



**GABRIELE MELO DE ANDRADE**

**UTILIZAÇÃO DO ENDOCARPO DA MACAÚBA COMO  
AGREGADO GRAÚDO ALTERNATIVO PARA A PRODUÇÃO  
DE BIO-CONCRETOS**

**LAVRAS – MG  
2022**

**GABRIELE MELO DE ANDRADE**

**UTILIZAÇÃO DO ENDOCARPO DA MACAÚBA COMO AGREGADO  
GRAÚDO ALTERNATIVO PARA A PRODUÇÃO DE BIO-CONCRETOS**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência e Tecnologia da  
Madeira, para a obtenção do  
título de Mestre.

Prof. Dr. Saulo Ferreira Rocha

Orientador

Prof. Dr. Rodolfo Giacomim Mendes de Andrade

Co-orientador

**LAVRAS – MG  
2022**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Andrade, Gabriele Melo de.

Utilização do endocarpo da macaúba como agregado graúdo  
alternativo para a produção de bio-concretos / Gabriele Melo de  
Andrade. - 2022.

63 p.

Orientador(a): Saulo Rocha Ferreira.

Coorientador(a): Rodolfo Giacomim Mendes de Andrade.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. Bio-concretos. 2. Biomassas. 3. Compósitos Cimentícios. I.  
Ferreira, Saulo Rocha. II. Andrade, Rodolfo Giacomim Mendes de.  
III. Título.

**GABRIELE MELO DE ANDRADE**

**UTILIZAÇÃO DO ENDOCARPO DA MACAÚBA COMO AGREGADO  
GRAÚDO ALTERNATIVO PARA A PRODUÇÃO DE BIO-CONCRETOS**

**USE OF MACAÚBA ENDOCARP AS ALTERNATIVE COARSE  
AGGREGATE FOR PRODUCTION OF BIO-CONCRETES**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Lavras, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Ciência e  
Tecnologia da Madeira, para a  
obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 18 de julho de 2022

Dr. Saulo Rocha Ferreira - UFLA

Dr. Rodolfo Giacomim Mendes de Andrade - IFES

Dr. Keoma Defaveri do Carmo e Silva - UFLA

Dr. Thiago Melo Grabojs – UFRJ.

Prof. Dr. Saulo Rocha Ferreira

Orientador

Prof. Dr. Rodolfo Giacomim Mendes de Andrade

Co-orientador

**LAVRAS – MG**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, pelo incentivo, amor e paciência.

À Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, pela oportunidade, infraestrutura e profissionais. À FAPEMIG, pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao meu orientador, prof. Dr. Saulo Rocha Ferreira, pela confiança, ensinamentos e contribuições.

Aos colegas e companheiros de laboratório pela companhia diária e contribuições, por estarem sempre dispostos a ajudar, agradeço.

Aos meus amigos (família), por ajudarem a tornar os meus dias mais leves e felizes, serei para sempre imensamente grata por tudo que vivemos aqui.

## RESUMO

A macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.) é uma palmeira de fruto oleaginoso, cujo endocarpo pode apresentar potencial como agregado alternativo para a produção de bio-concretos. O presente trabalho propõe o estudo das características do endocarpo da macaúba, para avaliar seu comportamento como agregado gráudo em bio-concretos. O endocarpo utilizado para o estudo foi disponibilizado pelo Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA), localizado em Lavras, MG, Brasil. Os endocarpos foram caracterizados quanto sua composição química, características anatômicas, propriedades físicas e durabilidade em meio alcalino. A compatibilidade química entre o endocarpo e a matriz cimentícia foi avaliada por meio de análise de calorimetria semi-adiabática com endocarpo da macaúba tratados e não tratados com  $\text{Ca(OH)}_2$  e água quente em uma proporção de 10% em relação à massa de cimento. Foram desenvolvidos bio-concretos, usando cimento Portland (CP-V ARI), com substituições em massa e volume de 25, 50 e 100% de agregado gráudo por endocarpo de macaúba. Os bio-concretos foram caracterizados mecanicamente por meio de ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral. Os resultados mostraram que o endocarpo possui densidade básica no valor de  $1,23 \text{ g/cm}^3$  e capacidade de absorção de 9%. A análise química evidenciou um alto teor de lignina (39,60%) e baixo teor de extrativos (3,10%). A durabilidade do endocarpo foi mais comprometida na presença de solução alcalina de NaOH após 30 e 60 dias, com diminuição da resistência mecânica e modificação da composição química do material. O tratamento em água quente mostrou-se mais eficiente para a remoção dos extrativos do endocarpo e melhoria da compatibilidade química com a matriz. A adição de 25% do volume de brita por endocarpo da macaúba proporcionou um bio-concreto com resistência à compressão de aproximadamente 30 MPa, estando dentro da faixa de resistência necessária para aplicação como concreto estrutural na construção civil.

**Palavras-chave:** Bio-concretos. Biomassas. Compósitos cimentícios.

## ABSTRACT

Macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.) is a palm tree with an oleaginous fruit which endocarp may have potential as an alternative aggregate to produce bio-concretes. This paper proposes a study of the characteristics of the endocarp of macaúba, to evaluate its potential and behavior as a coarse aggregate in bio-concretes. The endocarp used for the study was provided by the Engineering Department of the Federal University of Lavras (UFLA), located in Lavras, MG, Brazil. The endocarps were characterized as to its chemical composition, anatomical characteristics, physical properties and durability in alkaline conditions. The chemical compatibility between the endocarp and the cement matrix was evaluated by semi-adiabatic calorimetry analysis with macauba endocarp treated and untreated with  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and hot water in a proportion of 10% in relation to the cement mass. Bio-concretes were developed using Portland cement (CP-V ARI), with substitutions in mass and volume of 25, 50 and 100% of coarse aggregate by macauba endocarp. The bio-concretes were mechanically characterized by axial compression and tensile tests by diametrical compression. The results showed that the endocarp has a bulk density of  $1.23 \text{ g/cm}^3$  and an absorption capacity of 9%. Chemical analysis showed a high lignin content (39.60%) and low extractive content (3.10%). The durability of the endocarp was more compromised in the presence of alkaline NaOH solution after 30 and 60 days, with a decrease in mechanical strength and modification of the chemical composition of the material. The hot water treatment was more efficient in removing extractives from the endocarp and improving the chemical compatibility with the matrix. The addition of 25% of the volume of coarse aggregate by macauba endocarp provided a bio-concrete with compressive strength of approximately 30 MPa, within the strength range required for application as structural concrete in civil construction.

**Keywords:** Bio-concretes. Biomass. Cementitious composites.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	10
1.1 Objetivos .....	12
1.1.2 Objetivos específicos .....	12
1.2 Organização da pesquisa .....	12
2 REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	14
2.1 Bio-concretos .....	14
2.2 Compatibilidade química entre cimento e bio-agregados .....	15
2.2.1 Problemática .....	15
2.2.2 Tratamentos para melhoria da compatibilidade química entre bio-agregados e cimento.....	16
2.3 Durabilidade das biomassas em ambiente alcalino .....	17
2.4 Caracterização mecânica de materiais não convencionais.....	19
2.5 Macaúba ( <i>Acrocomia aculeata</i> (Jacq.) Lodd. ex Mart.).....	19
3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS .....	22
3.1 Caracterização dos materiais.....	22
3.1.1 Endocarpo da macaúba e agregado graúdo.....	22
3.1.1.1 Densidade, absorção de água, teor de umidade e contrações volumétricas.....	23
3.1.1.2 Microscopia de luz e laser.....	24
3.1.1.3 Microscopia de varredura eletrônica (MEV) .....	24
3.1.1.4 Análise de Micro Tomografia Computadorizada (MicroTC) .....	25
3.1.1.5 Composição química do endocarpo.....	26
3.1.2 Cimento Portland .....	26
3.1.3 Areia.....	27
3.1.4 Água.....	27
3.1.5 Cloreto de cálcio .....	27
3.2 Tratamento dos endocarpos para melhoria da compatibilidade química .....	27
3.2.1 Lavagem em água quente .....	28
3.2.2 Lavagem em solução alcalina.....	29
3.3 Calorimetria Semi-adiabática .....	29
3.4 Testes de durabilidade em meio alcalino .....	32
3.5 Análise termogravimétrica (TGA) .....	32

3.6 Análise de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) .....	33
3.7 Caracterização mecânica do endocarpo .....	33
3.8 Produção dos bio-concretos .....	33
3.8.1 Dosagem .....	33
3.8.2 Moldagem .....	34
3.9 Avaliação das propriedades mecânicas do bio-concreto .....	37
3.9.1 Ensaio mecânico de compressão axial .....	37
3.9.2 Ensaio mecânico de tração por compressão diametral .....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	40
4.1 Caracterização do endocarpo da macaúba .....	40
4.1.1 Propriedades físicas .....	40
4.1.2 Características anatômicas dos endocarpos .....	41
4.1.3 Micro Tomografia Computadorizada .....	44
4.1.4 Composição química do endocarpo .....	46
4.1.5 Durabilidade do endocarpo em meio alcalino .....	47
4.1.5.1 Efeito da imersão alcalina na resistência mecânica dos endocarpos .....	47
4.1.5.2 Influência da imersão alcalina na composição química do endocarpo .....	49
4.2 Comportamento mecânico dos bio-concretos .....	51
4.2.1 Compressão axial .....	51
4.2.2 Tração por compressão diametral .....	53
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	56
REFERÊNCIAS .....	58

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais amplamente utilizado na construção civil, com uma produção de 10 bilhões de toneladas anualmente, além de possuir vantagens em relação aos outros materiais de construção, principalmente por apresentar boas propriedades mecânicas e durabilidade (MEYER, 2009)

Entretanto, as etapas da produção do concreto, e dos materiais que o constituem, resultam em emissões significativas de gases de efeito estufa e colocam pressão sobre a disponibilidade de recursos naturais. O processo de fabricação do cimento Portland, componente majoritário do concreto, foi responsável por 7% do total de energia industrial consumida em 2019, e por cerca de 7% do total de CO<sub>2</sub> emitido no mundo no mesmo ano (IEA, 2020). Esses valores devem-se, principalmente, às etapas de seu processo produtivo, como a combustão de combustíveis fósseis e a decomposição do calcário para a produção do clínquer, principal ingrediente do cimento (MONTEIRO et al., 2017; IEA, 2020).

Além disso, o processo de extração e o alto consumo de agregados naturais utilizados para a produção do concreto, causam uma diminuição drástica na disponibilidade dessa matéria-prima e geram interferências no ecossistema, como a poluição do ar, água e solo (BLANKENDAAL; SCHUUR; VOORDIJK, 2014).

Considerando ainda a quantidade de resíduos gerados nos processos de produção e utilização do concreto (MEYER, 2009), observa-se que esse material não é totalmente compatível com os padrões de desenvolvimento sustentável. Por isso, há uma urgência em promover estratégias sustentáveis para amenizar o impacto ambiental causado pela produção e utilização do concreto no setor de construção civil.

Diversas estratégias ambientalmente amigáveis vêm sendo estudadas nos últimos anos (HABERT et al., 2020; MARAVEAS, 2020; MONTEIRO et al., 2017), dentre elas, a produção de bio-concretos é uma das alternativas promissoras, pois previne o uso excessivo de matérias-primas, possibilita a utilização de materiais de origem vegetal, bem como resíduos, além de permitir

o armazenamento de carbono por longos períodos (SHAFIGH et al., 2014; AMZIANE; SONEBI, 2016; CALDAS et al., 2021).

Os bio-concretos são materiais cimentícios formados por uma mistura de agregados de origem vegetal, constituindo a maior parte do volume, e um aglutinante mineral. Esses agregados podem ser provenientes de diversas fontes de biomassa, possibilitando o reaproveitamento de resíduos industriais e agrícolas, como a madeira, bambu, milho, cascas de coco, café e arroz, entre outros (MO et al., 2016; SHAFIGH et al., 2014).

Dentre as culturas agrícolas em desenvolvimento no Brasil, a Macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.) é uma palmeira nativa brasileira, de alta produtividade, com frutas ricas em óleo, que vem sendo utilizado para a produção de biodiesel (CARGNIN et al., 2008; MONTOYA et al., 2016). Entretanto, a extração de óleo do fruto da macaúba resulta em grandes volumes de resíduos sólidos. A quantidade de resíduos de endocarpo, que representa 30% do fruto, pode chegar a 19 toneladas/ha ao ano (CONCEIÇÃO et al., 2013).

O uso do endocarpo da macaúba como agregado graúdo para a produção de bio-concretos é uma alternativa promissora, principalmente por ser de origem natural e renovável, assim, pode atender as demandas de produção de materiais de baixo impacto ambiental e agregar valor ao produto através da geração de novas tecnologias.

A maioria das biomassas, tais como o endocarpo da macaúba, possuem características diversas de porosidade, anatomia, composição química e densidade. Por essa razão, antes de serem empregadas como agregados alternativos, esses materiais necessitam de uma extensa caracterização para o entendimento de suas propriedades, buscando uma melhor avaliação da qualidade do bio-concreto produzido. Entretanto, essa caracterização necessita de adaptações de técnicas já existentes ou a elaboração de novos procedimentos de caracterização (AMZIANE; SONEBI, 2016).

Com base no exposto, a presente pesquisa propõe o estudo das características do endocarpo da macaúba, para avaliar seu comportamento como agregado graúdo na produção de bio-concretos.

## 1.1 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é estudar as características do endocarpo da macaúba e avaliar seu comportamento como agregado graúdo em bio-concretos.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Esta pesquisa tem os seguintes objetivos específicos:

- Determinar as características físicas, químicas e anatômicas do endocarpo, a fim de compreender o comportamento desse material de forma individual e em matrizes cimentícias;
- Investigar a durabilidade dos endocarpos em meio alcalino, por meio de imersão em soluções de  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{NaOH}$  durante 30 e 60 dias;
- Identificar o tratamento de melhor eficácia para retirada de extrativos e melhoria da compatibilidade química entre a matriz e o endocarpo da macaúba;
- Produzir bio-concretos com substituições por massa e volume de 25%, 50% e 100% de agregado graúdo por endocarpo da macaúba;
- Analisar as propriedades mecânicas dos bio-concretos produzidos com diferentes volumes de endocarpo da macaúba.

## 1.2 Organização da pesquisa

Essa pesquisa será apresentada em cinco capítulos:

**Capítulo 1:** Introdução ao tema estudado, com exposição dos objetivos e organização da pesquisa.

**Capítulo 2:** Referencial teórico sobre bio-concretos, compatibilidade química entre cimento e bio-agregados e os tratamentos para melhoria da compatibilidade, durabilidade de biomassas em meio alcalino e caracterização mecânica de materiais não convencionais. E por fim uma pequena revisão sobre a macaúba.

**Capítulo 3:** Apresentação da caracterização dos materiais e descrição dos procedimentos experimentais para avaliação das propriedades do bio-concreto.

**Capítulo 4:** Apresenta os resultados e discussões obtidos durante a pesquisa.

**Capítulo 5:** Conclusões sobre os resultados da pesquisa

## CAPÍTULO 2

### 2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

#### 2.1 Bio-concretos

Os bio-concretos são compósitos compostos basicamente por aglomerantes minerais combinados com agregados de origem vegetal e outros aditivos (BERALDO, 2011). Esses materiais podem desempenhar um papel importante na substituição de materiais convencionais empregados na construção civil, e possuem vantagens como a alta disponibilidade de matéria-prima renovável para sua produção, baixa densidade (400-1500 kg/m<sup>3</sup>), boa estabilidade dimensional, além de bom isolamento térmico e baixo custo (BERALDO, 2011; VO; NAVARD, 2016).

A utilização de biomassa como agregado na produção de concreto mostra-se uma alternativa promissora, principalmente pela alta disponibilidade de matéria-prima. Diversos tipos de biomassas vêm sendo estudadas para aplicação em matriz cimentícias, dentre elas destacam-se as partículas de madeira (BERTOLINI et al., 2014; DA GLORIA et al., 2021; FAN et al., 2012) e bambu (CALDAS et al., 2020; SANTOS et al., 2017). Karade (2010) e Shafigh et al. (2014) citam ainda a possibilidade da utilização de resíduos de biomassa da indústria agrícola, como cascas de arroz, cascas de café, cascas de nozes, cascas de cocos e espigas de milho.

Andreola (2017) utilizou partículas de bambu como agregado miúdo em uma matriz de cimento Portland CP V-ARI, água e agente modificador de viscosidade para produção de bio-concretos. A substituição de agregado miúdo por bio-agregado variou de 45% a 50% e foi possível a produção de concretos com baixa emissão de carbono e propriedades físicas e mecânicas adequadas para aplicação na construção civil.

Silveira et al. (2019) verificaram o potencial de utilização da madeira de cacto (*Cereus jamacaru*) como agregado para produção de bio-concreto leve e conseguiram produzir concretos de baixa densidade (872 a 1347 kg/m<sup>3</sup>) e boas propriedades físicas e mecânicas e boa trabalhabilidade, podendo ter várias aplicabilidades na construção civil.

