



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

Maíta dos Santos Rosa

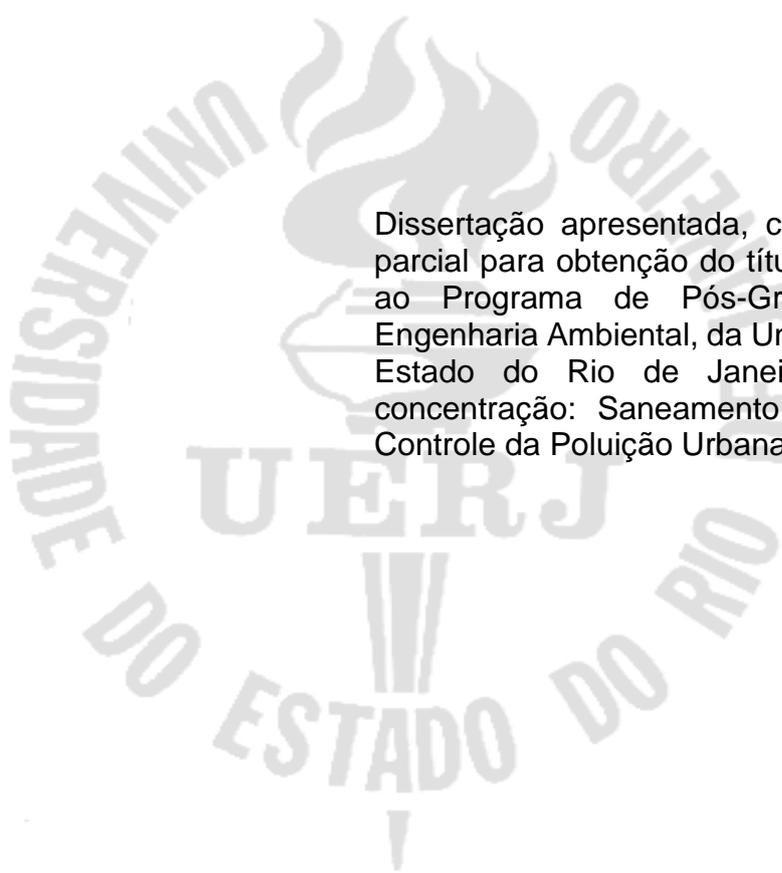
**Investigação de propriedades físicas e mecânicas de um compósito
cimentício produzido a partir do aproveitamento da biomassa de
resíduos de coco**

Rio de Janeiro

2024

Maíta dos Santos Rosa

**Investigação de propriedades físicas e mecânicas de um compósito cimentício
produzido a partir do aproveitamento da biomassa de resíduos de coco**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental – Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Orientadora: Prof.^a Dra. Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk

Coorientador: Prof. Dr. Romildo Dias Toledo Filho

Rio de Janeiro

2024

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

R788 Rosa, Maíta dos Santos.
Investigação de propriedades físicas e mecânicas de um compósito cimentício produzido a partir do aproveitamento da biomassa de resíduos de coco / Maíta dos Santos Rosa. – 2024.
89 f.

Orientadora: Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk.
Coorientador: Romildo Dias Toledo Filho.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia ambiental - Teses. 2. Biomassa - Teses. 3. Coco - Produtos - Teses. 4. Cimento - Teses. 5. Construção sustentável - Teses. I. van Elk, Ana Ghislane Henriques Pereira. II. Toledo Filho, Romildo Dias. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia. IV. Título.

CDU 628.477

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Maíta dos Santos Rosa

**Investigação de propriedades físicas e mecânicas de um compósito cimentício
produzido a partir do aproveitamento da biomassa de resíduos de coco**

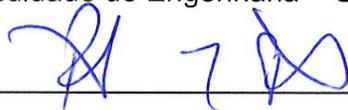
Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Saneamento Ambiental – Controle da Poluição Urbana e Industrial.

Aprovada em 20 de maio de 2024.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br ANA GHISLANE HENRIQUES PEREIRA VAN ELK
Data: 27/06/2024 09:38:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dra. Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ



Prof. Dr. Romildo Dias Toledo Filho (Coorientador)
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Documento assinado digitalmente
gov.br MARGARETH DA SILVA MAGALHAES
Data: 05/07/2024 03:41:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dra. Margareth da Silva Magalhães
Faculdade de Engenharia – UERJ



Dr. M'hamed Yassin Rajiv da Gloria
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Documento assinado digitalmente
gov.br RONEI DE ALMEIDA
Data: 05/07/2024 13:47:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ronei de Almeida
Faculdade de Engenharia – UERJ

Documento assinado digitalmente
gov.br VERUSCHKA ESCARIO DESSOLES MONTEIRO
Data: 04/07/2024 11:07:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dra. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro
Universidade Federal de Campina Grande

Rio de Janeiro

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus, pois sem Ele eu nada poderia fazer. À Nossa Senhora pelo amparo e intercessão.

Aos meus pais, Benite e Valdenilza, por todo apoio e compreensão que tornaram esta jornada um pouco mais leve. À minha irmã, Milena, por ser alguém com quem sempre posso contar.

Agradeço à minha orientadora, Professora Ana Ghislane Van Elk, por acreditar em mim, por seu incentivo e otimismo que tantas vezes me ajudaram a prosseguir, pelas oportunidades concedidas, pela compreensão e por toda a orientação.

Agradeço ao Professor Romildo Toledo Filho pela oportunidade incrível de poder realizar o programa experimental no NUMATS/UFRJ e por ter aceitado a coorientação. Agradeço a todos do NUMATS que contribuíram direta ou indiretamente por esta concretização, agradeço por toda bondade e solicitude que sempre encontrei.

Agradeço à UERJ, ao PEAMB, aos professores por todo o conhecimento transmitido.

Agradeço à empresa Vero Coco pelo fornecimento das cascas de coco usadas nesta pesquisa.

À banca examinadora por aceitar participar e trazer suas contribuições.

RESUMO

ROSA, Maíta dos Santos. **Investigação de propriedades físicas e mecânicas de um compósito cimentício produzido a partir do aproveitamento da biomassa dos resíduos de coco.** 2024. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

O consumo de coco no Brasil gera uma quantidade significativa de resíduos sólidos. Apesar do resíduo de coco ser orgânico, esse tipo de biomassa possui uma lenta biodegradação. Sua destinação final inadequada pode causar impactos, como contaminação do solo e contribuir para a proliferação de vetores que transmitem doenças. O grande volume de resíduos de coco gerado, quando destinado a aterros sanitários reduz sua vida útil. A casca do coco possui potencial para ser usada como insumo para outras indústrias, como a indústria da construção civil, que tradicionalmente possui alta demanda por recursos naturais não-renováveis. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo investigar propriedades de um compósito cimentício produzido com biomassa proveniente de uma indústria de água de coco. Trata-se do mesocarpo do coco, que passou por beneficiamento, tratamento e caracterização para a produção de compósitos com fração volumétrica de 30%, 35% e 40% de biomassa, juntamente com a parcela aglomerante (30% de cimento, 30% de metacaulinita e 40% de cinza volante). No estado fresco, investigou-se a consistência das misturas. No estado endurecido, investigaram-se as seguintes propriedades físicas: densidade aparente; absorção total de água; índice de vazios e massa específica; e as propriedades mecânicas: resistência à compressão uniaxial e resistência à tração na flexão. De forma geral, observou-se redução nos valores das propriedades mecânicas e da densidade aparente, e aumento no índice de vazios e na absorção de água, com o aumento da fração volumétrica de biomassa. Os valores de resistência à compressão variaram de 3,44 MPa a 10,26 MPa aos 28 dias; e a densidade aparente variou de 1,06 g/cm³ a 1,29 g/cm³. Os resultados indicam um potencial uso para os resíduos de biomassa do mesocarpo do coco na construção civil, principalmente para elementos de vedação, como painéis, com função não estrutural.

Palavras-chave: Resíduos de coco; Resíduos de biomassa; Bioconcreto; Compósito; Materiais sustentáveis; Construção sustentável.

ABSTRACT

ROSA, Maíta dos Santos. **Investigation of physical and mechanical properties of a cementitious composite produced from the coconut waste biomass.** 2024. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Coconut consumption in Brazil generates a significant amount of solid waste. Despite the coconut waste being organic, this type of biomass has slow biodegradation. Its inadequate final disposal can cause impacts, such as soil contamination, and contribute to the proliferation of vectors that transmit diseases. The large volume of coconut waste generated when sent to landfills reduces their useful life. The coconut waste has the potential to function as an input for other industries, such as the construction industry, which traditionally has a high demand for non-renewable natural resources. In this context, the present work aims to develop and investigate the properties of a bio-based cementitious composite produced with coconut mesocarp from a specific coconut water industry. Coconut mesocarp was processed, treated and characterized for the production of composites with a volumetric fraction of 30%, 35% and 40% of biomass, together with the binding portion (30% cement, 30% metakaolinite and 40% fly ash). In the fresh state, the consistency of the mixtures was investigated. In the hardened state, the following mechanical properties were investigated: uniaxial compression strength and flexural tensile strength; and physical properties: bulk density; total water absorption; void index and specific mass. In general, it was observed a reduction in the values of mechanical properties and bulk density, and an increase in the void index and water absorption, with an increase in the volumetric fraction of biomass. Compressive strength values ranged from 3.44 MPa to 10.26 MPa at 28 days; and the apparent density ranged from 1.06 g/cm³ to 1.29 g/cm³. The results indicate a potential use for coconut biomass waste in civil construction, mainly for sealing elements with non-structural functions.

