

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
FACULDADE DE TECNOLOGIA – FT
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DA FIBRA DE BAMBU (*B. vulgaris* 'Vittata') EM
MATRIZ GEOPOLIMÉRICA

ERICK DA SILVA OLIVEIRA

MANAUS-AM

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
FACULDADE DE TECNOLOGIA – FT
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC

ERICK DA SILVA OLIVEIRA

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DA FIBRA DE BAMBU (*B. vulgaris* ‘Vittata’) EM
MATRIZ GEOPOLIMÉRICA

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Lizandro Manzato

Coorientador: Dr. Ruy A. de Sá Ribeiro

MANAUS-AM

2021

Ficha Catalográfica

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

Oliveira, Erick da Silva
O48a Análise mecânica da incorporação da fibra de bambu (*b. vulgaris*
'vittata') em matriz geopolimérica / Erick da Silva Oliveira . 2020
84 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Lisandro Manzato
Coorientador: Ruy A. de Sá Ribeiro
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade
Federal do Amazonas.

1. Bambu. 2. Geopolímero. 3. Fibra. 4. Placa. I. Manzato,
Lisandro. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

A minha mãe Marilene, minha avó Maria Madalena e meu irmão Gutemberg Junior por toda a força e paciência, é nosso.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecer por todo o esforço da minha família, pelo auxílio nos dias difíceis, pelo amor despedindo a mim e fé depositada que eu conseguiria chegar até onde estou hoje.

Ao meu orientador Lizandro Manzato que desde o começo acreditou que conseguiríamos chegar ao fim, que me acompanhou e guiou e compartilhou seus conhecimentos, tempo e paciência.

Ao meu grande amigo e coorientador Dr. Ruy Sá Ribeiro e a querida professora M.^a Marilene Sá Ribeiro que me incentivaram e que por tantas vezes me ouviram e apoiaram em momentos difíceis, obrigado.

Aos meus amigos, em especial a Loren que aturou meus desabafos e foi minha válvula de escape por diversas vezes.

Aos amigos que fiz ao longo do mestrado, aos professores que se tornaram amigos.

Aos amigos de laboratório Silma, Marcela, Larissa, Wanison, Fernanda e Mitsuo pelos risos que aliviaram um pouco o cansaço do caminho.

À Universidade Federal do Amazonas - UFAM, pelos recursos oferecidos para o desenvolvimento e conclusão desta pesquisa.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM, pelas portas sempre abertas e a disposição a ajudar.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, em especial aos laboratórios LEEN (Laboratório de Estruturas de Engenharia), LCPA (Laboratório de Chapas e Aglomerados) por todo o apoio e disponibilidade ofertada.

Ao Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais – LSCN do IFAM que foi minha segunda casa ao longo do mestrado.

As indústrias ELKEM pela doação de microsilica.

A Metacaulim do Brasil pela doação de metacaulim industrial.

“A vida é um sopro”.

(Oscar Niemeyer)

RESUMO

Na busca por novas soluções tecnológicas para aplicação na construção civil este estudo produziu placas geopoliméricas com adição de fibra de bambu *Bambusa vulgaris var. 'Vittata'* bem como caracterizou suas propriedades e analisou as características físicas e mecânicas que o conjunto fibra/matriz são capazes de produzir bem como analisou-se o efeito do tratamento por imersão das fibras de bambu previamente a sua utilização como reforço na matriz geopolimérica. Para a caracterização da fibra de bambu foram analisados seus teores de extrativos, lignina, holocelulose e alfacelulose bem como seu teor de umidade (Revelaram os seguintes resultados Umidade (9,78), Cinzas (0,77), Extrativos (0,89), Lignina (15,10), Holocelulose (64,95), Alfacelulose (70,91). Na análise do geopolímero foram analisadas a fluorescência de raio-x (FRX) e a difração de raio-x (DRX) dos materiais percursos além de ensaios de força com cargas de compressão e flexão bem como a capacidade de estanqueidade das placas por meio do ensaio de permeabilidade. Identificou-se resultados promissores tanto na caracterização das fibras confirmando seu poder de reforço como em sua aplicabilidade como reforço na matriz geopolimérica tendo um ganho de resistência a flexão que elevou de 1,2 MPa no caso da matriz sem fibras para 5,6 MPa na matriz com adição de 10% de fibra de bambu.

Palavras-chave: Fibra natural, bambu, geopolímero.

ABSTRACT

In the search for new technological solutions for application in civil construction, this study produced geopolymeric slabs with the addition of bamboo fiber *Bambusa vulgaris* var. 'Vittata' as well as characterized its properties and analyzed the physical and mechanical characteristics that the fiber / matrix set are capable of producing as well as the effect of the immersion treatment of bamboo fibers was analyzed before its use as a reinforcement in the geopolymeric matrix. For the characterization of the bamboo fiber its contents of extractives, lignin, holocellulose and alpha cellulose were analyzed as well as its moisture content (The following results were revealed: Moisture (9.78), Ash (0.77), Extracts (0.89) , Lignin (15.10), Holocellulose (64.95), Alfacellulose (70.91). In the geopolymer analysis, the X-ray fluorescence (FRX) and the X-ray diffraction (DRX) of the precursor materials were analyzed. in addition to strength tests with compression and flexion loads as well as the ability to seal the plates through the permeability test. Promising results were identified both in the characterization of the fibers, confirming their reinforcing power as well as their applicability as reinforcement in the geopolymeric matrix having a flexural strength gain that increased from 1.2 MPa in the case of the fiber-free matrix to 5.6 MPa in the matrix with the addition of 10% bamboo fiber.

Keywords: Natural fiber, bamboo, geopolymer.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: PRIMÓRDIOS DA PRODUÇÃO DE GEOPOLÍMERO.	19
FIGURA 2: A) LAJES EM ARENITO GEOPOLIMÉRICO; B) ESCULTURAS EM FORMA H; C) OUTRAS ESTRUTURAS DA MESMA LOCALIDADE.	20
FIGURA 3: REORGANIZAÇÃO DOS ALUMINOSILICATOS.	21
FIGURA 4: CADEIAS DE POLISSIALATO.	22
FIGURA 5: ESTRUTURA DA PAREDE CELULAR.	28
FIGURA 6: PAREDES CELULARES DE ESPÉCIE VEGETAL AMPLIADA 500X.	28
FIGURA 7: A) SISTEMA DE RIZOSOMAS E ENTOUCEIRAMENTO; B) SISTEMA DE RIZOSOMAS E ALASTRAMENTO DAS ESPÉCIES ALASTRANTES DE BAMBU.	29
FIGURA 8: INFLUÊNCIAS DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA, TIPO E RIGIDEZ DA FIBRA NOS PADRÕES DE TRINCA DE COMPÓSITOS GEOPOLIMÉRICOS.	35
FIGURA 9: TOUCEIRA DE <i>B. VULGARIS</i> 'VITTATA'.	37
FIGURA 10: A) MOINHO PARA EXTRAÇÃO DAS FIBRAS; B) MÁQUINA ALLGAIER SIFTER.	38
FIGURA 11: (A) FIBRA IMERSA EM ÁGUA; (B) PENEIRA; (C) FIBRA "ESPREMIDA".	39
FIGURA 12: (A) FIBRA EM SECAGEM EM AR AMBIENTE (B) FIBRA EM SECAGEM EM ESTUFA (C) FIBRA PÓS SECAGEM.	39
FIGURA 13: CALCINAÇÃO E DETERMINAÇÃO DE TEOR DE CINZAS.	40
FIGURA 14: A) ESQUEMA DE EXTRAÇÃO; B) EVAPORADOR ROTATIVO; C) BALÃO COM EXTRATIVOS.	42
FIGURA 15: ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE TEOR DE LIGNINA.	43
FIGURA 16: A) BANHO MARIA DE GLICERINA; B) BANHO GELADO C) FILTRAÇÃO DA HOLOCELULOSE.	44
FIGURA 17: A) FILTRAÇÃO DA ALFACELULOSE; B) SECAGEM DA ALFACELULOSE.	45
FIGURA 18: ENSAIO DE TEOR DE UMIDADE.	46
FIGURA 19: EPSILON 3-X.	47
FIGURA 20: A) D2 PHASER; B) PREPARO DA AMOSTRA DE BAMBU; C) COLOCAÇÃO DO CADINHO NO EQUIPAMENTO.	48
FIGURA 21: A) SÍLICA EM DISSOLUÇÃO EM ÁGUA DESTILADA; B) HIDRÓXIDO DE POTÁSSIO.	49
FIGURA 22: SILICATO DE POTÁSSIO APÓS 24 HORAS.	50
FIGURA 23: A) MOLDE DOS CORPOS DE PROVA SEM TAMPA; B) MOLDE COM TAMPA.	51
FIGURA 24: CORPOS DE PROVA MOLDADOS.	51
FIGURA 25: PRENSA HIDRÁULICA.	52

FIGURA 26: MÁQUINA DE ENSAIOS UNIVERSAIS DE FORÇA.	53
FIGURA 27: A) PENEIRAMENTO DOS SÓLIDOS; B) MISTURADOR MAV 1600 VONDER.....	54
FIGURA 28: MOLDAGEM SEM ADIÇÃO.....	55
FIGURA 29: MOLDAGEM COM 10% DE ADIÇÃO.....	55
FIGURA 30: DESMOLDE COM 24 HORAS.	56
FIGURA 31: ENSAIO DE PERMEABILIDADE.	56
FIGURA 32: DIFRATOGRAMA DO BAMBU IN NATURA E TRATADO EM ÁGUA	59
FIGURA 33: ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL DO GEOPOLÍMERO SEM ADIÇÃO DE FIBRA.	63
FIGURA 34: ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL DO GEOPOLÍMERO COM ADIÇÃO DE FIBRA DE BAMBU.....	63
FIGURA 35: GRÁFICO DE RESULTADOS DE COMPRESSÃO. MEDIAS	64
FIGURA 36: RESULTADO DE ENSAIO DE FLEXÃO COM IDADE DE 7 DIAS.	65
FIGURA 37: ENSAIO DE FLEXÃO DA PLACA COM ADIÇÃO DE 10% DE FIBRA.	66
FIGURA 38: DIFRATOGRAMA DO GEOPOLÍMERO COM E SEM ADIÇÃO DE BAMBU.	67
FIGURA 39: ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DO GEOPOLÍMERO COM E SEM ADIÇÃO DE BAMBU.	68
FIGURA 40: PLACA 0% ADIÇÃO.	69
FIGURA 41: PLACA COM FIBRA.	69

LISTA DE TABELAS

TABELA 1:TEORES DA BAMBUSA VULGARIS.....	30
TABELA 2 RESULTADOS DOS TEORES DA FIBRA DE BAMBU TRATADO E IN NATURA.....	57
TABELA 3: FICHA TÉCNICA DO METACALIM HP ULTRA E RESULTADOS DO FRX.....	60
TABELA 4: FRX DO CIMENTO.....	61
TABELA 5: FRX DA SÍLICA.....	61
TABELA 6: FRX DO HIDRÓXIDO DE POTÁSSIO.....	62
TABELA 7:MÉDIA E DESVIO PADRÃO DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO.....	64
TABELA 8: MÉDIA E DESVIO PADRÃO DO ENSAIO DE FLEXÃO.....	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVO.....	17
2.1	OBJETIVO GERAL.....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	REVISÃO DA BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	MATRIZ CIMENTÍCIA	18
3.2	GEOPOLÍMERO.....	19
3.2.2	Fonte de aluminosilicatos	22
3.3	FIBRAS NATURAIS	26
3.3.1	Composição das fibras naturais.....	27
3.1.2	O bambu	29
3.1.3	Características químicas e físicas do bambu.....	30
3.1.4	Emprego do bambu.....	30
3.1.5	Teor de cinzas	31
3.1.6	Os extrativos	31
3.1.7	Lignina insolúvel	31
3.1.8	A holocelulose.....	32
3.1.9	A alfacelulose.....	32
3.4	TRATAMENTO FIBRA DE BAMBU	33
3.5	COMPÓSITO GEOPOLIMÉRICO COM FIBRAS	33
3.5.1	Placas geopoliméricas com fibras.....	36
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
4.1	DIVISÃO DA PESQUISA	37
4.1.1	Materiais	37
4.1.2	TRATAMENTO DA FIBRA DE BAMBU (B. VULGARIS ‘VITTATA’) POR IMERSÃO EM ÁGUA	39
4.1	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	40
4.2.1	Teor de cinzas	40
4.2.2	Teor de extrativos	41
4.2.3	Teor de lignina insolúvel	42
4.2.4	Teor de holocelulose.....	44

4.2.5	Teor de alfacelulose.....	45
4.4	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	46
4.4.1	Teor de umidade	46
4.5	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS PERCURSORES DO COMPOSITO.....	47
4.5.1	Espectrometria de fluorescência de raio-x (FRX).	47
4.5.2	Difração de raio-x (DRX).....	48
4.6	PREPARO DO GEOPOLÍMERO.....	49
4.6.1	Preparo do silicato de potássio	49
4.6.2	Produção da pasta geopolimérica.....	50
4.6.3	Moldagem dos Cp's	50
4.7	ENSAIOS DE FORÇA DO COMPÓSITO	52
4.7.1	ENSAIOS DE COMPRESSÃO DOS COMPÓSITOS PROJETADOS	52
4.7.2	PREPARO DA PLACA GEOPOLIMÉRICA	54
4.7.3	Ensaio de flexão a três pontos	55
4.8.3	Permeabilidade	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1	ANÁLISES DA FIBRA DE BAMBU.....	57
5.1.1	DRX DA FIBRA DE BAMBU IN NATURA E TRATADO EM ÁGUA	59
5.2	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS PRECURSORES.....	60
5.2.1	Metacaulim.....	60
5.2.2	Cimento.....	61
5.2.3	Sílica	61
5.2.4	Hidróxido de potássio (KOH)	62
5.3	ENSAIOS MECÂNICOS DO GEOPOLÍMERO	62
5.3.1	Ensaio de compressão axial do geopolímero com e sem adição de fibra	62
5.3.2	Ensaio de flexão	65
5.4	ANÁLISE QUÍMICA DE GEOPOLÍMERO.....	67
5.4.1	DRX do geopolímero com e sem adição de fibra.....	67
5.4.2	FTIR do geopolímero com e sem fibra.....	68
5.5	ENSAIOS DE DURABILIDADE DAS PLACAS GEOPOLIMÉRICAS.....	69
5.5.1	Permeabilidade	69
6	CONCLUSÃO.....	71

6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	73
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

1 INTRODUÇÃO

A degradação acelerada de recursos naturais e a busca por materiais com menor custo ao meio ambiente é um problema a ser resolvido com certa urgência, um grande termômetro de alerta para tal problema é a emissão de dióxido de carbono (CO_2), sendo a construção civil um dos maiores agentes nocivos neste quesito, a construção civil é responsável por emitir cerca de 455,94 kg a 516,12 kg de CO_2 por metro quadrado construído sendo estes dados apenas uma estimativa, pois os métodos construtivos ao redor do mundo são variados e a captação de dados imprecisa [1].

Neste cenário o geopolímero é um material que podemos enquadrá-lo em uma categoria formidável, a dos eco materiais, seu processo de produção pode incluir a reutilização de resíduos da indústria como cinzas volantes, escoria metalúrgica além de detritos dos processos de tratamento de água como os resíduos de estação de tratamento, que até então seriam apenas mais um resíduo industrial a ser descartado podendo ter o reuso garantido para a produção de um novo produto [2].

Sendo o geopolímero um material que faz parte da classe dos cerâmicos traz consigo suas características negativas que podem ser amenizadas por meio do uso de fibras naturais as quais agregam a capacidade de transporte de tensões em escala micro dentro do compósito, o que realiza a redução do fissuramento no material por meio do transporte de cargas pontuais no caso de tensões de flexão [3].

Dentre suas vantagens a incorporação de fibras vegetais também torna a matriz mais leve e reduz a condutividade térmica e acústica na superfície do compósito proporcionando características que tornam o material mais funcional para ser utilizado como elemento de vedação como por exemplo em placas [3].

O uso das fibras naturais na construção civil é uma das soluções que tem se mostrado promissora na busca de novos materiais. No caso do bambu imperial, sua dupla vantagem, a de captar dióxido de carbono do ar e como agregado em matrizes cimentícias, o torna promissor além de seu baixo custo de produção, baixa densidade e biodegradação, sua aplicação na substituição de fibras sintéticas é uma de seus usos mais promissores [4].

Por tais aspectos o bambu imperial é ideal para ser incorporado a matriz geopolimérica com o intuito de agregar propriedades promissoras a tal matriz, dentre elas a resistência a tração e flexão que por conseguinte melhora a ductibilidade da matriz [5].

O geopolímero e as fibras de origem naturais tem uma capacidade de interação e aplicabilidade excelente, onde em conjunto possuem características de ductilidade e proteção a integridade da fibra natural protegendo-a do contato com o ar e com agentes nocivos como pragas e fungos [6].

Neste trabalho foram realizadas as análises de caracterizações das propriedades da fibra de bambu *Bambusa vulgaris* 'Vittata' e sua incorporação à matriz geopolimérica, bem como a análise mecânica do compósito.

Sendo tal estudo dividido em duas etapas na primeira foi realizada a caracterização das fibras de bambu, seus teores e características físicas e a influência do tratamento por imersão em água. Na segunda etapa foi realizada a produção do geopolímero com e sem adição de fibras e seus devidos ensaios físicos.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Avaliar a capacidade mecânica de compressão e flexão que a fibra de bambu (*B. vulgaris* 'Vittata') pode agregar ao geopolímero.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar as fibras de bambu (*B. vulgaris* 'Vittata') quanto seus teores de extrativos, holocelulose, lignina insolúvel e alfacelulose, além de suas características físicas como teor de cinzas e teor de umidade;
- Produzir e analisar o desempenho do compósito geopolímero em conjunto com a fibra de bambu por meio de ensaios de compressão e de ensaios de flexão;
- Analisar comparativamente a capacidade de estanqueidade da matriz geopolimérica e da matriz geopolimérica com incorporação da fibra de bambu.

3 REVISÃO DA BIBLIOGRÁFICA

3.1 MATRIZ CIMENTÍCIA

No século XXI um dos grandes problemas a serem solucionados pela ciência em relação a construção civil é a produção de novas tecnologias que amenizem a emissão de dióxido de carbono (CO_2) e de diversos outros resíduos oriundos desta na atmosfera terrestre, além disto a necessidade de materiais com propriedades mais eficazes, duráveis e resistentes se mostra um dos pré-requisitos para as construções do futuro [7].

Neste cenário de altas emissões de CO_2 o cimento Portland (CP) é o aglutinante mais comum na construção civil e um dos responsáveis pelas altas emissões, no entanto, a indústria de cimento hoje enfrenta dificuldades para atender a demanda em razão das reservas limitadas de pedra calcária e aumento dos impostos do carbono que onera sua produção em algumas localidades do mundo[8].

Somente na construção civil as emissões são responsáveis por cerca de 455,94 kg a 516,12 kg de CO_2 emitido por metro quadrado construído, sendo estes dados apenas uma estimativa, pois os métodos construtivos ao redor do mundo são variado e a captação de dados imprecisa [1].

Grande parte desta emissão ocorre durante a produção de materiais considerados insubstituíveis na construção civil como o concreto e o aço que fornecem a sociedade o concreto armado sem o qual as grandes construções do homem seriam impossíveis, no entanto os mesmos que figuram como redentores da humanidade e facilitadores de suas mega construções são também os maiores emissores de poluentes, em 2015 a produção de cimento Portland atingiu 4,3 bilhões de toneladas em 2015 com estimativas de atingirmos uma produção de 6,1 bilhões de toneladas no ano de 2050 [9].