O uso bem-sucedido desses materiais conforme relatado nos estudos, como substituintes totais ou parciais de agregados naturais, contribui para a economia de energia, conservação de recursos naturais e redução do custo de materiais de construção, além de evitar o acúmulo de resíduos no meio ambiente (SHAFIGH et al., 2014).

## **2.2 Compatibilidade química entre cimento e bio-agregados**

### **2.2.1 Problemática**

Uma das desvantagens da produção de compósitos cimento-biomassa diz respeito à pouca compatibilidade química entre os dois materiais. Segundo Beraldo (2011), a maioria das biomassas possuem compostos químicos em sua composição que acabam interferindo nos processos de hidratação do cimento.

Nas primeiras etapas de hidratação do cimento, os compostos de silicato de cálcio  $C_2S$  e  $C_3S$  são hidratados e formam um gel de silicatos de cálcio hidratados e hidróxido de cálcio. A rede cristalina formada durante essa etapa de hidratação é a principal responsável pela resistência mecânica da pasta cimentícia. Entretanto, como resultado da hidratação dos silicatos de cálcio, cerca de 25% da massa de cimento é transformada em hidróxido de cálcio, gerando uma pasta altamente alcalina, de pH 12,5 (STANCATO, 2006).

As biomassas de origem vegetal (lignocelulósicas) geralmente são compostas quimicamente por 35-50% de celulose, 20-35% de hemiceluloses e 10-25% de lignina, além de uma pequena quantidade de cinzas e extrativos. Esses componentes podem variar de acordo com o tipo de biomassa (SANTOS et al., 2012).

O ambiente alcalino da matriz cimentícia tem a capacidade de degradar as hemiceluloses e extrativos presentes na maioria das biomassas, liberando subprodutos e causando inibição do processo de hidratação do cimento, podendo também gerar alterações dimensionais no compósito cimentício (VAICKELIONIS; VAICKELIONIENE, 2006)

Outra explicação para incompatibilidade química proposta na literatura, é que a desintegração das hemiceluloses em ambiente alcalino aumenta a

quantidade de extrativos, gerando maiores quantidades de açúcares que são absorvidos na superfície das partículas de cimento, formando uma camada inibitória e, conseqüentemente, reduzindo a velocidade de hidratação (KANTAUTAS; VAICKELIONIS, 2000; VO; NAVARD, 2016).

Kochova et al. (2017) avaliaram o efeito de diferentes compostos orgânicos presentes em fibras lignocelulósicas no processo de hidratação do cimento. Para isso, os autores adicionaram diferentes açúcares com frutose, glucose e sucrose, além de lignina e celulose em pastas cimentícias que, posteriormente, foram avaliadas através de análises de calorimetria e cromatografia. Os resultados mostraram que a concentração de açúcares na pasta cimentícia afeta diretamente o calor de hidratação do cimento, visto que, o açúcar diminui a concentração de íons  $\text{Ca}^{2+}$  na pasta cimentícia, retardando a formação dos produtos de hidratação. Dentre os compostos orgânicos avaliados, a glicose, manose e xilose foram os que mais afetaram a hidratação do cimento, retardando o processo por até dois dias.

### **2.2.2 Tratamentos para melhoria da compatibilidade química entre bio-agregados e cimento**

Para fins de viabilizar o uso de bio-agregados com alto teor de extrativos e outros compostos orgânicos inibidores da hidratação do cimento, são realizados pré-tratamentos para remoção desses compostos.

Um dos métodos mais simples reportados em literatura para remoção extrativos hidrossolúveis é através da lavagem em água. No estudo de Da Gloria et al. (2021), os autores produziram compósitos cimento-madeira e, visando minimizar a incompatibilidade entre serragem de madeira e a matriz cimentícia, realizaram lavagens em água quente a 80 °C por 1 hora, com 5 repetições para retirada de extrativos. Neste estudo, foi observado que os tratamentos preliminares de lavagem em água quente aplicados se mostraram eficazes e essenciais para a remoção de extrativos hidrossolúveis, pois melhorou a compatibilidade entre o cimento Portland e a madeira inserida na matriz cimentícia.

Iwakiri et al. (2012) fabricaram painéis cimento-madeira utilizando partículas de madeira de duas espécies com e sem tratamento. Os autores utilizaram tratamentos com água fria por 24 horas e água quente por 6 horas e

verificaram que apesar dos tratamentos exercerem pouca influência nas propriedades mecânicas dos painéis, o tratamento em água quente por 6 horas apresentou melhor resultado em comparação aos demais.

Diversas pesquisas abordam a utilização de tratamentos alcalinos como alternativa para remoção de impurezas visando a melhoria da compatibilidade entre o cimento e vários tipos de materiais lignocelulósicos (LIMA et al., 2020; RAIA et al., 2021).

Moslemi et al. (1983), sugerem além de tratamentos em água quente e fria, a imersão em solução de NaOH (1%). Boix et al. (2020) realizaram tratamentos com NaOH a 5% por 30 minutos em partículas do caule de *Miscanthus X giganteus* e posteriormente avaliaram a influência do tratamento nas propriedades mecânicas de blocos de concreto produzidos com o material. O uso de partículas do caule de *Miscanthus* tratadas com NaOH aumentou significativamente a resistência dos blocos, com resistência a compressão de cerca de 4 MPa, enquanto os blocos não tratados apresentaram resistência a compressão de 2,2 MPa.

### **2.3 Durabilidade das biomassas em ambiente alcalino**

A durabilidade das biomassas dentro da matriz cimentícia está diretamente ligada ao seu desempenho ao longo do tempo, visto que, a alcalinidade da matriz provoca a degradação das fibras que compõem as biomassas. Gram (1983), estudando a durabilidade de fibras naturais como reforço em matrizes cimentícias concluiu que no processo de degradação das fibras o primeiro mecanismo é a decomposição da lignina e da hemicelulose na lamela média, que quebra a ligação entre as fibras individuais, seguido pela mineralização da fibra.

Wei; Meyer (2015) buscaram entender os mecanismos de degradação de fibras de sisal em matrizes de cimento e, corroborando com os estudos de Gram (1983), verificaram que o processo de degradação das fibras inicia-se através da degradação da lignina e parte da hemicelulose, causando queda da integridade e estabilidade da parede celular. Posteriormente ocorre a degradação das ligações de hidrogênio intramoleculares, levando a dispersão das microfibrilas de celulose e por último ocorre a hidrólise alcalina das regiões amorfas causando a degradação completa das microfibrilas de celulose.

Além disso, os autores verificaram ainda que à medida que a degradação prossegue, os produtos de hidratação, tais como silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio, gradualmente infiltram-se na parede celular, o que por sua vez leva à mineralização e fragilização da fibra natural.

Toledo Filho et al., (2000) verificou a durabilidade de fibras de sisal e de coco expostas a soluções alcalinas de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) com pH 12 e hidróxido de sódio (NaOH) com pH 11 por até 420 dias. Os autores avaliaram a resistência das fibras após a exposição em soluções alcalinas através de ensaios de tração e verificaram que as fibras de sisal e coco mantidas em solução de NaOH mantiveram, respectivamente, 72,7% e 60,9% de sua resistência após 420 dias. Entretanto, as fibras de sisal imersas em solução de  $\text{Ca(OH)}_2$  de pH 12 perderam completamente sua flexibilidade e resistência após 300 dias.

Merta et al., (2012) avaliaram a durabilidade de fibras de cânhamo em ambiente alcalino através de testes de envelhecimento acelerado a fim de simular um período de 2 e 15 anos. Para isso, as fibras de cânhamo foram imersas em soluções de  $\text{Ca(OH)}_2$  com diferentes proporções por 7 dias a 40° C (simulando 2 anos) e por 30 dias a 55°C (simulando 15 anos). Como resultado, os autores verificaram que as fibras perderam parcialmente ou completamente sua estrutura celular, sendo incapazes de resistir a cargas de ensaios mecânicos.

Toledo Filho et al., (2009) afirma que há uma redução da resistência de compósitos reforçados com fibras vegetais devido à fatores associados ao enfraquecimento das fibras pelo ataque de álcalis, mineralização das fibras e às variações dimensionais sofrida pelas fibras devido à alta absorção de água. Segundo Vo; Navard (2016) a alta absorção de água em bio-concretos gera aumento das contrações volumétricas da biomassa presente na matriz cimentícia, causando danos interfaciais e rachaduras no concreto.

Por isso, para que a durabilidade da biomassa em matriz alcalina seja assegurada, se faz necessário entender o comportamento do material que irá compor o bio-concreto, pois irá influenciar diretamente nas propriedades de resistência do compósito produzido.

## 2.4 Caracterização mecânica de materiais não convencionais

Devido à grande diversidade de biomassas de origem vegetal e suas diferentes características como forma, porosidade, densidade e resistência mecânica, muitas vezes, não existem normas e técnicas de caracterização disponíveis na literatura para cada tipo de material, dificultando sua aplicação como bio-agregado em concretos e argamassas (AMZIANE; SONEBI, 2016).

Por isso, atualmente há uma tendência de buscar novas formas de caracterização de diferentes materiais, através do desenvolvimento de novas técnicas ou da adaptação das normas existentes. Pepe et al. (2020) avaliaram a resistência à ruptura de agregados de formato irregular provenientes de calcário natural triturado, cascalho de rio, tijolo reciclado e concreto reciclado. Para isso, aplicaram testes de compressão de partícula única, método que não é comumente utilizado para avaliar materiais de construção. A partir da análise e de fórmulas experimentais aplicadas pelos autores, foi possível estimar os valores de resistência à tração e distribuição de energia de fratura, destacando ainda, a influência do tipo e tamanho dos agregados avaliados no comportamento mecânico dessas partículas.

Placet et al. (2014) buscaram compreender a causa do comportamento não-linear de fibras elementares submetidas a esforços de tração, adaptando testes de tração com carga progressiva repetida com 17 microscopia de luz polarizada in situ, e desenvolver um aparelho adaptado de micro-tração com observação in situ de deformações e deslocamentos que possibilita a torção e destorção das fibras durante os ciclos de tração.

## 2.5 Macaúba (*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart.)

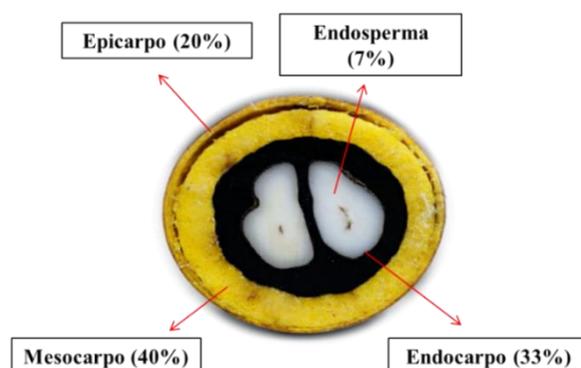
A espécie *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart., popularmente conhecida como macaúba, macaúva, macajá, macaibeira entre outros, é uma palmeira pertencente à família Arecaceae. É nativa de florestas tropicais e possui ampla distribuição na América Central e América do Sul, incluindo o México, Antilhas, Brasil, Argentina e Uruguai, estando ausente no Equador e Peru (AMARAL, 2007; DUARTE et al., 2017; MOTA et al., 2011) e tendo maior ocorrência na América Central, Paraguai e Brasil.

A macaúba é considerada a palmeira de maior distribuição no Brasil, sendo encontrada em todo território nacional, exceto na região Sul. As maiores

concentrações da espécie ocorrem nos estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Ceará, com ocorrência mais comum em áreas abertas do Cerrado (LORENZI, 2006; MOTTA et al., 2002; VIANNA; CAMPOS-ROCHA, 2020).

A espécie possui cerca de 10 a 15 m de altura, de estipe ereto com 20 a 30 cm de diâmetro, revestido pelas bainhas persistentes das folhas já caídas e com a presença de acúleos de até 10 cm ao longo do estipe, folhas, folíolos e parte do cacho e da inflorescência (MOTA et al., 2011; VIANNA; CAMPOS-ROCHA, 2020)

As folhas da macaúba são pinadas, com 3 a 5 m de comprimento, aculeadas e com folíolos lanceolados, de coloração verde-escura. As inflorescências ocorrem entre as folhas, são amareladas e apresentam-se agrupadas em cachos pendentes de 80 a 130 cm de comprimento e protegidas por uma bráctea que pode atingir até 2 m de comprimento (NUCCI, 2007). O fruto possui formato globoso, com o tamanho variando de 2,0 a 3,5 cm, composto por 20% de epicarpo (casca), 40% de mesocarpo (polpa), 33% de endocarpo e 7% de amêndoa (Figura 1) (CARGNIN et al., 2008). O epicarpo possui coloração esverdeada nos estágios iniciais de desenvolvimento, passando à coloração verde-amarela, amarela ou castanha quando maduro. Possui mesocarpo fibroso e mucilaginoso recobrendo o endocarpo, que apresenta cor preta e caracteriza-se como um material rígido, lenhoso que protege uma amêndoa oleaginosa de cor branca (GRAY, 2020; SCARIOT et al., 1991).



**Figura 1.** Composição do fruto da macaúba (*Acrocomia aculeata*). Adaptado de Moreira et al. (2020).

A macaúba é uma espécie vegetal com ampla utilidade, sendo empregada para fins alimentares, cosméticos e energéticos, onde todos os componentes da palmeira são aproveitados. As folhas são utilizadas para nutrição animal, fibras têxteis (COSTA; OLIVEIRA; COSTA, 2018); o estipe é destinado para construção civil (LORENZI, 2006) e alimentação (palmito) (GRAY, 2020) o fruto, sendo a parte de maior importância econômica da planta, possui aplicação na alimentação humana e animal (LORENZI, 2006), utilizado principalmente para produção de óleo a partir da polpa e amêndoa (POETSCH et al., 2012).

Estima-se que a produção de macaúba seja de 25.000 kg/ha de fruto ao ano e cerca de 5.000 kg/ha de óleo, valores comparáveis aos do dendê (*Elaeis guineensis*) que é responsável por 30% do óleo vegetal produzido no mundo (ABREU et al., 2011; MOTA et al., 2011; MOURA et al., 2009). O fruto da macaúba possui alta concentração de óleo na polpa (45% - 60%, massa seca) o que o torna de grande interesse como matéria prima para a produção de biodiesel (EVARISTO et al., 2016).

Entretanto, como parte do processamento para a produção de biodiesel, quantidades significativas de subprodutos são geradas, como a casca, massa residual da polpa e amêndoa e o endocarpo. Segundo Conceição et al. (2013), a produção residual de endocarpo pode atingir 19,3 toneladas/há.

Alguns estudos abordam utilizações alternativas para o endocarpo, visando o reaproveitamento e agregar valor ao material, como carvão ativado (POETSCH et al., 2012; RIOS et al., 2014) e para fins energéticos (POETSCH et al., 2012; SILVA et al., 1986; VILAS BOAS et al., 2010). Entretanto, devido aos poucos estudos sobre esse material, o seu potencial de aplicação ainda é pouco explorado. Por isso, um bom entendimento das suas características podem direcioná-lo a outros usos para o desenvolvimento de novos materiais.

## CAPÍTULO 3

### 3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 Caracterização dos materiais

##### 3.1.1 Endocarpo da macaúba e agregado graúdo

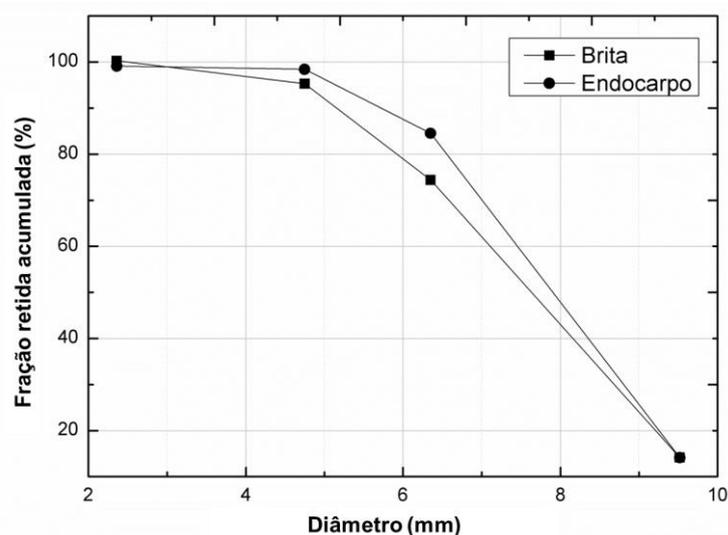
O endocarpo de macaúba (*Acrocomia aculeata*) utilizado para o desenvolvimento do trabalho foi disponibilizado pelo grupo de pesquisa em Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biocombustíveis (G-ÓLEO) do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, localizado na cidade de Lavras – Minas Gerais, Brasil. Os endocarpos, que já tinham sido quebrados para a remoção da noz, foram limpos em água corrente e passaram por uma escovação manual para remover os resíduos da polpa para não afetar o processo de hidratação do cimento.