Keywords: Coconut waste; Biomass waste; Bio-based materials; Composite; Sustainable materials; Sustainable construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Partes anatômicas do coco.....	19
Figura 2 – Parte I do método.....	33
Figura 3 - Material bruto recebido	34
Figura 4 – Trituração da biomassa.....	35
Figura 5 – Tratamento do bioagregado.....	36
Figura 6 – Secagem do bioagregado	36
Figura 7 – Homogeneização do bioagregado	37
Figura 8 – Processo de obtenção do bioagregado em condição saturada superfície seca.....	38
Figura 9 – Procedimentos para verificação da condição saturada superfície seca ...	38
Figura 10 – Bioagregado no frasco indicado na norma.....	39
Figura 11 – Secagem da amostra em estufa e posterior pesagem.....	39
Figura 12 – Bioagregado em peneiras	41
Figura 13 - Parte II do método.....	43
Figura 14 – Ensaio de consistência.....	44
Figura 15 – Mistura com 45% de bioagregado na mesa	45
Figura 16 – Materiais para a mistura.....	47
Figura 17 – Instrumentos para ensaio.....	48
Figura 18 – Preenchimento dos moldes com o bioconcreto.....	49
Figura 19 – Corpos de prova cilíndricos endurecidos.	49
Figura 20 – Ensaio de absorção total de água.....	51
Figura 21 – Ensaio de resistência à compressão.....	52
Figura 22 – Ensaio de resistência à tração na flexão.....	54
Figura 23 - Ensaio de consistência.	59
Figura 24 – Corpos de prova após ensaio de resistência à compressão.....	65
Figura 25 – Corpos de prova após o ensaio de resistência à tração na flexão.	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Produção de coco dos principais países produtores de 2018 a 2022.....	18
Gráfico 2 - Área colhida pelos principais países produtores de coco, de 2018 a 2022,	18
Gráfico 3 - Produtividade dos principais países produtores de coco, de 2018 a 2022,	19
Gráfico 4 – Curvas granulométricas do bioagregado	56
Gráfico 5 - Curvas granulométricas dos materiais cimentícios.....	59
Gráfico 6 – Índice de consistência.....	60
Gráfico 7 - Densidade aparente g/cm ³	61
Gráfico 8 – Curvas tensão versus deformação aos 7 dias.	65
Gráfico 9 - Curvas tensão versus deformação aos 28 dias.	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de biomassa aplicadas no desenvolvimento de materiais para a construção civil em diversos trabalhos.....	25
Quadro 2 - Quantidade e dimensões de corpos de prova.....	48
Quadro 3 - Classes de resistência à compressão para bioconcretos.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção de coco nos estados brasileiros	17
Tabela 2 – Consumo de materiais por m ³ de bioconcreto produzido	46
Tabela 3 - Resumo de propriedades do bioagregado	57
Tabela 4 - Densidade dos materiais cimentícios	58
Tabela 5 - Composição química da cinza volante	58
Tabela 6 – Resultados de absorção total de água, índice de vazios e massa específica	62
Tabela 7 - Resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade	63
Tabela 8 – Módulo de ruptura	67

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
1.1 Origem, produção e consumo de coco no Brasil	16
1.2 Geração de resíduos de biomassa de coco	19
1.3 Gerenciamento de resíduos de biomassa de coco.....	20
1.3.1 Valorização de resíduos de biomassa de coco	22
1.4 Bioconcretos	24
1.4.1 Desafios relacionados à aplicação de bioagregados em compósitos.....	26
1.4.2 Propriedades dos bioconcretos	28
2 MATERIAIS E MÉTODOS	32
2.1 Materiais	32
2.2 Métodos	32
2.2.1 Parte I – Bioagregado e materiais cimentícios	33
2.2.1.1 Produção do bioagregado	34
2.2.1.2 Densidade do bioagregado.....	37
2.2.1.3 Absorção de água do bioagregado.....	40
2.2.1.4 Massa específica, granulometria e composição química dos materiais cimentícios.....	42
2.3 Parte II – Bioconcreto	42
2.3.1 Estudo da dosagem do bioconcreto	43
2.3.2 Consumo de materiais.....	45
2.3.3 Produção do bioconcreto.....	46
2.3.4 Ensaio de consistência	47
2.3.5 Moldagem dos corpos de prova	48
2.3.6 Densidade aparente	50
2.3.7 Absorção total de água por imersão, índice de vazios e massa específica.....	50
2.3.8 Resistência à compressão uniaxial, módulo de elasticidade e verificação de possíveis aplicações de acordo com a classe de resistência.....	52
2.3.9 Resistência à tração na flexão.....	53
2.3.10 Análises estatísticas	55
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56

3.1 Bioagregados	56
3.2 Materiais cimentícios.....	57
3.3 Bioconcreto	59
3.3.1 Consistência	59
3.3.2 Densidade aparente	61
3.3.3 Absorção total de água por imersão, índice de vazios e massa específica.....	61
3.3.4 Resistência à compressão uniaxial, módulo de elasticidade e verificação de possíveis aplicações de acordo com a classe de resistência.....	62
3.3.5 Resistência à tração na flexão.....	66
CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS.....	70
ANEXO I.....	78

INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de coco. Em 2022 o país produziu 2.744.418 toneladas, se situando em 4º lugar em relação aos demais países produtores de coco (FAOSTAT, 2023). De acordo com Brainer (2018), no Brasil a produção é destinada à obtenção de coco seco *in natura*, água de coco e derivados, como por exemplo, o coco ralado.

Com a elevada produção, o consumo de coco e de produtos derivados gera uma quantidade significativa de resíduos. As cascas de coco representam em média 85% da massa do fruto (AYRILMIS et al., 2011). São constituídas por material fibroso, com alto teor de lignina e celulose (OLIVEIRA, 2017). Apesar de ser um resíduo orgânico, sua biodegradação é lenta, levando de 8 a 10 anos para decompor-se (NUNES; SANTOS; SANTOS, 2007).

Dentre os impactos que os resíduos de coco podem causar quando não recebem destinação final ambientalmente adequada, encontram-se: poluição visual, obstrução de sistemas de drenagem urbana, proliferação de vetores que transmitem doenças, contaminação do solo e de corpos hídricos; e quando encaminhados a aterros sanitários, esses resíduos contribuem para a redução de sua vida útil (LEITÃO et al., 2010).

De acordo com Lacerda e Leitão (2021), uma das principais formas estudadas de aproveitamento de resíduos de casca de coco é na produção de agregados e isolantes térmicos para a construção civil. O uso da biomassa de resíduos de coco pode contribuir para a redução da poluição do meio ambiente, tendo em vista a quantidade de resíduos gerados (TALHA; SULAIMAN, 2018).

Ao longo dos anos diversos autores investigaram o uso de fibras vegetais como reforço em compósitos, como Toledo Filho, England e Ghavami (1997), Lima (2004), e Asim et al. (2020). Porém, existe uma categoria de material alternativo produzido com aplicação de fração volumétrica de biomassa mais elevada em compósitos: o “bioconcreto”. Nesse caso, a biomassa é beneficiada para ser aplicada como agregado, sendo chamada então de “bioagregado”.

Estima-se que a construção civil é responsável pelo consumo de 40% de todo o recurso natural disponível no planeta (BOŠKOVIĆ; RADIVOJEVIĆ, 2023). E os bioagregados usados na produção dos bioconcretos possuem a vantagem de serem

produzidos a partir de matéria-prima renovável, que pode ser resíduo de atividades agroindustriais (BRASILEIRO; VIEIRA; BARRETO, 2013; SILVEIRA et al., 2018; TOLEDO FILHO; DA GLORIA; ANDREOLA, 2019; SÁ, 2022).

Bioconcretos podem ser considerados materiais de baixa densidade, baixa condutividade térmica e desempenho mecânico adequado (TOLEDO FILHO; Da GLORIA; ANDREOLA, 2019). O material possui potencial para contribuir com a regulação de temperatura e umidade de ambientes internos, proporcionando conforto ao usuário e melhorando a eficiência energética de edificações (SÁ, 2022).