Para mitigar este cenário hoje já vemos alternativas sendo implementadas aos mercado como concretos pré moldados que fazem uso de cinzas volantes que são resíduos da produção de carvão, reutiliza-se também a sílica advinda da casca de arroz e escória de forno granulado e com isso amenizando o uso de cimento .[1].

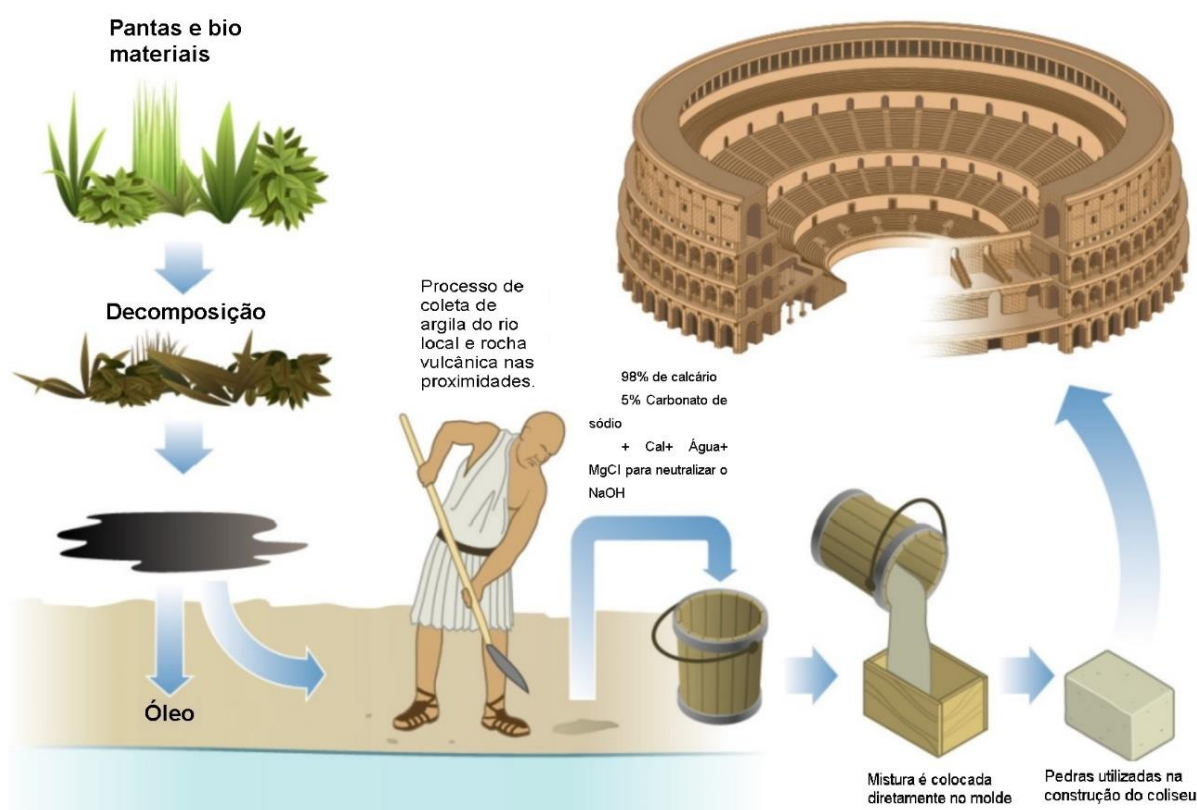
3.2 GEOPOLÍMERO

Com todos os fatores econômicos, sociais e ambientais levantados a respeito do uso do cimento Portland o geopolímero figura como uma solução a longo prazo e diferente do que acreditamos é uma resposta a demandas construtivas não tão recente quanto imaginamos [10] recorda que durante o Império Romano eles se utilizavam de um tipo de polimerização (fig. 1) oriunda de um processo hoje considerado primitivo mais altamente eficiente que consistia na mistura do óleo e cinzas da planta de palma com lama vermelha que produzia o que hoje conhecemos como geopolímero.

Com a produção de blocos rochosos oriundos deste processo era possível produzir edificações altamente resistentes e que inclusive algumas resistem até nossos dias atuais [10].

Figura 1: Primórdios da produção de geopolímero.

Fonte: [10]

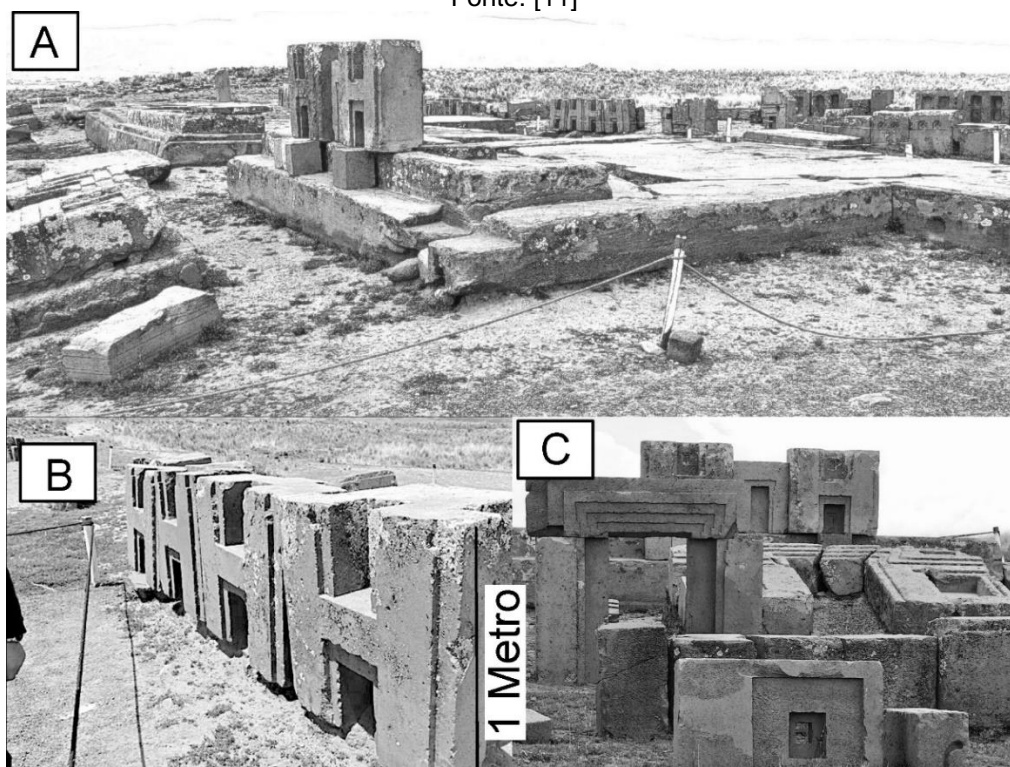


Em estudos recentes [11] ao analisar monumentos com idade de 1400 anos na região dos andes na América do Sul produzidos pelo Império Tiwanaku anteriores inclusive aos povos Incas identificou-se blocos de arenito de 150 a 180 toneladas,

mas não foram suas monumentalidades que chamaram a atenção dos pesquisadores e sim peças com altura de 1 metro em formas que remetem a letra “H” (fig. 2b e 2c) com ângulos perfeitos a 90° e seu acabamento impecável que levantam questionamentos quanto como houve sua execução levando em conta as ferramentas primitivas da época.

Figura 2: A) Lajes em arenito geopolimérico; B) Esculturas em forma H; C) outras estruturas da mesma localidade.

Fonte: [11]



Iniciados os estudos de fragmentos de tais monumentos foram identificadas presença de matéria orgânica (Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca), materiais aos quais são incomuns em rochas de origem vulcânica além da presença de matéria orgânica amorfa, o que nos remete a possibilidade de pedras artificiais [11].

Este estudo identificou dos processos distintos de produção de elementos Geopoliméricos distintos, um sendo o das lajes (fig. 2a), ou seja, o povo Tiwanaku se utilizava de dois processos distintos em suas construções um que produziu as grandes lajes da construção, semelhante ao concreto geopolimérico e outra para a produção das esculturas oriundas de biomassas orgânica-mineral sendo utilizada como um tipo de cerâmica [11].

Todos estes estudos tratam-se de um único material de aluminossilicato alcalino amorfo, que se obtém da condensação de aluminossilicato ativado por

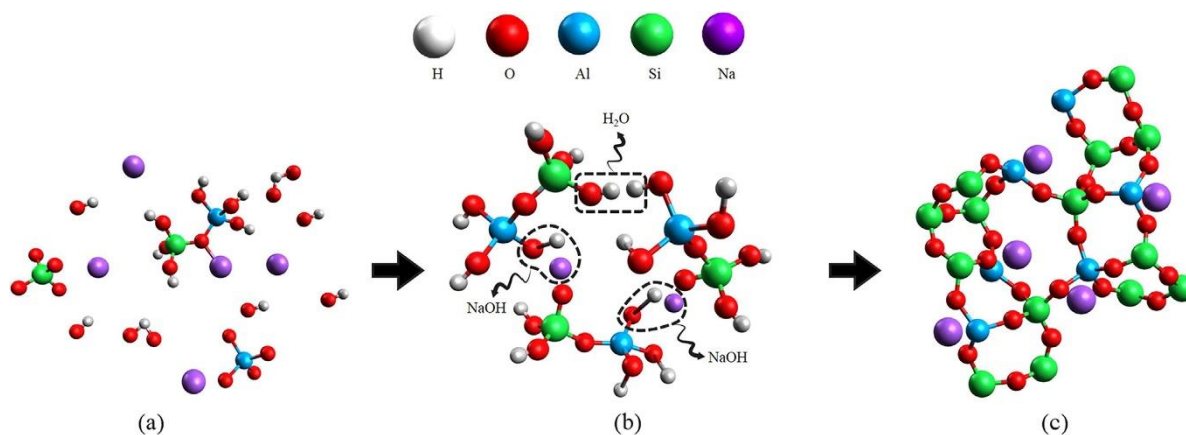
solução aquosa de silicato alcalino ou hidróxido, produzindo o que chamamos de geopolímero um material da classe dos cerâmicos assim como os produtos do cimento com características de resistência elevadas [12].

3.2.1. Sintetização do geopolímero

Davidovits conseguiu não somente desvendar este sistema como criar proporções reproduzíveis de Si/Al e batizou o produto de tal processo de geopolímero, por ele foi criada essa proporção atômica de Si/Al, Ca/Al e Si/Ca de 2,047 a 5,570, 0,107 a 1,401 e 4,882 a 4,267 são as proporções necessárias a seus materiais percursos para obtenção das características comuns ao geopolímero.

Suas características somente são possíveis pois ao longo de seu processo de mistura dos percursos do geopolímero ocorre um reordenamento molecular, este processo de quebra e reordenamento é conhecido como geopolimerização (fig. 3), se trata de um processo exotérmico que consiste em três etapas: oligomerização, agregação e condensação no qual a solução alcalina reage realizando a dissolução de suas cadeias (oligomerização) formando diversos oligômeros que posteriormente se conectam por meio do compartilhamento de uma molécula de oxigênio (agregação) e por fim há a condensação das cadeias [13].

Figura 3: Reorganização dos aluminossilicatos.
Fonte: [13]



O resultado oriundo deste processo é o geopolímero que em diversos pontos superiores ao cimento Portland seus pontos mais notáveis são o baixo impacto ambiental, a baixa emissão de dióxido de carbono na sua produção além da

possibilidade de utilizar diversos resíduos materiais de indústrias como as cinzas volantes, escória metalúrgica e resíduos minerais [14].

Atrai a atenção pelas suas características físicas, como resistência à compressão em ensaios de força, baixa porosidade que prolonga sua vida útil, resistência à ação de intempéries, além da sua alta resistência ao fogo sendo um material facilmente utilizável em foço de escadas de incêndio que em construção [15].

A estrutura química do geopolímero é classificada em três (fig. 4), polissialato, polissiloxossilato e polidissiloxossilato, a determinação das cadeias será determinada pela razão de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ da fonte de aluminossilicatos. A geopolimerização (agregação) continua ocorrendo enquanto houver cátions (Na^+ ou K^+) para neutralizar e estabilizar as cadeias moleculares [16].

Figura 4: Cadeias de polissialato.
Fonte: [16].



3.2.2 Fonte de aluminossilicatos

As fontes de aluminossilicatos tem sido um dos grandes enfoques das últimas décadas quando se trata de pesquisa de novos materiais, seja por sua capacidade de produzir materiais com capacidade de substituir o cimento Portland, seja por suas características superiores e sua diversidade de aplicações variadas. Desta forma uma vasta quantidade de fontes foram analisadas, como resíduos de construção ou de demolição de estruturas [17], escórias de auto forno industrial [18], entre outras.

Poucas se caracterizam pela quantidade necessária de pesquisa de seus desempenhos, características e informações técnicas de comportamento físico necessárias para uma aplicação efetiva em escala comercial, poderíamos resumi-las

exclusivamente as cinzas volantes da queima de carvão, o metacaulim que é obtido da calcinação do caulim e escórias de alto forno da fabricação de ferro [19].

Quando falamos em fontes de aluminosilicatos oriundas de cinzas volantes temos que analisar sua viabilidade técnica quanto a seu fornecimento e sua disponibilidade, localidades como Japão e Europa já reaproveitam este produto em mais de 90% do que é produzido, enquanto em outras localidades atinge meros 15 % de uso de sua totalidade produzida.

O metacaulim produto da calcinação da caulinita se classifica como uma das fontes de aluminosilicatos mais popular por se tratar de uma fonte pura e consistente, no entanto sofre por percalços em seu caminho como a já utilização de suas reservas por outras indústrias como a de papel e cerâmica, além da indústria de cimento que a utiliza para produção de cimentos específicos [19]. Além de seus fatores de obtenção do caulim e do metacaulim (por processo de calcinação) necessita de um ambiente controlado para cura em razão de sua alta propensão a rachaduras [19].

3.2.3. Solução alcalina

A solução ativadora de geopolímero que consiste em uma solução alcalina altamente concentrada que pode ser obtida pelo uso de hidróxido de sódio e hidróxido de potássio ou uma mistura de ambos que consiste em uma solução mista composta por ambos [16].

No entanto as pesquisas indicam que o poder de dissolução das cadeias de aluminosilicatos é mais eficiente em soluções de NaOH do que as de KOH, no entanto geopolímeros oriundos de KOH são superiores quando se trata de resistência compressão fator que deve ser levado em consideração na produção de uma solução ativadora para geopolímero [16].

Desta forma uma solução mista se mostra mais eficiente além de poder haver uma complementação com sílica ativa para haver uma melhor gelificação e precipitação de silicatos na solução ativadora obtendo desta forma uma estabilidade entre as características fundamentais de ambas [16].

3.2.4. Aplicações do geopolímero

A aplicação do geopolímero hoje se encontra com necessidade de estudos mais completos quanto suas propriedades mecânica, de características e de envelhecimento. Torna-lo capaz de substituir um material altamente difundido como o cimento Portland é um desafio pela necessidade de mais estudos e um desafio quanto aos custos e sua viabilidade econômica frente a seu adversário.

Dentre suas peculiaridades está a sua temperatura de cura que tem influência nas propriedades mecânicas adquiridas sendo o ideal em torno de 40 - 65°C para obtenção de melhores desempenhos de suas propriedades mecânicas e físicas [20].

Um fator que deve ser levado em conta é suas relações de água ativadora/percursor são altamente sensíveis quando se trata de geopolímero no entanto este é capaz de resistências muito superiores aos do cimento Portland atingindo valores de até 160 MPa de resistência a compressão [21].

Outro ponto a ser levantado tem a questão de seus precursores serem produtos de uso controlado não podendo ser manuseados de forma indiscriminada, no entanto características como a alta resistência ao fogo suportando de 1000 - 1200°C, baixa porosidade são fatores que o tornam um candidato altamente qualificado para atuar como matriz inclusive para a adição de fibras naturais já que o geopolímero atuaria como uma barreira de proteção para as fibras, além de possuir boa estabilidade química tornando-o resistente as intemperes temporais as quais ficará exposto sua matriz [20].

Algumas pesquisas já realizadas identificaram que a adição de fibras como basalto [22], resíduo de casca de milho [23], fibra de juta [24] e bambu [25] como reforço de matriz geopolimérica a base de metacaulim apresentam ótimos resultados, o geopolímero reforçado com casca de milho chegou a resultados de 14,1 MPa [23], o geopolímero reforçado com fibra de juta em percentual de 30% em relação a matriz chegou a 20,5 MPa com o uso de potássio para a produção de solução ativadora [24].

Desta forma o geopolímero em grande escala deve se dar possivelmente pela indústria pré-fabricada em decorrência da necessidade de controle maior de seus precursores e de sua cura para atingir seu potencial máximo já que o mesmo necessita de processos produtivos controlados, mesmo desta forma sua aplicação poderia ocorrer em revestimentos, placas de vedação e lajes pré-moldadas [26].

A aplicação em reparos de grandes construções pode trazer economia, somente os EUA gastaram em 5 anos com reformas de pontes e estruturas de concreto US \$ 1,6 trilhão no mesmo cenário a União Europeia gastou 1,15 trilhões de euros no reparo de 84 mil pontes de concreto, reparos em estruturas de concreto tem um custo elevado pois os materiais para tais serviços são de alto custo estando aí disponível um nicho de mercado que o geopolímero pode se utilizar [27].

Tais comprovações de capacidade de reparo abrem o leque de sua utilização inclusive para reparos rápidos em pistas de aeroporto que com apenas 6 horas de cura já pode receber pousos e decolagens [27].

Outro uso ou melhor, reuso que o geopolímero é capaz de produzir é a reutilização de resíduos nocivos em sua produção o que traz como benefício a retirada deste material nocivo do meio ambiente onde pode causar contaminação de águas superficiais, metais como Cu, Co, Cd, Pb, Zn, Pd podem passar por um processo de encapsulamento físico na estrutura molecular do geopolímero sendo necessária a análise destas interações químicas.

No caso Cr^{6+} e Pb^{2+} são capazes de melhorar as propriedades mecânicas da matriz geopolimérica ao qual forem inseridos [28]. Já no caso da adição Zn^{2+} em geopolímero a base de cinzas volantes apesar de ocorrer a contenção de seus fatores nocivos há uma redução de sua capacidade mecânica o que tem que ser levado em consideração, os fatores de anulação dos metais pesados dependem das características das matérias primas do geopolímero o PH do ativador e na estrutura dos poros do geopolímero [27].

A produção de isolantes térmicos com base geopolimérica é produzido utilizando o mesmo princípio geopolimérico com a adição de agentes expansores que produzem um produto eficiente quanto a suas características expansivas preservando suas características nativas ao geopolímero [29].

Ainda há a possibilidade da produção de concreto autolimpante baseado em geopolímero que caso figurasse em grandes construções seria capaz de degradar pequenas moléculas que se depositassem ao longo do tempo na superfície das edificações (dióxido de carbono básico, oxigênio, água, ácido sulfúrico ou ácido nítrico) [30].

3.3 FIBRAS NATURAIS

Há algumas décadas iniciou-se a busca por formas de tornar a existência humana no planeta menos agressiva e mais sustentável, isto sem perder qualidade de vida, dentro desta busca surgem materiais alternativos que não abandonem os padrões que a sociedade impõe de conforto e estética, sendo também estes menos onerosos para a indústria como é o caso das fibras vegetais que caminham para ser uma alternativa altamente viável de substituição das fibras sintéticas que tem seu custo de produção elevado apresentando características e desempenho semelhantes [31].