Os endocarpos obtidos apresentaram diferentes tamanhos, em vista disso, para obtenção das dimensões desejadas para o desenvolvimento do trabalho e remoção das partículas maiores, o material foi levado a um agitador de peneiras contendo peneiras com dimensões entre 9,5 e 2,35 mm, conforme visualizado na Figura 2a. Assim, foram utilizados os endocarpos passantes na peneira de #9,5 mm até os retidos na peneira de #2,35 mm (Figura 2b). O mesmo procedimento foi aplicado para avaliação da granulometria da brita.



**Figura 2.** a) Agitador de peneiras para análise de distribuição granulométrica; b) Endocarpos da macaúba utilizados na pesquisa.

A Figura 3 mostra a distribuição granulométrica acumulada dos endocarpos e da brita utilizado na pesquisa (retidos e passantes na peneira de #2,35 mm) através do peneiramento, de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR NM 248 (2003).



**Figura 3.** Curva granulométrica acumulada do endocarpo da macaúba e agregado graúdo.

### 3.1.1.1 Densidade, absorção de água, teor de umidade e contrações volumétricas

Para determinação da densidade básica e da capacidade de absorção de água e teor de umidade do endocarpo foi utilizada a norma ASTM D2395-17 (2017) de forma adaptada. Para isso, partículas de endocarpos foram submersos em água até estarem completamente saturados e posteriormente foram mensurados seus valores de massa e volume. Após isso, os endocarpos foram secos em estufa por 72 horas à  $103 \pm 2$  °C para a determinação de sua massa seca.

Os valores de densidade básica, absorção de água e teor de umidade foram calculados, respectivamente, pelas Equações 1, 2 e 3:

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_{sat}} \times 100 \quad (1)$$

$$A = \frac{(M_{sat} - M_s)}{M_s} \times 100 \quad (2)$$

$$U = \frac{(M_i - M_f)}{M_f} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

$\rho_b$ = densidade básica do endocarpo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

A= absorção de água (%);

$M_s$ = massa do endocarpo seco em estufa (g);

$M_{\text{sat}}$ = massa do endocarpo na condição saturada superfície seca (g);

$M_i$ = massa inicial da amostra do endocarpo (g);

$M_f$ = massa final da amostra do endocarpo (g);

U= teor de umidade (%).

Para determinação das contrações volumétricas foi utilizado o procedimento adaptado de Ferreira et al. (2012). Pequenas amostras do endocarpo da macaúba foram submersas em água até o ponto de saturação. Após isso, as amostras foram secas em estufa até atingir massa constante. Para verificar a variação dimensional, foram retiradas micrografias das amostras saturadas e secas em um microscópio modelo Motic BA310 trinocular, onde as áreas da seção transversal do endocarpo serão obtidas e comparadas com o auxílio do software ImageJ.

### **3.1.1.2 Microscopia de luz e laser**

Para a avaliação características anatômicas do endocarpo da macaúba foram obtidas micrografias ópticas usando um microscópio de luz digital da Keyence, modelo VHX-600 com lente Keyence modelo VH-z20R em ampliações entre 20-200x. Além disso, análises de microscopia a laser foram realizadas a fim de obter a rugosidade e o perfil topográfico da superfície externa e da superfície fraturada do endocarpo, utilizando um equipamento LEXT OLS 4000 com ampliações de 20 e 50x.

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

Para avaliação da microestrutura do endocarpo, amostras foram polidas, utilizando etapas de lixamento e polimento sequencial para a análise de Microscopia de Varredura Eletrônica (MEV). A análise foi realizada utilizando o microscópio eletrônico de varredura Zeiss LEO EVO LS 25 sob

uma tensão de aceleração de 15 kV. Nenhum pré-revestimento foi aplicado. As amostras foram fixadas em um suporte de metal coberto por uma fita revestida de carbono. A análise foi realizada em um ambiente de alto vácuo sob uma distância de trabalho de 8 mm. Foram utilizados detectores de backscattering e elétrons secundários.

### 3.1.1.4 Análise de Micro Tomografia Computadorizada (MicroTC)

Buscando analisar as características morfológicas e o comportamento de aderência do endocarpo na matriz cimentícia foram realizadas análises de Micro Tomografia Computadorizada (MicroTC). A análise MicroTC foi realizada no Laboratório de Instrumentação Nuclear, LIN, da COPPE/UFRJ. O sistema de MicroCT adotado foi o V|TOMEX|M (GE Company). Foram confeccionadas amostras em tubo pvc de 25 mm de diâmetro contendo endocarpos da macaúba fraturados embebidos em pasta cimentícia sob comprimento de incorporação de aproximadamente 10 mm. Amostras de endocarpos fraturados e brita também foram avaliadas. As amostras analisadas estão ilustradas na Figura 4.



**Figura 4.** Amostras utilizadas na análise MicroTC. a) Endocarpo da macaúba; b) Brita.

Para digitalização das amostras foram adotados os seguintes parâmetros: voltagem de 100 kV, corrente de 180  $\mu$ A, tempo de exposição de 300 ms, 7 frames, magnificação de 10,43, tamanho do pixel de 19  $\mu$ m, e um total de 1500 imagens.

O software Phoenix Datos software foi utilizado para reconstrução tridimensional para ajustes de alinhamento dos cortes, correções de feixes, por

meio de um filtro matemático de melhoramento de bordas para obtenção de um melhor contraste entre a matriz cimentícia e os poros. Para visualização 3D e 2D, foi utilizado o software VGStudio max 3.0.

### 3.1.1.5 Composição química do endocarpo

Para avaliação da composição química do endocarpo da macaúba foram determinados os teores de extrativos totais, lignina insolúvel, holocelulose e teor de cinzas. O teor de extrativos foi quantificado por meio de adaptação da norma TAPPI T204 cm-97 (Buchanan, 2007). Com o auxílio de um extrator Soxhlet, a acetona foi removida após um período de 5 horas, seguida por uma lavagem final em água a 80 °C. A norma TAPPI T211 om-16 (2007) foi aplicada para determinar o teor de cinzas. Amostras foram levadas à uma mufla à 525 °C, onde permaneceram nessa temperatura por 3 horas. O teor de lignina insolúvel foi quantificado de acordo com a norma TAPPI T222 im-15 (2006) por meio do método de hidrólise. O teor de holocelulose foi determinado seguindo o procedimento descrito por Browning (1963).

### 3.1.2 Cimento Portland

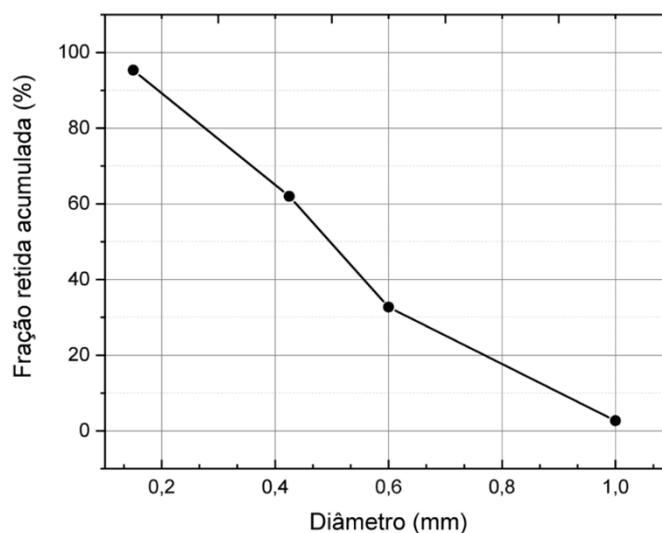
Para a realização da presente pesquisa, foi utilizado Cimento Portland (CP-V ARI). A composição química e propriedades físicas do cimento estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química e propriedades físicas do cimento

Elementos químicos	CP V – ARI (%)
CaO	63,8
SiO <sub>2</sub>	17,8
SO <sub>3</sub>	3,82
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,98
K <sub>2</sub> O	0,82
TiO <sub>2</sub>	0,21
MnO	0,10
Outros	8,47
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	3,2
Área superficial (m <sup>2</sup> /Kg)	420

### 3.1.3 Areia

Foi utilizada areia quartzosa de rio com partículas menores que 840  $\mu\text{m}$  (ABNT, peneira n° 20). A distribuição granulométrica da areia pode ser observada na Figura 5.



**Figura 5.** Curva granulométrica acumulada da areia

### 3.1.4 Água

A água utilizada para o desenvolvimento da fase experimental da presente pesquisa foi a proveniente da rede de abastecimento da cidade de Lavras, Minas Gerais.

### 3.1.5 Cloreto de cálcio

Foi utilizado cloreto de cálcio puríssimo anidro di-hidratado, com o objetivo de acelerar o processo de hidratação do cimento. O cloreto de cálcio foi aplicado em um teor de 3% em relação à massa do cimento.

## 3.2 Tratamento dos endocarpos para melhoria da compatibilidade química

A presença de extrativos na maioria das biomassas pode causar inibições no processo de hidratação do cimento. Visando minimizar esta incompatibilidade química entre endocarpo e a matriz cimentícia, foram aplicadas lavagens em água quente e solução alcalina para a remoção de extrativos hidrossolúveis e impurezas aderidos na superfície do endocarpo.

### 3.2.1 Lavagem em água quente

O tratamento térmico consistiu na lavagem dos endocarpos com água quente (80°C) por 1 hora em uma proporção endocarpo/água de 100g/L para remoção de extrativos solúveis em água e posteriormente os endocarpos foram secos em estufa, seguindo os procedimentos adotados por Da Gloria (2015). Foram realizados ciclos de lavagens de 1 e 5 vezes, e após cada ciclo, foi determinado o teor de extrativos da água de acordo com a Equação 4. A água de cada ciclo foi filtrada por uma malha de peneiramento de 150 µm. A água residual foi seca em estufa na temperatura de 40 °C por 36 h para a eliminação por evaporação, restando apenas os extrativos para quantificação.

$$e\% = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad (4)$$

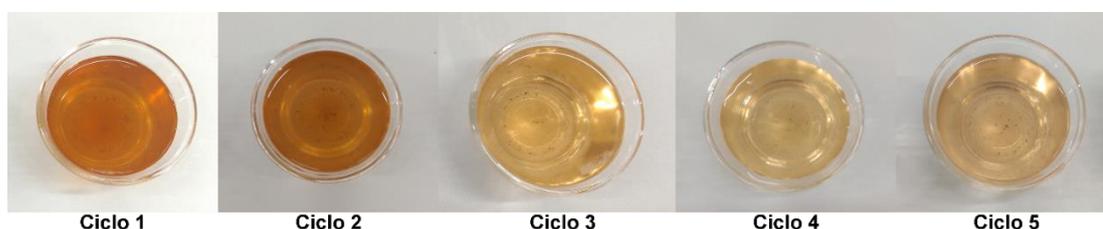
Onde:

e%= teor de extrativos

m<sub>1</sub> = massa de água (g)

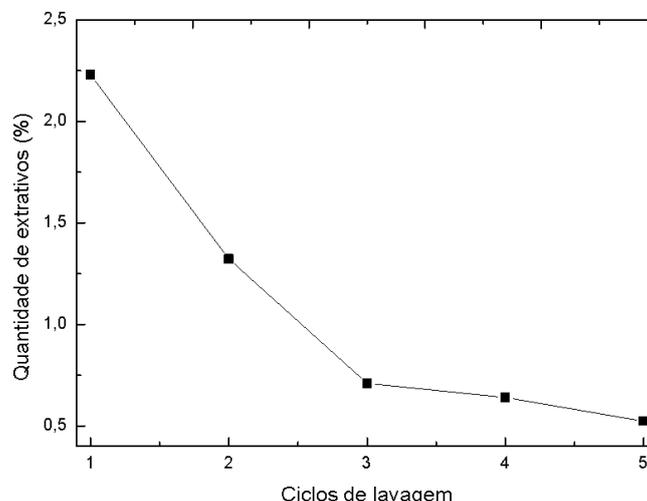
m<sub>2</sub> = massa residual após evaporação da água (g)

Após cada lavagem a coloração da água de cada ciclo foi observada, como ilustra a Figura 6, onde é possível verificar, da esquerda para direita, que o primeiro ciclo apresentou uma coloração mais escura e os demais vão clareando após cada lavagem. A mudança de coloração pode ser explicada pelo fato de que cada lavagem removeu uma quantidade significativa de extrativos, como aqueles responsáveis pela cor, por exemplo.



**Figura 6.** Água residual do endocarpo após os ciclos de lavagem

Tal fato pode ser confirmado pelo gráfico da Figura 7, onde é possível identificar a redução progressiva da concentração de extrativos dos endocarpos após cada ciclo de lavagem.



**Figura 7.** Redução progressiva da quantidade de extrativos.

### 3.2.2 Lavagem em solução alcalina

Também foi aplicado o tratamento de lavagem em solução alcalina. Alguns estudos (IWAKIRI et al., 2012; CASTRO et al. 2014; FERREIRA et al. 2015) abordam a utilização de Hidróxido de Cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), como tratamento para a remoção de extrativos, em diferentes proporções e tempo de imersão. Baseado nesses estudos, os endocarpos foram imersos em uma solução de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  por 50 minutos a uma temperatura de 22 °C. A proporção de solução/água foi de 0,185g/100mL (nível de solubilidade do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  em água). Após isso, os endocarpos foram secos em estufa a 40 °C por 24 horas.

### 3.3 Calorimetria Semi-adiabática

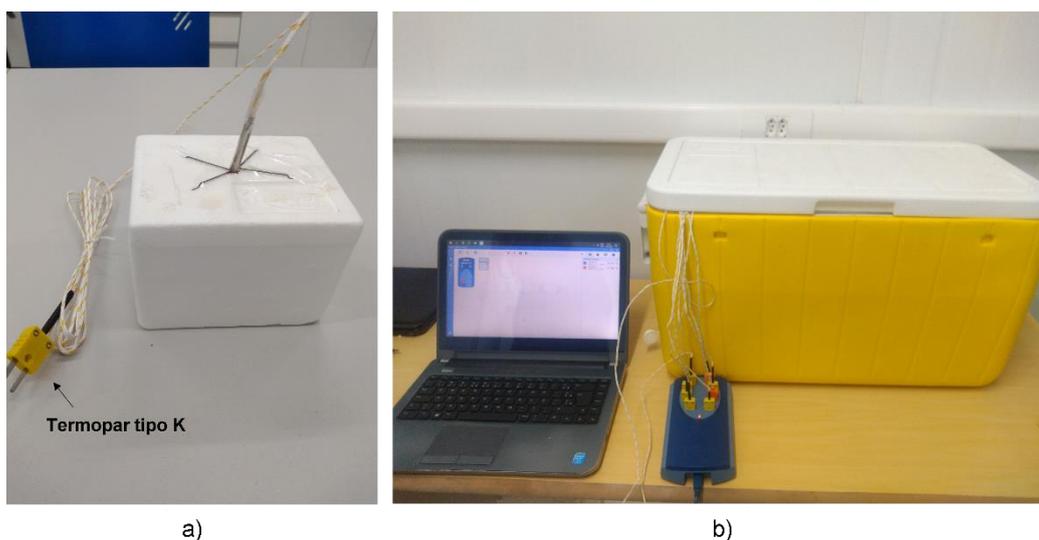
Buscando identificar o tratamento de melhor eficácia para retirada de extrativos e melhoria da compatibilidade química entre a matriz e o endocarpo da macaúba, foi realizado o ensaio de calorimetria semi-adiabática. Foram produzidas argamassas contendo 10% de endocarpo da macaúba em relação ao cimento, que foram tratados com água quente e com Hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ).

Para realização desse ensaio a norma NBR 12006 (ABNT, 1990) foi adaptada. A norma determina a utilização de um calorímetro semi-adiabático e

por não haver a disponibilidade deste, foram utilizadas caixas de isopor para promover o isolamento.