Segundo Da Gloria (2020), bioconcretos de madeira começaram a ser produzidos na Europa no final da década de 70, como elementos construtivos no formato de painéis. De acordo com Sá (2022), na Europa e no Canadá é avançado o uso do bioconcreto de cânhamo, e existem empresas especializadas na produção de blocos pré-fabricados e na aplicação das misturas *in-loco* em paredes por jateamento. Brasileiro, Vieira e Barreto (2013) produziram compósito de cimento e medula de coco e concluíram que esses compósitos podem ser utilizados para a produção de materiais de construção leves e não estruturais. Andreola (2017) desenvolveu e caracterizou bioconcretos de alta trabalhabilidade usando bioagregado de bambu e ressalta a influência do volume de partículas de biomassa sobre a resistência mecânica. Santos (2020) produziu bioconcretos contendo 50%, 60% e 70% de bioagregado de casca de arroz, e relatou que os bioconcretos apresentaram baixa densidade e também baixa resistência mecânica, mas suficiente para o uso em questão. Abbas et al. (2020) e Sá (2022) destacam a importância do aprofundamento de estudos que utilizem outras biomassas em bioconcretos, de acordo com a realidade de cada localidade.

Nesse contexto, tendo em vista o quão significativo é o volume de resíduos gerados a partir do consumo do coco, e a necessidade de soluções que minimizem os impactos desses resíduos ao meio ambiente, mostra-se fundamental a realização de estudos que investiguem as propriedades de compósitos produzidos com frações elevadas de biomassa de coco, a fim de se verificar a viabilidade técnica desse material para a construção civil.

Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral investigar propriedades físicas e mecânicas de um compósito cimentício produzido a partir do aproveitamento da biomassa de resíduos de coco.

Objetivos Específicos

- Produzir um bioagregado a partir do mesocarpo do coco;
- Desenvolver um compósito cimentício (bioconcreto) com o bioagregado produzido;
- Verificar a influência da fração volumétrica do bioagregado em propriedades físicas e mecânicas do bioconcreto;
- Identificar possibilidades de aplicação do bioconcreto produzido, a partir da resistência à compressão obtida.

Estrutura da Dissertação

Este trabalho está dividido em três capítulos. No primeiro é apresentado a fundamentação teórica, onde é abordada: a origem, a produção e o consumo do coco no Brasil; a geração de resíduos de biomassa de coco, bem como o gerenciamento desses resíduos no Brasil; o conceito de bioconcreto, perpassando pelos desafios e soluções recorrentes e pelas propriedades desse material.

No segundo capítulo são apresentados os materiais usados no programa experimental, e os métodos: para preparo e caracterização do bioagregado; para caracterização dos materiais cimentícios; para investigação das propriedades físicas (densidade aparente, absorção total de água, índice de vazios, massa específica) e mecânicas (resistência à compressão uniaxial e resistência à tração na flexão) dos bioconcretos; para as análises estatísticas.

No terceiro capítulo são apresentados os resultados e realizadas as discussões pertinentes.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Origem, produção e consumo de coco no Brasil

O coco, também conhecido popularmente como coco-da-baía, é o fruto do coqueiro, que tem por nome científico *cocos nucifera* L. A literatura aponta o Sudeste Asiático como provável local de origem do coqueiro, e que sua introdução no Brasil ocorreu a partir de 1553 (FONTES; FERREIRA, 2006). A introdução do coqueiro no Brasil ocorreu na Bahia, e a partir de então houve uma expansão, inicialmente pelo litoral nordestino e posteriormente por quase todo o país (BRAINER, 2018).

A região nordeste do Brasil é responsável por cerca de 70% da produção nacional de coco (BRAINER; XIMENES, 2020). A Tabela 1 apresenta a produção de coco nos estados brasileiros, conforme dados da produção agrícola de 2022 disponível no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022).

De acordo com os dados da *Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics* (FAOSTAT, 2023), o Brasil encontra-se entre os cinco maiores produtores de coco do mundo desde 1995, e em 2022 ficou em 4º lugar, com 2.744.418 t de coco produzidas. O Gráfico 1 apresenta a produção de coco, de 2018 a 2022, dos cinco países que mais produziram coco no mundo (FAOSTAT, 2023). O Gráfico 2 apresenta a área colhida em hectares referente à produção de coco nesses países, e o Gráfico 3 mostra a produção por hectare.

Os países que apresentam maior produção de coco possuem extensão de áreas cultivadas superiores às do Brasil, no entanto a produtividade é inferior. Brainer (2018) observou que entre 1990 e 2015 a produção de coco no Brasil cresceu 143,2%, enquanto a área cultivada com coqueiro cresceu apenas 13,2%. O autor atribui o aumento da produtividade a fatores como o uso intensivo de insumos, tecnologias e à utilização das variedades de coqueiro anão verde e do híbrido, quando foram introduzidos novos plantios nas regiões Norte, Sudeste e Centro Oeste. Segundo Fontes e Ferreira (2006) a variedade de coqueiro anão verde se caracteriza por maior produção de frutos por hectare.

Tabela 1 – Produção de coco nos estados brasileiros

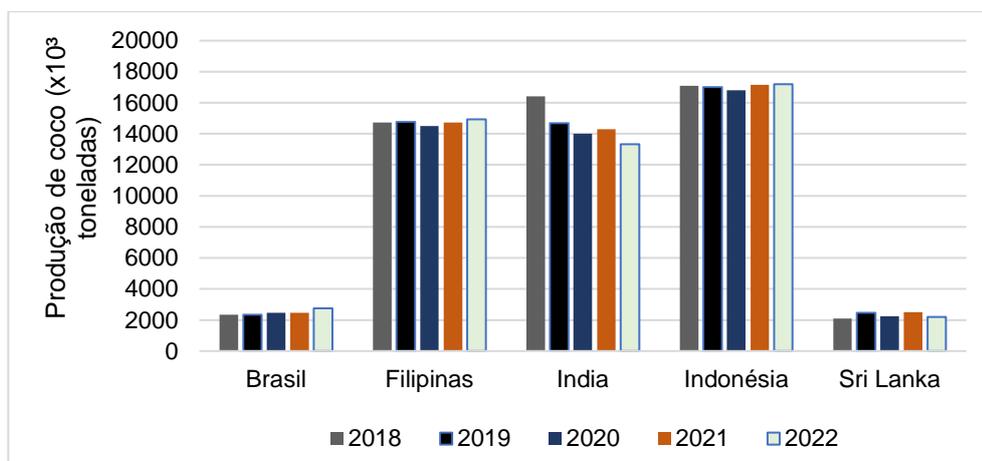
ESTADO	QUANTIDADE PRODUZIDA (mil frutos)	ÁREA COLHIDA (ha)	PRODUTIVIDADE (frutos.ha⁻¹)
CEARÁ	572.328	42.520	13.460
BAHIA	340.941	36.706	9.288
PARÁ	175.022	17.424	10.045
SERGIPE	140.245	20.989	6.682
ESPÍRITO SANTO	123.954	8.838	14.025
PERNAMBUCO	142.875	7.151	19.980
ALAGOAS	105.201	22.969	4.580
RIO GRANDE DO NORTE	74.507	17.624	4.228
PARAÍBA	53.613	6.297	8.514
RIO DE JANEIRO	27.461	2.036	13.488
MINAS GERAIS	27.714	1.753	14.098
SÃO PAULO	12.960	982	13.198
MATO GROSSO	9.187	711	12.921
PIAUI	7.188	590	12.183
MARANHÃO	5.092	1.281	3.975
TOCANTINS	3.512	243	14.453
GOIÁS	2.320	197	11.777
AMAZONAS	1.893	439	4.312
RONDÔNIA	3.142	268	11.724
PARANÁ	1.080	182	5.934
ACRE	1.396	196	7.122
RORAIMA	615	77	7.987
MATO GROSSO DO SUL	366	52	7.038
AMAPÁ		sem informação	
DISTRITO FEDERAL		sem informação	
RIO GRANDE DO SUL		sem informação	
SANTA CATARINA		sem informação	

Fonte: IBGE, 2022 (Adaptado).