A produção de fibras naturais em 2018 foi estimada em 32 milhões de toneladas em escala mundial, dentre as quais estão inclusas as fibras de origem vegetal e animal [32].

A grande vantagem que as fibras naturais têm é sua alta disponibilidade a nível mundial além da possibilidade de aproveitamento do aparato já existente na agroindústria para beneficiamento deste material, além de sua baixa densidade e suas propriedades que em alguns casos é superior as fibras sintéticas [33]. Quando comparamos as fibras naturais com as fibras sintéticas destacamos a sua baixa densidade e alta resistência, quando falamos em baixa densidade as fibras naturais giram em torno de 1,2-1,6 g/cm³, enquanto isso fibras sintéticas fica em torno de 2,4 g/cm³ [34] o que torna os materiais compósitos com fibras naturais muito mais leves.

Dentre as fibras naturais destaca-se o bambu. Estima-se que exista 37 milhões de hectares de floresta de bambu a nível mundial, no comercio asiático já existe uma tradição milenar de uso desta gramínea na produção de diversos utensílios e moveis além de edificações residenciais [35].

No Brasil temos 22 mil hectares de cultivo de bambu no Maranhão, 15 mil hectares em Pernambuco e Paraíba além de alguns hectares de floresta na região do Acre que chegam a ocupar 20% do território da Amazônia acreana [35]. Sua utilização no mercado pode ser o mais diversificado indo desde a indústria de embalagens, utensílios de cozinha e moveis até a produção de papel pelo seu alto teor de celulose passando pela biomedicina e construção civil figurando inclusive em estruturas produzidas, pela Domebambu Estruturas Ltda, com armações em hastes de bambu [36].

3.3.1 Composição das fibras naturais

As fibras naturais têm como seus constituintes principais a celulose, hemicelulose e lignina além de possuir em menor quantidade pectina, ceras e substâncias solúveis em água, tanto a pectina como os materiais cerosos e todas as outras substâncias entram em uma categoria única que são denominados extrativos [37].

Embora a formação das cadeias moleculares e da estrutura variem os constituintes nas fibras naturais permanecem os mesmos variando apenas em suas quantidades nos diversos tipos de filamentos fibrosos de origem vegetal. Dentre estas moléculas constituintes temos a celulose que se trata de uma das moléculas mais abundantes da terra estando presente em madeiras, em todas as espécies de plantas além de algumas bactérias e algas marinhas que tem a capacidade de produzi-la [38].

As propriedades físicas das fibras naturais dependem diretamente da disposição de sua matriz sendo o componente mais presente na grande maioria das espécies a celulose, além de ter um papel fundamental na resistência a qual a fibra tem capacidade a ser exposta. Suas cadeias moleculares ou celulósicas formam cadeias longas que alinhadas e empacotadas formam microfibrilas que interligadas com outras cadeias formam as estruturas das fibras [39].

Além dos aspectos relacionados a influência da celulose na fibra temos como fatores determinantes em suas propriedades suas características físicas, como diâmetro, comprimento, densidade e capacidade de absorção de água que é fator determinante nos aspectos de durabilidade da fibra após coleta [40].

Outro fator determinante na resistência da fibra no caso da força de tração é o comprimento de uma fibra se reduz em fibras de longo comprimento pois quando falamos em fibra estamos falando em uma cadeia de microfibrilas formadas por celulose que formam a fibra, neste contexto a possibilidade de um defeito em suas cadeias pode acarretar o rompimento da mesma, defeito o qual é menos possível de ocorrer em fibras curtas [41].

As células das paredes celulares da fibra natural estão divididas em quatro categorias: lamela média, parede primária, parede secundária que tem suas camadas (s1, s2, s3) e lúmen [42], conforme ilustrado (fig. 5 e 6).

Figura 5: Estrutura da parede celular.
Fonte: [43].

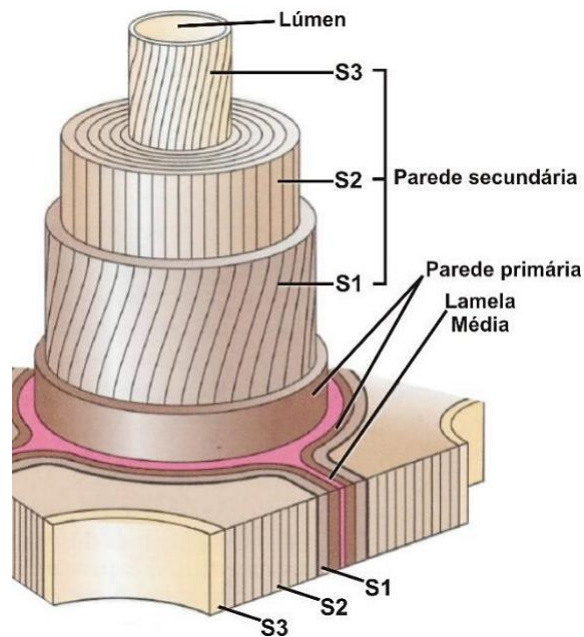
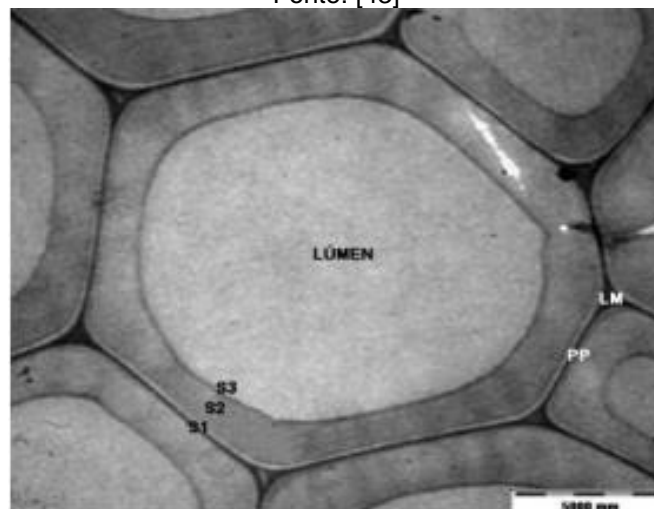


Figura 6: Paredes celulares de espécie vegetal ampliada 500x.
Fonte: [43]



Na parede lamelar média (fig. 5) temos a interligação entre as estruturas celulares para formar o conjunto de células que formam a fibra vegetal a lamela média é formada principalmente por lignina, e as paredes primarias e secundarias constituídas de celulose em seus três estágios, holocelulose, alfacelulose e hemicelulose, funcionalmente a camada primária é a camada de expansão onde encontramos um desarranjo das fibrilas celulares, já no caso da parede secundária e suas três camadas temos a estruturação da fibra com empacotamento celular alinhado em sentidos diferentes entre elas e é responsável por manter o reforço da célula [43].

3.1.2 O bambu

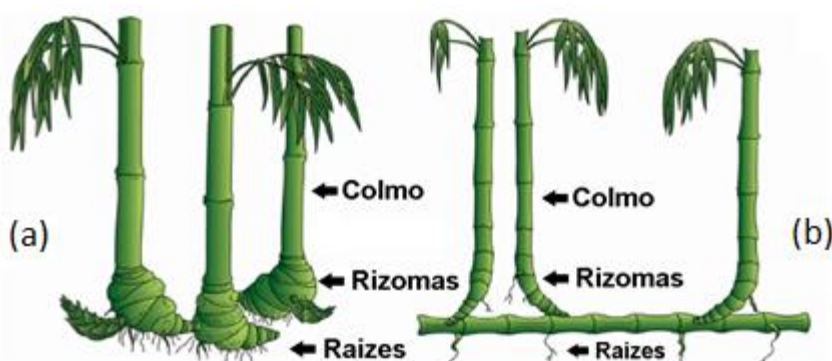
O bambu faz parte da família botânica das *Poaceae*, subfamília *Bambusoideae* que possui 75 gêneros conhecidos e 1.250 espécies catalogadas, um dos maiores detentores de plantações de bambu é a Ásia com 15 milhões de hectares divididos entre China e o sudeste asiático que compreende 11 países em sua região [44]. Tais espécimes da família *Poaceae* já foram encontrados indícios de sua existência desde a era Cretácea sendo mais antiga que a presença do homem, os chineses já documentavam seu uso desde 2600 a.C. [45].

No Brasil a chegada de algumas espécies remete a colonização portuguesa que trouxe dentre estas a *Bambusa vulgaris* (bambu-verde), *Bambusa vulgaris variedade vittata* (bambu imperial), *Bambusa tuldoides* (bambu comum), *Dendrocalamus gigantes* (bambu gigante ou bambu balde) e *Dendrocalamus latiflornus*. Sendo que o Brasil como grande parte dos países tropicais detentor de espécies nativas como: Cambaúba, bambu taboca, Taquaraçu, Ubá, taquara e canabrava além de ter 18 milhões de hectares de floresta de bambu nativo na região da Amazônia acreana. [46].

O bambu é uma gramínea que possui três estruturas simples: o colmo, as raízes e rizomas, a última a qual é responsável pela propagação de forma horizontal do bambu e pela formação de novos colmos que irmão se desenvolver na vertical em uma curta distância formando assim a touceira no caso das espécies entouceirantes como podemos ver na (fig. 7a) o que acaba acarretando a formação de uma moita que pode conter de 30 a 100 hastes variando em relação a espécie, tipo de solo e região podendo nascer de 5 a 10 colmos por ano [47].

Figura 7: a) Sistema de rizomas e entouceiramento; b) Sistema de rizomas e alastramento das espécies alastrantes de bambu.

Fonte: Autor.



No caso de espécies alastrantes poucos são os rizomas que se ativam e formam um novo colmo além de a distância entre os colmos ser maior tornando assim a ramificação deste tipo de bambu mais longa e como o próprio nome diz “alastrada” como pode ser observado na (fig. 7b) as espécies que se enquadram nesta categoria tem maior resistência a climas amenos e tem uma germinação para a produção de novas hastes de apenas 10% de suas gemas [48].

3.1.3 Características químicas e físicas do bambu

As características físicas, químicas e de morfologia do bambu são diretamente influenciadas pelo seu teor de lignina e espessura de suas paredes celulares, aos quais são influenciados pelo tipo de solo e clima da região de plantio, sendo muito semelhante a madeira em sua formação com a diferença que o teor de cinzas, sílica e extratos alcalinos é maior no caso do bambu [49].

Durante análise e caracterização da *bambusa vulgaris* [50] chegaram aos resultados constantes (Tabela 1).

Tabela 1: Teores da bambusa vulgaris.
Fonte: [50]

Componente	B1	B2	Média (%)
Teor de extrativos	7,6	7,5	7,6
Lignina total	18,0	17,9	18,0
Teor de holocelulose	74,4	74,6	74,5

Desta forma também podemos verificar os resultados obtidos por Silva[50] aos quais obteve 18,0% de lignina e 74,5% de holocelulose ambos valores que se aproximam entre si e foram utilizados como parâmetro para as análises realizadas.

3.1.4 Emprego do bambu

O emprego do bambu é milenar sendo utilizado desde a alimentação até utensílios domésticos e medicina natural, atualmente o bambu começa sua aplicação como matéria prima da indústria de larga escala como para a construção civil, painéis laminados de alta resistência e produção de papel além de ser utilizado em escala menor na construção de galpões e estufas nas regiões rurais do Brasil [51] .

No caso da *bambusa vulgaris* por se tratar de uma espécie de fibras longas é muito utilizada na produção de embalagens e papelão além da produção de papel por seu rápido crescimento e elevado teor de celulose sendo uma das vertentes de pesquisa do uso desta espécie como biomassa para analisar seu potencial termo energético [52].

3.1.5 Teor de cinzas

O teor de cinzas pode ser determinado pela ignição do material orgânico, o que promove a formação de gases e a consequente eliminação de carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e enxofre da amostra, permanecendo apenas a fração mineralógica como sódio, potássio, cálcio, magnésio, ferro, zinco e outros [53].

3.1.6 Os extrativos

Os extrativos são definidos como toda matéria lignocelulósica que não tem influência estrutural na parede celular da fibra natural. Em tal categoria estão alguns sais, açúcares e polissacarídeos (solúveis em água), ácidos ou ésteres graxos, álcoois de cadeias longas, ceras, resinas esteroides e compostos fenólicos glicosídeos [54, 55].

Sua função nas fibras naturais e madeiras é acumular nutrientes e preservar a integridade da fibra contra agressores externos como fungos, cupins e bactérias no entanto após a coleta do bambu passam a não ter função nenhuma dentro da fibra e podem inclusive colocar em risco a manutenção das características positivas do material [54, 56, 57].

Sendo os extrativos um conjunto grande de substâncias, a literatura emprega diferentes tipos de solventes para extrai-los [58].

3.1.7 Lignina insolúvel

A lignina é tida como a cola natural e ocorre na maioria das plantas, é responsável pela estruturação da planta além de ter influência positiva direta com o ângulo das microfibrilas a maior rigidez e degradação lenta das fibras naturais por funcionar como escudo de proteção das cadeias da fibra [59].

Por sua vez, tem relação negativa com a resistência à tração, força específica, módulo de elasticidade, densidade, diâmetro e comprimento da fibra; forças estas ambivalentes à rigidez que a lignina traz à estrutura [60].

3.1.8 A holocelulose

A holocelulose é uma designação que engloba a celulose e outros carboidratos presentes em fibras naturais, incluindo as pentoses, a hemicelulose e a alfacelulose. [61].

A determinação da holocelulose é fundamental para analisar o módulo específico, força específica e capacidade de absorção à umidade da fibra. A quantidade de holocelulose está diretamente ligada à capacidade da fibra de interagir com a umidade, mas está ligada negativamente com a resistência à tração. Falhas nas cadeias de holocelulose são frequentemente a causa de rompimentos de fibras longas [39].

Dentro da holocelulose temos a hemicelulose que é um polissacarídeo amorfo intermediário, existem vários tipos e subclasses de hemicelulose como as xiloglicoses e β -glicanas tal estrutura que tem a função intermediária de ligação dentro das cadeias de celulose dando estabilidade e estrutura as cadeias de celulose, além de proporcionar elasticidade a estrutura [39].

3.1.9 A alfacelulose

A alfacelulose é o constituinte mais importante na parede celular das plantas além de ser o polímero natural mais abundante que se tem conhecimento, sua produção estimada na biosfera é de 10^{12} toneladas por ano, sua estrutura é linear e constituída por um único tipo de açúcar [62].

3.4 TRATAMENTO FIBRA DE BAMBU

O bambu assim como outras plantas não está imune a infestações principalmente em razão dos altos teores de amido que o torna altamente suscetível a infestação de pragas tanto durante seu crescimento quanto após sua coleta em estado seco, dentre elas a *Dinoderus minutus*, *Dinoderus pilifrons*, *Bostrichus parallellus* e *Stromatium barabatum* são as mais comuns [63]. Estas infestação utiliza o bambu como alimento e moradia causando sérios danos a estrutura [64].

O amido por sua definição é um polissacarídeo natural presente em diversos tubérculos como a batata e o aipim, o amido presente em algumas espécies de bambu está na faixa de 5,55 μm que é classificado como pequeno em relação a outros amidos como o da batata que gira em torno de 30 a 35 μm seu percentual pode variar entre 2 e 10% no caso da família *bambusae* [63].

Desde o século XVII até o final do século XX no Equador tinha-se o costume de extrair as hastes de bambu na região montanhosa e transportá-las aos centros urbanos e durante estas viagens que eram realizadas de barco as hastes vinham sendo expostas a água, viagem a qual durava de três a quatro semanas, o mesmo procedimento foi observado na Colômbia e em algumas comunidades indígenas as quais efetuavam o processo utilizando lagos próximos para efetuar o procedimento, tal processo realizava a extração por meio aquoso do amido que é o principal atrativo para pragas que assolam o bambu [65].

3.5 COMPÓSITO GEOPOLIMÉRICO COM FIBRAS

Com o crescimento do interesse em utilizar o geopolímero como futuro sucessor ao cimento Portland nas construções há a necessidade de identificar uma forma de melhorar sua ductibilidade e aumento de seu modulo de elasticidade, neste ponto o geopolímero e o cimento Portland são muito semelhantes tendo uma resposta pouco efetiva a cargas aplicadas em forma de tração mesmo em cargas pequenas [9].

Sendo assim o geopolímero como o concreto necessita de um reforço, estudos mostram que o uso da fibra como reforço no geopolímero agrega transmissão de cargas dentro da matriz geopolimérica o que aumenta sua ductibilidade, quesito onde o geopolímero apresenta características tão negativas quanto o cimento portland [66].

Neste cenário muitos autores analisam a possibilidade do uso das fibras naturais em conjunto ao geopolímero, pois assim como todo material cerâmico sua natureza é de baixa tenacidade, fator que pode ser amenizado com o uso de fibras, algumas pesquisas como [26] adicionou fibra de algodão a matriz geopolimérica e com isso observou o aumento da resistência a flexão do geopolímero. Na utilização de fibras vegetais curtas [67] observou o aumento da deflexão máxima que chegou a ser duas vezes maior que os compósitos sem as fibras.

No mercado já possuímos diversos materiais em uso com aplicação de fibras naturais, uma das fibras mais utilizadas como reforço durante o século XX foi o amianto que possui características de transporte de tensões e resistência a temperatura significativa no entanto desde o final do século XX passa por um processo de descontinuidade no mercado em razão da identificação de uma série de patologias causadas pela inalação de suas partículas (pulmonares, digestivas, ginecológicas e urológicas) com isso hoje figura em diversos países como elemento proibido em qualquer processo produtivo [68].

Em substituição ao uso do amianto a busca por fibras que venham a substituí-lo tornou-se uma corrida urgente a ser vencida, nisto surgiu o uso de diferentes fibras das quais podemos classificar em grandes grupos, podemos citar: as de aço, as inorgânicas, as poliméricas, as naturais e as a base de carbono [9].

No caso dos compósitos cimentícios as fibras mais utilizadas são as de aço em suas diversas variações, sua faixa de capacidade de reforço é altamente ampla podendo chegar até a 2850 MPa, além de ser uma fibra amplamente utilizada e com todos os seus processos de produção normatizados [69].

Dentre a categoria das fibras inorgânicas temos a fibra de sílica, ou fibra de vidro sendo sua aplicação mais utilizada em matrizes alcalinas de compósitos cimentícios e não em matrizes geopoliméricas que tendem a realizar um processo de degradação das mesmas por seu ambiente altamente alcalino, dentro desta categoria podemos também citar as fibras de boro, carboneto de boro, nitreto de boro, zircônia, carboneto de silício[9].

Temos inclusive as fibras poliméricas sintéticas que aparecem como uma solução a reutilização de resíduos plásticos, as mais estudadas para aplicação em matriz geopolimérica são o tereftalato de polietileno (PET), polipropileno (PP), polietileno (PE) e álcool polivinílico (PVA) no entanto suas características de baixo módulo de elasticidade, baixa resistência ao calor além de uma difícil interação matriz

x reforço tornam sua aplicabilidade de certa forma não tão eficientes quanto outras fibras[9].