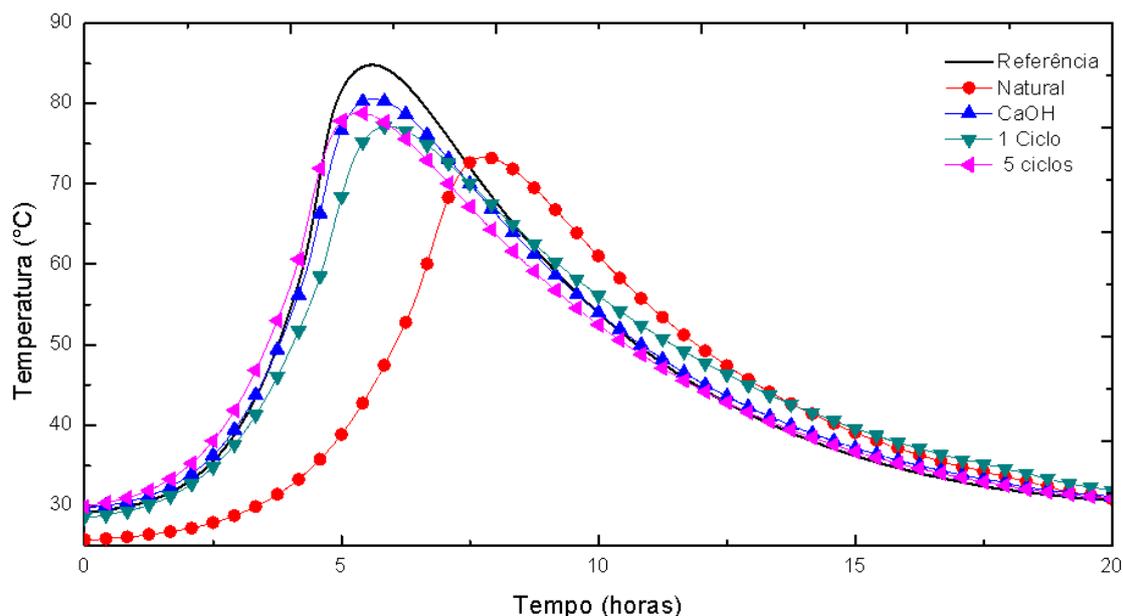
As pastas em estado fresco com diferentes porcentagens de endocarpos foram despejadas em recipientes quadrados de isopor com um volume de 418 cm<sup>3</sup> (Figura 8a). Em seguida, para a leitura de temperatura, foram inseridos termopares do tipo K no seu interior, acoplados a um termostato para acompanhar a variação de temperatura do concreto em relação ao tempo. Após isso o recipiente foi lacrado.

Os recipientes foram inseridos dentro de uma caixa térmica com abertura para a passagem dos termopares. O ensaio foi realizado em ambiente climatizado, com 25°C e UR 60%. As medidas foram coletadas com o auxílio de um software data logger PicoLog 6, conectado a um microcomputador, com leituras a cada 20 segundos por 24 horas (Figura 8b).



**Figura 8.** Calorimetria semi-adiabática: a) Caixa de isopor para melhor isolamento térmico contendo as pastas cimentícias para estudo da influência da macaúba na hidratação; b) Set-up para obtenção das medidas calorimétricas.

A Figura 9 mostra as curvas de temperatura obtidas do teste de calorimetria semi-adiabática das pastas de cimento produzidas com os endocarpos após cada tratamento. A curva do endocarpo não-lavado (natural) foi a que apresentou maior retardamento da hidratação, com o período de indução iniciando-se por volta de 3 horas após o início do teste, enquanto a pasta referência inicia com 1h20 min.



**Figura 9.** Curvas da análise de calorimetria semi-adiabática.

Vale a pena destacar que apenas com um ciclo de lavagem em água quente, foi possível chegar a resultados significativos, com pouca influência na hidratação, apresentando valores próximos à amostra referência.

Os tratamentos com lavagens em água quente em 5 ciclos e lavagem em  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  foram os que apresentaram melhores resultados, gerando pouca influência na hidratação da matriz. A incidência de maior temperatura para a amostra referência pode ser explicado pelo fato de que essa amostra apresenta apenas cimento e água em sua composição.

De acordo com o que foi evidenciado no teste, a fim de obtermos a melhor abordagem para a produção dos bio-concretos, os endocarpos utilizados na presente pesquisa passaram por 5 ciclos de lavagem em água quente ( $80^\circ \text{C}/1\text{h}$ ).

### 3.4 Testes de durabilidade em meio alcalino

Com relação a durabilidade do endocarpo da macaúba em meio alcalino, foram realizados tratamentos visando simular de forma acelerada, o ambiente físico-químico de degradação a que o endocarpo será submetido dentro da matriz cimentícia, seguindo o procedimento adaptado de Toledo Filho et al. (2000). Os endocarpos que foram armazenados em recipientes com soluções de  $\text{Ca(OH)}_2$  de pH 12 e NaOH pH 11 pelo período de 30 e 60 dias (Figura 10a). Os recipientes foram cobertos e o pH das soluções foi verificado em intervalos regulares (Figura 10b). No decorrer da análise, as soluções que não apresentassem o pH inicial foram substituídas.

Após 30 e 60 dias de imersão nas soluções, os endocarpos foram secos em laboratório em temperatura ambiente por 24 h para posteriores avaliações.



**Figura 10.** Ensaio de durabilidade. a) Endocarpos submersos em solução de  $\text{Ca(OH)}_2$  e NaOH; b) Medição do pH das soluções com o auxílio de pHômetro.

### 3.5 Análise termogravimétrica (TGA)

Análises termogravimétricas foram realizadas no endocarpo da macaúba in natura e após o ensaio de durabilidade em meio alcalino. Foi utilizado o equipamento NETZSCH STA 449 F5 Jupiter operando com taxa de aquecimento de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  com temperatura indo de  $25^\circ\text{C}$  para  $1000^\circ\text{C}$  em um fluxo de nitrogênio a  $20\text{ mL}/\text{min}$ . Foram utilizados  $10\text{ mg}$  de material com tamanho máximo de  $0,60\text{ mm}$  em um cadinho de alumina aberto.

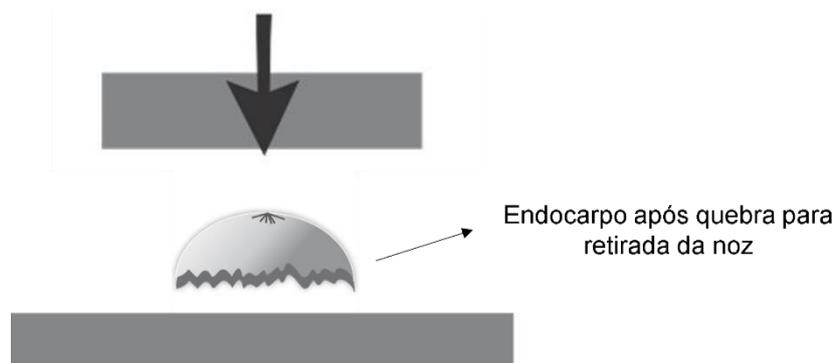
### 3.6 Análise de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Para a avaliação das propriedades físico-químicas do endocarpo in natura e após o ensaio de durabilidade em meio alcalino, foi realizado o ensaio de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR). A análise foi realizada em um Espectrômetro FT-IR Varian 600-IR, com acessório GladiATR da Pike Technologies acoplado para medidas por reflectância total atenuada (ATR) a 45° com cristal de seleneto de zinco. As amostras foram escaneadas na faixa de 600 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , com 24 varreduras e resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$ .

### 3.7 Caracterização mecânica do endocarpo

Para caracterização mecânica do endocarpo foi realizado o teste de compressão axial em sistema de teste mecânico servo-eletrônico pela AROTEC. Foi utilizado célula de carga de 20 kN e taxa de deslocamento de 1 mm/min.

O objetivo desse teste foi avaliar o comportamento mecânico do endocarpo após a quebra para retirada da noz e após a realização do ensaio de durabilidade em meio alcalino. As amostras encontravam-se no formato semielipsoidal. A Figura 11 ilustra o procedimento do ensaio.



**Figura 11.** Ensaio de compressão axial em amostras fraturadas do endocarpo.

### 3.8 Produção dos bio-concretos

#### 3.8.1 Dosagem

Para a produção dos bio-concretos as misturas foram preparadas em ambiente controlado em laboratório com temperatura de  $24 \pm 1^\circ\text{C}$  e Umidade

relativa de  $60 \pm 5\%$ . Foram produzidas misturas com proporção 0,6 de água para cimento (a/c) com traços de substituição do agregado graúdo (brita) por endocarpo da macaúba em massa e volume, alterando as proporções de brita/endocarpo em 25, 50 e 100%.

O traço para produção dos bio-concretos foi definido com base no trabalho desenvolvido por Barboza; Bastos (2008) para obtenção de concretos com resistência mecânica de 30 Mpa aos 28 dias. Esta abordagem foi adotada com o intuito de avaliar as variações de resistência e densidade de acordo com cada tipo de substituição. O traço dos concretos está representado na Tabela 2.

Tabela 2 – Traço para produção do concreto

Mistura	Código de ID	Cimento	Areia	Brita	AEM*	Água
Concreto referência	REF	1	2,6	2,7	-	0,6
25% de AEM em massa	M25	1	2,6	2,0	0,7	0,6
50% de AEM em massa	M50	1	2,6	1,35	1,35	0,6
100% de AEM em massa	M100	1	2,6	-	2,7	0,6
25% de AEM em volume	V25	1	2,6	2,0	0,7	0,6
50% de AEM em volume	V50	1	2,6	1,35	1,35	0,6
100% de AEM em volume	V100	1	2,6	-	2,7	0,6

\*AEM – Agregado de endocarpo da macaúba

### 3.8.2 Moldagem

As etapas envolvendo a produção dos bio-concretos foram executadas no Laboratório de Construção Civil (ABI) da Universidade Federal de Lavras. Os bio-concretos foram produzidos em uma argamassadeira industrial.

Antes do início da moldagem, os endocarpos foram pesados e saturados em água por 24h para evitar a absorção de água de hidratação do cimento. Posteriormente, os endocarpos foram secos em uma sala de 25°C, UR 60%, até o estado superficialmente seco.

Para a produção dos bio-concretos, a seguinte abordagem foi adotada:

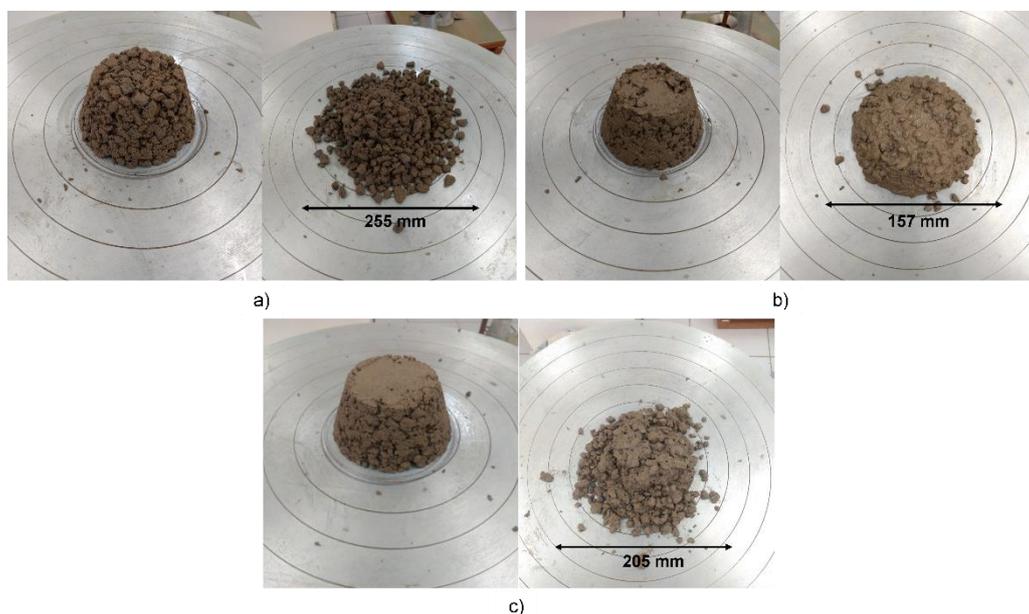
- Mistura prévia do cloreto de cálcio e a água em um béquer plástico;
- Mistura do cimento e areia por 1 minuto;
- Lançamento da água com cloreto de cálcio aos poucos, por cerca de 1 minuto;
- Pausa de 1 minuto para retirada do material retido na argamassadeira;
- Mistura por mais 1 minuto;
- Adição da brita e/ou endocarpos no estado saturado superficialmente seco;
- Mistura por 2 minutos;
- Pausa de 1 minuto para retirada do material retido na argamassadeira;
- Mistura por 3 minutos.



**Figura 12.** a) Lançamento do cimento; b) Lançamento da água com cloreto de cálcio; c) Adição da brita e/ou endocarpo; d) Pausa para retirada de material retido.

Após cada mistura, foi realizado teste de espalhamento segundo a NBR 13276 (ABNT, 2005). Os compósitos frescos foram colocados em um recipiente cônico, em três camadas. Cada camada foi adensada com auxílio de haste, e posteriormente foram realizados 30 golpes na mesa para avaliação do espalhamento das misturas.

Os resultados obtidos mostraram que a mistura com substituição em massa de 100% de brita por endocarpo da macaúba apresentou maior ocorrência de segregação das partículas, enquanto a mistura com substituição por volume de 100% de brita por endocarpo da macaúba apresentou a menor segregação (Figura 13). Não foi observado a ocorrência de exsudação em nenhuma das misturas durante o ensaio.



**Figura 13.** Teste de espalhamento antes e após aplicação dos golpes. a) M100; b) V100; c) Referência.

Os moldes utilizados foram de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Inicialmente, os moldes foram limpos e receberam uma fina camada de vaselina industrial para facilitar a desmoldagem. As misturas no estado fresco foram colocadas em três camadas nos moldes (Figura 14a), que foram adensadas com o auxílio de uma haste, e após a última camada, os corpos-de-prova foram vibrados mecanicamente na mesa vibratória por 1 minuto (Figura 14b). Os corpos-de-prova foram mantidos nos moldes em uma sala de 25°C por 7 dias, protegidos da perda de umidade, até a desmoldagem.

Para cada porcentagem de substituição foram feitos 15 corpos-de-prova para posterior caracterização física e mecânica dos bio-concretos.



**Figura 14.** a) Misturas colocadas nos moldes cilíndricos metálicos; b) Mesa vibratória.

### 3.9 Avaliação das propriedades mecânicas do bio-concreto

#### 3.9.1 Ensaio mecânico de compressão axial

A resistência dos bio-concretos produzidos foi avaliada por meio de ensaio mecânico de compressão axial. Antes do ensaio, os corpos-de-prova tiveram suas extremidades regularizadas com o auxílio de um torno mecânico, com exceção das amostras de substituição por massa de 100% de brita por endocarpo da macaúba, por apresentar-se frágil e com grande porosidade (Figura 15a). Para realização do ensaio das amostras dessa mistura, foi utilizado Neoprene nas extremidades dos corpos-de-prova para que houvesse alguma estabilidade na máquina de ensaios.

Foi utilizado uma máquina de ensaio universal, modelo Inspekt table, da Hegewald & Pescheke MPT GmbH, com célula de carga de 20kN e velocidade de deslocamento de 0,1 mm/min. 5 amostras para cada mistura de bio-concretos foram testadas após 28 dias de cura em ambiente controlado em laboratório ( $20^{\circ}\text{C} \pm 1$  e  $\text{Ur}: 65\% \pm 2$ ). O ensaio de compressão axial seguiu as normas da NBR 5739 (ABNT, 2018).

A deformação axial dos corpos-de-prova foram determinadas por meio da média fornecida por dois extensômetros, posicionados nas laterais dos

corpos-de-prova (Figura 15b). O cálculo de módulo de elasticidade ( $E$ ) foi realizado segundo a norma NBR 8522 (ABNT, 2003), pela Equação 5:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (5)$$

Onde:

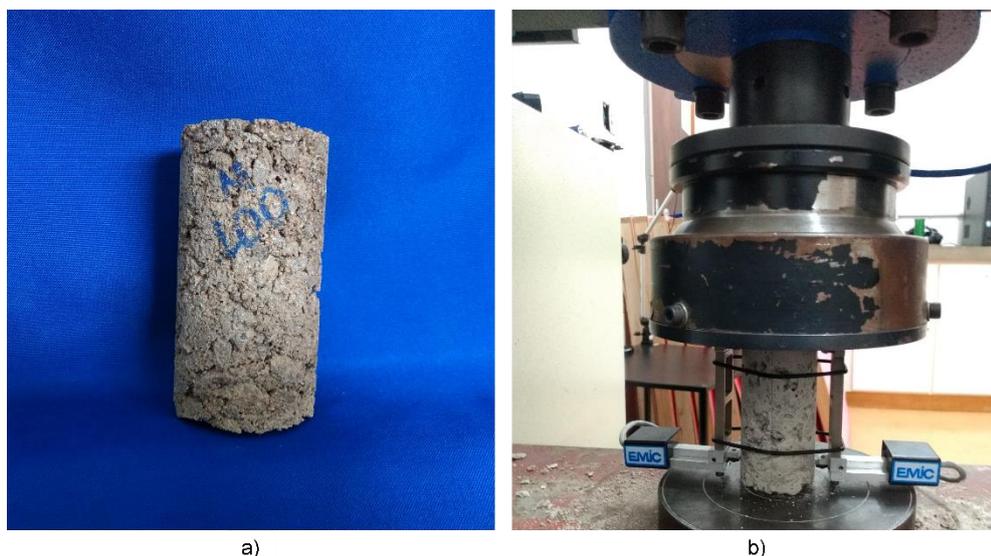
$E$ : módulo de elasticidade;

$\sigma_2$ : tensão de compressão correspondente a 40% da carga última;

$\sigma_1$ : tensão de compressão correspondente à deformação axial,  $\varepsilon_1$ , de  $5 \cdot 10^{-5}$ ;

$\varepsilon_2$ : deformação axial produzida pela  $\sigma_2$ ;

$\varepsilon_1$ : deformação axial igual a  $5 \cdot 10^{-5}$ .