Segundo Brainer e Ximenes (2020), a produção mundial do coco é destinada principalmente à obtenção da copra (polpa seca do fruto), sendo o óleo e a farinha de coco os principais derivados produzidos. Ainda de acordo com os autores, no Brasil,

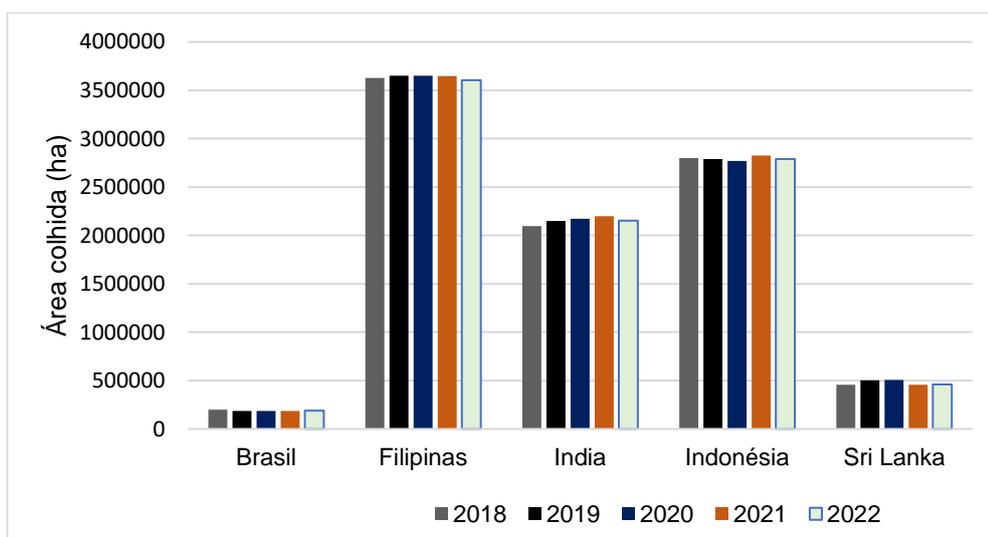
a produção se destina principalmente à obtenção de coco seco *in natura*, coco ralado, leite de coco e água de coco. A água de coco é geralmente obtida a partir da produção de “coco verde” proveniente da variedade de coqueiro anão-verde; o “coco seco”, obtido da variedade coqueiro gigante, é geralmente destinado ao mercado *in natura* e à indústria de alimentos. Já a variedade híbrida, resultado do cruzamento dos tipos anão e gigante, pode ser destinada a ambas finalidades (FONTES; FERREIRA, 2006).

Gráfico 1 - Produção de coco dos principais países produtores de 2018 a 2022 em toneladas.



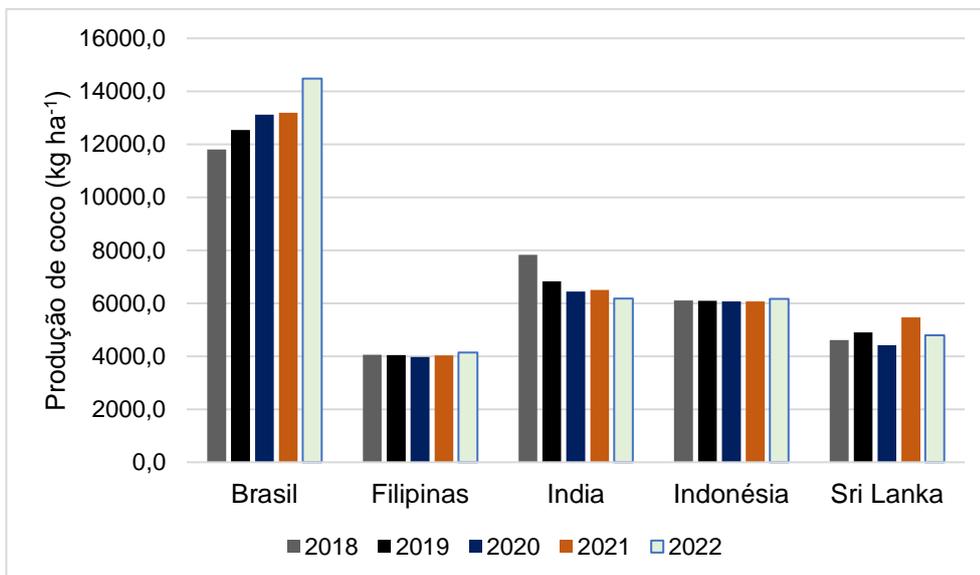
Fonte: FAOSTAT, 2023 (Adaptado).

Gráfico 2 - Área colhida pelos principais países produtores de coco, de 2018 a 2022, em hectares.



Fonte: FAOSTAT, 2023 (Adaptado).

Gráfico 3 - Produtividade dos principais países produtores de coco, de 2018 a 2022, em quilograma por hectares.

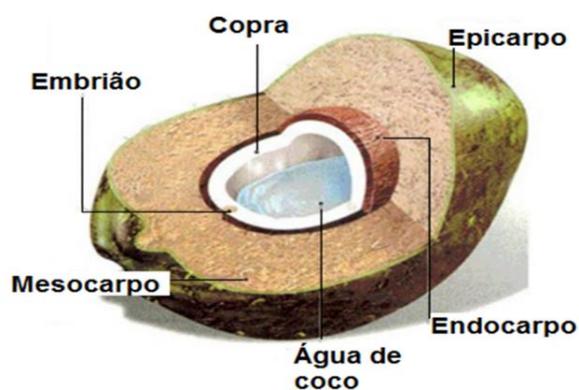


Fonte: FAOSTAT, 2023 (Adaptado).

1.2 Geração de resíduos de biomassa de coco

O consumo da polpa do coco tem como consequência a geração de grandes volumes de resíduo a partir do epicarpo, mesocarpo e endocarpo descartados. Sendo o endocarpo mais significativo no coco seco (com maior tempo de maturação). As partes anatômicas do coco estão ilustradas na Figura 1.

Figura 1 - Partes anatômicas do coco



Fonte: Mattos et al., 2011 (Adaptado).

Apesar de ser um resíduo orgânico, sua biodegradação é lenta, levando de 8 a 10 anos (NUNES; SANTOS; SANTOS, 2007). A destinação final inadequada desses resíduos pode resultar em impactos ambientais, como, poluição visual, obstrução de sistemas de drenagem urbana, proliferação de vetores que transmitem doenças, contaminação do solo e de corpos d'água; e quando destinados aos aterros sanitários contribuem para a redução de sua vida útil (LEITÃO et al., 2010). Pérez Valdovinos et al. (2020) destacam também a alta contaminação devido à grande emissão de CO₂ produzida quando ocorre incineração desses resíduos.

A casca do coco representa, em média, 85% da massa do fruto (AYRILMIS et al., 2011). Segundo Brainer e Ximenes (2020), a massa da casca de coco seco corresponde a cerca de 360 g, enquanto a massa da casca de coco verde corresponde a aproximadamente 1,05 kg. Brainer e Ximenes (2020) estimaram a produção anual de cascas de coco no Brasil para 2020 em torno de 2,7 milhões de toneladas, sendo 74,5% referente à casca de coco verde, cuja biodegradação é mais difícil que a biodegradação das cascas de coco seco. As informações a respeito das quantidades de casca de coco verde descartadas nas áreas onde o coco é consumido geralmente não são precisas, e isso é um fator que dificulta o gerenciamento desses resíduos (NUNES et al., 2020).

1.3 Gerenciamento de resíduos de biomassa de coco

O “gerenciamento de resíduos sólidos” é definido na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) como as ações exercidas nas etapas de manejo dos resíduos, como a coleta, o tratamento e a disposição final ambientalmente adequada. Essas ações devem estar em consonância com o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos ou com plano de gerenciamento de resíduos sólidos, especificados na mesma Lei (BRASIL, 2010).

Seguindo a classificação da PNRS, os resíduos do coco podem se enquadrar na categoria de resíduos domiciliares, de limpeza urbana, de estabelecimentos comerciais, industriais ou agrossilvopastoris.

De acordo com a PNRS, os resíduos domiciliares e os de limpeza urbana compõem os resíduos sólidos urbanos (RSU). Resíduos comerciais e industriais cuja

composição seja similar à dos resíduos domiciliares também são considerados como RSU. A responsabilidade pelo gerenciamento dos RSU é do órgão ou municipalidade competente. A PNRS exige a elaboração de plano de gerenciamento de resíduos sólidos aos geradores de resíduos que não sejam equiparados pelo poder público municipal aos resíduos domiciliares. A responsabilidade pelos resíduos agrossilvopastoris pertence a seus geradores, aos quais a PNRS exige a elaboração de um plano de gerenciamento de resíduos sólidos, que deve conter, dentre outras exigências, os procedimentos operacionais relativos às etapas do gerenciamento.

Nunes et al. (2020) realizaram pesquisa em campo com aplicação de questionário a fim de levantar informações acerca dos resíduos dos cocos comercializados *in natura*. Os autores consideraram uma amostra de sete municípios do litoral sul da Bahia: Ilheus, Itacaré, Canavieiras, Valença, Itubera, Camamu e Cairu. Eles identificaram que 60% dos estabelecimentos investigados armazenavam os resíduos em sacos de polímero, 26% em barris, 9% em cestos, e 5% descartavam as cascas imediatamente no local da venda do coco, misturando-as ao lixo comum, juntamente com outros materiais recicláveis, inclusive. De acordo com os autores, os resíduos do coco colocados para serem coletados pelo serviço de limpeza urbana eram destinados a um vazadouro a céu aberto, uma vez que não havia aterros sanitários ou práticas de logística reversa, reaproveitamento ou reciclagem em nenhuma das cidades investigadas.