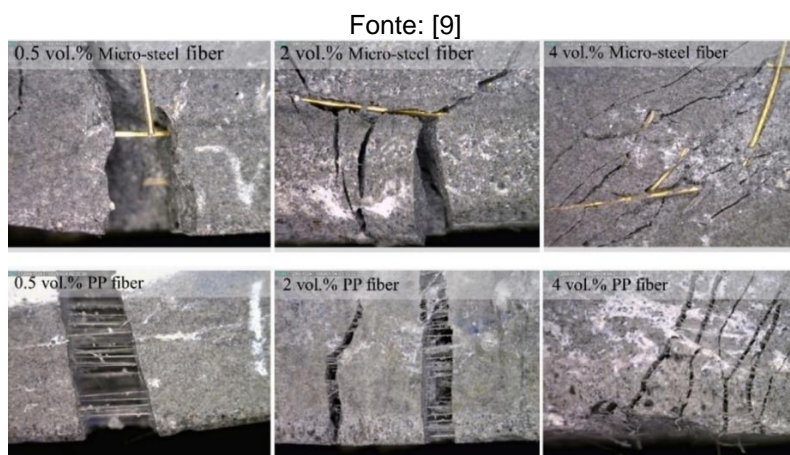
Já no caso das fibras naturais, temos estudos vastos com a aplicação em matrizes de geopolímero, dentre as mais estudadas estão as de juta, sisal, cânhamo e bambu, dentre as já citadas figuram como as fibras com menor impacto ambiental e com menor custo de produção [70].

Seus pontos negativos são suas variações como material de origem vegetal que é há uma série de fatores que podem influenciar em suas características, além de baixa durabilidade após coleta [9], no caso de sua aplicação de matrizes de cimento Portland possui elevada degradação pelo seu contato com hidratos de cálcio durante o processo de cura do cimento sendo mais aconselhável a introdução de fibras naturais em matriz geopolimérica [71], [72].

Desta forma o método aplicação e de distribuição do reforço em compósitos Geopoliméricos tem uma variação alta, no caso do compósito reforçado com fibras de aço sua mistura ocorre inicialmente com todos os pós e somente depois é misturada com a água ativadora [73], já no caso de fibras poliméricas sintéticas ou multifilamentares é preferível que as fibras sejam misturadas a água ativadora já que no caso de mistura com os pós não há uma dispersão eficiente [74].

Sendo assim, o que ocorre com a introdução de fibra na matriz geopolimérica é que a tensão de tração incidente sobre a matriz em ensaio se converte e se dissipa na forma de força de cisalhamento por meio das fibras, este processo é semelhante ao que ocorre no concreto de cimento Portland que se utiliza do aço para o mesmo fim.

Figura 8: influências da fração volumétrica, tipo e rigidez da fibra nos padrões de trinca de compósitos Geopoliméricos.



As propriedades do compósito geopolimérico são diretamente influenciadas pelo tipo de fibra, seu volume e se há na interface fibra/matriz uma boa interação e ausência de hidrofobicidade da fibra além presença de rugosidade em sua superfície possibilitando uma maior área de contato e de transporte de tensões como podemos observar na (fig. 8), um volume maior de fibras também possibilita a redução da distância entre as fissuras [9].

3.5.1 Placas geopoliméricas com fibras

No que tange ao reforço de matrizes geopoliméricas por meio das pesquisas podemos perceber o aumento de sua resistência muito mais elevada em forças de flexão, Sá et al. [25] com a adição de um percentual de 5% de fibra de bambu tratada em álcalis adicionada a matriz de geopolímero alcançou o resultado de até 454% de melhora em sua resistência a flexão este reforço é oposto as forças de compressão, Correia et al. [75] ao aplicar uso de fibras de abacaxi ao compósito geopolimérico identificou a redução da resistência a compressão, chegando a valores de até 50% de perda.

Na adição de fibras de coco, sisal e algodão identificou-se aumentos na resistência compressão de até 27%, no entanto sua resistência a flexão não obteve alterações de nenhuma espécie em seu comportamento mecânico e no caso das fibras de rafia observou-se que não houveram alterações mecânicas positivas, com reduções em sua resistência a compressão e de flexão atingindo até 45% de perdas [76].

Estudos como o de [77] deixam evidentes correlações quanto ao comportamento mecânico de matrizes geopoliméricas, sua durabilidade e a quantidade de vazios a qual a matriz apresenta exposição após sua cura, esta porosidade aparente ou apenas estrutural pode ser evidenciada ainda quando há a adição de fibras o que pode ser um dos fatores de perda de resistência, sejam de cargas em flexão ou compressão.

Com o intuito de reduzir tal problemática uma dentre diversas soluções encontradas seria a vibração durante o processo de fundição do geopolímero no entanto uma metodologia completa deste procedimento necessita ser estudada pela alta variação dos períodos de vibração, além de uma análise mais profunda desta possível melhora no comportamento mecânico do geopolímero relatada e tal metodologia [78].

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Divisão da Pesquisa

Esta pesquisa foi realizada em duas etapas, a primeira onde foi realizada a coleta do bambu, tratamento da fibra e análise de suas características. No segundo momento da pesquisa foi realizada a caracterização dos materiais precursores, do geopolímero e a produção do compósito geopolimérico com e sem fibra além dos ensaios de compressão e flexão.

4.1.1 Materiais

A haste de bambu *B. vulgaris* var. 'Vittata' com idade aproximada de 4 a 5 anos foi coletada de um bambuzal (Fig. 9) manejado pelo Laboratório de Estruturas de Engenharia (LTEE) do INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia), no município de Manaus, Amazonas (3°05'44.3"S 59°59'17.6"W), número de cadastro no Sistema Nacional de Gestão do Patrimônio Genético (SisGen) A9B39E0.

Figura 9: Touceira de *B. vulgaris* 'Vittata'.
Fonte: Autor



A haste de bambu foi extraída da touceira a partir do terceiro nó (na altura de 99 cm do solo), distancia esta pela dificuldade de extração da haste pois pelo modo de

disseminação do bambu de forma entouceirantes as hastes de bambu mais velhos vão ficando para o meio em decorrência do seu modo de crescimento.

Após a extração da haste de bambu mediu-se o comprimento (13,28 m) e os diâmetros da base (10,5 cm)(diâmetro para ter a circunferência dividir por P.I), meio (10,19 cm) e topo (7,6 cm).A haste foi cortada em segmentos de 1,50 m de comprimento para facilitar o transporte manual até um moinho martelo (fig. 10a) que realiza o processo de trituração de todo o bambu no Laboratório de Chapas e Aglomerado de Madeira do INPA.

Figura 10: A) Moinho para extração das fibras; B) Máquina Allgaier Sifter.
Fonte: Autor



Após o processo de moagem do bambu as fibras de bambu foram colocadas por um compartimento central ao meio do equipamento o qual chama-se máquina *Allgaier sifter* (Fig. 10b), que por um processo de movimento circular de forte intensidade faz a separação das fibras de bambu em quatro tipos distintos de malhas, funcionando como uma peneira granulométrica em proporções grandes, nesta pesquisa utilizou-se apenas as fibras coletadas da malha que se caracterizam por fibras de tamanho intermediário #4 (12,51 - 40 mm), não sendo fibras de granulometria mais fina, tão pouco das mais grossas separadas pelo equipamento.

4.1.2 Tratamento da fibra de bambu (*B. vulgaris* 'Vittata') por imersão em água

Após o processo de separação das fibras foi realizado o tratamento das fibras para extração do amido que consistiu na imersão das fibras em água (H₂O) (fig. 11a), sendo água está trocada diariamente com o auxílio de uma peneira com abertura de 50 mm (fig. 11b) para evitar o acúmulo de material orgânico extraído.

Figura 11: (A) Fibra imersa em água; (B) Peneira; (C) Fibra "espremida".

Fonte: Autor.

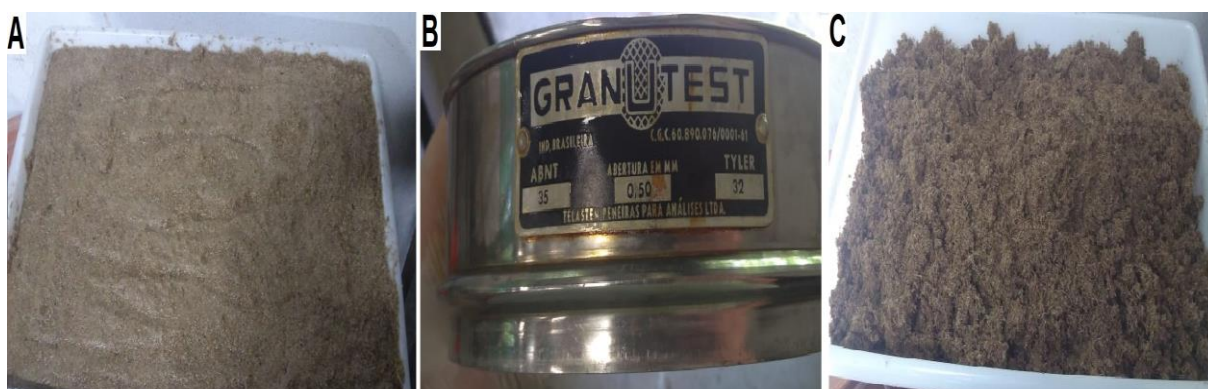
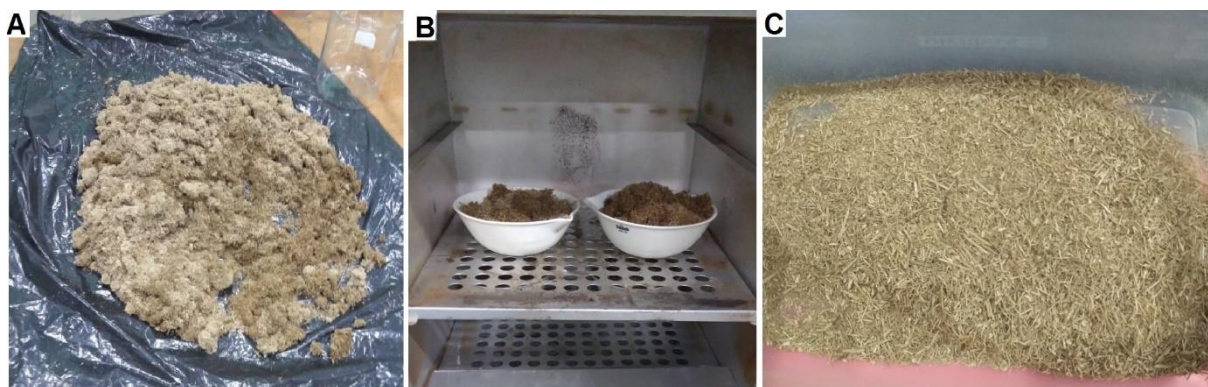


Figura 12: (A) Fibra em secagem em ar ambiente (B) Fibra em secagem em estufa (C) Fibra pós secagem.

Fonte: Autor



O processo de imersão durou um período de 7 dias, sendo realizado diariamente o processo de troca da água (fig. 11c), após o qual as fibras foram retiradas e depositadas sobre uma manta plástica para secagem inicial de forma natural (fig. 12 a) e após esta redução da umidade em excesso as fibras foram sendo colocadas em estufa a 100°C para secagem (fig. 12b) até obtenção de massa constante (fig. 12c). Este método é uma adaptação de [79].

4.1 Caracterização Química

A caracterização das fibras de bambu *vulgaris* 'Vittata' foi analisada quanto as suas características físicas e químicas, com o objetivo de obter informações a respeito de suas propriedades e sempre visando um comparativo da fibra *in natura* e das fibras que passaram pelo processo de imersão em água vendo quais alterações tal processo poderia vir a alterar as propriedades da fibra além de analisar suas propriedades que viriam a agregar propriedades à matriz geopolimérica.

A caracterização seguiu métodos já normatizados para análise de biomassas de origem vegetal, todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais (LSCN) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM/Campus Manaus Distrito Industrial.

4.2.1 Teor de cinzas

A determinação do teor de cinzas foi executada pelo método amostral de triplicata seguindo, onde utilizou-se amostras de fibras de bambu *B. vulgaris* 'Vittata' com massa de aproximadamente 1,5 g (Balança SHIMADZU-AUW220D). As amostras foram colocadas em cadinhos numa mufla (fig.13) que ao atingir 600°C é iniciado o controle do período de ensaio de 3 horas [80].

Figura 13: Calcinação e determinação de teor de cinzas.

Fonte: Autor



Aguardou-se a mufla (GP Científica) retornar a temperatura de no mínimo 200 °C, em seguida os cadinhos com as amostras foram colocados em um dessecador com sílica gel durante aproximadamente 30 minutos, até o completo resfriamento. Após este processo as amostras foram pesadas e analisada a diferença de massa para determinar o teor de cinzas [80].

Com o conhecimento do valor da massa do recipiente (MR), da massa da amostra (MA) e da massa do conjunto recipiente/amostra calcinada (MRAC) é possível determinar o teor de cinzas totais (TC%) [53].

O teor de lignina é determinado pela equação 1:

(1)

$$TC\% = \frac{MRAC - MR}{MA} \times 100\% = TC\%$$

4.2.2 Teor de extrativos

A técnica utilizada para determinar o teor de extrativos da fibra de bambu é por extração *soxhlet*, que consistiu na pesagem de 4g de fibra de bambu seca que foi colocada em um cone de papel filtro com porosidade baixa (Qualit. Whatman GR1 125mm) para evitar o extravasamento da fibra e contaminação do experimento, o cartucho contendo a fibra foi depositado dentro do *soxhlet* (fig. 11a).

Em um balão de vidro com capacidade de 500 mL adicionou-se 150 mL de acetona (C₃H₆O) a 70% e conectou-se ao *soxhlet*. Depositando o balão sobre a manta aquecedora, conectou-se o conjunto extrator + balão + manta ao condensador (fig. 14a), com temperatura mínima de 10°C para não haver evaporação da acetona [53].

A temperatura do conjunto sendo sempre controlada para que os refluxos sejam constantes e não menos que 24 fluxos por hora durante o período de ensaio, que é de 4 horas. Após o tempo de ensaio, a acetona que permanece no balão foi recuperada em um vaporizador rotativo até permanecer no balão apenas o extrativo (fig.14b) [53].

Figura 14: A) Esquema de extração; B) Evaporador Rotativo; C) Balão com extrativos.
Fonte: Autor



O balão foi colocado em estufa por um período de uma hora a 105 ± 2 °C. Após este período, o balão foi colocado em um dessecador até atingir a temperatura ambiente, podendo ser efetuada a pesagem (fig. 14c).

Com os valores de MR (Massa do Recipiente), MA (Massa da Amostra) e da massa do conjunto balão/extrativos (MRE) foi possível calcular o teor de extrativos (TE%) [53].

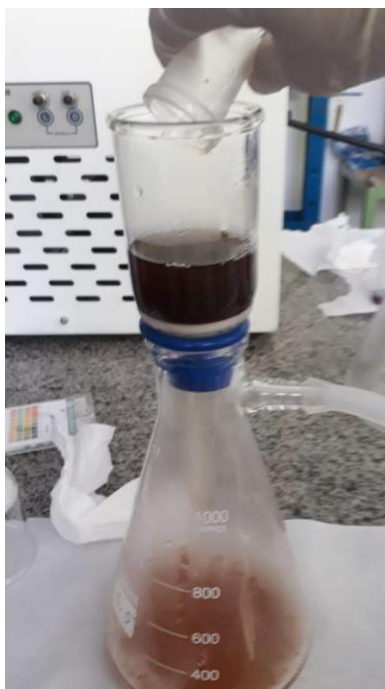
O teor de lignina é determinado pela equação 2:

$$TE\% = \frac{MRE - MRRS}{MA} \times 100\% = TE\% \quad (2)$$

4.2.3 Teor de lignina insolúvel

Para o processo de extração e determinação da lignina foi utilizada a hidrólise ácida, onde 1g de fibra de bambu moída sem umidade e sem extrativos foi colocado em um almofariz de 300 mL e adicionado 8,5 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 72% resfriado em geladeira à temperatura entre 10 e 15°C. Efetuou-se a maceração com um bastão durante quinze minutos e manteve-se a fibra na solução por um período de 24 horas [53].

Figura 15: Ensaio de determinação de teor de lignina.
Fonte: Autor



Após o processo de digestão da fibra pelo ácido, adicionou-se 150 mL de água destilada para diluição do ácido e transferiu-se o mesmo para um balão conectado a um condensador e uma manta aquecedora durante 5 horas.

Após o período de 5 horas aguardou-se o resfriamento do balão com a lignina. Durante o resfriamento montou-se a aparelhagem de filtração com o kitassato, a bomba de vácuo e um funil de abertura de 10 a 16 μm . Depositou-se a solução no funil e lavou-se com água destilada até atingir o pH próximo ao da água (fig. 15). O conteúdo do filtro foi colocado na estufa a 105 ± 2 °C, até atingir peso constante [53].

Após o peso assumir constância, transferiu-se o funil com a lignina para um dessecador até atingir temperatura ambiente, procedendo em seguida com a pesagem do conjunto funil + lignina (MFL), em posse das variáveis obtidas na balança, massa do funil (MF) e massa da amostra (MA), foi possível determinar o teor de lignina [53].

O teor de lignina é determinado pela equação 3:

(3)

$$\left(\frac{MFL - MF}{MA} \times 100\% \right) - TC\% = TLI\%$$

4.2.4 Teor de holocelulose

A técnica utilizada para determinar o teor de holocelulose da fibra de bambu é com base na oxidação da lignina por ácido. Em um Erlenmeyer de 500 mL depositou-se 3 g de fibra de bambu sem umidade e sem extrativos. Em seguida, adicionou-se 120 ml de água destilada.

Em uma capela de exaustão (modelo boro5), preparou-se um banho-maria de glicerina com temperatura $70 \pm 2^\circ\text{C}$ (placa de aquecimento e termômetro de mercúrio), no Erlenmeyer de 500 mL adicionou-se 2,5 g de clorito de sódio (NaClO_2) e 1 mL de ácido acético glacial 99% ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$) tampando-se com um Erlenmeyer de 25 mL, manter o conjunto aquecido por uma hora sobre agitação constante (fig. 16a), após a primeira hora de ensaio repetir a colocação do clorito de sódio e do ácido acético na mesma quantidade e após 1 hora repetir novamente a colocação ácido acético glacial e do clorito de sódio, em seguida prosseguiu-se por um período de mais 2 horas em banho-maria totalizando 5 horas de banho maria [53].

Após o processo efetuou-se o resfriamento do Erlenmeyer por 30 minutos (fig. 16b) em banho de água gelada seguindo-se com a filtração utilizando um kitassato de 1.000 mL conectado a uma bomba de vácuo para iniciar a filtração (fig. 16c) [53].

Figura 16: A) Banho maria de glicerina; B) Banho gelado C) Filtração da holocelulose.
Fonte: Autor



O conteúdo do Erlenmeyer de 500ml deve ser transferido para o funil, com uma agitação constante. Lavou-se a holocelulose com água destilada até o pH da água no funil tornar-se o mesmo da água que está sendo colocada. Utilizou-se tiras de pH para esta etapa, adicionou-se 20 mL de metanol, seguido de mais enxague de água destilada [53].

O funil foi colocado em uma estufa à temperatura de 65 °C por 18 horas. Após este período, colocou-se o funil em um dessecador por 30 minutos, efetuou-se a pesagem do conjunto funil + holocelulose (MFH) em posse das massas previamente obtidas do funil (MF) e a massa da amostra (MA) efetuou-se o cálculo dos valores de holocelulose, experimento foi realizado em triplicata para melhor controle de resultados [53].