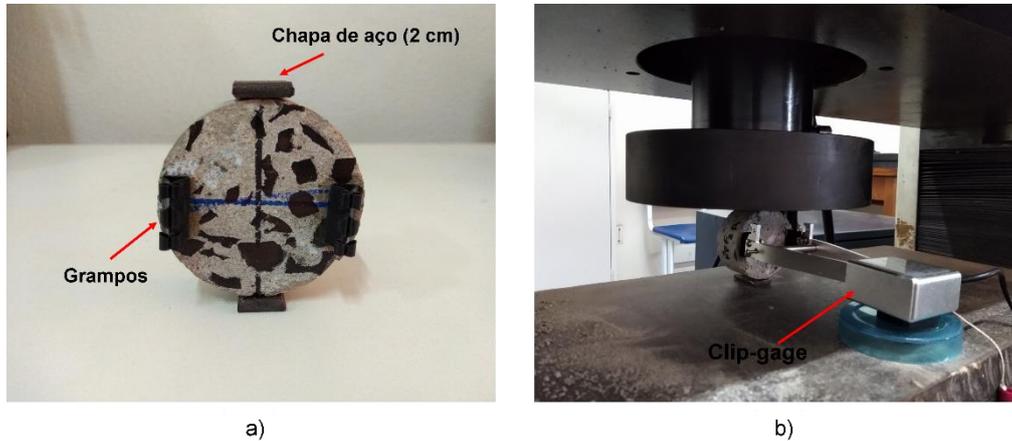


**Figura 15.** a) Amostra 100% de substituição por massa; b) Ensaio de compressão axial.

### 3.9.2 Ensaio mecânico de tração por compressão diametral

Os ensaios de tração por compressão diametral foram realizados seguindo a NBR 7222 (ABNT, 1994) de forma adaptada. Para isso, dois corpos-de-prova de cada substituição foram cortados para obtenção de discos com aproximadamente 2,5 cm de espessura, conforme a metodologia proposta por Fontes et al. (2016). O procedimento foi realizado em máquina de ensaios, com velocidade de 0,3 mm/min. A deformação das amostras foi medida com o auxílio de extensômetro do tipo clip-gage acoplado à amostra por meio de

grampos (Figura 16a). O extensômetro apresenta abertura inicial de 4,5 cm. Foram utilizadas chapas de aço de 2 cm de largura nas extremidades das amostras para ajudar na estabilidade dos corpos-de-prova na máquina de ensaios.



**Figura 16.** a) Amostra utilizada no ensaio; b) Set-up do ensaio de compressão diametral.

## CAPÍTULO 4

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1 Caracterização do endocarpo da macaúba

##### 4.1.1 Propriedades físicas

Os resultados das propriedades físicas estão apresentados na Tabela 3. O endocarpo da macaúba pode ser considerado como material de baixa densidade, segundo a classificação da ASTM D2395 (2017) para agregados, visto que o valor de densidade básica de agregados comumente utilizados em concretos, como a brita, apresenta em média densidade de  $2,85 \text{ g/cm}^3$  (GERIN et al., 2020).

Ao compararmos a densidade do endocarpo ( $1,23 \text{ g/cm}^3$ ) com outros materiais de origem lignocelulósica (Tabela 3), como a madeira, por exemplo, podemos considerá-lo como material de densidade alta (maior que  $0,72 \text{ g/cm}^3$ ), segundo a classificação do Laboratório de Produtos Florestais (LPF, 2022) para densidade da madeira.

Tabela 3 - Valores das propriedades físicas do endocarpo da macaúba e de outras biomassas com aplicação como bio-agregados.

Biomassa	Absorção (%)	U (%)	$\Delta_v$ (%)	$\rho_b$ ( $\text{g/cm}^3$ )	Fonte
<i>Endocarpo</i>	$9,05 \pm 0,1$	$8,34 \pm 0,2$	$6,75 \pm 1,1$	$1,23 \pm 0,1$	-
Madeira	30-200	-	15*	$0,7-0,8^{**}$	Simpson; Ten Wood (1999)
Serragem de madeira ( <i>Pinus elliotii</i> <i>Engelm</i> )	100	14	-	1,2	Da Gloria et. al (2021)
Partículas de bambu ( <i>Dendrocalamus Asper</i> )	109	11	-	1,4	Da Gloria et. al (2021)
Brita (basalto)	1,6	-	-	2,9	Gerin et. al (2020)

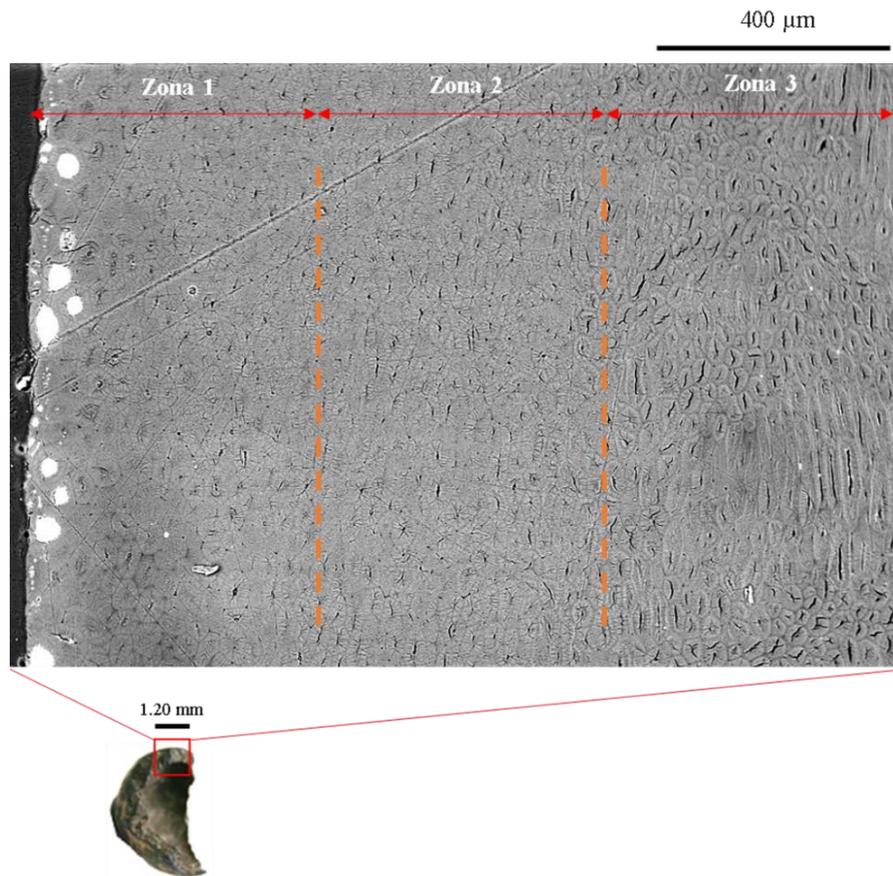
U= teor de umidade;  $\Delta_v$ = Variação volumétrica;  $\rho_b$  = densidade básica; \*Coeficiente de variação volumétrica da madeira; \*\*Valor que abrange a maioria das espécies de madeira.

O teor de umidade de equilíbrio do endocarpo é de 8,34%, enquanto a capacidade de absorção de água chega a aproximadamente 9%, valor baixo em comparação a outros materiais lignocelulósicos utilizados como bio-agregados. Da Glória (2021) encontraram o valor de 109,14% de absorção para partículas de bambu que foram aplicadas em compósitos cimentícios. Estes mesmos autores também encontraram o valor de 100% de absorção para a serragem de diferentes madeiras.

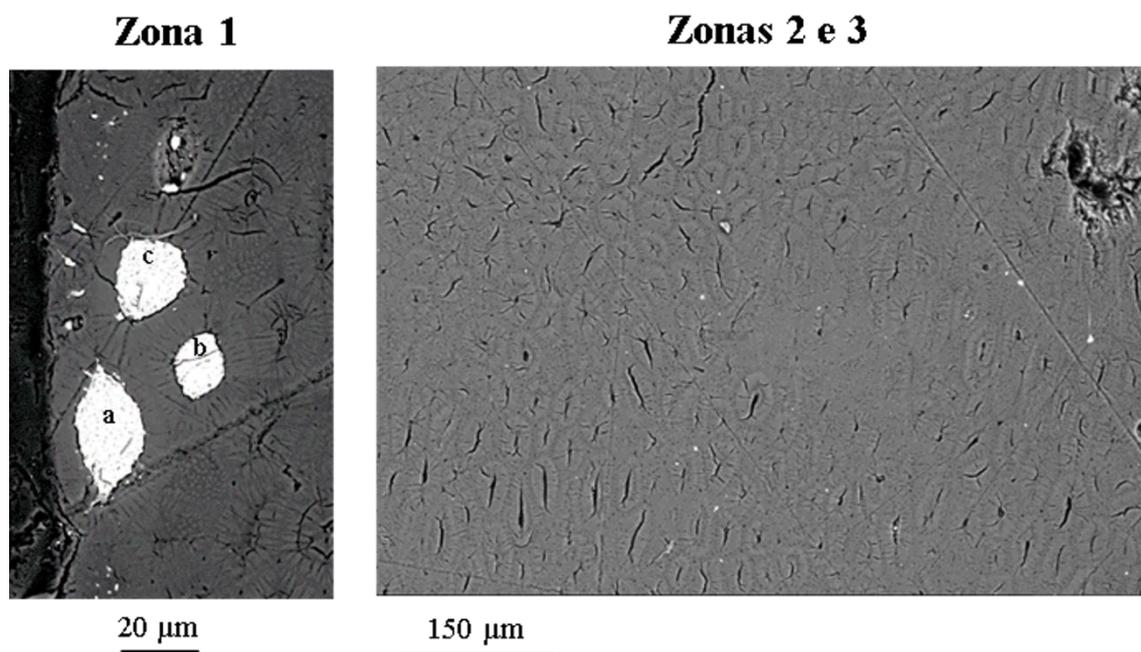
Em relação aos agregados de origem natural, o valor de absorção do endocarpo (9,05%) é superior, Gerin et al. (2020) encontraram o valor de 1,6% de absorção para brita (basalto). Agregados graúdos com alto índice de absorção, geralmente, apresentam maiores valores de contrações quando submetidos à secagem. Os agregados de quartzo e feldspato, por exemplo, são considerados agregados com baixos valores de contrações, enquanto materiais como o seixo, normalmente apresentam altos valores de contrações. Para o endocarpo, o valor médio de contração foi de 6,75%.

#### **4.1.2 Características anatômicas dos endocarpos**

A partir da avaliação das características anatômicas do endocarpo, foi possível observar que o material apresenta 3 zonas que podem ser distinguidas pelas características das células de cada zona. A primeira zona, mais periférica, pode ser facilmente diferenciada pela presença de pontos de acúmulo de Si. Esses locais, que apresentam estruturas similares à lumens, apresentaram diâmetro nominal de 21  $\mu\text{m}$  (Figura 17, 18).



**Figura 17.** Microscopia eletrônica de Varredura (MEV) superfície do endocarpo



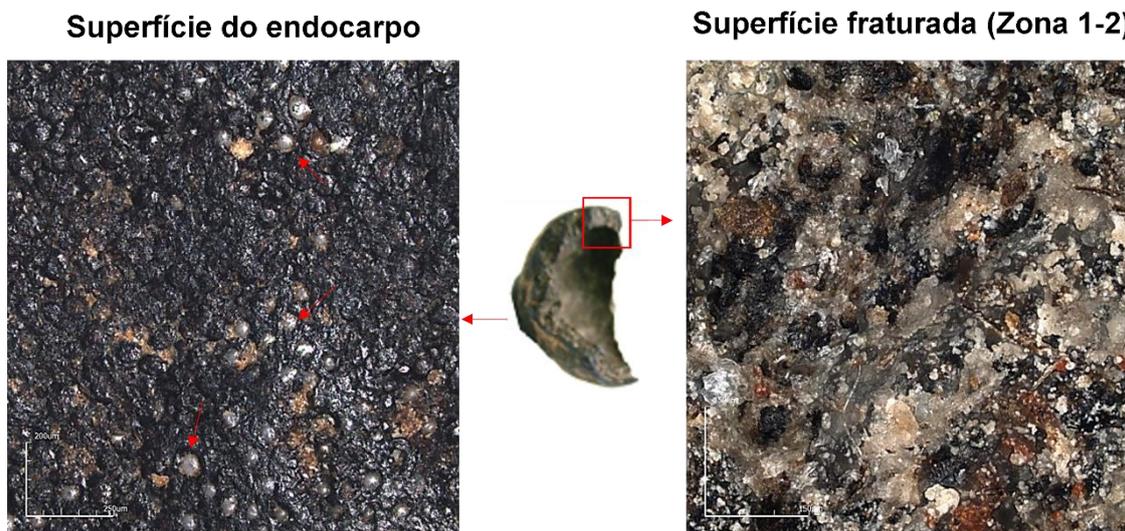
**Figura 18.** Microscopia eletrônica de Varredura (MEV) das distintas zonas da seção transversal do endocarpo da macaúba.

As células identificadas na estrutura do endocarpo foram medidas e estão apresentadas na Tabela 4. Foi observado que o endocarpo apresenta células em formato hexagonal com um lúmen no centro. Na zona 1 e 3, é possível observar um baixo número de células, provavelmente devido sua maior área superficial. A zona 2 apresenta células menores e mais uniformes, enquanto a zona 3 apresenta células mais heterogêneas e alongadas. Nesta última, também foi observado maior área com presença de lumens e rachaduras.

Tabela 4 - Caracterização morfológica da sessão transversal do endocarpo.

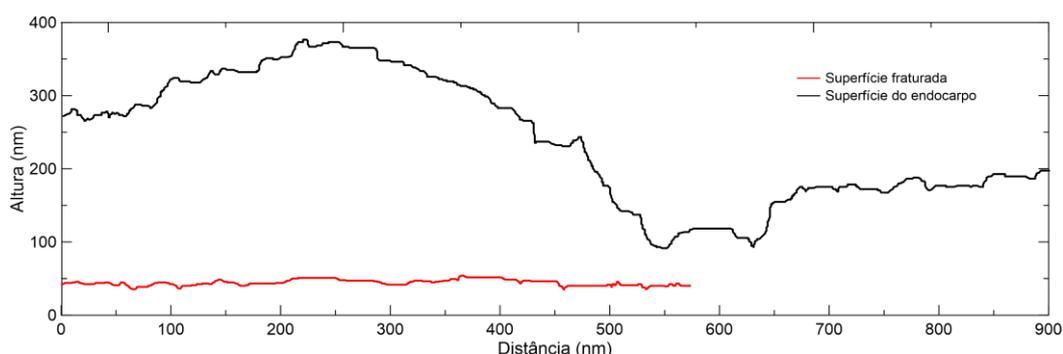
Área	Número de células (n°/100 $\mu\text{m}^2$ )	Área da célula ( $\mu\text{m}^2$ )	Circularidade
Zona 1	8 (2)	1881,69 (465,63)	0,65 (0,37)
Zona 2	11 (3)	1563,15 (407,14)	0,82 (0,06)
Zona 3	7 (2)	2074,76 (1217,72)	066 (0,15)

A presença acumulada de Si também foi observada por meio da análise de microscopia de luz. Na Figura 19 é possível observar algumas “pérolas” de Si evidenciadas pelas setas vermelhas.



**Figura 19.** Microscopia de luz das superfícies do endocarpo da macaúba.

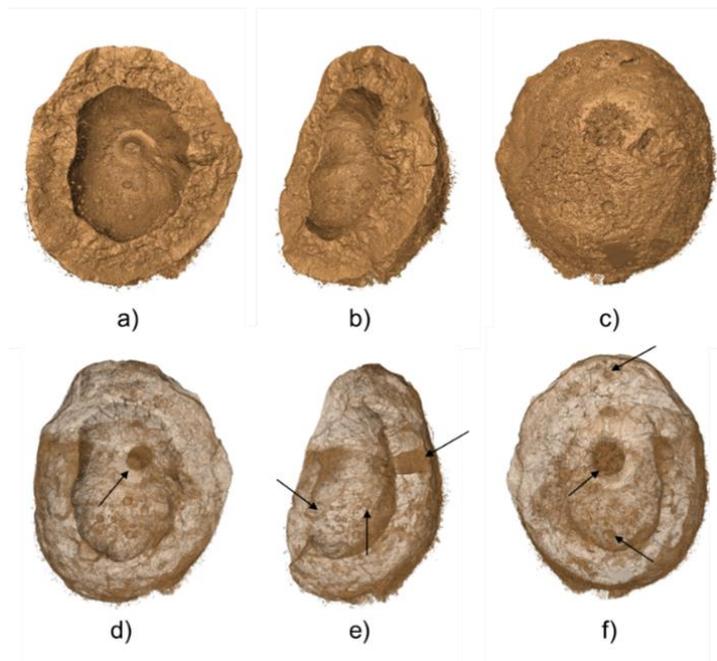
A superfície externa do endocarpo pode ser considerada lisa, especialmente quando comparada com a superfície fraturada. Os valores de rugosidade média ( $R_a$ ) da superfície fraturada e da superfície externa foram de 313 e 24 $\mu\text{m}$ , respectivamente (Figura 20). Mesmo apresentando um valor alto de  $R_a$  na sua seção transversal fraturada, o endocarpo irá sempre apresentar, pelo menos, uma superfície lisa, que pode diminuir a interação com a matriz cimentícia.