Colombo e Zaccarias (2021) realizaram um estudo de caso no Parque Ibirapuera localizado em São Paulo. As autoras verificaram que não havia um gerenciamento oficial e padronizado dos resíduos de coco gerados no parque pelos 88 pontos de venda do fruto identificados. O principal procedimento adotado era o acondicionamento dos resíduos em recipientes fornecidos pelo parque, e a transferência para caçambas por um funcionário do parque, quando os recipientes se encontravam com a capacidade total atingida. A coleta e a destinação final desses resíduos eram feitas por uma empresa terceirizada que os encaminhavam ao aterro de Caieiras (SP). As autoras também verificaram que havia comerciante que armazenava o resíduo do coco por conta própria e os encaminhavam para uma usina de beneficiamento. Além disso, segundo as autoras, os funcionários do parque também relataram a disposição incorreta desses resíduos pelos usuários do parque, como por exemplo, nos gramados.

No Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) da cidade do Rio de Janeiro, uma parcela de 18% do total de resíduos recebido pelo sistema público municipal no ano de 2021 é classificada como “outros”, que, de acordo com o PMGIRS, engloba o coco (cocos inteiros, cascas, fibras e cachos) como resíduo, dentre outros materiais, como folhas, têxteis e borracha (RIO DE JANEIRO (RJ), 2022). De acordo com as informações do PMGIRS, os resíduos de coco representam 6% dos resíduos classificados como “outros” e 1,02% do total da massa de resíduos sólidos domiciliares coletados na cidade do Rio de Janeiro em 2021. Para esses resíduos especificamente não é citada no PMGIRS nenhuma destinação existente alternativa ao aterro sanitário. Os RSU da cidade do Rio de Janeiro são coletados pela Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB) e enviados a uma empresa terceirizada que fica responsabilizada pela destinação final adequada dos mesmos.

1.3.1 Valorização de resíduos de biomassa de coco

O que a princípio é considerado resíduo de uma indústria pode ser, na realidade, um subproduto gerado, que ao ser valorizado é usado como matéria-prima em outra indústria. Dentre os aspectos que a PNRS traz à lume, encontra-se no artigo terceiro, a definição de destinação final adequada, que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético dos resíduos. Como preconizado pela PNRS, os resíduos devem ser tratados como um recurso, priorizando seu uso como matéria-prima para outros produtos e processos (VAN ELK, 2021).

As propriedades das cascas de coco contribuem para um bom potencial de aproveitamento. São compostas de: celulose (30,58%), hemicelulose (26,70%), lignina (33,30%), água (8,86%) e cinzas (0,56%) (ARENA; LEE; CLIFT, 2016). De acordo com Niro et al. (2016), as fibras compõem 30% do mesocarpo, enquanto a medula (fibras curtas e pó), chega a 70%. De acordo com Udhayasankar e Karthikeyan (2015), o endocarpo do coco seco é composto por celulose (26,6%),

hemicelulose (21,0%), lignina (29,4%), pectina (27,7%), solventes (4,2%), anidridos (3,5%) e cinzas (0,6%).

Lacerda e Leitão (2021) identificaram a partir da literatura que a casca do coco verde pode ser aproveitada principalmente das seguintes formas:

- a) Como biossorventes;
- b) Como substrato alternativo para obtenção do biopolímero xantano;
- c) Na produção de agregados e isolantes térmicos para a construção civil;
- d) Na produção de polpa celulósica;
- e) Na produção de agente adesivo a partir do mesocarpo para a colagem de painéis;
- f) Como filtro anaeróbio no tratamento de efluentes domésticos em áreas rurais;
- g) E na produção de bioetanol, lignina e ramnolipídeos.

Algumas empresas que usam coco como matéria-prima para seus produtos conseguem aproveitar os resíduos em seus próprios processos produtivos. De acordo com Oliveira (2017) as empresas Adel coco (CE), Aquacoco (RN), Sococo (AL/PA), Dikoko (CE/PE) e Cocolândia (MT), por exemplo, usam os resíduos do coco para geração de energia térmica, substrato agrícola nos cultivos, e/ou venda da fibra gerada para empresas que fabricam telhas, mantas para contenção de erosão e briquetes. A empresa Coco Legal (COCO LEGAL, [s.d.]) informa em seu site que desde o início da empresa as cascas de coco são trituradas e utilizadas como adubo orgânico para a plantação que está localizada em Papucaia (Cachoeiras de Macacu/RJ). Segundo a empresa, atualmente ela também adquire cocos que provêm da Bahia e do Espírito Santo, e abastece seus fornecedores com casca de coco triturada. No site da empresa Vero Coco (VERO COCO, c2023) também é informado que a empresa tritura 100% das cascas de coco e produzem adubo orgânico para os próprios coqueirais localizados na Região dos Lagos do Rio de Janeiro.

1.4 Bioconcretos

O uso de biomassa na produção de materiais de construção é uma técnica antiga. Os primeiros usos, como reforço em matrizes frágeis, por exemplo, foram os de palha e capim na produção de adobes (TOLEDO FILHO, 1997). Há relatos de uso de fibras de madeira e palha na Grécia Antiga para aumento da estabilidade (DITTENBER; GANGARAO, 2012; BHATTACHARYYA; SUBASINGHE; KIM, 2015). E do uso de palha e juta durante as arquiteturas indo-muçulmanas para aumentar a ligação e diminuir fissuras (GUPTA; SRIVASTAVA; BISARIA, 2015).

De acordo com Nawab et al. (2023), com o passar do tempo e a evolução da tecnologia, as fibras naturais, mais especificamente, foram sendo substituídas por materiais artificiais como aço, vidro e propileno. Porém, voltaram a ganhar destaque ao se considerar a necessidade de materiais alternativos que contribuam para que a indústria da construção civil cause menos impactos negativos ao meio ambiente. Para Yadav e Agarwal (2021), o uso de materiais de construção à base de biomassa vegetal é um avanço em direção a materiais multifuncionais ecológicos, sustentáveis e eficazes.

Diversos trabalhos têm aprofundado os estudos a respeito da aplicação de diferentes tipos de biomassa vegetal no desenvolvimento de materiais para a construção civil, conforme os exemplos citados no Quadro 1. A biomassa é geralmente usada como reforço de, por exemplo, argamassas e concretos, como geralmente é o caso das fibras. Mas também em maiores quantidades, constituindo o próprio agregado de compósitos (ANDREOLA, 2017; SANTOS, 2020).

Bioconcretos são os compósitos constituídos por agregados produzidos a partir de biomassa vegetal, como bambu, madeira, cânhamo, em conjunto com aglomerantes inorgânicos, como o cimento e a cal (BERALDO, 2014; SÁ, 2022). A introdução de uma elevada concentração de biomassa vegetal na forma de agregado (bioagregado) é o princípio fundamental deste conceito (AMZIANE; SONEBI, 2016).

Em países da Europa e no Canadá é bem difundido o bioconcreto de cânhamo (hempcret ou hemplime), que é aplicado por empresas especializadas, e geralmente é requerido pela característica isolante que possui (AMZIANE; SONEBI, 2016; SÁ, 2022).

Quadro 1 – Tipos de biomassa aplicadas no desenvolvimento de materiais para a construção civil em diversos trabalhos

BIOMASSA	AUTORES
Bambu	<ul style="list-style-type: none"> • Sudin e Swamy, 2006 • Da Gloria et al., 2021 • Sá, 2022
Cânhamo	<ul style="list-style-type: none"> • Sassoni et al., 2014 • Mazhoud et al., 2021
Casca de arroz	<ul style="list-style-type: none"> • Chabannes et al., 2014 • Chabi et al., 2018 • Santos, 2020
Endocarpo do coco	<ul style="list-style-type: none"> • Gunasekaran et al., 2011 • Liu; Li; Ni, 2022 • Pichaipillai et al., 2023
Fibras do mesocarpo do coco	<ul style="list-style-type: none"> • Toledo Filho et al., 1997 • Asim et al., 2020 • Quiñones-Bolaños et al., 2021
Madeira	<ul style="list-style-type: none"> • Aguiar, 2020. • Da Gloria, 2020.
Medula do coco	<ul style="list-style-type: none"> • Brasileiro; Vieira; Barreto, 2013 • Koňáková et al., 2015 • Suazo et al., 2020
Sisal	<ul style="list-style-type: none"> • Lima, 2004. • Melo Filho, 2012. • Frazão et al., 2018
Talo de girassol	<ul style="list-style-type: none"> • Mati-Baouche et al., 2014 • Gomez-Campos et al., 2023

Materiais compósitos apresentam maiores potencialidades que seus constituintes individualmente, e pode-se dizer que há exemplos na própria natureza, como a madeira, que é um compósito fibroso constituído de uma matriz de lignina e pectina reforçada com fibras de celulose (LIMA, 2004).