O teor de holocelulose é determinado pela equação 4:

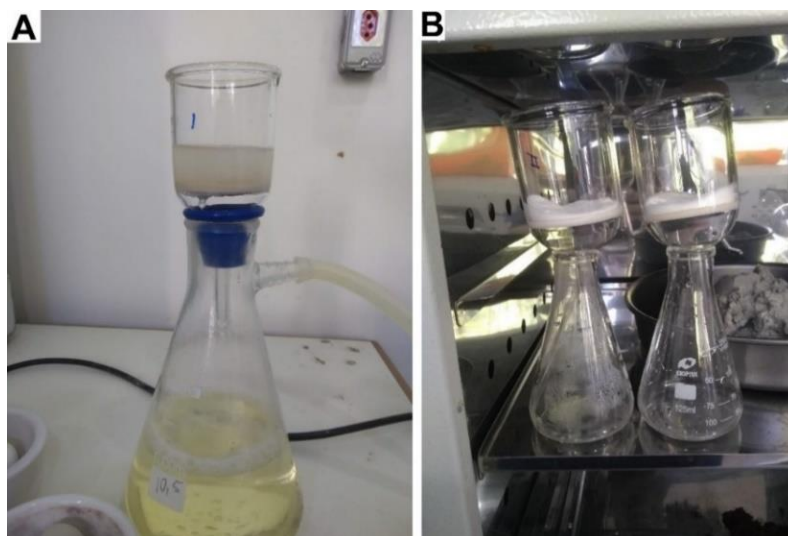
$$\frac{MFH - MF}{MA} \times 100\% = TH\% \quad (4)$$

4.2.5 Teor de alfacelulose

Pesou-se cerca de 1 g da holocelulose seca e colocou-se em um almofariz de 100 mL à temperatura ambiente adicionou-se 15 mL de uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 17,5%, aguardou-se 2 minutos de contato entre a solução e a celulose, e, então, iniciou-se a maceração com o auxílio de um bastão por 8 minutos. Findo este tempo foi adicionado 40 mL de água destilada e transferida a solução para o funil. No funil conectado ao kitassato de 1000 mL e a uma bomba de vácuo, o material foi “lavado” com água destilada até atingir pH semelhante ao da água destilada (fig. 17a).

Figura 17: A) Filtração da Alfacelulose; B) Secagem da Alfacelulose.

Fonte: Autor



Após este processo, o funil e a alfacelulose foram levados à estufa a $105 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e secos até atingir peso constante ou por no mínimo 18 horas (fig. 17b). Retirou-se o funil da estufa e depositou-se em um dessecador até atingir a temperatura ambiente para efetuar a pesagem, em posse da massa do funil com alfacelulose (MFA), massa do funil (MF) e massa da holocelulose (MAH) foi possível efetuar o cálculo [53].

A alfacelulose é determinada pela equação 5:

(5)

$$\left(\frac{MFA - MF}{MAH} \times 100\% \right) = TA\%$$

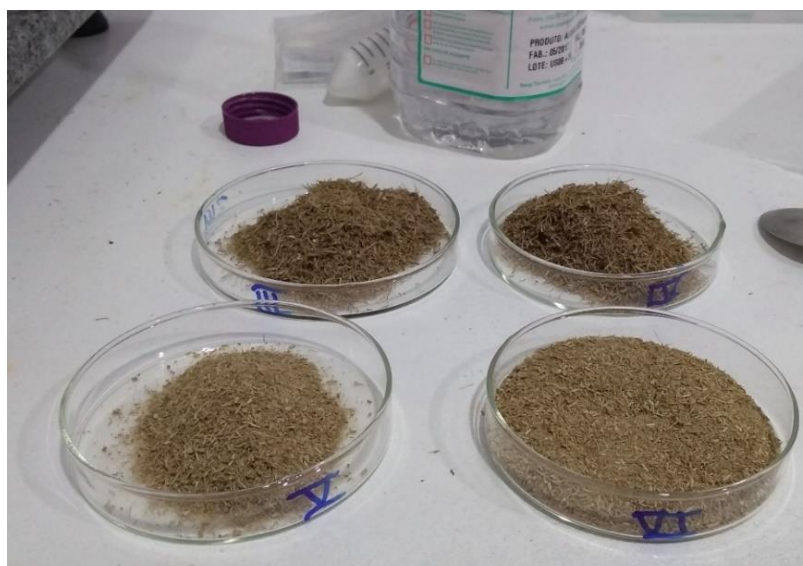
4.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

4.4.1 Teor de umidade

Em uma placa de petri previamente lavada e seca em estufa foi adicionado uma quantidade de aproximadamente 2g, de fibra (*B. vulgaris* 'Vittata'), o material foi pesado em uma balança de precisã), assim como seu recipiente, após as devidas pesagem o material foi colocado em estufa a $105 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ por três horas, após o primeiro ciclo de pesagem a fibra foi pesada e recolocada em estufa repetindo-se o processo até obtenção de massa constante da fibra (fig. 18) [81]

Figura 18: Ensaio de Teor de Umidade.

Fonte: Autor



Com todos os dados em mãos, massa do recipiente (MR), massa da fibra de bambu úmida (MAU), do conjunto recipiente/fibra úmida (MRAU) e do conjunto recipiente/fibra secas (AS) foi possível calcular o teor de umidade (TU%).

O teor de umidade é determinado pela equação 6:

(6)

$$\frac{(MRAU - MRAS) \times 100\%}{MAU} = TU\%$$

4.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS PERCURSORES DO COMPOSITO

4.5.1 Espectrometria de fluorescência de raio-x (FRX).

As fibras de bambu *in natura* e tratada em água, assim como todos os materiais precursores do geopolímero (metacaulim, do cimento, da sílica e do KOH), foram analisados realizando o ensaio de Espectrometria de Fluorescência de raios x (FRX) na Universidade Federal do Amazonas (UFAM), no laboratório de Ensaio Físico-Químico (LEM) em equipamento da marca Panalytical modelo Epsilon 3-X (fig. 19), com tensão máxima de 50 kV e corrente máxima de 3 mA.

A realização do ensaio foi com o intuito de analisar qualquer alteração nas características das fibras de bambu quanto ao seu tratamento e no caso dos precursores foi com o intuito de ter suas características.

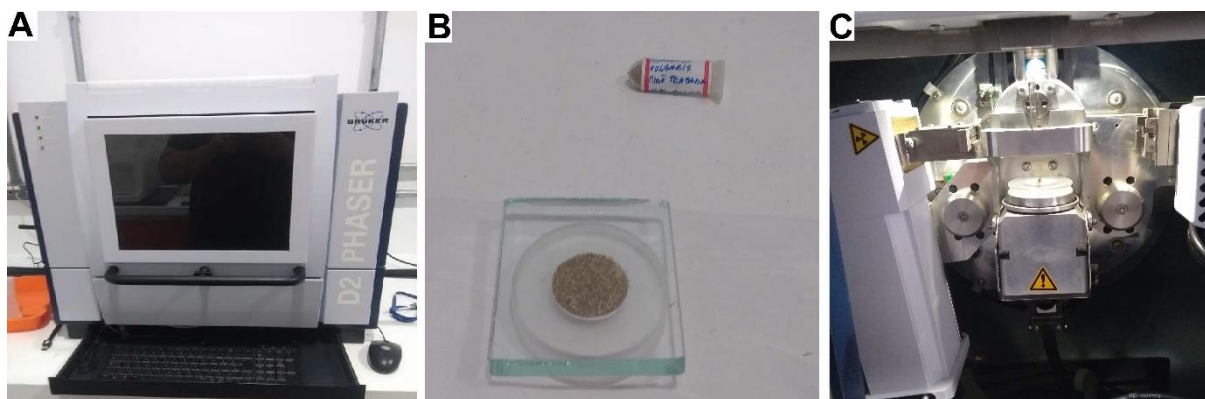
Figura 19: Epsilon 3-X.
Fonte: Malvernpanalytical.



4.5.2 Difração de raio-x (DRX)

A fim de se obter a identificação das fases das fibras de bambu *in natura* e tratada em água foi realizada a difração de raio-x.

Figura 20: A) D2 Phaser; B) Preparo da amostra de Bambu; C) Colocação do cadinho no equipamento.
Fonte: Autor.



O ensaio foi realizado no difratômetro da marca Bruker D2 Phaser (fig.20a) do Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais do Instituto Federal do Amazonas (IFAM) – Campus Manaus Distrito Industrial, equipado com fenda de 0,6 mm, faca de 3 mm, tubo de radiação de $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 0,15408\text{nm}$), com tensão de 30 kV e corrente de 10 mA. O ângulo de varredura abrangido foi de 5° a 100° com passo de varreduras de $0,02^\circ$ e intensidades coletadas a cada 5 segundos/ passo.

No preparo das amostras de bambu, tanto a *in natura* quanto o tratado em água, ambas foram previamente secas em estufa para não haver nenhuma umidade durante o ensaio (fig. 20b). Após o preparo dos materiais foi realizado o ensaio (fig. 20c) apenas se utilizando das partículas mais finas e que se moldassem dentro do cadinho de amostra (fig. 20b) sendo nivelado com o uso de uma placa de vidro pequena para que houvesse o mínimo de irregularidade possível na superfície da amostra a ser analisada no ensaio.

O método foi utilizado para cálculo da cristalinidade foi o método Seagal [62], o método avalia que a celulose possui dois componentes principais, um cristalino e outro amorfo, o pico mais elevado se refere fase cristalina do material, e o pico menor a intensidade, o resultado da diferença de ambos dividido pelo pico mais intenso nos fornece a cristalinidade do material [38].

A equação utilizada para o cálculo da cristalinidade:

(7)

$$\%IC = \frac{I_c - I_{am}}{I_c} \times 100$$

Sendo as variáveis:

IC – Índice de cristalinidade;

I_c – Intensidade máxima do pico;

I_{am} – Intensidade.

4.6 Preparo do Geopolímero

As proporções de cada material na produção do geopolímero utilizado são referentes a uma pasta que já vem sendo desenvolvida a algum tempo pelo grupo de pesquisa, sua relação de sílica/ alumina está na faixa de 1,52:1. As quantidades aqui citadas são referentes a produção de um volume de 62,44cm³ de pasta geopolimérica.

4.6.1 Preparo do silicato de potássio

Para a produção da solução ativadora utilizou-se uma solução de sílica ativada (16%) em pó doada pela empresa Elkem (microsilica classe 920), hidróxido de potássio (KOH) (20%) concedido pela Mawin do Brasil e água destilada (22%), inicialmente realizou-se a pesagem de todos os ingredientes em uma balança (shimadzu-auw220d), após a pesagem realizou-se a dissolução da sílica em água destilada (Fig.21a) até não haver nenhum resíduo aparente de pó de sílica, após este processo foi efetuada a dissolução do hidróxido de potássio (Fig.21b).

Figura 21: A) Sílica em dissolução em água destilada; B) Hidróxido de potássio.
Fonte: Autor.



Após a dissolução aquosa da sílica no hidróxido de potássio e água temos a solução ativadora de silicato de potássio a qual será necessário aguardar 24 horas antes da utilização (Fig.22).

Figura 22: Silicato de potássio após 24 horas.
Fonte: Autor.



4.6.2 Produção da pasta geopolimérica

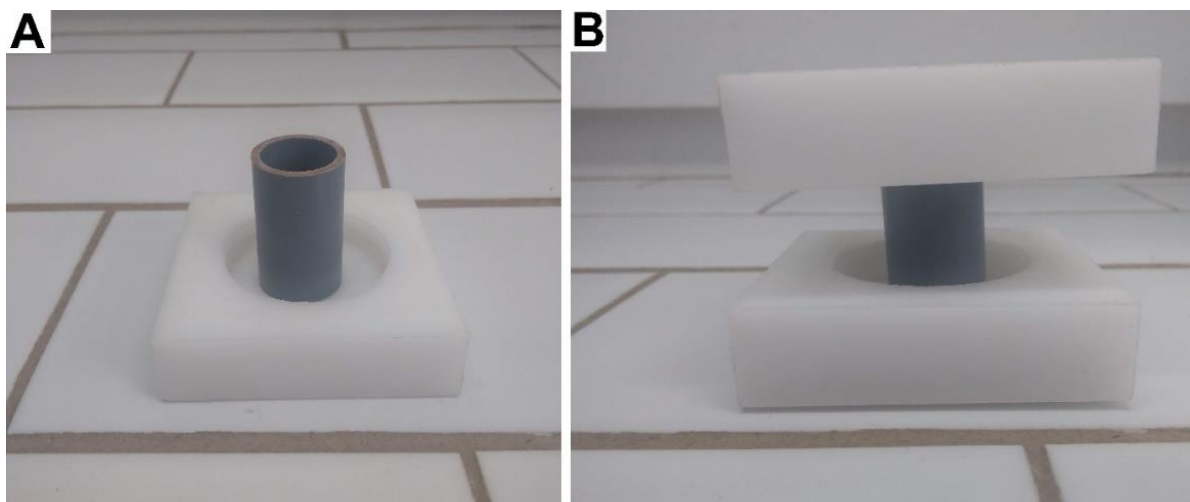
Com o silicato de potássio (Na_2SiO_3) com idade de 24 horas efetuou-se a mistura do metacaulim (29,33%) cedido pela Metacaulim do Brasil (São Paulo - SP) com o cimento (12,67%) (CP II-Z 40 RS) cedido pela MIZU, após a mistura de todos os pós foi realizada a mistura com a solução ativadora, todo este processo de mistura manual dura em torno de 5 minutos.

No caso dos corpos de prova que tiveram a adição de fibra de bambu *B. vulgaris* a mesma foi incorporada no momento das misturas dos pós com o metacaulim (29,33%) e o cimento (12,67%) na quantidade de percentual de 5% (valor referente a massa total do geopolímero).

4.6.3 Moldagem dos Cp's

A moldagem dos corpos de prova foi realizada de forma a adaptar a ABNT NBR 5738 – Procedimento para moldagem e cura de corpos de provas. Após a homogeneização da mistura esta foi derramada em molde plástico de PVC (Fig.23a) de dimensões, 43,0mm de altura e 21,0 mm Ø, que foi constantemente vibrado de forma manual para reduzir ao máximo a formação de vazios.

Figura 23: A) Molde dos corpos de prova sem tampa; B) Molde com tampa.
Fonte: Autor.



No molde foi utilizado um plástico filme para evitar a perda de água durante a cura de 24 horas em ar ambiente aplicado tanto na base do molde quanto em sua superfície (Fig. 23b) a qual após a colocação do filme foi posta a tampa semelhante a base (fig. 24).

Figura 24: Corpos de prova moldados.
Fonte: Autor.



Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados com o auxílio de uma prensa hidráulica de 15 toneladas da marca Bovenau (fig. 25) do tipo manual pois o desmolde em alguns corpos de prova ocorre com maior dificuldade.

Figura 25: Prensa hidráulica.
Fonte: Autor.



Seguido ao desmolde todos os corpos de prova foram colocados em sacos plásticos para protegê-los durante o processo de cura, seguindo a ABNT NBR 5738 – Procedimento para moldagem e cura de corpos de provas com adaptações onde permaneceram pelo período de 3,7,28 dias, a cura ocorreu em temperatura ambiente.

4.7 Ensaio de força do compósito

4.7.1 Ensaio de Compressão dos Compósitos Projetados

O ensaio foi realizado no Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) por meio do equipamento de ensaios mecânicos da marca Tinius Olsen (fig. 26) com célula de carga de 300 kN, adotando-se a velocidade de 0,6 mm/min.

Figura 26: Máquina de ensaios universais de força.
Fonte: Autor.



Seguiu procedimentos normatizados conforme instruções da ABNT NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos com pequenas adaptações da norma para uso de corpos de prova de matriz geopolimérica por terem menor tamanho tanto em diâmetro quanto em circunferência. O experimento seguiu a norma no que se trata de período de idades, seguida pela determinação das idades de 3, 07 e 28 dias.

A resistência à compressão é calculada pela equação 07:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \times D^2}$$

(8)

Sendo as variáveis:

f_c – Resistência à compressão (MPa);

F – Força máxima alcançada (N);

D – Diâmetro do corpo de prova (mm).

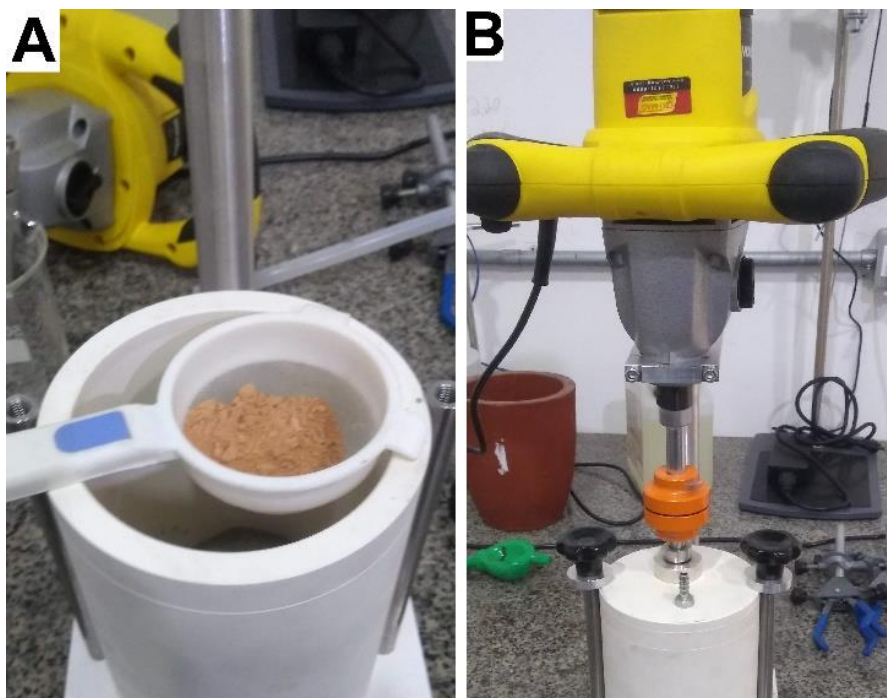
Os testes de compressão foram realizados no compósito geopolimérico com e sem adição de fibra de bambu #4 (12,51-40 mm, fibras curtas), seguindo os estudos

previamente concebidos [55]. Para tal foram testadas adições de 5% de fibra de bambu ao geopolímero além de corpos de prova sem adição de fibra.

4.7.2 Preparo da placa geopolimérica

Seguindo os mesmos procedimento de produção da matriz geopolimérica realizadas no item 4.6.1 e 4.6.2 inclusive o peneiramento (fig.27a), com as devidas proporções de pasta atualizadas ao tamanho do molde de 220mm x 100mm x 10mm , neste caso fazendo-se necessário o uso de um misturador (MAV 1600 VONDER) (fig.27b) por se tratar de um volume maior de cada ingrediente.

Figura 27: A) Peneiramento dos sólidos; B) Misturador MAV 1600 VONDER.
Fonte: Autor.



A fibra de *bambu B. vulgaris* foi incorporada na matriz geopolimérica em percentuais de 2,5%, 5% e 10% (valor referente a massa total do geopolímero). No processo de produção da pasta geopolimérica sem adição utilizou-se o misturador por um período de 5 minutos sem o uso de vácuo (fig.27b). No caso da pasta geopolimérica com reforço de fibra de bambu após a produção do geopolímero por um período de 5 minutos há a adição das quantidades específicas de reforço de bambu por mais um período de 5 minutos utilizando o vácuo de uma bomba de vácuo (tecnal-TE058) para amenizar a formação de bolhas e vazios no compósito.

A moldagem (fig. 28) dos corpos de prova foi realizada de forma a adaptar a ABNT NBR 15498– Placa de fibrocimento sem amianto – Requisitos e métodos de ensaio. Após o preparo do geopolímero a mistura foi derramada em molde acrílico de dimensões, 100x220x10mm, que foi constantemente vibrado de forma manual para reduzir ao máximo a formação de vazios (fig. 29).