**Figura 20.** Microscopia a laser da superfície do endocarpo: rugosidade e perfil topográfico

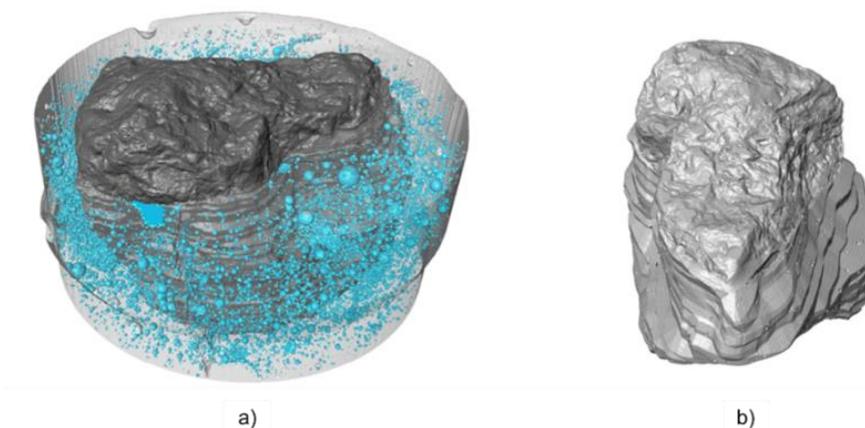
#### 4.1.3 Micro Tomografia Computadorizada

Os resultados obtidos com a análise de Microtomografia computadorizada (MicroCT) corroboram com os resultados de microscopia de luz e laser, visto que as imagens obtidas mostram o endocarpo da macaúba com formato e superfície complexa. Por meio da visão rotativa do endocarpo da macaúba na Figura 21 a, b, c é possível observar um volume de cor opaca das superfícies interior e exterior do endocarpo, enquanto na Figura 21 d, e, f mostram a versão de cor translúcida do mesmo volume, o que permite observar a estrutura interna do endocarpo, com os poros germinativos e os respectivos canais destacados por setas.



**Figura 21.** MicroTomografia do endocarpo da macaúba: amostras com coloração opaca e translúcida. Visão interior (a,d); visão lateral (b e e); visão exterior (c e f). Setas indicando poros germinativos do endocarpo.

A Figura 22a mostra um agregado mineral de brita embebido em pasta cimentícia, enquanto a Figura 22b mostra a visão rotativa da superfície irregular da brita. Considerando que as duas figuras dos agregados possuem a mesma resolução, é possível considerar que o agregado mineral apresenta uma superfície mais homogênea.

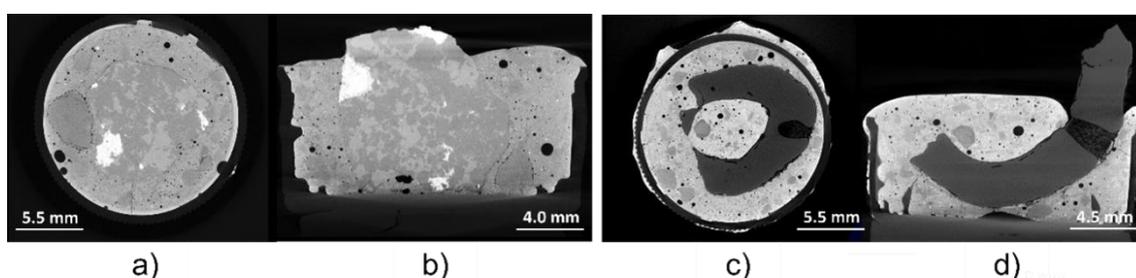


**Figura 22.** MicroTomografia da brita: a) imersa em matriz cimentícia; b) visão da superfície da brita.

A Figura 23 mostra partículas bidimensionais de agregado de brita e endocarpo da macaúba embebida em pasta cimentícia com suas respectivas

seções transversais e longitudinais. Os cortes com agregado mineral (Figura 23 a e b) está apresentado sob uma escala cinza homogênea devido a densidade similar entre os materiais; a ausência de vazios no perímetro da interface matriz-agregado indica uma boa interação química, e, conseqüentemente, uma boa adesão.

Quanto ao agregado de endocarpo da macaúba, por apresentar densidade diferente da matriz cimentícia, é possível observar um claro contraste entre os dois materiais (Figura 23 c e d). É válido destacar a ancoragem mecânica do endocarpo devido ao seu formato semielipsoidal, bem como os vazios na matriz, e o desprendimento localizado ao longo do seu perímetro, sendo o último reflexo do encolhimento do endocarpo.



**Figura 23.** Agregados (brita e endocarpo) imersos em matriz cimentícia. a) Seção transversal e b) Seção longitudinal da brita; c) Seção transversal e d) Seção longitudinal do endocarpo da macaúba.

#### 4.1.4 Composição química do endocarpo

Os resultados das características químicas do endocarpo da macaúba estão apresentados na Tabela 5. Os dados indicaram um baixo teor de extrativos e cinzas. Esses valores podem ser comparados aos encontrados em madeiras de folhosas e coníferas como pode ser observado na Tabela 5.

O baixo teor de extrativos observado no endocarpo da macaúba é um dado positivo para aplicações industriais, pois pode não necessitar de pré-tratamentos no endocarpo, como por exemplo, a lavagem em água para remoção de extrativos antes de serem aplicadas a compósitos cimentícios.

A madeira e outros bio-agregados, como partículas de bambu, apresentam densidade menor que  $1 \text{ g/cm}^3$  devido ao maior teor de extrativos, visto que os componentes dessas substâncias apresentam baixo peso molecular. O

endocarpo da macaúba apresenta um maior valor, possivelmente devido sua composição química e estrutura compacta.

Tabela 5 - Composição química do endocarpo da macaúba

Biomassas	Extrativos totais (%)	Lignina insolúvel (%)	Holocelulose (%)	Cinzas (%)	Fonte
<i>Endocarpo da macaúba</i>	3,10 (0,26)	39,60 (0,16)	52,64 (0,10)	4,7 (0,37)	-
Madeira de folhosas	2-4	15-30	60-70	-	Lourenço; Pereira (2018)
Madeira de coníferas	5-8	25-35	65-75	-	Lopes (2008)
Bambu*	10-25	-	63-71	0,66-3	Marinho et al. (2012)

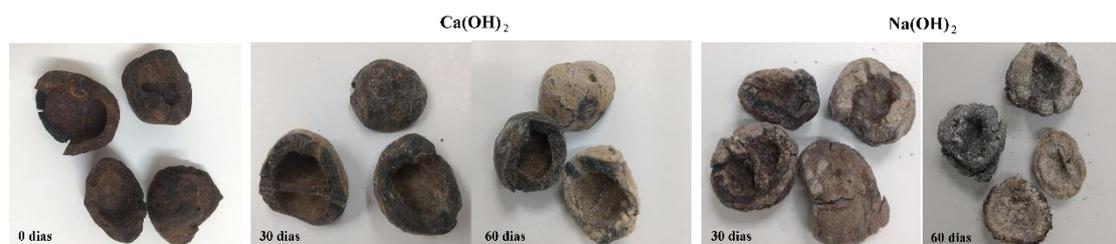
\*Os dados da espécie *Dendrocalamus giganteus* (bambu-gigante)

O teor de lignina do endocarpo é alto quando comparado aos teores de madeira de coníferas e folhosas, o que é favorável, pois além de atuar na proteção do material contra microorganismos, sua estrutura tridimensional atua positivamente na resistência a forças de compressão, gerando uma estrutura resistente ao impacto, compressão e quebra, ao conferir rigidez à parede da célula, propriedades desejadas para elementos construtivos (DONALDSON, 2001; LOURENÇO; PEREIRA, 2018;).

#### 4.1.5 Durabilidade do endocarpo em meio alcalino

##### 4.1.5.1 Efeito da imersão alcalina na resistência mecânica dos endocarpos

A durabilidade do endocarpo da macaúba foi avaliada através da imersão em soluções alcalinas de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (hidróxido de cálcio) e NaOH (hidróxido de sódio) por 30 e 60 dias. A Figura 24 apresenta o aspecto dos endocarpos antes e após o período de imersão. Por meio de avaliação visual dos endocarpos, foi possível observar que a imersão por 60 dias em  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e 30 e 60 dias em NaOH causaram certa degradação na superfície do endocarpo além de promoverem um inchamento, provavelmente devido a absorção da solução com o decorrer dos dias.

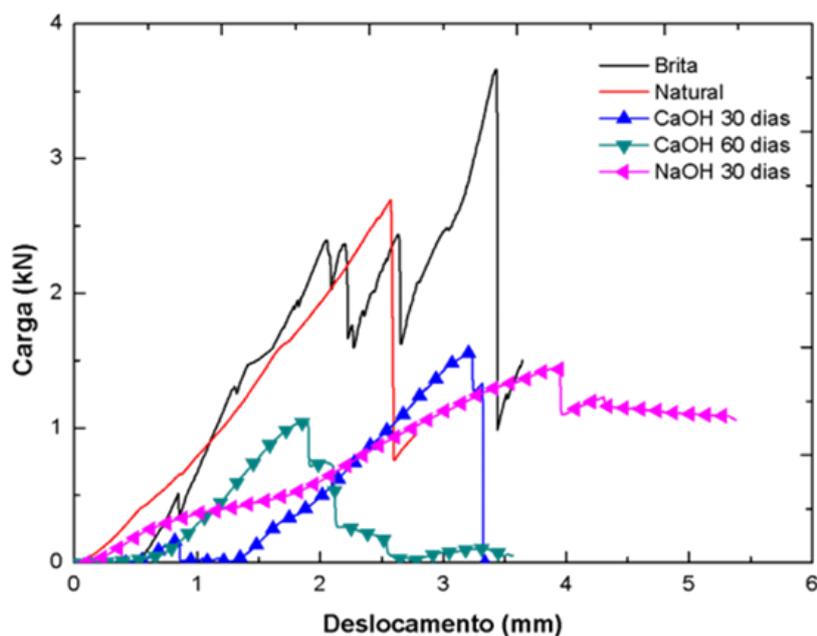


**Figura 24.** Aspectos do endocarpo da macaúba após imersão em solução alcalina

Ensaio mecânico de compressão axial foram realizados buscando avaliar os efeitos da imersão em solução alcalina na resistência mecânica do endocarpo. O mesmo ensaio foi aplicado para amostras de brita, a fim de possibilitar a comparação entre os valores de cargas suportadas. A Tabela 6 apresenta os valores médios de carga máxima e deslocamento obtidos no ensaio de cada amostra. Destaca-se não foi possível realizar o ensaio mecânico do endocarpo após 60 dias de imersão em NaOH, devido à fragilidade que se encontravam as amostras.

Tabela 6 – Valores médios e desvio padrão (entre parênteses) obtidos no ensaio de compressão axial para o endocarpo da macaúba e brita.

<b>Amostra</b>	<b>Carga<sub>máx</sub> (kN)</b>	<b>Deslocamento (mm)</b>
Brita	2,88 (0,78)	3,62 (0,97)
Macaúba natural	2,17 (1,08)	4,0 (1,2)
CaOH 30 dias	1,53 (0,83)	3,33 (2,15)
CaOH 60 dias	1,72 (1,13)	3,90 (1,21)
NaOH 30 dias	1,01 (0,54)	7,97 (3,08)

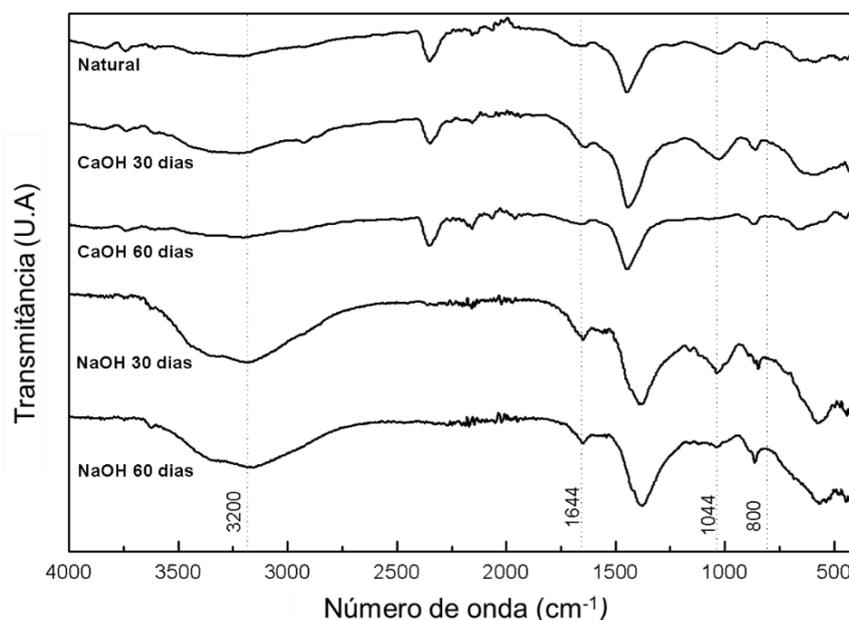


**Figura 25.** Curvas típicas de carga x deslocamento do ensaio mecânico dos endocarpos após ensaio de durabilidade

Conforme observado na Tabela 6 e na Figura 25, as amostras com 30 dias de imersão em NaOH suportaram os menores valores de carga em relação às demais amostras. A partir desses resultados é possível afirmar que a solução de NaOH apresenta maior efeito de degradação ao endocarpo da macaúba.

#### 4.1.5.2 Influência da imersão alcalina na composição química do endocarpo

Os resultados para a análise de FTIR do endocarpo da macaúba natural e submetidos ao ensaio de durabilidade estão apresentados na Figura 26. Os espectros FTIR mostram as principais bandas correspondentes aos componentes presentes no endocarpo da macaúba.



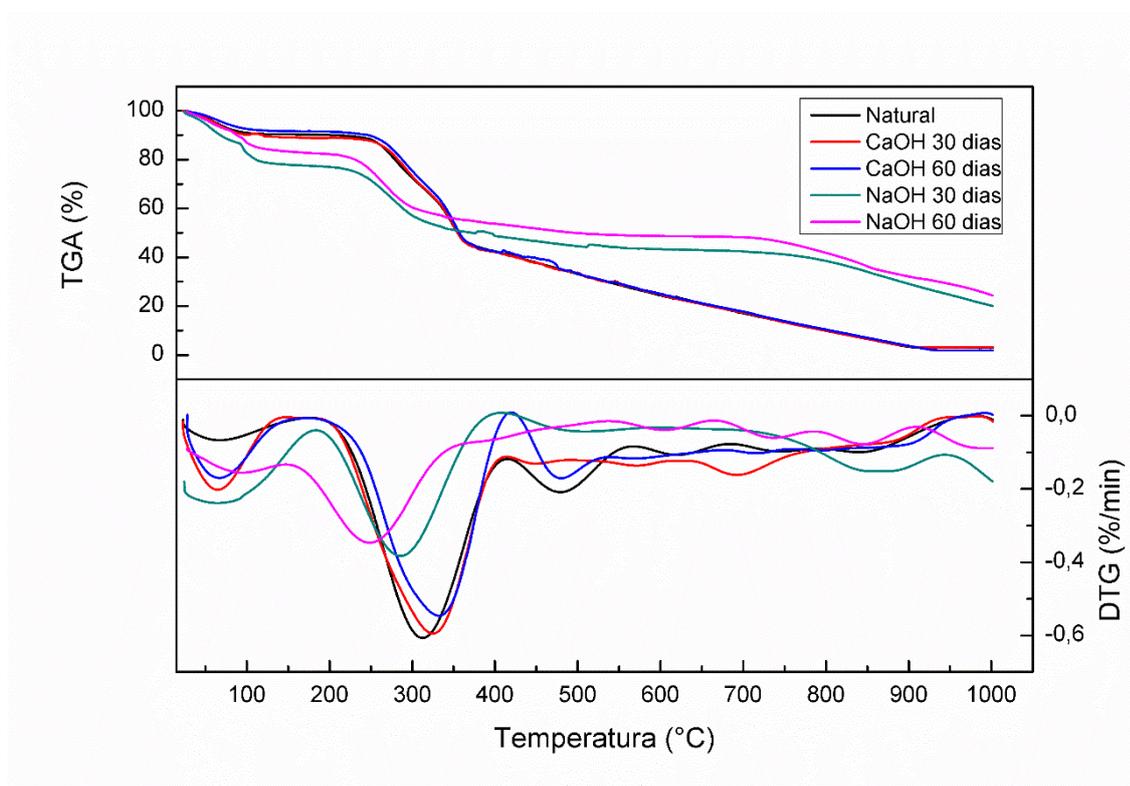
**Figura 26.** Espectroscopia de infravermelho do endocarpo da macaúba antes e após ensaio de durabilidade.