Bioagregados têm a vantagem de serem produzidos a partir de matéria-prima renovável, geralmente disponível em grande quantidade. Além disso, resíduos agroindustriais, como cascas de arroz e de coco, bem como sobras do processamento de colmos de bambu, podem ser usados como bioagregados (BRASILEIRO; VIEIRA; BARRETO, 2013; SILVEIRA et al., 2018; TOLEDO FILHO; DA GLORIA; ANDREOLA, 2019; SÁ, 2022).

Inicialmente os bioconcretos foram desenvolvidos utilizando-se técnicas de prensagem, que demandavam altos gastos de energia, porém, os estudos avançaram para o desenvolvimento de bioconcretos trabalháveis e moldáveis, a partir de técnicas convencionais de produção de concreto (ANDREOLA, 2017).

Caldas et al. (2017) ressaltam o potencial que os bioconcretos possuem de reduzir a “pegada de carbono” das construções, quando se considera o carbono biogênico da biomassa usada. Além disso, de acordo com Sá (2022), os bioagregados possuem boas propriedades térmicas e higroscópicas, que fazem com que os bioconcretos possuam potencial para contribuir com a regulação de temperatura e umidade de ambientes internos, proporcionando conforto ao usuário e melhorando a eficiência energética de edificações.

1.4.1 Desafios relacionados à aplicação de bioagregados em compósitos

Um dos desafios para a produção de bioconcretos é a incompatibilidade química entre a biomassa vegetal (bioagregado) e o cimento. Isso ocorre porque os extrativos e a hemicelulose presentes na biomassa se dissolvem na água durante a mistura e formam membranas ao redor dos grãos de cimento não hidratados, dificultando o acesso da água a esses grãos, fazendo com que haja inibição ou retardo das reações de hidratação do cimento (DA GLORIA; TOLEDO FILHO, 2021). Por conta disso, foram desenvolvidos estudos a respeito de tratamentos físicos e químicos para os bioagregados, com o objetivo de promover melhora na compatibilidade entre a biomassa usada e a matriz cimentícia.

Beraldo (1997) estudou diferentes tratamentos em partículas de bambu e concluiu que os compósitos produzidos com o bioagregado lavado com água a 80° C

e com cimento CP V ARI apresentaram melhores resultados mecânicos. Da Gloria e Toledo Filho (2021) verificaram a quantidade de ciclos de lavagem de partículas de madeira, com água a 80° C, necessária para que não ocorresse a inibição da hidratação do cimento. Os autores concluíram que três ciclos de lavagem era o mínimo para que ocorresse a hidratação do cimento, e que apenas a partir de cinco lavagens ocorria redução considerável do retardo na hidratação.

Tratamentos químicos também são aplicados aos bioagregados, como a imersão em solução alcalina, como por exemplo de hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Segundo Sá (2022), esse é o método mais comum para a remoção de impurezas orgânicas e fortalecimento da interface entre o bioagregado e a matriz.

Iwakiri et al. (2012) compararam os resultados dos ensaios mecânicos de bioconcretos de bioagregado de madeira que receberam diferentes tratamentos: imersão em água fria por 24 h, imersão em água quente por 6 h e imersão em solução diluída a 1% de hidróxido de sódio. Os autores constataram que os melhores resultados foram obtidos para os bioconcretos cujo bioagregado foi tratado por imersão em água quente. Iwakiri et al. (2015) investigaram o tratamento do bioagregado com hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e constataram maior eficácia em relação aos tratamentos anteriores.

É possível também a criação de uma barreira física que impeça a água de solubilizar os extrativos a partir do revestimento das partículas de bioagregado com produtos repelentes à água ou impermeabilizantes (PIMENTEL, 2000; VO; NAVARD, 2016).

Outro desafio existente na produção de bioconcretos é o de minimizar os efeitos da elevada absorção de água que ocorre nos bioagregados, geralmente acima de 90%, devida à porosidade que as biomassas apresentam (SOUZA, 2006). Por conta dessa característica, costumam-se empregar os bioagregados em condição saturada ou realizar a compensação de água na produção dos bioconcretos. A compensação de água é feita ao se acrescentar uma quantidade de água, além da água de hidratação do cimento, correspondente ao fator água/cimento.

Para usar aparas de madeira como bioagregado na condição saturado superfície seca, Toledo Filho, Da Gloria e Andreola (2019) deixaram as partículas imersas em água por 24 h e secaram ao ar por 30 minutos antes da produção e moldagem do bioconcreto. Da Gloria (2020) verificou a quantidade de água de

compensação necessária ao aferir o quanto o bioagregado absorvia de água no misturador durante o tempo usual de mistura para um bioconcreto. O autor relata que esse procedimento possibilitou a produção de bioconcretos trabalháveis sem a necessidade de pré-saturação da serragem de madeira, que foi o bioagregado usado.

Outro fator que influencia a absorção de água pelos bioagregados é a granulometria. Toledo Filho, Da Gloria e Andreola (2019) e Da Gloria et al. (2021) removeram a fração de bioagregado com diâmetro inferior a 1,18 mm, uma vez que grãos muito finos apresentam maior superfície específica e retenção de água.

1.4.2 Propriedades dos bioconcretos

Toledo Filho, Da Gloria e Andreola (2019) classificam os bioconcretos como materiais de baixa densidade, baixa condutividade térmica e desempenho mecânico adequado. O desempenho mecânico pode ser verificado através de ensaios como o de resistência à compressão uniaxial, onde a carga é aplicada no eixo longitudinal do corpo de prova comprimindo-o, e o de resistência à tração na flexão, onde o material é submetido à flexão, rompendo-se por tração na parte inferior.

Diferentes regiões podem ter predominâncias de biomassas distintas, e isso certamente influencia a escolha da biomassa a ser usada no bioconcreto. É importante, no entanto, que se leve em consideração que as propriedades dos compósitos produzidos estão relacionadas às propriedades físicas, químicas, mecânicas e anatômicas da biomassa usada, além da fração volumétrica aplicada (TEIXEIRA et al., 2020).

Frações volumétricas elevadas de biomassa tendem a resultar em bioconcretos mais leves e com melhores desempenhos em relação ao isolamento térmico. Isso ocorre devido ao aumento da porosidade e consequente redução da densidade aparente e da condutividade térmica (AGOPYAN et al., 2005). Frações volumétricas elevadas de biomassa, no entanto, tendem a reduzir a resistência mecânica e a comprometer a trabalhabilidade, propriedade relacionada à consistência dos bioconcretos (LERTWATTANARUK; SUNTIJITTO, 2015).

Da Gloria e Toledo Filho (2021) produziram bioconcretos com frações volumétricas entre 45% e 80% de bioagregado de madeira. A densidade dos bioconcretos variou de 0,7 g/cm³ a 1,25 g/cm³. A resistência à compressão aos 28 dias variou de 0,44 MPa a 15,97 MPa e o módulo de elasticidade de 0,03 GPa a 4,03 GPa. As misturas com maiores frações volumétricas do bioagregado tiveram os menores valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Sá (2022) produziu bioconcretos de bambu nas frações volumétricas de 35%, 40% e 45%. As misturas apresentaram índice de consistência (espalhamento) mínimo de 180 ± 5 mm, sendo observado que as que possuíam frações de bambu mais elevadas apresentaram menores índices de consistência. As misturas com frações de bambu mais elevadas também apresentaram menores valores de densidade aparente, que variaram de 1,14 g/cm³ a 1,34 g/cm³. Os módulos de ruptura obtidos a partir do ensaio de tração na flexão para as misturas com frações de bioagregado de 35%, 40% e 45% foram de 2,26 MPa, 2,11 MPa e 1,54 MPa, respectivamente. E a resistência à compressão uniaxial para essas misturas foi de 9 MPa, 7 MPa e 6 MPa, respectivamente.

O material aglomerante também influencia em propriedades do bioconcreto, como a durabilidade, resistência ao fogo e a microrganismos, propriedades termo-hígricas, acústicas e mecânicas (SÁEZ-PÉREZ; BRÜMMER; DURÁN-SUÁREZ, 2020). Bioconcretos produzidos com cal hidráulica apresentam baixa densidade e, conseqüentemente, baixa condutividade térmica (SÁEZ-PÉREZ; BRÜMMER; DURÁN-SUÁREZ, 2020). Porém, tendem a atingir valores de resistência mecânica baixos, enquanto bioconcretos produzidos com cimento tendem a atingir valores de resistência mecânica elevados (SÁ, 2022). Dessa maneira, o aglomerante para bioconcretos pode ser definido em função das principais propriedades que se deseja obter, de acordo com o uso pretendido, o local onde será aplicado, o processo de produção, e/ou considerações financeiras e ambientais (AMZIANE; SONEBI, 2016).