Figura 28: Moldagem sem adição.
Fonte: Autor.



Figura 29: Moldagem com 10% de adição.
Fonte: Autor.



4.7.3 Ensaio de flexão a três pontos

A determinação de resistência à flexão da placa foi executada efetuando adaptação da norma ABNT (NBR15498:2016). Três corpos de prova, de cada percentual 0%, 2,5%, 5% e 10% de fibra, foram moldados em tamanhos de 100x220x10mm.

Figura 30: Desmolde com 24 horas.
Fonte: Autor.



Os corpos de prova foram desmoldados (fig. 30) com idade de 1 dia sendo envoltos em plástico filme para protegê-los e evitar perda de umidade ao longo de seu tempo de cura.

A resistência à tração na flexão é calculada pela equação 08:

$$R_f = \frac{3P_{\text{má}} \times L}{2b \times e^2}$$

(8)

Sendo as variáveis:

R_f – Resistência à tração na flexão, dado em megapascals (MPa);

$P_{\text{má}}$ – Carga de ruptura por flexão, dado em newtons (N);

L – Distância entre os suportes, dado em milímetros (mm);

b – Largura do corpo de prova, dado em milímetros (mm);

e – Espessura média do corpo de prova, dado em milímetros (mm);

4.8.3 Permeabilidade

A determinação da permeabilidade da placa foi executada seguindo uma adaptação da norma ABNT (NBR15498:2016).

Figura 31: Ensaio de permeabilidade.
Fonte: Autor.



Três amostras de aproximadamente 100mm x 90mm de cada tipo de placa (0%, 2,5%, 5%, 10%) (fig. 31) foram colocadas como base para um pedaço cilíndrico de tubo de PVC onde efetuou-se a vedação da borda do tubo que está em contato com a placa e encheu-o com 43 mm de água, manteve-se o experimento em local sem qualquer movimentação ou vibração durante 24 horas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISES DA FIBRA DE BAMBU

A caracterização química das fibras *B. vulgaris* 'Vittata' tem o intuito de avaliar as propriedades mecânicas do mesmo por meio de sua composição química, um exemplo desta atuação é o percentual de celulose que influencia diretamente no módulo de elasticidade e resistência a tração da fibra [82].

A composição vegetal do bambu pode ter uma variação inclusive na mesma espécie, sendo influenciada pelo tipo de solo, o clima da região, época de coleta e maturidade do bambu. As análises do bambu são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 Resultados dos teores da fibra de bambu tratado e in natura.
Fonte: Autor

(1) média de 03 repetições.

(2) extrativos solúveis em água + acetona.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO BAMBU ⁽¹⁾		
	BAMBU IN NATURA %	BAMBU TRATADO EM ÁGUA %
	Valor médio (%)	Valor médio (%)
Umidade	9,78±0,19	9,53±0,07
Cinzas	0,77±0,26	0,46±0,12
Extrativos	0,89± 0,78(2)	0,79±0,64 (3)
Lignina	15,10±0,23	28,33±0,09
Holocelulose	64,95±0,17	64,37±0,16
Alfacelulose	70,91±0,54	70,59±0,43

(3) extrativos solúveis em acetona.

Os valores percentuais de umidade encontrada na bambusa *vulgaris* "vittata" assemelham-se aos encontrados por [83] que giram em torno de 8 a 10%, tais resultados indicam um teor de umidade considerado bom tendo em vista que fibras com menor teor de umidade tem sua ligação favorecida na interface fibra x matriz seus resultado inclusive são superiores a fibras como a de Juta (12,6%), Linho (10,0%) e sisal (11,0%) [84].

O teor de cinzas encontrada nas referências da mesma espécie giram em torno de 3% a diferença encontrada pode ser em decorrência da região de coleta, tipo de solo e época da coleta [85]. O teor de cinzas funciona também como um fator de identificação da cristalinidade do material, ou seja quanto maior o teor de cinzas menor a amorfização da fibra [86], fibras como Sida Rhombifolia (4,07%) , juta (0,5% a 2%) , Kenaf (2) . -5%) [82].

O teor de extrativos identificados nas referências gira em torno de 16% na mesma espécie coletada em uma região de São Paulo, possivelmente o tipo de solo, clima, época de coleta e tipo de solvente utilizado possivelmente tenham influenciado nos teores de extrativos, a redução da quantidade de extrativos encontrado no bambu tratado possivelmente é pela ausência dos extrativos solutos em água [85], uma quantidade menor de extrativos, dentre eles a cera aumentam a porosidade da superfície da fibra o que acarreta uma melhora na interface fibra/ matriz [87] .

O teor de lignina detectado em referências bibliográficas gira em torno de 20% na espécie *vulgaris vittata*, os valores encontrados se aproximam bastante aos encontrados ao longo desta pesquisa, os valores encontrados podem decorrer da dissolução facilitada em ácido em decorrência do período que o bambu passou em imersão [85], níveis elevados de lignina ajudam a reter água dentro da fibra o que as protege de ataques externos, no entanto níveis elevados de lignina acarreta o enrijecimento da fibra o que não seria um fator favorável a seu uso [82], [60].

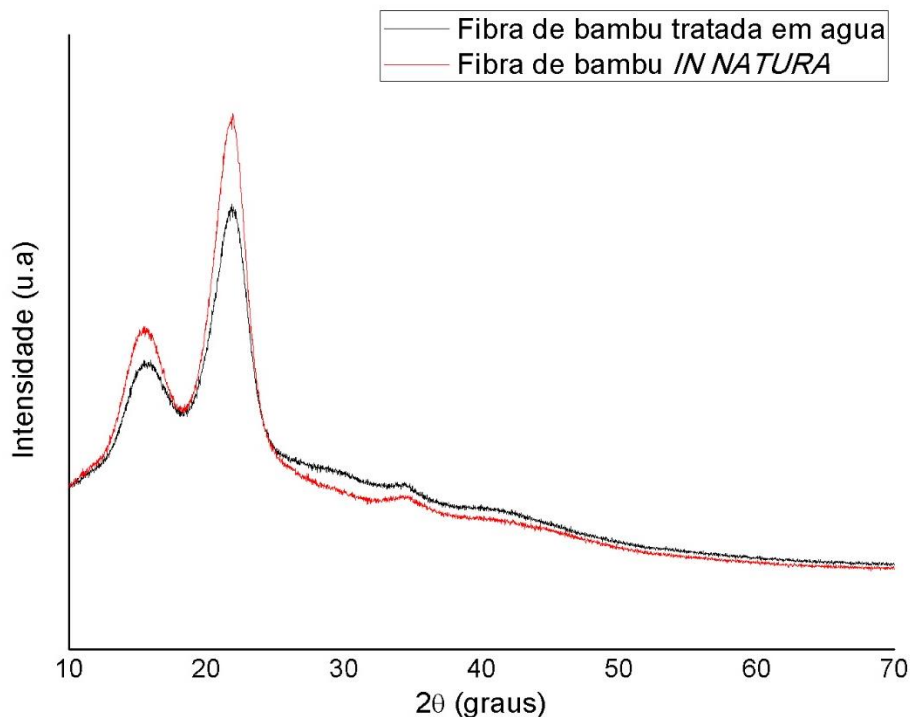
O teor de holocelulose detectado em referências bibliográficas gira em torno de 66% na espécie *vulgaris vittata*, os valores encontrados se aproximam bastante aos encontrados ao longo desta pesquisa, os valores encontrados não diferem entre a fibra tratada e a in natura o que nos diz que não há dissolução de nenhuma das cadeias de açúcares presentes no extrato de holocelulose pelo processo de tratamento de imersão em água [85].

Os valores percentuais de alfacelulose encontrada na bambusa *vulgaris "vittata"* assemelham-se aos encontrados na referência que giram em torno de 70% sendo demonstrado também que o tratamento em água não teve quase nenhuma influência negativa ao teor de celulose pura [88].

5.1.1 DRX DA FIBRA DE BAMBU *IN NATURA* E TRATADO EM ÁGUA

A análise de DRX foi realizada no Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais do Instituto Federal do Amazonas (IFAM) - campus Manaus, Distrito Industrial. No caso da análise da fibra de bambu.

Figura 32: Difratoograma do bambu *IN NATURA* e Tratado em água



Segundo o método Segal [89] o índice de cristalinidade é de 29,39% para a amostra de bambu *IN NATURA* E 27,03% referentes aos picos $2\theta = 15,93^\circ$ e $21,83^\circ$ a redução da cristalinidade se deve possivelmente pela extração do amido por imersão em água, isso inclusive possivelmente é o motivo pelo qual no momento da extração de lignina a mesma apresentou maiores quantidades [38].

A cristalinidade da celulose presente em uma fibra é um fator que tem grande influência nas propriedades mecânicas da fibra vegetal, ou seja, quanto menor for a fase amorfa da fibra vegetal melhor são suas propriedades físicas [90].

5.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS PRECURSORES

5.2.1 Metacaulim

O metacaulim utilizado foi o Metacaulim HP ULTRA fornecido pela Metacaulim do Brasil. A empresa disponibiliza uma ficha técnica que enquadra as características físico-químicas e informa se elas se encontram dentro dos limites impostos pela norma ABNT (NBR 15.894:2010).

Tabela 3: Ficha Técnica do Metacaulim HP ULTRA e resultados do FRX.

Fonte: Ficha disponibilizado pela Metacaulim do Brasil.

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS	VALORES TÍPICOS	VALORES LIMITES (NBR 15.894)	FRX DO METACAU LIM
SiO ₂	57%	44% a 65%	54,93%
Al ₂ O ₃	34%	32% a 46%	41,77%
CaO + MgO	< 0,1%	< 1,5%	0,9%
SO ₃	< 0,1%	< 1%	-
Na ₂ O	< 0,1%	< 0,5%	-
Eq.Alcalino Na ₂ O	< 1,5%	< 1,5%	-
Fe ₂ O ₃	2%	-	-
TiO ₂	1,5%	-	-
Umidade	0,5%	< 2%	-
Perda ao Fogo	3%	< 4%	-
Resíduo #325	6%	< 10%	-
Desempenho com Cimento (7 dias)	115%	> 105%	-
Atividade Pozolânica Chapelle	880mg Ca (OH)2/g	> 750mg Ca (OH)2/g	-
Área Específica BET	230.000cm ² /g	150.000cm ² /g	-
Massa Específica	2,56kg/dm ³	-	-

No entanto, para melhor caracterização do material foi realizado o FRX, que deve atender aos seguintes requisitos: SiO₂ entre 44 e 65%; Al₂O₃ entre 32 e 46%; CaO + MgO menor ou igual a 1,5%; SO₃ menor ou igual a 1%; Na₂O menor ou igual a 0,5%. Como pode ser observado na coluna 01 disponibilizada pelo fornecedor e na coluna 03 que apresenta os resultados do FRX ambos confirmam que o metacaulim enquadra-se nos parâmetros necessários, sendo 96,70% constituído de sílica e alumina.

5.2.2 Cimento

O cimento utilizado foi o cimento Portland CP II-Z 40 RS disponibilizado pela MIZU empresa local de produção de cimento. Foi necessário efetuar o FRX do produto para ter mais bem determinado sua composição, o fabricante não disponibiliza ficha técnica do material.

Tabela 4: FRX do Cimento.

FRX DO CIMENTO	
COMPONENTE	CONCENTRAÇÃO %
Cálcio (ca)	57,41%
Silício (si)	26,22%
Alumínio (al)	6,72%
Ferro (fe)	3,66%
Enxofre (s)	3,11%
Magnésio (mg)	1,29%
Potássio (k)	0,62%
Fosforo (p)	0,26%

Como já é esperado o cimento apresenta grandes quantidades em cálcio pois a matéria prima do cimento é o calcário e o gesso além da sílica presente em grande parte dos materiais argilominerais, além de em menores quantidades de ferro, enxofre, magnésio e potássio [91].

5.2.3 Sílica

A sílica utilizada foi sílica ativada em pó do tipo microsilica ELKEM classe 920D normatizada pela NBR 13956 no Brasil e pela ASTM 920, doada a esta pesquisa pela empresa Mawin do Brasil. Foi realizado o FRX do material para atestar seu percentual de pureza do material que o fabricante relata.

Tabela 5: FRX da SÍLICA.

FRX DA SÍLICA	
COMPONENTE	CONCENTRAÇÃO %
Sílica (si)	87,369%
Ferro (fe)	2,997%
Potássio (k)	2,709%
Magnésio (mg)	2,629%
Outros	4,296%

Os resultados obtidos durante o ensaio atestam os padrões exigidos pela ASTM C 1240 que normatiza que o percentual total de sílica deve ser de no mínimo 85%, os percentuais de ferro, potássio e magnésio são toleráveis.

5.2.4 Hidróxido de potássio (KOH)

O hidróxido de potássio utilizado foi doado pela empresa Mawin do Brasil. Foi realizado FRX do material para atestar seu percentual de pureza. Pelos resultados obtidos do FRX podemos constatar que a pureza do hidróxido de potássio chega a 96,6%.

Tabela 6: FRX do hidróxido de potássio.

FRX DO HIDRÓXIDO DE POTÁSSIO (KOH)	
Componente	CONCENTRAÇÃO %
Óxido de potássio (k)	99,61%
Oxido de fosforo (p)	0,21%
Óxido de prata(ag)	0,14%
Outros	0,25%

5.3 ENSAIOS MECÂNICOS DO GEOPOLÍMERO

5.3.1 Ensaio de compressão axial do geopolímero com e sem adição de fibra

O ensaio de compressão foi realizado no Laboratório de Engenharia da Madeira do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, no município de Manaus, Amazonas.

O ensaio seguirá conforme instruções da ABNT NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. O planejamento do experimento inicia-se pela determinação da altura e diâmetro dos corpos de prova, seguida pela determinação das idades de 1, 3, 7, 14 e 21 dias.

Os corpos de prova foram todos nivelados, medidos, pesados e rompidos juntos, o planejamento do experimento foi feito de forma que todos fossem rompidos no mesmo dia com suas respectivas idades de 1, 3, 7, 14 e 21 dias, sendo o de 21 dias uma adaptação necessária para o uso do equipamento sendo impossível realiza-lo com 28 dias.

Figura 33: Ensaio de compressão axial do geopolímero sem adição de fibra.
Fonte: Autor.

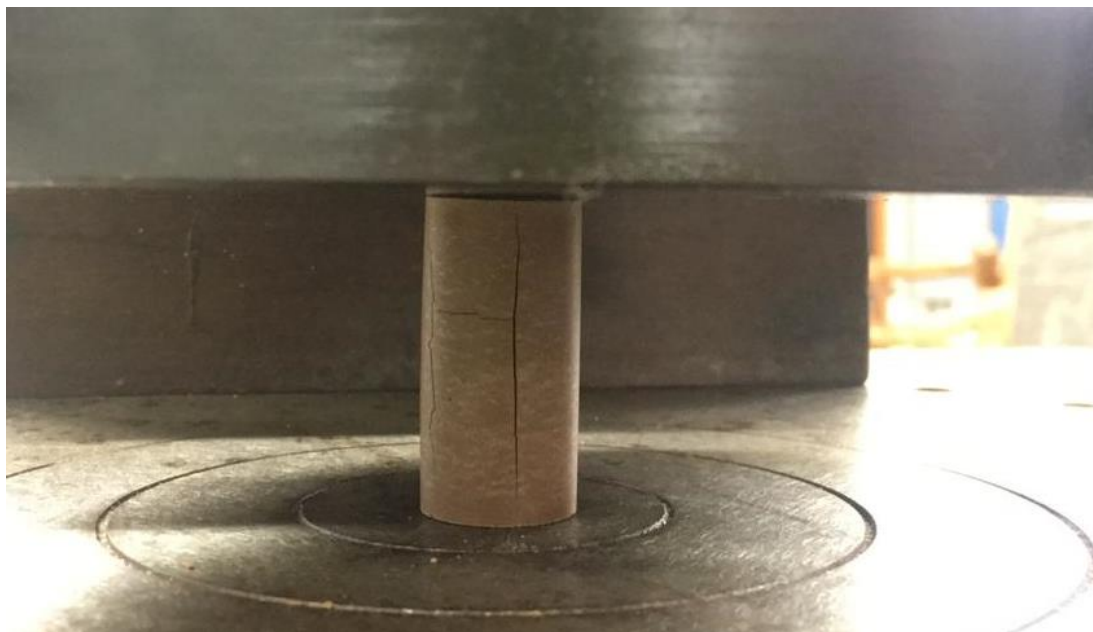


Figura 34: Ensaio de Compressão Axial do geopolímero com adição de fibra de bambu.
Fonte: Autor.

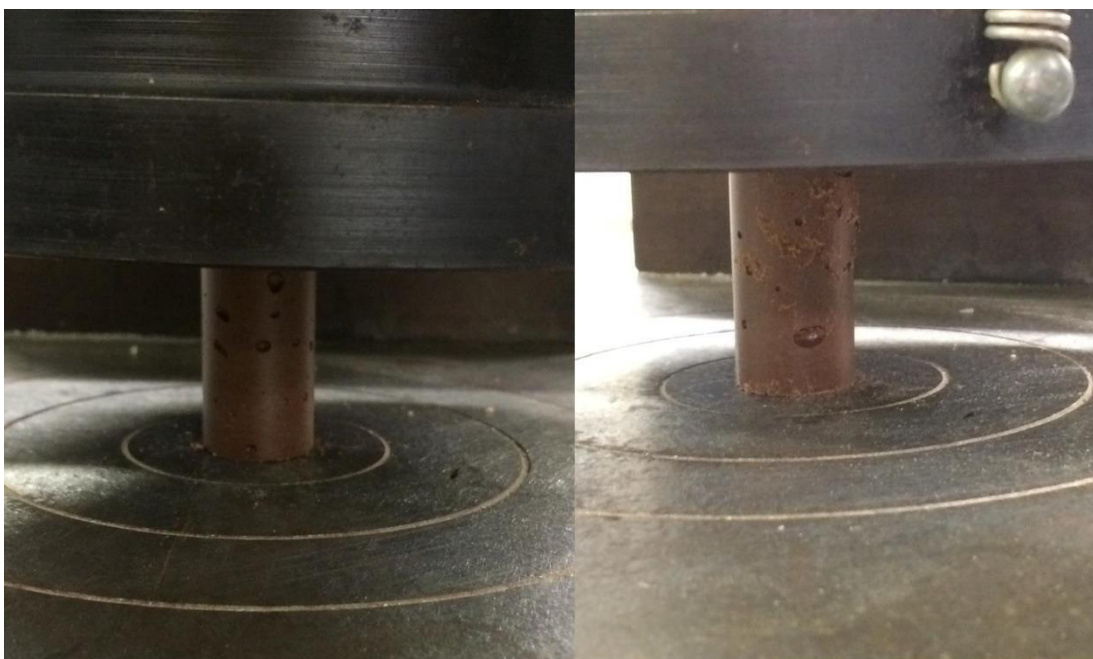


Figura 35: Gráfico de resultados de compressão. medias

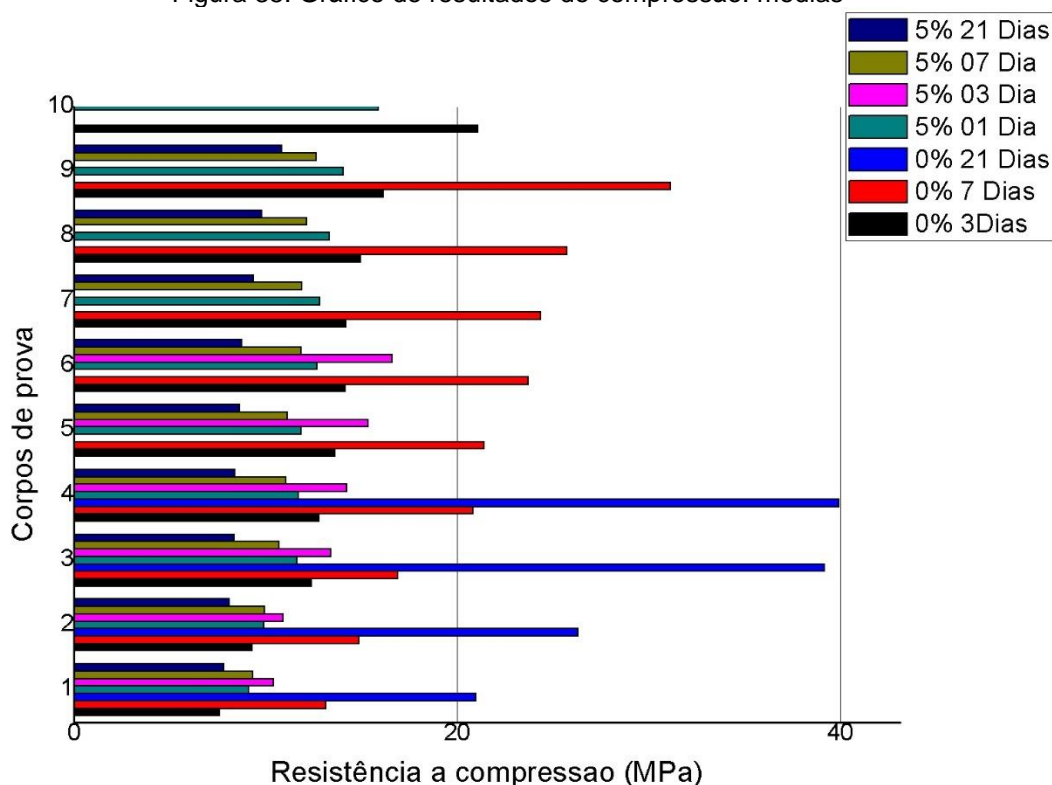


Tabela 7:Média e desvio padrão dos ensaios de compressão.
Fonte: Autor.