A partir dos resultados da análise FTIR, ilustrado na Figura 26, foi possível observar que as maiores bandas de absorção em todas as imersões e no endocarpo natural, estão associados com os componentes da celulose e lignina. Os picos proeminentes  $1644\text{ cm}^{-1}$  no espectro está associado com duplas ligações de C=C da molécula aromática da lignina, enquanto o pico de  $1044\text{ cm}^{-1}$  é atribuído a ligações C-O e C-H da celulose. O pico próximo a  $800\text{ cm}^{-1}$  pode estar relacionado com a flexão C-H da lignina (Ferreira et al., 2015; Ferreira et al., 2021). É possível observar que a intensidade desses picos em cada imersão tem pouca variação.

A diferença mais proeminente observada na análise FTIR está evidenciada no pico de  $3200\text{ cm}^{-1}$ , que indica a presença de ligações de grupos OH, representando a quantidade de água na amostra. Comparando os espectros de cada imersão, observa-se o aumento da intensidade do pico nas imersões em NaOH. Mwaikambo; Ansell, (2002), explicam que tratamentos alcalinos reduzem as ligações de hidrogênio, devido à remoção de grupos hidroxila por meio da reação com hidróxido de sódio. Essas reações resultam no aumento da concentração de OH, fato que pode ter ocorrido com a imersão dos endocarpos por 30 e 60 dias em NaOH.

A Figura 27 ilustra os resultados obtidos para a análise termogravimétrica dos endocarpos antes e após o ensaio de durabilidade. Os resultados obtidos corroboram com os encontrados para análise FTIR, onde é possível observar a maior perda de massa para as imersões em NaOH (100°C), correspondente à quantidade de água da amostra. Entre 250 e 350 °C outra perda significativa de massa é observada, relacionada a decomposição da celulose, hemicelulose e lignina, onde ocorre o pico mais acentuado nas curvas de DTG (ARBELAIZ et al., 2006).

Para os tratamentos com NaOH, é possível observar na curva DTG, que houve redução do pico entre 200° a 300°C, o que pode indicar remoção parcial da estabilidade térmica.



**Figura 27.** Análise termogravimétrica (TG/DTG) do endocarpo da macaúba antes e após ensaio de durabilidade.

## 4.2 Comportamento mecânico dos bio-concretos

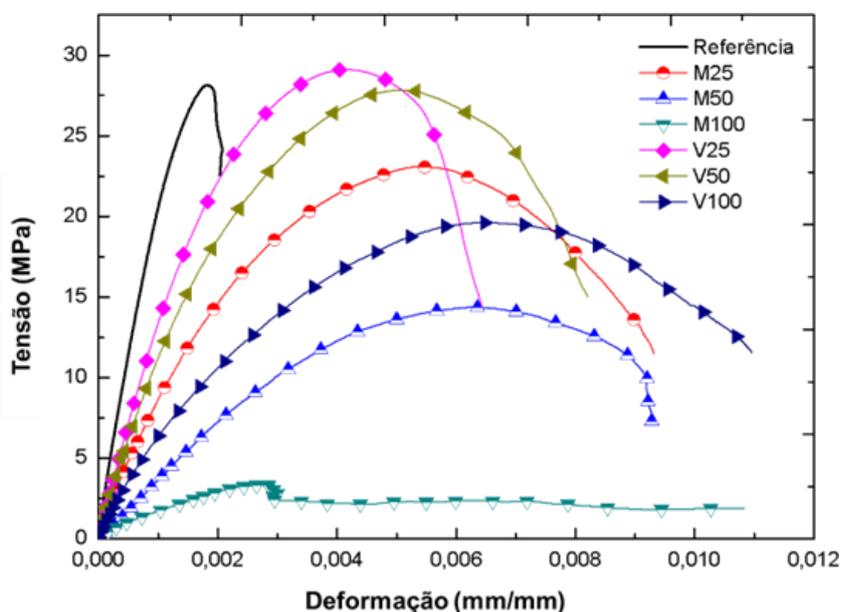
### 4.2.1 Compressão axial

Os bio-concretos de endocarpo da macaúba foram avaliados sob esforços de compressão após 28 dias de cura. Os valores médios de carga

máxima, tensão máxima ( $\sigma_{\text{máx}}$ ), deformação e o módulo de elasticidade (E) de cada mistura estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores médios das propriedades mecânicas sob compressão axial após 28 dias dos bio-concretos e desvio padrão (entre parênteses).

Mistura	Carga máx (kN)	$\sigma_{\text{máx}}$ (Mpa)	Deformação (mm/mm)	E (Gpa)
Referência	52,00 (7,30)	28,37 (0,23)	0,002 (0,0004)	20,62 (0,90)
M25	39,47 (3,06)	22,4 (0,34)	0,007 (0,004)	7,32 (0,52)
M50	25,38 (4,65)	13,17 (2,09)	0,008 (0,001)	3,81 (0,94)
M100	6,45 (2,62)	3,40 (1,30)	0,013 (0,002)	1,25 (0,03)
V25	53,58 (2,02)	30,40 (1,11)	0,005 (0,001)	15,22 (2,01)
V50	51,98 (3,44)	26,48 (1,61)	0,006 (0,001)	10,41 (1,31)
V100	36,86 (2,4)	20,78 (0,9)	0,003 (0,005)	8,18 (1,61)



**Figura 28.** Curvas típicas de tensão x deformação do ensaio mecânico de compressão axial.

De acordo com a Tabela 7 e a Figura 28, constatou-se que tanto a resistência quanto o módulo de elasticidade (E) são menores quando há o

aumento do volume de endocarpo, com exceção da mistura V25, que apresentou o maior valor de resistência à compressão axial (30,4 Mpa), porém um menor módulo de elasticidade (E) quando comparado à amostra referência.

É possível observar que as misturas com substituição por massa tiveram os menores valores de resistência e E, quando comparado à amostra referência e às amostras de substituição por volume. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que o traço de substituição por massa diminui a quantidade de cimento no traço conforme é aumentado a quantidade de endocarpo da macaúba. Torres et al. (2015) explica que o teor de cimento na produção do concreto pode afetar as características de porosidade e as propriedades de resistência, absorção e durabilidade do concreto.

Observando as curvas de tensão x deformação apresentadas na Figura 28 é possível observar a ruptura dos bio-concretos acontece de forma mais gradativa, em comparação à amostra referência. A adição do endocarpo da macaúba na matriz permitiu um maior controle do processo de fissuração na compressão, pois absorvem a energia e distribuem as tensões, sendo capazes de suportar maiores deformações, gerando uma maior ductilidade ao bio-concreto. Andreola (2017) observou as mesmas características no desenvolvimento de bio-concretos com partículas de bambu. Esse comportamento pode explicar o maior valor de resistência à compressão encontrado para mistura V25.

Além disso, esse fator também pode estar relacionado com as características morfológicas do endocarpo. Como foi informado nos tópicos 4.1.2 e 4.1.3, o endocarpo possui regiões com maiores valores de rugosidade, além de apresentar um formato e vazios que podem gerar maiores adesões com a pasta de cimento, melhorando a ancoragem com a matriz. Essas características serão mais bem justificadas no tópico 4.2.2.

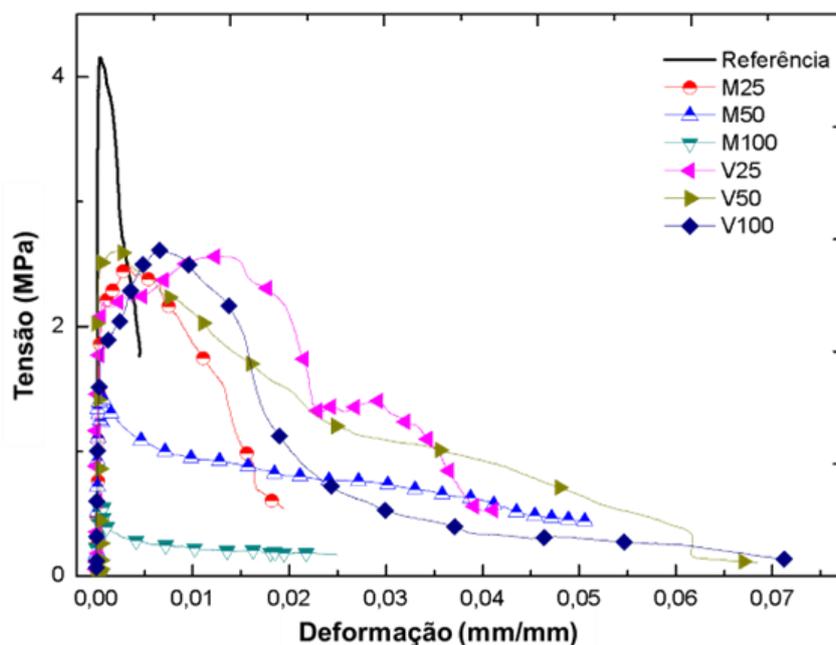
#### **4.2.2 Tração por compressão diametral**

Os valores médios de carga máxima, tensão máxima ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) e deformação de cada mistura obtidos no ensaio de compressão diametral estão

dispostos na Tabela 8 e as curvas de tensão x deformação estão apresentadas na Figura 29.

Tabela 8 - Valores médios da resistência à tração por compressão diametral dos bio-concretos e desvio padrão (entre parênteses).

Mistura	Carga máx (kN)	$\sigma_{máx}$ (Mpa)	Deformação (mm/mm)
Referência	5,72 (1,34)	3,30 (0,77)	0,04 (0,03)
M25	3,44 (0,87)	1,98 (0,50)	0,05 (0,04)
M50	2,29 (0,94)	1,32 (0,54)	0,07 (0,05)
M100	1,01 (0,05)	0,58 (0,03)	0,04 (0,03)
V25	4,43 (0,54)	2,55 (0,31)	0,07 (0,06)
V50	4,89 (1,52)	2,82 (0,88)	0,07 (0,04)
V100	3,68 (0,58)	2,13 (0,35)	0,06 (0,03)

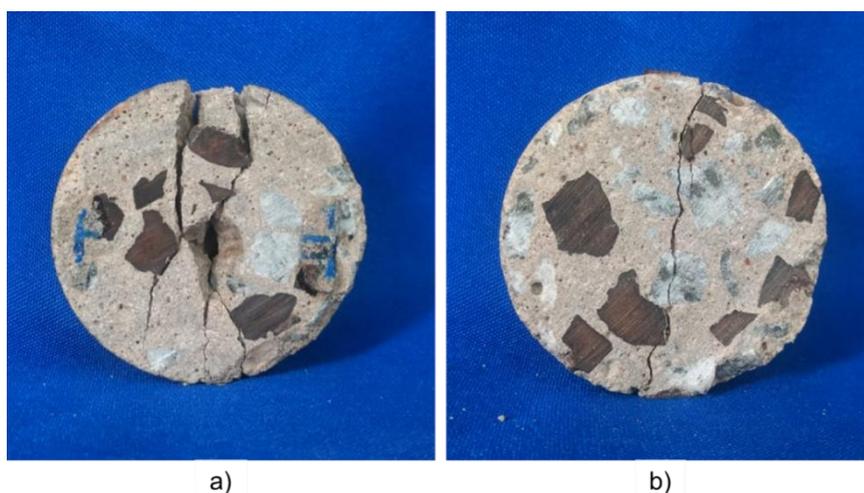


**Figura 29.** Curvas típicas tensão x deformação do ensaio de tração por compressão diametral

Avaliando as curvas típicas ilustradas na Figura 29, observa-se um comportamento linear elástico das misturas até o pico máximo, com redução da deformação para a mistura referência e um aumento da tensão máxima após a fissuração (*hardening*) para as misturas V25 e V100. O comportamento contrário foi observado para as misturas M50 e M100, que apresentaram os menores valores de resistência à tração: 1,32 e 0,58 Mpa, respectivamente. A curva de tensão x deformação dessas misturas apresentam um comportamento de pós-pico caracterizado pela redução gradual da capacidade de resistência às forças de tração.

As misturas V50 e V25 apresentaram o maior valor de resistência à tração, com 2,82 e 2,55 Mpa, respectivamente. O maior valor observado para a mistura V50 pode ser atribuído às maiores quantidades de endocarpo da macaúba, em comparação ao V25. A presença em maior quantidade do bio-agregado conferiu uma maior ductilidade ao concreto e maior capacidade de absorção das forças aplicadas, além de possibilitar uma maior ancoragem entre o bio-agregado e a matriz, como pode ser observado na Figura 30.

Esse resultado assemelha-se ao encontrado por Silva (2019), que observou o mesmo comportamento dúctil em ensaios de tração por compressão diametral em bio-concretos com partículas de bambu nos teores de 35 e 45%, com valores de resistência à tração de 1,90 e 1,45 MPa, respectivamente.



**Figura 30.** Amostras de bio-concretos após ensaio de tração por compressão diametral. a) V25; b) V50.

## CAPÍTULO 5

### 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos ensaios realizado na presente pesquisa pode-se concluir que:

- I. O endocarpo da macaúba apresenta estrutura anatômica complexa, com 3 zonas distintas pelas características das células. A zona 1 apresenta o menor número de células e é distinguida pela presença de Si, enquanto a zona 2 apresenta células menores e mais uniformes e a zona 3 possui células heterogêneas e alongadas. Os resultados de Microtomografia computadorizada mostraram que o endocarpo possui o formato e estruturas internas, como poros e canais que podem facilitar a adesão à matriz cimentícia.
- II. O endocarpo da macaúba apresenta um alto teor de lignina, e baixo teor de extrativos e cinzas, valores positivos no que se refere a aplicação industrial. O alto teor de lignina confere boas propriedades de rigidez e resistência à microorganismos ao endocarpo da macaúba. O baixo teor de extrativos pode indicar que não há necessidade da aplicação de pré-tratamentos para utilização do material em matrizes cimentícias.
- III. O tratamento de lavagem em água quente mostrou-se eficiente na retirada de extrativos, o que implicou na pouca influência da presença dos endocarpos na hidratação do cimento.
- IV. A durabilidade do endocarpo da macaúba é comprometida na presença de componentes alcalinos com o decorrer do tempo. Houve uma diminuição da resistência mecânica e modificação da composição química do endocarpo em contato com  $\text{Ca(OH)}_2$  e NaOH, com maiores danos causados pela solução de NaOH após 30 e 60 dias.
- V. Os bio-concretos produzidos com endocarpo da macaúba como agregado alternativo apresentaram boas propriedades mecânicas para uso na construção civil. A adição de 25% do volume de brita por endocarpo da macaúba proporcionou um bio-concreto com

resistência à compressão de aproximadamente 30 MPa, estando dentro da faixa de resistência necessária para aplicação como concreto estrutural na construção civil.

## REFERÊNCIAS

ABREU, I. S. et al. First karyotype, DNA C-value and AT/GC base composition of macaw palm (*Acrocomia aculeata*, Arecaceae) a promising plant for biodiesel production. **Australian Journal of Botany**, v. 59, n. 2, p. 149–155, 2011.

AMARAL, F. P. DO. **Estudo das características físico-químicas di óleos da amêndoa e polpa da macaúba [*Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. ex Mart]**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”. Botucatu, p. 52. 2007. Disponível em: <  
[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90468/amaral\\_fp\\_me\\_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/90468/amaral_fp_me_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y)> Acesso em: 24 de mar. 2021.

AMZIANE, S.; COLLET, F. (ED.). **Bio-aggregates based building materials: state-of-the-art report of the RILEM Technical Committee 236-BBM**. Springer, 2017. v. 23

AMZIANE, S.; SONEBI, M. Overview on bio-based building material made with plant aggregate. **RILEM Technical Letters**, v. 1, p. 31–38, 2016.

ANDREOLA, V. M. **Caracterização física, mecânica e ambiental de bio-concretos de bambu**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 100. 2017. Disponível em: <  
<http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/mestrado/2017-1/2928-andreola-vm-tm-17/file>> Acesso em: 22 de mar. 2021.

ANDREOLA, V. M.; DA GLORIA, M. Y. R.; TOLEDO FILHO, R. D. **Desenvolvimento de biocompósitos contendo partículas de bambu**. II Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis. João Pessoa: 2016.