A produção do cimento está fortemente associada a impactos negativos ao meio ambiente, como a elevada emissão de dióxido de carbono na atmosfera. Uma das práticas adotadas para driblar essa problemática é a incorporação de materiais cimentícios suplementares, como cinzas volantes e metacaulinita (SANTOS, 2020). A metacaulinita possui alta reatividade pozolânica (LIMA; TOLEDO FILHO, 2008). Mas sua elevada superfície específica compromete a trabalhabilidade de misturas

cimentícias (SOUSA; RÉGO, 2021). A cinza volante, devido à sua esfericidade, beneficia a reologia das misturas (MA et al., 2016).

Com o intuito de reduzir o consumo de cimento, Andreola et al. (2019) substituíram parcialmente o cimento por cinzas volantes e metacaulinita na produção de bioconcretos com fração volumétrica de bioagregado de bambu em 40%, que apresentaram resistência à compressão de 60% a 90% do valor de referência (bioconcreto produzido com matriz de cimento). Os valores médios de resistência à compressão aos 28 dias variaram de 8 MPa a 15 MPa. Da Gloria (2020) observou que era possível obter bioconcretos de madeira com resistências próximas à referência ao substituir o cimento por 30% de metacaulinita e 40% de cinza volante, em massa, usando um fator água/materiais cimentícios de 0,35. SÁ (2022) produziu bioconcretos de bambu substituindo os materiais cimentícios em 10%, 15% e 20% por solo. Houve redução na resistência mecânica do bioconcreto com o aumento do teor do solo, mas o autor destaca que os bioconcretos cumpriram a função de serem autoportantes e resistentes para determinadas aplicações.

A relação água/cimento (A/C) também é um fator que muito se relaciona às propriedades do bioconcreto. De acordo com Toledo Filho, Da Gloria e Andreola (2019) a alta absorção de água dos bioagregados exige maior quantidade de água para se alcançar uma boa trabalhabilidade no estado fresco, porém no estado endurecido o excesso de água é liberado pela troca de umidade, o que leva a ocorrência de perda de massa simultânea e retração por secagem dos bioconcretos. Da Gloria et al. (2021) observaram em seu estudo que havia proporcionalidade inversa entre a relação A/C e a resistência mecânica de bioconcretos de madeira, bambu e cascas de arroz.

Andreola (2017) constatou em sua pesquisa que tanto a resistência à compressão uniaxial quanto o módulo de elasticidade foram menores para menores volumes de cimento, maiores volumes de partículas de bioagregado de bambu e maiores relações de água/cimento. Aos 28 dias, a média da resistência à compressão do bioconcreto com 45% de bioagregado e relação água/cimento de 0,40 foi de 4,20 MPa (coeficiente de variação de 6,5%) e do bioconcreto com relação água/cimento de 0,50 foi de 3,93 MPa (coeficiente de variação de 5,5%). Para o bioconcreto com 50% de bioagregado e relação água/cimento de 0,40 a média da resistência à compressão aos 28 dias foi de 2,57 MPa (coeficiente de variação de 0,5%), e para os produzidos com relação água/cimento de 0,50 a média da resistência à compressão aos 28 dias

foi de 2,25 MPa (coeficiente de variação de 8,9%). Os módulos de ruptura obtidos com o ensaio de flexão em 3 pontos variaram de 1,26 a 1,85 MPa. A partir do ensaio de absorção de água por capilaridade, a autora identificou maior absorvidade no bioconcreto com maior volume de partículas de bambu. Em 72 horas ocorreu 75% de absorção no bioconcreto com teor de bambu de 50%, e relação água/cimento de 0,40.

Silveira et al. (2018) produziram bioconcretos com biomassa de cacto. A biomassa foi usada nos volumes de 45% a 58%. A densidade dos compósitos variou de 0,87 g/cm³ a 1,45 g/cm³. E a resistência à compressão uniaxial variou de 1,72 MPa a 10,51 MPa. Os autores também relataram que os maiores valores de resistência foram obtidos com as misturas produzidas com menor quantidade de água para compensação e menores proporções de bioagregado.

Brasileiro, Vieira e Barreto (2013) produziram quatro tipos de compósitos: pasta de cimento ($a/c = 0,30$); argamassa (traço 1:1 em massa, $a/c = 0,40$); argamassa com 10% de substituição da areia pela medula de coco (traço 1:0,9:0,1 em massa, $a/c = 0,85$); compósito de medula de coco e cimento (traço 1:0,1 em massa, $a/c=0,75$). Os valores de resistência à compressão dos compósitos com 10% de substituição da areia por medula e dos compósitos com medula não apresentaram diferença estatística (p -valor $< 0,05$). Os valores de resistência à compressão variaram de 3,97 a 4,35 MPa. Houve diferença estatística (p -valor $< 0,05$) entre todos os compósitos em relação à absorção de água, sendo maior para o compósito somente com medula e cimento, cerca de 38%. Esse compósito, em contrapartida, apresentou menor densidade aparente, isso é, 0,99 g/cm³.

No trabalho de Toledo Filho, Da Gloria e Andreola (2019), bioconcretos feitos com aparas de madeira e partículas de bambu foram produzidos com relações cimento/biomassa variando de 0,5 a 3, apresentaram densidade de 0,7 g/cm³ a 1,2 g/cm³ e resistência à compressão de 0,5 a 9,5 MPa. Os resultados de absorção capilar de água mostraram que a porosidade aumentou conforme o aumento da fração de bioagregado. Foi notada rápida absorção na fase inicial que levou a uma rápida saturação no bioconcreto com maior teor de bioagregado (TOLEDO FILHO; DA GLORIA; ANDREOLA, 2019).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

A biomassa usada na presente pesquisa para a preparação do bioagregado foi o mesocarpo do coco. O material é proveniente da Região dos Lagos do Rio de Janeiro e foi fornecido pela empresa Vero Coco, que produz e comercializa água de coco. A Figura 3 apresenta o material na forma que chegou ao laboratório.

Na produção do compósito cimentício, para reduzir o consumo de cimento, cuja produção está atrelada à liberação de altas taxas de dióxido de carbono (SANTOS, 2020), optou-se por substituir parcialmente o cimento por materiais pozolânicos: a metacaulinita e a cinza volante. O cimento usado na pesquisa foi o Cimento Portland CP V – ARI Max Performance da marca Cimento Nacional. A metacaulinita usada foi da marca Metacaulim do Brasil (Metacaulim HP Ultra). A cinza volante usada estava disponível no laboratório, armazenada sem identificação de fabricante.

Como os materiais pozolânicos apresentam reatividade mais lenta que o cimento (SANTOS, 2020), foi usado um aditivo acelerador de pega a base de cloreto de cálcio (CaCl_2), produzido pela empresa Proquímios, no teor de 3% da massa dos materiais cimentícios, seguindo os estudos de Santos (2020).

Foi usado um agente modificador de viscosidade, *viscosity modify admixture* (VMA), disponível no laboratório sem identificação de fabricante. O VMA proporciona boa trabalhabilidade à mistura e maior viscosidade, com o aumento da capacidade de retenção de água da mistura e de sua resistência à segregação.

A água adicionada à mistura foi proveniente do sistema de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro/RJ.

2.2 Métodos

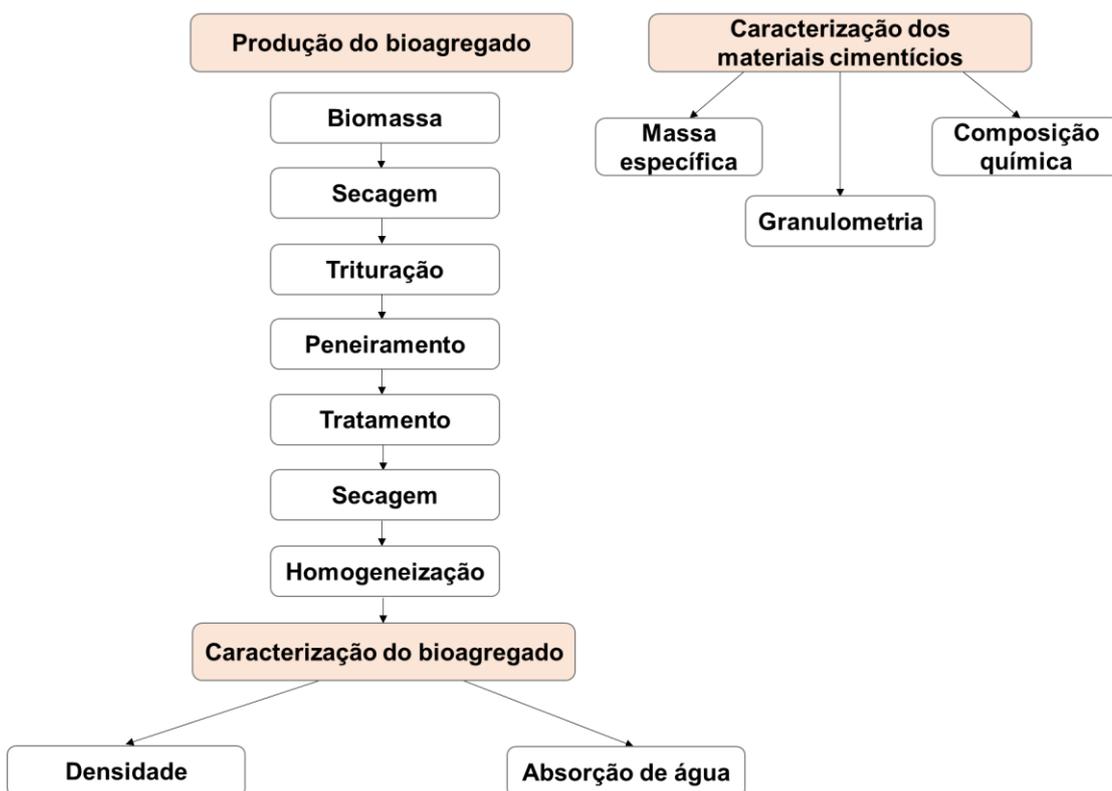
O método está dividido em duas partes. A Parte I se refere ao preparo e à caracterização do bioagregado, e à caracterização dos materiais cimentícios. A Parte