0% 3Dias	0% 7 Dias	0% 21 Dias	5% 01 Dia	5% 03 Dia	5% 07 Dia	5% 21 Dias	
13,89	21,42	32,75	12,28	13,82	11,48	8,69	Média
3,67	5,68	9,45	1,95	2,44	1,16	1,27	Desvio padrão

Os resultados do ensaio de compressão mostram que a matriz geopolímero + fibra de bambu se mostra pouco eficiente ao ensaio de compressão, o desvio padrão (tabela 7) nos mostra que os dados presentes nos ensaios dos corpos de prova sem adição, como podemos ver (fig. 35) a variação dos dados é elevada indo de 7,62 MPa a 21,1MPa, quando observamos os resultados da matriz sem adição de fibra de bambu é visível um maior desempenho do material além de uma menor desvio padrão (tabela 7) no entanto resistência média muito inferior).

Possivelmente tais resultados decorrem da formação de vazios e má dispersão das fibras dentro da matriz além da formação de bolhas. Como podemos observar o experimento apresentou alguns resultados desfavoráveis em relação aos corpos de prova atingindo de 10, 4 MPa a 16,62 MPa nos compósitos com adição de fibra de

bambu com idade de 3 dias e os com adição de fibra com mais idade perdendo resistência como o caso dos corpos de prova com 21 dias que apresentaram resultados de 7,83 MPa a 11,77 MPa, já no caso do geopolímero sem adição de fibra natural atingiu-se em 28 dias até 39,9 MPa de resistência, tais resultados possivelmente decorrem de algum tipo de degradação da fibra dentro da matriz pois a mesma a idade de 21 dias chegou a apenas 11,77 MPa

5.3.2 Ensaio de flexão

O ensaio de flexão foi realizado de forma a adaptar a ABNT NBR 15498– Placa de fibrocimento sem amianto – Requisitos e métodos de ensaio. Após a cura dos corpos de prova o ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia da Madeira do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, no município de Manaus, Amazonas. O equipamento utilizado foi o Tinius Olsen.

Figura 36: Resultado de ensaio de flexão com idade de 7 dias.
Fonte: Autor.

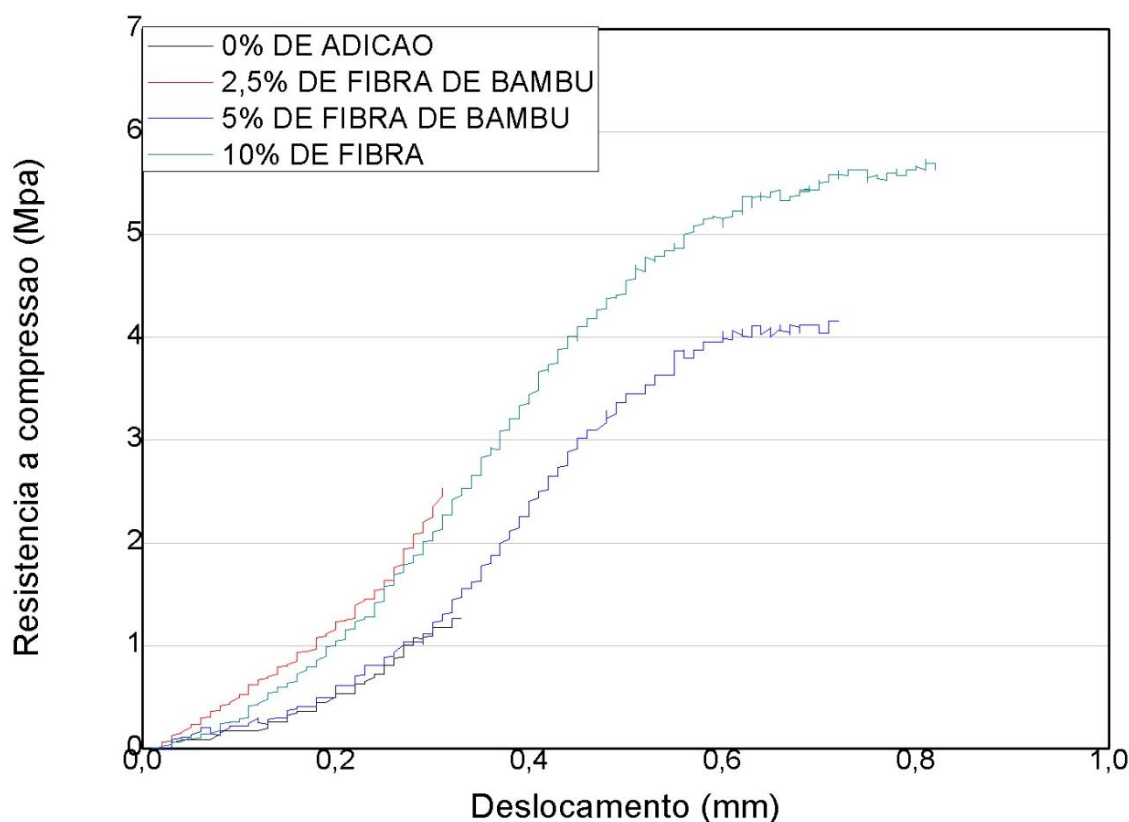


Figura 37: Ensaio de flexão da placa com adição de 10% de fibra.
Fonte: Autor.



Tabela 8: Média e desvio padrão do ensaio de flexão.
Fonte: Autor.

0% 7 dias	2,5% 7 dias	5% 7 dias	10% 7 dias	
1,51	2,39	3,79	4,98	Média
0,43	0,30	1,05	1,06	Desvio padrão

Os corpos de prova foram todos medidos, pesados e rompidos com idade de 07 dias de cura. As idades foram escolhidas com base no ganho de resistência obtido no ensaio de compressão. Segundo [50] estudos indicam que os geopolímeros adquirem cerca de 70% de sua resistência final à compressão em 4 horas. Nesta pesquisa esse resultado só foi obtido aos 7 dias onde, este correspondeu à mais de 76% da resistência aos 28 dias no caso do ensaio de compressão.

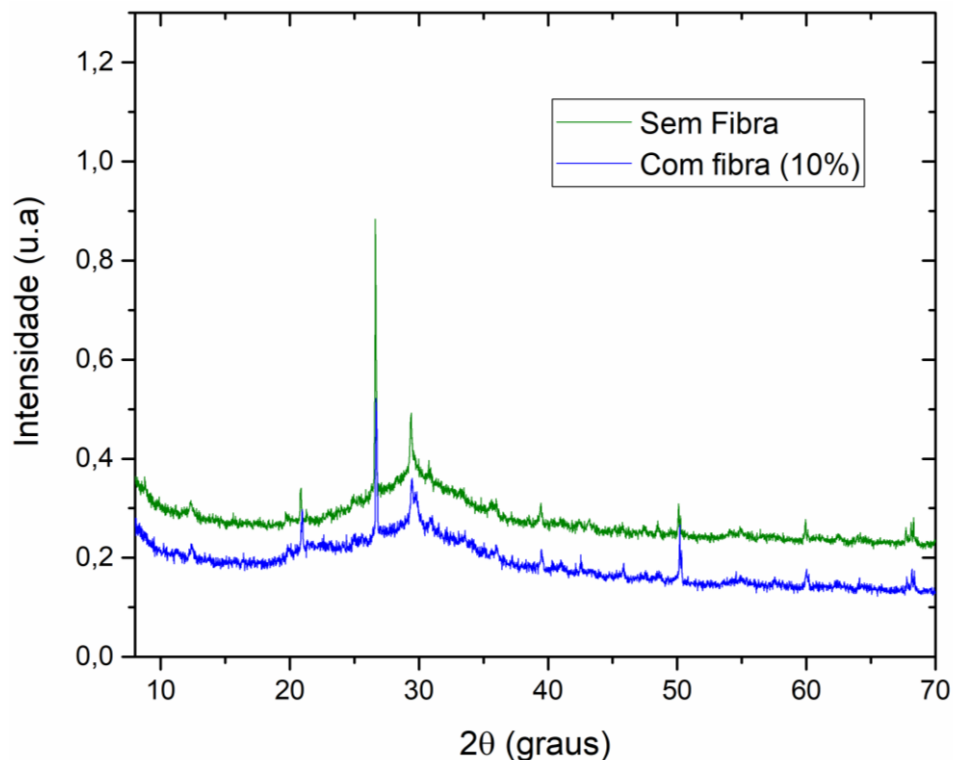
Podemos observar uma elevação altamente significativa da resistência a flexão com o uso do reforço (fig. 36 e 37), a matriz sem adição de fibra atinge apenas 1,2 MPa de resistência enquanto a placa com adição de fibra atinge 5,60 e 4,98 MPa na média (tabela 8) o que comprova a eficácia da adição das fibras de bambu, além do desvio padrão baixo mostrando certo padrão de resultados, sendo o mais elevado no caso do geopolímero com adição de 10% de fibra.

5.4 ANÁLISE QUÍMICA DE GEOPOLÍMERO

5.4.1 DRX do geopolímero com e sem adição de fibra

O Difratoograma do geopolímero é apresentado na figura 38. O pico identificado com deslocamento acentuado para a esquerda

Figura 38: Difratoograma do geopolímero com e sem adição de bambu.

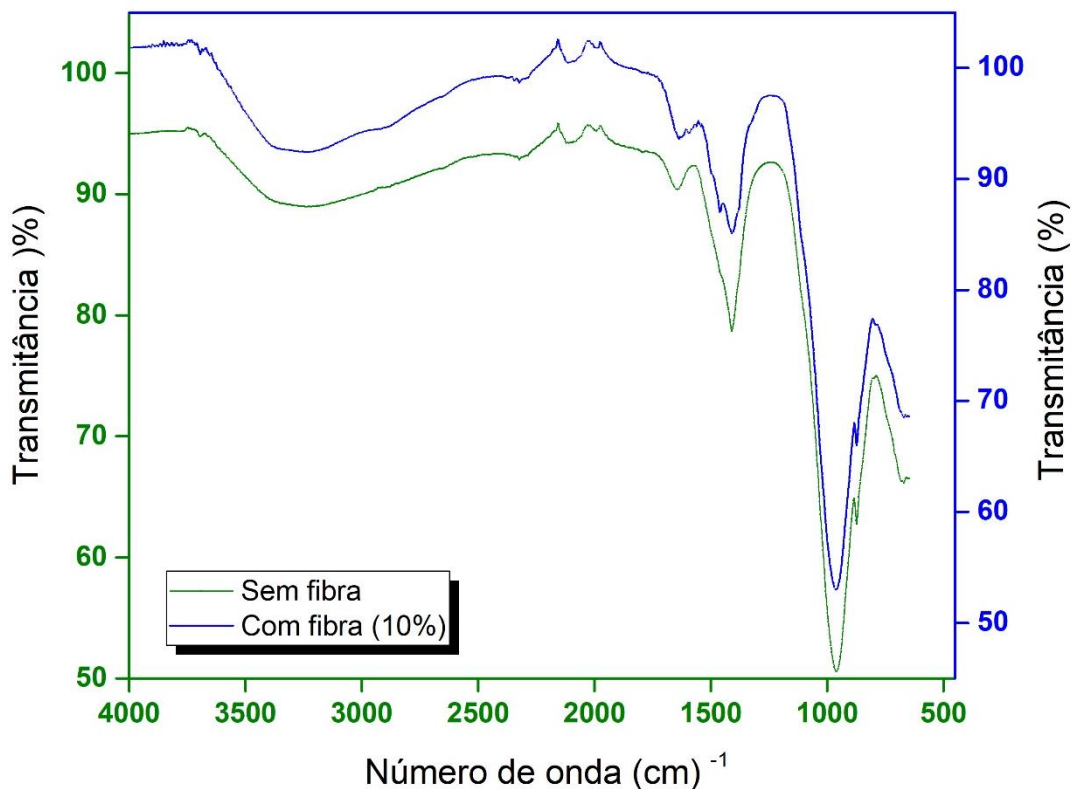


O Difratoograma do geopolímero podemos observar na fig. 38. Segundo [92] estas informações apresentadas pelo ensaio informam consumo das fases cristalinas, sendo a intensidade residual uma parte não reagente no momento da ativação alcalina do geopolímero, ou seja se trata de material não geopolimerizado.

Desta forma podemos confirmar também o processo de geopolimerização por mais que parcial por meio do pico em torno de 28° que podemos observar nitidamente no Difratoograma.[92]

5.4.2 FTIR do geopolímero com e sem fibra

Figura 39: Análise termogravimétrica do geopolímero com e sem adição de bambu.



A fig. 39 nos mostra os resultados obtidos por FTIR do geopolímero com e sem adição de fibras de bambu, podemos observar que a presença de água nas bandas 1600 cm^{-1} quanto na de 3500^{-1} [93] e também vibrações de carbonatação em 1400^{-1} que pode ocorrer em reação ao gás carbônico atmosférico.

De acordo com a literatura vibrações identificadas entre $980\text{ a }1080\text{cm}^{-1}$ que possivelmente se trata de bandas de absorção e de $1050\text{-}1080\text{cm}^{-1}$ correspondem ao estiramento do Si-O-Al, segundo a literatura [93] a principal característica do geopolímero é o estiramento destas bandas atestando assim uma modificação da microestrutura que é presente em materiais precursores do geopolímero como o metacaulim [93].

5.5 ENSAIOS DE DURABILIDADE DAS PLACAS GEOPOLIMÉRICAS

5.5.1 Permeabilidade

A determinação da permeabilidade da placa foi executada seguindo uma adaptação da norma ABNT (NBR15498:2016).

Figura 40: Placa 0% adição.
Fonte: Autor.



Figura 41: Placa com fibra.
Fonte: Autor.



Os corpos de prova sem adição de fibra (fig. 38) como podemos observar não resistiram ao em ensaio de permeabilidade ocorrendo diversas fissuras em toda a sua extensão havendo a completa destruição das amostras e decorrente inevitável vazamento da água e total inviabilização da amostra, tais resultados se devem possivelmente a defeitos da matriz. O que não condiz com as propriedades de baixa permeabilidade do geopolímero [94].

No caso das placas com adição de fibra em todos os seus teores (2,5%, 5%, 10%) (fig. 39) pode ser observado que não ocorreu nenhum tipo de vazamento ao longo das 24 horas de ensaio nem qualquer aparente modificação no aspecto físico da matriz comportando-se da forma que é esperada uma matriz geopolimérica [64].

6 CONCLUSÃO

A caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa bem como os percursores do geopolímero e da fibra de bambu elucidam como seu trabalho em conjunto é promissor. Alguns dos resultados desta pesquisa são citados abaixo:

- Na caracterização da fibra de bambu que foi aplicada como reforço da matriz os teores encontrados assemelham-se aos que constam na bibliografia com quase nenhuma variação nos teores em relação ao bambu tratado em água e o bambu *in natura* o que demonstra que as fibras não perdem sua capacidade de reforço de forma nenhuma e que com o tratamento se torna mais resistente a incidência de pragas, seu teor de celulose demonstra boa resistência mecânica o que é promissor para aplicação como reforço de matrizes.

- Na caracterização dos materiais percursores do geopolímero pudemos observar que os parâmetros apresentados pelos fabricantes foram comprovados e assim preservada a qualidade do produto não havendo nenhuma influência negativa destes nos resultados desta pesquisa.

- A resistência a compressão do compósito se mostrou pouco eficiente com a adição das fibras tal resultado possivelmente se deve a formação de vazios e má distribuição das fibras no momento da moldagem.

- Na resistência a flexão os resultados mostram a eficiência da adição da fibra na matriz geopolimérica no qual partimos de um resultado muito baixo não chegando sequer a 1,5 MPa para um resultado de 5,6 MPa demonstrando desta forma que a aplicação da fibra cumpre seu propósito que é uma melhor distribuição de cargas aplicadas.

O bambu com uma diversificada gama de propriedades físicas e mecânicas além de seu apelo sustentável tem muito a ser explorado e desenvolvido para chegar ao patamar de outras fibras já bem consolidadas no mercado, o que não ofusca de maneira nenhuma suas características altamente promissoras para aplicação em diversos segmentos da indústria assim como a da construção civil que clama por soluções que sanem uma demanda urgente por materiais sustentáveis.

Na outra face temos a aplicação de um material que já tem uma trajetória de pesquisa mais extensa remetendo da década de 70 com Davidovits, pesquisando de forma incansável e tentando torna-la viável a aplicação de larga escala que são os Geopolímeros, seu maior empecilho é torna-lo financeiramente mais viável e de fácil

acesso como já é caso do cimento Portland para tal há a necessidade de um investimento maior em pesquisar estes materiais como este trabalho realizou.