A. ARBELAIZ, B. FERNÁNDEZ, J.A. RAMOS, I. MONDRAGON. Thermal and crystallization studies of short flax fibre reinforced polypropylene matrix composites: effect of treatments. **Thermochim. Acta**. V. 404, p.111–121.2006.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12006: cimento: determinação do calor de hidratação pelo método de garrafa de Langavant**. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778: argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura e determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Argamassa e concreto—determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 1994.

ASTM INTERNATIONAL. **D2395-17: Standard Test methods for density and specific gravity (relative density) of wood and wood-based materials.** In: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

BARBOZA, M. R., BASTOS, P. S. Traços de concreto para obras de pequeno porte. **Concreto e Construção**, v.36, p.32-36. 2008.

BERALDO, A. L. Compuestos biomasa vegetal y cemento B. **Aprovechamiento de residuos agroindustriales como fuente sostenible de materiales de construcción**, v. 1, p. 301–326, 2011.

BERTOLINI, M. DA S. et al. Wood-Cement Composites from Wastes of Pinus Sp. Wood: Effect of Particles Treatment. **International Journal of Materials Engineering**, v. 4, n. 2, p. 146–149, 1 abr. 2014.

BLANKENDAAL, T.; SCHUUR, P.; VOORDIJK, H. Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: A scenario approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 66, p. 27–36, 1 mar. 2014.

BOIX, E. et al. Influence of chemical treatments of miscanthus stem fragments on polysaccharide release in the presence of cement and on the mechanical properties of bio-based concrete materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 105, 1 jan. 2020.

BROWNING, B. **The Chemistry Of Wood**; Interscience (Wiley), 1963.

BUCHANAN, M.W.G.C. **Solvent extractives of wood and pulp (Proposed revision of T 204 cm-97)**, Draft 2; TAPPI, p. 339, 2007.

CALDAS, L. R. et al. Bamboo bio-concrete as an alternative for buildings' climate change mitigation and adaptation. **Construction and Building Materials**, v. 263, 10 dez. 2020.

CALDAS, L. R. et al. Environmental impact assessment of wood bio-concretes: Evaluation of the influence of different supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 268, 25 jan. 2021.

CARGNIN, A.; JUNQUEIRA, N. T. V.; FOGAÇA, C. M. Potencial da macaubeira como fonte de matéria-prima para produção de biodiesel. **Embrapa Cerrado - Documentos (INFOTECA-E)**, 2008.

CASTRO, V., ARAÚJO, R. D., PARCHEN, C., IWAKIRI, S. Evaluation of pretreatment effects of Eucalyptus benthamii Maiden & Cabbage wood on the compatibility degree with Portland cement. **Revista Árvore**, v. 38, n. 5, p. 935-942, 2014.

CONCEIÇÃO, L. D. H. C. S. DA et al. **Potencial da Macaúba e avaliação de maciços**. Congresso Brasileiro de Macaúba. Patos de Minas: Embrapa Agroindústria de Alimentos-Artigo em anais de congresso (ALICE), jan. 2013.

COSTA, J. M. C.; OLIVEIRA, D. M.; COSTA, L. E. C. Macauba Palm—*Acrocomia aculeata*. In: RODRIGUES, S.; SILVA, E. DE O.; BRITO, E. S. (Eds.). **Exotic Fruits**. 1. ed. Londres: Academic Press, 2018. v. 1p. 297–304.

DA GLORIA, M. Y. R. **Desenvolvimento e caracterização de painéis sanduíches de concreto com núcleo leve e faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 115. 2015. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/documents2/mestrado/2015/2588-gloria-myr-tm-15-pdf>> Acesso em: 22 ago.2020.

DA GLORIA, M. Y. R. et al. A comprehensive approach for designing workable bio-based cementitious composites. **Journal of Building Engineering**, v. 34, n. 101696, p. undefined, 1 fev. 2021.

DIN, E. N. 196-1: 2016-11. **Methods of testing cement- Part I**, v. 1, p. 196-1.

DONALDSON, L. A. Lignification and lignin topochemistry—an ultrastructural view. **Phytochemistry**, v. 57, n. 6, p. 859-873, 2001.

DUARTE, S. et al. Alteration of physico-chemical characteristics of coconut endocarp — *Acrocomia aculeata* — by isothermal pyrolysis in the range 250–550 °C. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 126, p. 88–98, 1 jul. 2017.

EVARISTO, A. B. et al. Energy potential of the macaw palm fruit residues and their use in charcoal production. **Ciencia Florestal**, v. 26, n. 2, p. 571–577, 1 abr. 2016.

FAN, M. et al. Cement-bonded composites made from tropical woods: Compatibility of wood and cement. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 135–140, 1 nov. 2012.

FERREIRA, S. R., LIMA, P. R. L., SILVA, F. A., TOLEDO FILHO, R. D. Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 17, p. 1024-1034, 2012.

FERREIRA, S. R., DE ANDRADE SILVA, F., LIMA, P. R. L., TOLEDO FILHO, R. D. Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber–matrix bond in cement based systems. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 730-740, 2015.

FERREIRA, S. R. et al. Influence of natural fibers characteristics on the interface mechanics with cement based matrices. **Composites Part B: Engineering**, v. 140, p. 183–196, 1 maio 2018.

FERREIRA, S. R. et al. Pull-out behavior and tensile response of natural fibers under different relative humidity levels. **Construction and Building Materials**. v.308, p.124823. 2021.

FLORES-JOHNSON, E. A. et al. Microstructure and mechanical properties of hard *Acrocomia mexicana* fruit shell. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, 1 dez. 2018.

FONTES, C. M. A.; TOLEDO FILHO, R. D.; BARBOSA, M. C. Cinza de lodo de esgoto (CLE) em concretos de alto desempenho: caracterização e aplicação. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 9, p. 989-1006, 2016.

GERIN, M.T.; SALES, A.; DE NARDIN, S. Mechanical and Physical Properties of Recycled Aggregates Concrete. **Revista Tecnológica**, v.29, n. 1, p.259-274. 2020.

GONÇALVES, A. P. B. et al. Physicochemical, Mechanical and Morphologic Characterization of Purple Banana Fibers. **Materials Research**, v. 18, p. 205–209, 1 dez. 2015.

GRAM, H.-E. **Durability of natural fibres in concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concret Research Institute, 1983. v. 1

GRAY, M. **Acrocomia aculeata - Pacsoa**. Disponível em: <[http://www.pacsoa.org.au/w/index.php?title=Acrocomia\\_aculeata](http://www.pacsoa.org.au/w/index.php?title=Acrocomia_aculeata)>. Acesso em: 2 dez. 2020.

HABERT, G. et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 1, n. 11, p. 559–573, nov. 2020.

HIRAMATSU, Y.; OKA, Y. Determination of the tensile strength of rock by a compression test of an irregular test piece. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 3, n. 2, p. 89–90, 1 maio 1966.

IWAKIRI, S. et al. Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* “Paricá” e *Cecropia hololeuca* “Embaúba” para produção de painéis cimento-madeira. **Cerne**, v. 18, n. 2, p. 303–308, jun. 2012.

JENNINGS, J. S.; MACMILLAN, N. H. A tough nut to crack. **Journal of materials science**, v. 21, p. 1517–1524, 1986.

KANTAUTAS, A.; VAICKELIONIS, G. Modified sawdust concrete. **Statyba**, v. 6, n. 2, p. 113–119, 1 jan. 2000.

KARADE, S. R. Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 8, p. 1323–1330, ago. 2010.

KOCHOVA, K. et al. Effect of saccharides on the hydration of ordinary Portland cement. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 268–275, 30 set. 2017.

LPF - Laboratório de Produtos Florestais (Serviço Florestal Brasileiro – SFB). Disponível em: <https://lpf.florestal.gov.br/ptbr/madeiras-brasileiras>. Acesso em: 15 jun 2022.

LIMA, A. J. M. DE L. et al. Studies on the durability of wood-cement particleboards produced with residues of *Pinus* spp., Silica Fume, and Rice Husk Ash. **BioResources**, v. 15, n. 2, p. 3064–3086, 2020.

Lopes, O. R. **Influência dos extrativos e da relação cerne/alburno nas análises da madeira por espectroscopia de infravermelho próximo para produção de celulose**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Tecnologia e utilização de produtos florestais. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p.103. 2008. Disponível em: <http://locus.ufv.br/handle/123456789/3049>. Acesso em: 15 jun. 2022

LORENZI, G. M. A. C. **Acrocomia aculeata (Jacq.) Lodd. ex Mart. - Aracaceae: Bases para o extrativismo sustentável**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Fitotecnia e Fitossanitaríssimo. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 166. 2006. Disponível em: <<https://www.sapili.org/livros/pt/cp035426.pdf>> Acesso em: 15 mar. 2021

LOURENÇO, A.; PEREIRA, H. Compositional variability of lignin in biomass. **Lignin-trends and applications**. p. 65-98. 2018.

MARAVEAS, C. Production of sustainable construction materials using agro-wastes. **Materials**, v. 13, n. 2, p. 262–291, 1 jan. 2020.

MARINHO, N. P., NISGOSKI, S., KLOCK, U., ANDRADE, A. S. D., & MUÑIZ, G. I. B. D. Análise química do bambu-gigante (*dendrocalamus giganteus wall. ex munro*) em diferentes idades. **Ciência Florestal**, v. 22, p. 417-422. 2012.

MERTA, I.; KOPECSKÓ, K.; TSCHEGG, E. K. **Durability of hemp fibers in the alkaline environment of cement matrix**. (J. Barros, Ed.)8th RILEM international symposium on fibre reinforced concrete. **Anais...**Guimarães, Portugal: 2012. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/profile/Katalin-Kopecsko-2/post.pdf>>. Acesso em: 7 set. 2021

MEYER, C. The greening of the concrete industry. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 8, p. 601–605, set. 2009.

MO, K. H. et al. Green concrete partially comprised of farming waste residues: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 117, p. 122–138, 20 mar. 2016.

MONTEIRO, P. J. M.; MILLER, S. A.; HORVATH, A. Towards sustainable concrete. **Nature Materials**, v. 16, n. 7, p. 698–699, 1 dez. 2017.

MONTOYA, S. G. et al. Fruit development, growth, and stored reserves in macauba palm (*Acrocomia aculeata*), an alternative bioenergy crop. **Planta**, v. 244, n. 4, p. 927–938, 1 out. 2016.

MOREIRA, J. B. D.; DE REZENDE, D. B.; PASA, V. M. D. Deoxygenation of Macauba acid oil over Co-based catalyst supported on activated biochar from Macauba endocarp: A potential and sustainable route for green diesel and biokerosene production. **Fuel**, v. 269, p. 117253, 2020.

MOSLEMI, A. A.; GARCIA, J. F.; HOFSTRAND, A. D. Effect of Various Treatments and Additives on Wood-Portland Cement-Water Systems. **Wood and Fiber Science**, p. 164–176, 1983.

MWAIKAMBO, L. Y.; ANSELL, M. P. Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. **Journal of applied polymer science**, v. 84, n. 12, p. 2222-2234, 2002.

MOTA, C. S. et al. Exploração sustentável da macaúba para produção de biodiesel: colheita, pós-colheita e qualidade dos frutos. **Informe Agropecuário**, v. 32, n. 265, p. 41–51, nov. 2011.

MOTTA, P. E. F. DA et al. Ocorrência da macaúba em Minas Gerais: relação com atributos climáticos, pedológicos e vegetacionais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 7, p. 1023–1031, jul. 2002.

MOURA, E. F. et al. Somatic embryogenesis in macaw palm (*Acrocomia aculeata*) from zygotic embryos. **Scientia Horticulturae**, v. 119, n. 4, p. 447–454, 17 fev. 2009.

NUCCI, S. M. **Desenvolvimento, caracterização e análise da utilidade de marcadores microssatélites em genética de população de macaúba**. Dissertação (Mestrado em Genética, Melhoramento Vegetal e Biotecnologia). Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas, p.84. 2007. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/areadoinstituto/posgraduacao/repositorio/storage/pb1206305.pdf>> Acesso em: 15 mar. 2021

OLIVER, W. C.; PHARR, G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. **Journal of Materials Research**, v. 19, n. 1, p. 3–20, 2004.

PEPE, M. et al. Mechanical behaviour of coarse, lightweight, recycled and natural aggregates for concrete. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials**, v. 173, n. 2, p. 70–78, 1 abr. 2020.

POETSCH, J. et al. *Acrocomia aculeata*-a sustainable oil crop. **Rural**, v. 21, n. 3, p. 41–44, 2012.

PLACET, V.; CISSÉ, O.; BOUBAKAR, M. L. Nonlinear tensile behaviour of elementary hemp fibres. Part I: Investigation of the possible origins using repeated progressive loading with in situ microscopic observations. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 56, p. 319-327, 2014.

RAIA, R. Z. et al. Effects of alkali treatment on modification of the *Pinus* fibers. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 1, 12 mar. 2021.

RIOS, R. D. F. et al. **Adsorção de fenol no carvão ativado produzido a partir do endocarpo do fruto da macaúba**. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Florianópolis : COBEQ 2014, out. 2014. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/de9e/18e2ff722d0c033ab517c5522289968e1c18.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2020

SANTOS, D. et al. Compressive stress strain behavior of workable bio-concretes produced using bamboo, rice rusk and wood shavings particles. **Academic Journal of Civil Engineering**, v. 35, n. 2, p. 211–217, 2017.

SANTOS, F. A. et al. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, v. 35, n. 5, p. 1004–1010, 2012.

- SCARIOT, A. O.; LLERAS, E.; HAY, J. D. Reproductive biology of the palm *Acrocomia aculeata* in Central. **Biotropica**, v. 23, n. 1, p. 12–22, 1991.
- SHAFIGH, P. et al. Agricultural wastes as aggregate in concrete mixtures - A review. **Construction and Building Materials**, v. 53, p. 110–117, 28 fev. 2014.
- SILVA, J. DE C. E; BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. Endocarpos de babaçu e de macaúba comparados a madeira de *Eucalyptus grandis* para a produção de carvão vegetal. **Ipef**, v. 34, p. 31–34, dez. 1986.
- SILVA, N. A. **Estudo da aderência bambu-bioconcreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 129. 2019. Disponível em: < <http://www.coc.ufrj.br/en/documents2/mestrado/2019-1/3577-silva-na-tm-19>> Acesso em: 22 de ago. 2022.
- SILVEIRA, M. et al. Use of alternative aggregate for lightweight concrete production. **Academic Journal of Civil Engineering**, v. 37, n. 2, p. 576–582, 2019.
- SIMPSON, W.; TENWOLDE, A. Physical properties and moisture relations of wood. **Chapter 3**, p. 2-1. 1999.
- SÔNEGO, M. **Biomimetism of Brazil nutshell (*Bertholletia excelsa*)**. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharias de materiais) – Departamento de Ciências Exatas e de Tecnologia. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, p. 137. 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/13153> Acesso em: 2 dez. 2020.
- STANCATO, A. C. **Caracterização de compósitos à base de resíduos vegetais e argamassa de cimento modificada pela adição de polímeros para a fabricação de blocos vazados**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 234. 2006. Disponível em: < <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/257149>> Acesso em: 23 mar. 2021
- TAVARES, L. M. Chapter 1 Breakage of Single Particles: Quasi-Static. **Handbook of Powder Technology**, v. 12, p. 3–68, 1 jan. 2007.
- TAPPI. **Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525° 340 C (Five-year review of T 211 om-02)**, Draft 2; p. 27-342, 2007.
- TAPPI. **Acid-insoluble lignin in wood and pulp, Draft 2**; 2006.
- TOLEDO FILHO, R. D. et al. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. **Cement e Concrete Composites**, v. 22, p. 127–143, 2000.
- TOLEDO FILHO, R. D. et al. Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 6, p. 2409–2420, jun. 2009.
- TORRES, A.; HU, J.; RAMOS, A. The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 850-859, 2015.

VAICKELIONIS, G.; VAICKELIONIENE, R. Cement hydration in the presence of wood extractives and pozzolan mineral additives. **Ceramics - Silikáty**, v. 50, n. 2, p. 115–112, 30 mar. 2006.

VIANNA, S. A.; CAMPOS-ROCHA, A. **Flora do Brasil - Acrocomia aculeata (Jacq.) Lodd. ex Mart.** Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/listaBrasil>>. Acesso em: 2 dez. 2020.

VILAS BOAS, M. et al. Efeito da temperatura de carbonização e dos resíduos de macaúba na produção de carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 481–490, 2010.

VO, L. T. T.; NAVARD, P. Treatments of plant biomass for cementitious building materials – A review. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 161–176, 15 set. 2016.

WEI, J.; MEYER, C. Degradation mechanisms of natural fiber in the matrix of cement composites. **Cement and Concrete Research**, v. 73, p. 1–16, 2015.

YILMAZ, M.; BAKIŞ, A. Sustainability in Construction Sector. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 195, p. 2253–2262, 3 jul. 2015.