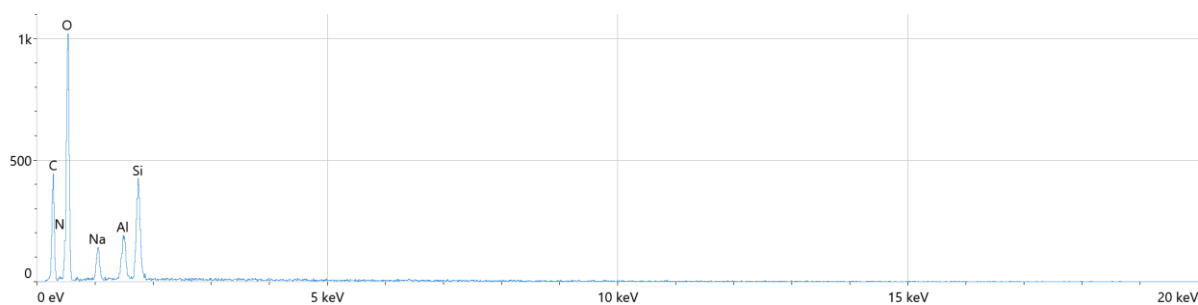
Total Number of Counts: 19 095

Total Acquisition Time: 29 seconds

Average Count Rate: 668 cps

Acceleration Voltage: 20 kV

Element	Atomic %	Atomic % Error	Weight %	Weight % Error	Net Counts
C	34.1	0.6	26.0	0.5	2 175
N	1.4	1.1	1.2	1.0	70
O	53.6	0.9	54.5	0.9	5 395
Na	3.2	0.1	4.7	0.2	884
Al	2.5	0.1	4.4	0.2	1 468
Si	5.2	0.1	9.2	0.2	3 453



ANEXOS

ANEXO I. ARTIGO PUBLICADO EM PERIÓDICO QUALIS-A1

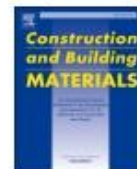
Sá Ribeiro, M.G.; Miranda, I.P.A.; Kriven, W.M.; Ozer, A.; Sá Ribeiro, R.A. High strength and low water absorption of bamboo fiber-reinforced geopolymer composites. *Constr. Build. Mater.*, v. 411, p. 134179, 2024. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134179>



Contents lists available at ScienceDirect

Construction and Building Materials

journal homepage: www.elsevier.com/locate/conbuildmat



High strength and low water absorption of bamboo fiber-reinforced geopolymer composites

Marilene G. Sá Ribeiro^{a,b,c}, Ires P.A. Miranda^{a,d}, Waltraud M. Kriven^b, Ali Ozer^b, Ruy A. Sá Ribeiro^{b,c,*}

^a Biodiversity and Biotechnology, Bionarte Network, Manaus, Amazonas 69000, Brazil

^b Department of Materials Science and Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801, USA

^c Green Building and Engineering Laboratory, National Institute for Amazonian Research, Manaus, AM 69067-375, Brazil

^d INPA - National Institute for Amazonian Research, Manaus, AM 69067-375, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:

Metakaolin
Stiff geopolymer composites
Sustainable construction material

ABSTRACT

This work focused on designing an adequate metakaolin-based, bamboo fiber-reinforced geopolymer composite for higher flexural strength and water absorption resistance. This study evaluated mineral particles and bamboo fiber-reinforced geopolymer composites, which were water-treated or alkali-treated for potential use as a multifunctional sustainable construction material. A lower-cost, sodium-metakaolin geopolymer reinforced with 20 wt% fine sand and 5 wt% bamboo fiber (19.0 MPa 4-pt flexural strength) was 32% stronger than its potassium-based counterpart and about 78% stronger than the sodium-based matrix reinforced with only 5 wt% bamboo fiber. All geopolymer composites reinforced with sand particulates and bamboo fibers exhibited much lower water absorption and were undamaged from oven and water saturation. All these sand-bamboo fiber-reinforced geopolymer composites were found to be suitable for quality assurance of composite plates for outdoor use.

1. Introduction

The metakaolin-based geopolymer (MKGP) processing involves the mixing and dissolution of the MK ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) in an alkali-silicate solution. The nature of the activator solution plays an important role in determining the structural and mechanical performances in the activation of aluminosilicate materials such as metakaolin. An alkali-activating solution is vital for dissolving Si and Al atoms to form geopolymer precursors and, finally, aluminosilicate material. NaOH dilution in the aqueous phase of the geopolymer synthesis acts on the dissolution process and on the bonding of solid particles in the final structure [1]. The most significant characteristics related to the alkali activator are the type of alkaline salt (usually silicate or hydroxide) [2] and the method of addition of the alkaline component (as a solution or in the solid state) [3].

The matrix material serves several functions which are imperative to the hybrid composite material. These functions depend upon the type of support, such as particulates, dispersions, discontinuous or continuous fibers, and whiskers. The matrix enables the composite to withstand

tensile, impact, compression, and flexural stress forces. The interface adhesion between the natural fiber and the geopolymer matrix plays an important role in determining the properties of the composite [4,5]. One of the properties of natural fibers is that they can absorb moisture, i.e., natural fibers are said to be strongly polar and hence hydrophilic [6]. This characteristic is mainly caused by the different biochemical components in the natural fiber itself. Over the years, researchers have recognized and proposed strategies to deal with this compatibility issue in natural fiber composites. The key strategies are to modify the surfaces of the natural fiber or to supplement the geopolymer matrix properties with additives, to enhance the interaction between the two materials. It is possible to follow a chemical treatment to modify the fiber surface area so that the bonding with the geopolymer matrix is improved. The simplest method is to treat the natural fibers with a chemical such as an alkaline (e.g., 5% NaOH) solution for a certain amount of time. However, if not done correctly, such treatments can weaken the overall mechanical properties of the natural fibers because lignin, the natural binding material or matrix in natural fibers, could also be weakened. Acetylating is another method to render the surface of the natural fiber

* Corresponding author at: Green Building and Engineering Laboratory, National Institute for Amazonian Research, Manaus, AM 69067-375, Brazil.
E-mail address: ruy@desart.com.br (R.A. Sá Ribeiro).

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134179>

Received 28 July 2023; Received in revised form 24 October 2023; Accepted 11 November 2023

Available online 1 December 2023

0950-0618/© 2023 Elsevier Ltd. All rights reserved.