6.1 Sugestões de trabalhos futuros

Com todos os resultados aqui expostos sugere-se a pesquisas futuras:

- Análise de outras formulações geopoliméricas para melhor aproveitamento do reforço;
- Produzir matrizes geopoliméricas com resíduos de que não sejam o metacaulim industrial para reaproveitamento destes;
- Produzir água ativadora com menor custo de produção;
- Analisar microestrutura da interface geopolímero x reforço;
- Avaliar o comportamento por meio de envelhecimento acelerado da matriz;
- Observar a capacidade de isolamento térmico e acústico da placa geopolimérica;
- Aplicar ensaio de furação nas placas para observar sua resposta a fixação;
- Produzir matriz sem a adição de cimento Portland.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 5738 – Concreto Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR15498 – Placa de fibrocimento sem amianto – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

_____. NBR15894 Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. NBR5739 – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR13956 – Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

- [1] Ghayeb HH, Razak HA, Sulong NHR. Evaluation of the CO₂ emissions of an innovative composite precast concrete structure building frame. *J Clean Prod*; 242. Epub ahead of print 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118567.
- [2] Nurrudin et al. Methods of curing geopolymer concrete: A review. *Int J Adv Appl Sci*. Epub ahead of print 2018. DOI: 10.21833/ijaas.2018.01.005.
- [3] Ballesteros JEM, Mármol G, Filomeno R, et al. Synergic effect of fiber and matrix treatments for vegetable fiber reinforced cement of improved performance. *Constr Build Mater*. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.007.
- [4] Lima PRL, Toledo Filho RD, Neumann R, et al. Efeito do envelhecimento acelerado sobre as propriedades de microconcreto reforçado com fibras longas de sisal. *Ambient Construído*. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.1590/s1678-86212019000100289.
- [5] Dantas LG, Motta LA de C, Pasquini D, et al. Surface Esterification of Sisal Fibres for use as Reinforcement in Cementitious Matrix. *Mater Res*. Epub ahead

- of print 2019. DOI: 10.1590/1980-5373-mr-2018-0585.
- [6] Balea A, Fuente E, Blanco A, et al. Nanocelluloses: Natural-based materials for fiber-reinforced cement composites. A critical review. *Polymers*. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.3390/polym11030518.
- [7] Novais RM, Pullar RC, Labrincha JA. Geopolymer foams: an overview of recent advancements. *Prog Mater Sci* 2019; 100621.
- [8] Fan F, Liu Z, Xu G, et al. Mechanical and thermal properties of fly ash based geopolymers. *Constr Build Mater*. Epub ahead of print 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.023.
- [9] Ranjbar N, Zhang M. Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Cem Concr Compos* 2020; 107: 103498.
- [10] Amran YHM, Alyousef R, Alabduljabbar H, et al. Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. *J Clean Prod* 2020; 251: 119679.
- [11] Davidovits J, Huaman L, Davidovits R. Ancient organo-mineral geopolymer in South-American Monuments: Organic matter in andesite stone. SEM and petrographic evidence. *Ceram Int* 2019; 45: 7385–7389.
- [12] Amari S, Darestani M, Millar GJ, et al. Microchemistry and microstructure of sustainable mined zeolite-geopolymer. *J Clean Prod*. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.237.
- [13] Singh NB, Middendorf B. Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Constr Build Mater*. Epub ahead of print 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117455.
- [14] Sellami M, Barre M, Toumi M. Synthesis, thermal properties and electrical conductivity of phosphoric acid-based geopolymer with metakaolin. *Appl Clay Sci*. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.1016/j.clay.2019.105192.
- [15] Faqir NM, Shawabkeh R, Al-Harhi M, et al. Fabrication of Geopolymers from Untreated Kaolin Clay for Construction Purposes. *Geotech Geol Eng*. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.1007/s10706-018-0597-5.

- [16] Liew YM, Heah CY, Mohd Mustafa AB, et al. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. *Prog Mater Sci* 2016; 83: 595–629.
- [17] Mehta A, Siddique R. An overview of geopolymers derived from industrial by-products. *Constr Build Mater* 2016; 127: 183–198.
- [18] Shi C, Qian J. High performance cementing materials from industrial slags - A review. *Resour Conserv Recycl* 2000; 29: 195–207.
- [19] Khalifa AZ, Cizer Ö, Pontikes Y, et al. Cement and Concrete Research Advances in alkali-activation of clay minerals. *Cem Concr Res* 2020; 132: 106050.
- [20] Sá Ribeiro RA, Sá Ribeiro MG, Kriven WM. Review of particle- and fiber-reinforced metakaolin-based geopolymer composites. *Journal of Ceramic Science and Technology*. Epub ahead of print 2017. DOI: 10.4416/JCST2017-00048.
- [21] Wu YG, Xie SS, Zhang YF, et al. Superhigh strength of geopolymer with the addition of polyphosphate. *Ceram Int* 2018; 44: 2578–2583.
- [22] Rill E, Lowry DR, Kriven WM. Properties of Basalt Fiber Reinforced Geopolymer Composites. 2010. Epub ahead of print 2010. DOI: 10.1002/9780470944103.ch6.
- [23] Musil SS, Kutyla G, Kriven WM. The Effect of Basalt Chopped Fiber Reinforcement on the Mechanical Properties of Potassium Based Geopolymer. 2012. Epub ahead of print 2012. DOI: 10.1002/9781118217542.ch4.
- [24] Sankar K, Kriven WM. Sodium Geopolymer Reinforced with Jute Weave. 2015. Epub ahead of print 2015. DOI: 10.1002/9781119040293.ch4.
- [25] Sá Ribeiro RA, Sá Ribeiro MG, Sankar K, et al. Geopolymer-bamboo composite – A novel sustainable construction material. *Constr Build Mater*. Epub ahead of print 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.037.
- [26] Alomayri T, Shaikh FUA, Low IM. Characterisation of cotton fibre-reinforced geopolymer composites. *Compos Part B Eng*. Epub ahead of print 2013. DOI:

10.1016/j.compositesb.2013.01.013.

- [27] Wu Y, Lu B, Bai T, et al. Geopolymer, green alkali activated cementitious material: Synthesis, applications and challenges. *Constr Build Mater* 2019; 224: 930–949.
- [28] Zhang J, Provis JL, Feng D, et al. Geopolymers for immobilization of Cr⁶⁺, Cd²⁺, and Pb²⁺. *J Hazard Mater* 2008; 157: 587–598.
- [29] Łach M, Korniejenko K, Miłkowska J. Thermal Insulation and Thermally Resistant Materials Made of Geopolymer Foams. In: *Procedia Engineering*. 2016. Epub ahead of print 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.350.
- [30] Banerjee S, Dionysiou DD, Pillai SC. Self-cleaning applications of TiO₂ by photo-induced hydrophilicity and photocatalysis. *Appl Catal B Environ* 2015; 176–177: 396–428.
- [31] Mahadevaswamy HS, Suresha B. Role of nano-CaCO₃ on mechanical and thermal characteristics of pineapple fibre reinforced epoxy composites. *Mater Today Proc*. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.08.211.
- [32] FAO, IFAD, UNICEF, et al. *Food Security and Nutrition in the World 2019. Safeguardian against economic slowdowns and downturns*. 2019. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2300145.
- [33] Faruk O, Bledzki AK, Fink HP, et al. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science*. Epub ahead of print 2012. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003.
- [34] Arpitha GR, Yogesha B. An Overview on Mechanical Property Evaluation of Natural Fiber Reinforced Polymers. In: *Materials Today: Proceedings*. 2017. Epub ahead of print 2017. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.02.153.
- [35] Barreto MIM, De Araujo V, Cortez-Barbosa J, et al. Structural performance analysis of cross-laminated Timber-Bamboo (CLTB). *BioResources*. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.15376/biores.14.3.5045-5058.
- [36] Laila T, Arruda A, Barbosa J, et al. The constructive advantages of buckminster

- fuller's geodesic domes and their relationship to the built environment ergonomics. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. Epub ahead of print 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-60582-1_36.
- [37] Madhu P, Sanjay MR, Senthamaraiannan P, et al. A review on synthesis and characterization of commercially available natural fibers: Part-I. *Journal of Natural Fibers*. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.1080/15440478.2018.1453433.
- [38] Henschen J, Li D, Ek M. Preparation of cellulose nanomaterials via cellulose oxalates. *Carbohydr Polym*. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.02.056.
- [39] Yan L, Chouw N, Jayaraman K. Flax fibre and its composites - A review. *Compos Part B Eng*. Epub ahead of print 2014. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.08.014.
- [40] Komuraiah A, Kumar NS, Prasad BD. Chemical Composition of Natural Fibers and its Influence on their Mechanical Properties. *Mech Compos Mater*. Epub ahead of print 2014. DOI: 10.1007/s11029-014-9422-2.
- [41] Bourmaud A, Beaugrand J, Shah DU, et al. Towards the design of high-performance plant fibre composites. *Progress in Materials Science*. Epub ahead of print 2018. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2018.05.005.
- [42] Mundim P. *Estudo da modificação superficial de fibras de sisal com ligninas, e sua utilização em matrizes cimentícias*. Universidade Federal de Uberlândia. Epub ahead of print 29 April 2019. DOI: 10.14393/ufu.di.2019.2058.
- [43] Coldebella R, Giesbrecht BM, Saccol AF de O, et al. Propriedades físicas e químicas da madeira de *Maclura tinctoria* (L.) D. Don ex Steud. *Rev Ciência da Madeira - RCM*. Epub ahead of print 2018. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v9n1p54-61.
- [44] Felisberto MHF, Beraldo AL, Clerici MTPS. Young bamboo culm flour of *Dendrocalamus asper*: Technological properties for food applications. *LWT - Food Sci Technol*. Epub ahead of print 2017. DOI: 10.1016/j.lwt.2016.06.015.

- [45] Carmiol V. Bambú Guadua en puentes peatonales. *Tecnol en Marcha*.
- [46] SALGADO, AL. de B.; AZZINLA.; CIARAMELLO, D. e MACEDO EL. *Instruções Técnicas sobre Bambu*. Campinas, 1994.
- [47] Neves AP. *Introdução in vitro de explantes de segmentos nodais de Dendrocalamus asper*. Universidade Federal da Fronteira Sul, <https://rd.uffs.edu.br/handle/prefix/1658> (2017).
- [48] Pereira MA dos R. *Projeto bambu: introdução de espécies, manejo, caracterização e aplicações*. Universidade Estadual Paulista, <http://hdl.handle.net/11449/106710> (2012).
- [49] Pedersoli Borges F, Colodette JL, Borges Gomes FJ. UTILIZAÇÃO DO BAMBU COMO MATÉRIA-PRIMA NA OBTENÇÃO DE POLPA CELULÓSICA VOLTADA À FABRICAÇÃO DE PAPEL DE EMBALAGEM SACKRAFT. *J Eng Exact Sci*. Epub ahead of print 2018. DOI: 10.18540/jcecvl4iss4pp0405-0411.
- [50] Silva NG, Farias DC, Batista AC, et al. Determinação de características químicas de fibras curtas de bambu (*bambusa vulgaris*) a partir da determinação de extrativos, lignina e holocelulose. *Brazilian J Dev* 2019; 5: 9282–9287.
- [51] Ostapiv F, Salamon C. PRODUÇÃO E USO DE DEQUES MODULARES DE BAMBU E MADEIRA. *Mix Sustentável*. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.29183/2447-3073.mix2019.v5.n1.43-51.
- [52] Marafon AC, Amaral AFC, De Lemos EEP. Characterization of bamboo species and other biomasses with potential for thermal energy generation. *Pesqui Agropecu Trop*. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.1590/1983-40632019v4955282.
- [53] MORAIS, J. P. S.; ROSA, M. F.; MARCONCINI JM. Procedimentos para Análise lignocelulósica. *Uma ética para quantos?* Epub ahead of print 2010. DOI: 10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- [54] Pino V, Ayala JH, González V, et al. Determination of the alkyl- and methoxy-phenolic content in wood extractives by micellar solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectrometry. *Talanta*. Epub ahead of print 2007.

DOI: 10.1016/j.talanta.2007.04.013.

- [55] Tappi T 204 cm-97. Solvent extractives of wood and pulp (Proposed revision of T 204 cm-97). *Tappi*.
- [56] Sun RC, Sun XF. Identification and quantitation of lipophilic extractives from wheat straw. *Ind Crops Prod*. Epub ahead of print 2001. DOI: 10.1016/S0926-6690(00)00088-1.
- [57] Zhang X, Nguyen D, Paice MG, et al. Degradation of wood extractives in thermo-mechanical pulp by soybean lipoxygenase. *Enzyme Microb Technol*. Epub ahead of print 2007. DOI: 10.1016/j.enzmictec.2006.06.021.
- [58] Silvério FO, Barbosa LCDA, Gomide JL, et al. Metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeiras de eucalipto. *Rev Arvore*. Epub ahead of print 2006. DOI: 10.1590/S0100-67622006000600016.
- [59] Abreu HDS, Do Nascimento AM, Maria MA. Lignin structure and wood properties. *Wood Fiber Sci*.
- [60] Pérez J, Muñoz-Dorado J, De La Rubia T, et al. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: An overview. *International Microbiology*. Epub ahead of print 2002. DOI: 10.1007/s10123-002-0062-3.
- [61] Taherzadeh MJ, Karimi K. Enzyme-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: A review. *BioResources*. Epub ahead of print 2007. DOI: 10.15376/biores.2.3.472-499.
- [62] Athijayamani A, Thiruchitrabalam M, Natarajan U, et al. Effect of moisture absorption on the mechanical properties of randomly oriented natural fibers/polyester hybrid composite. *Mater Sci Eng A*. Epub ahead of print 2009. DOI: 10.1016/j.msea.2009.04.027.
- [63] Rusch F, Ceolin GB, Hillig É. Morphology, density and dimensions of bamboo fibers: A bibliographical compilation. *Pesqui Agropecu Trop*. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.1590/1983-40632019v4955007.
- [64] Brito FMS, Paes JB, Oliveira JTS, et al. Giant bamboo (*Dendrocalamus*

- giganteus Munro) anatomical and physical characterization [Caracterização anatômica e física do bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus* Munro)]. *Floresta e Ambient.* Epub ahead of print 2015. DOI: 10.1590/2179-8087.033913.
- [65] MIDUVI. Estructuras de guadúa (GaK). In: *Norma Ecuatoriana de la construcción.* 2016.
- [66] Nematollahi B, Sanjayan J, Shaikh FUA. Matrix design of strain hardening fiber reinforced engineered geopolymer composite. *Compos Part B Eng.* Epub ahead of print 2016. DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.11.039.
- [67] Kheradmand M, Mastali M, Abdollahnejad Z, et al. Experimental and numerical investigations on the flexural performance of geopolymers reinforced with short hybrid polymeric fibres. *Compos Part B Eng.* Epub ahead of print 2017. DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.06.001.
- [68] Cerrada BC, Martí-Amengual G, Sanz-Gallen P. Presencia del amianto en la vida cotidiana: riesgos para la salud. *FMC Form Medica Contin en Aten Primaria* 2020; 27: 1–3.
- [69] Wang R, Gao X, Zhang J, et al. Spatial distribution of steel fibers and air bubbles in UHPC cylinder determined by X-ray CT method. *Constr Build Mater* 2018; 160: 39–47.
- [70] Ardanuy M, Claramunt J, Toledo Filho RD. Cellulosic fiber reinforced cement-based composites: A review of recent research. *Construction and Building Materials.* Epub ahead of print 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.035.
- [71] Filho JDAM, Silva FDA, Toledo Filho RD. Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems. *Cem Concr Compos.* Epub ahead of print 2013. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.04.003.
- [72] Wei J, Meyer C. Sisal fiber-reinforced cement composite with Portland cement substitution by a combination of metakaolin and nanoclay. *J Mater Sci.* Epub ahead of print 2014. DOI: 10.1007/s10853-014-8469-8.
- [73] Ganesan N, Abraham R, Deepa Raj S. Durability characteristics of steel fibre

- reinforced geopolymer concrete. *Constr Build Mater*. Epub ahead of print 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.014.
- [74] Zhang ZJ, Dai GZ, Wu SN, et al. Simulation of 42CrMo steel billet upsetting and its defects analyses during forming process based on the software DEFORM-3D. *Mater Sci Eng A*. Epub ahead of print 2009. DOI: 10.1016/j.msea.2007.11.135.
- [75] Correia EA, Torres SM, Alexandre MEO, et al. Mechanical performance of natural fibers reinforced geopolymer composites. *Mater Sci Forum* 2013; 758: 139–145.
- [76] Silva G, Kim S, Bertolotti B, et al. Optimization of a reinforced geopolymer composite using natural fibers and construction wastes. *Constr Build Mater*. Epub ahead of print 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119697.
- [77] Kriven WM, Bell JL, Gordon M. Microstructure and Nanoporosity of as-Set Geopolymers. 2008; 491–503.
- [78] Bai T, Liu B, Wu Y, et al. Mechanical properties of metakaolin-based geopolymer with glass fiber reinforcement and vibration preparation. *J Non Cryst Solids*; 544. Epub ahead of print 2020. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120173.
- [79] Jules A Janssen. *Building with Bamboo*. 1995. DOI: doi:10.3362/9781780442143.001.
- [80] Hojo O, Ernesto VART, Ribeiro CA, et al. Comparação metodológica entre mufla convencional e automática para análise de umidade e cinzas em bagaço de cana. *Congr da Qual em Metrol* 2008; 4–7.
- [81] TAPPI. *Alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp*. TAPPI T203 cm-99. 1999.
- [82] Moshi AAM, Ravindran D, Bharathi SRS, et al. Characterization of a new cellulosic natural fiber extracted from the root of Ficus religiosa tree. *Int J Biol Macromol*. Epub ahead of print 2019. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2019.09.094.
- [83] Azzini A, Beraldo AL. Starch and cellulosic fibers determination from laminated chips of three giant bamboo species. *Sci For Sci*.

- [84] Jayaramudu J, Guduri BR, Varada Rajulu A. Characterization of new natural cellulosic fabric *Grewia tilifolia*. *Carbohydr Polym*. Epub ahead of print 2010. DOI: 10.1016/j.carbpol.2009.10.046.
- [85] Brito JO, Tomazello Filho M, Salgado AL de B. Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu. *Ipef*,
- [86] Hyness NRJ, Vignesh NJ, Senthamaraikannan P, et al. Characterization of New Natural Cellulosic Fiber from *Heteropogon Contortus* Plant. *J Nat Fibers*. Epub ahead of print 2018. DOI: 10.1080/15440478.2017.1321516.
- [87] Indran S, Raj RE. Characterization of new natural cellulosic fiber from *Cissus quadrangularis* stem. *Carbohydr Polym*. Epub ahead of print 2015. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.09.072.
- [88] Guimarães M, Novack KM, Botaro VR, et al. Caracterização físico-química de fibra e polpas de *bambusa vulgaris schrad* para utilização em compósitos poliméricos. *Rev Latinoam Metal y Mater*.
- [89] Segal L, Creely JJ, Martin AE, et al. An Empirical Method for Estimating the Degree of Crystallinity of Native Cellulose Using the X-Ray Diffractometer. *Text Res J*. Epub ahead of print 1959. DOI: 10.1177/004051755902901003.
- [90] Rahman MM, Netravali AN. Advanced Green composites using liquid crystalline cellulose fibers and waxy maize starch based resin. *Compos Sci Technol*. Epub ahead of print 2018. DOI: 10.1016/j.compscitech.2018.04.023.
- [91] Levy SM, Helene PRL. Reciclagem de entulhos na construção civil, a solução política e ecologicamente correta. *I Simpósio Bras Tecnol das Argamassas*.
- [92] Brito WDS, Brum SM, Silva ALMF, et al. Evaluation of the rheological and mechanical behavior of the synthesized geopolymer with residue waste [Avaliação do comportamento reológica e mecânica de geopolímero sintetizado com reaproveitamento de resíduo]. *Rev Mater*.
- [93] Silva JV e. Síntese e caracterização de geopolímeros macroporosos com uso de peróxido de hidrógeno. 2019; 87.

- [94] Khale D, Chaudhary R. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review. *J Mater Sci*. Epub ahead of print 2007. DOI: 10.1007/s10853-006-0401-4.