II se refere ao bioconcreto, e descreve a sua produção, os métodos adotados para verificação de suas propriedades, e a realização das análises estatísticas.

2.2.1 Parte I – Bioagregado e materiais cimentícios

A Figura 2 resume os procedimentos realizados na Parte I dos métodos, que trata da produção e caracterização do bioagregado, bem como da caracterização dos materiais cimentícios.

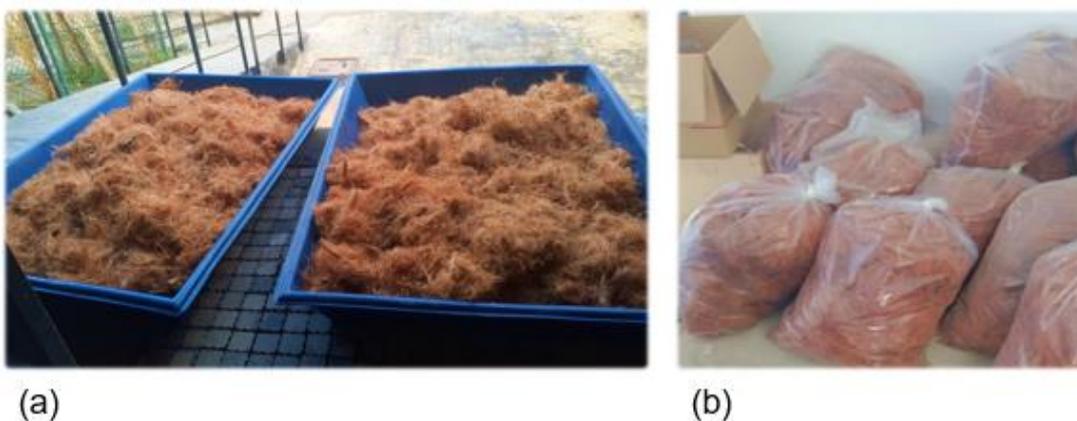
Figura 2 – Parte I do método



2.2.1.1 Produção do bioagregado

O mesocarpo do coco chegou ao laboratório seco (maturado), porém apresentava certa umidade. Por isso permaneceu por alguns dias ao sol para secagem. A Figura 3 (a) apresenta a biomassa na forma em que chegou ao laboratório. Após a secagem, esse material foi estocado em sacos até o processamento no triturador. Foram necessários 11 sacos de aproximadamente 120 L para o armazenamento, conforme Figura 3 (b).

Figura 3 - Material bruto recebido



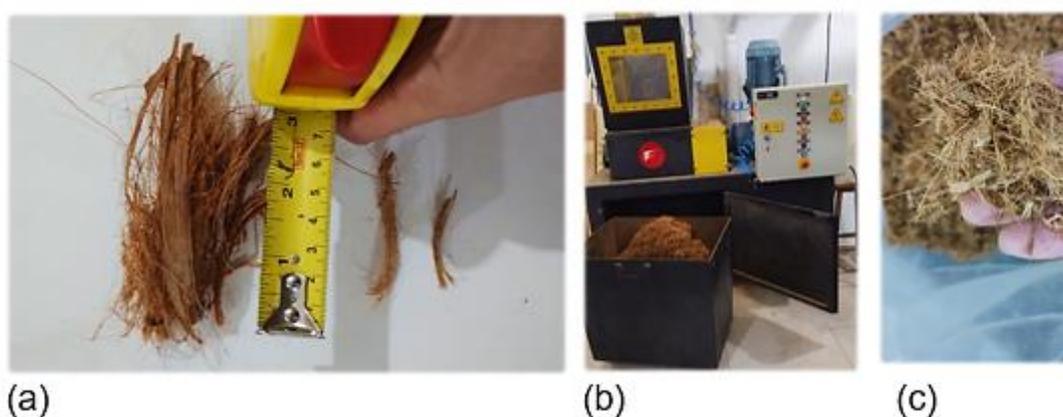
Legenda: (a) – biomassa na forma que chegou ao laboratório disposta em bandejas para secagem; (b) – biomassa ensacada após a secagem.

Para a trituração foi utilizado o equipamento triturador da marca Fragmaq modelo FT-75, que pode ser observado na Figura 4 (b). As Figuras 4 (a) e 4 (c) apresentam o formato da biomassa antes e após a passagem pelo triturador, respectivamente. O material foi novamente armazenado em sacos, sendo necessários 4 sacos 120 L, que totalizaram 35,55 kg.

Após a trituração foi realizado o peneiramento utilizando-se as seguintes peneiras: 4,75 mm; 2,36 mm e 18 mm. O peneiramento foi realizado principalmente com o intuito de se eliminar frações muito finas, uma vez que o formato do material poderia implicar na sua passagem ou não pela abertura das peneiras, a depender da direção que a partícula estivesse. Optou-se pelo uso como bioagregado do material passante na peneira de 4,75 mm, seguindo critério da NBR 7211 da Associação

Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2022) para agregado miúdo, e retido na peneira de 1,18 mm. O material passante na peneira de 1,18 mm não foi usado, seguindo o critério de Toledo Filho, Da Gloria e Andreola (2019), que ressaltam a alta absorção de água e potencial de liberação de extrativos para frações mais finas de bioagregados. Foram elaboradas curvas granulométricas de acordo com os registros das frações passantes nas peneiras.

Figura 4 – Trituração da biomassa

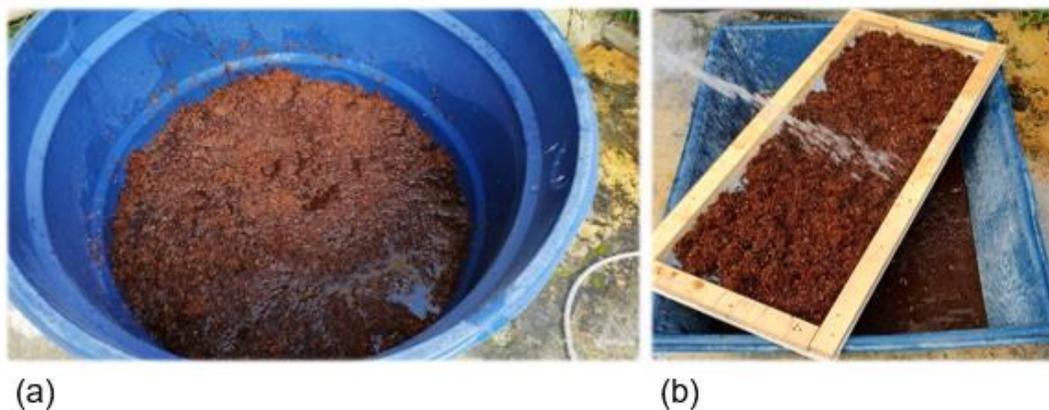


Legenda: (a) - biomassa antes da passagem pelo triturador; (b) - triturador; (c) – biomassa após a passagem pelo triturador.

A próxima etapa foi a realização do tratamento do bioagregado para remoção dos extrativos. O tratamento realizado foi o de imersão em solução alcalina em temperatura ambiente, baseado nos estudos de Da Gloria (2020) e Sá (2022). O bioagregado ficou imerso em uma solução de água e hidróxido de cálcio por uma hora, como pode ser observado na Figura 5 (a). Foi usada a proporção de 7:1 (água:bioagregado) e 1,85 g de hidróxido de cálcio por litro de água, equivalente a solubilidade desse aditivo.

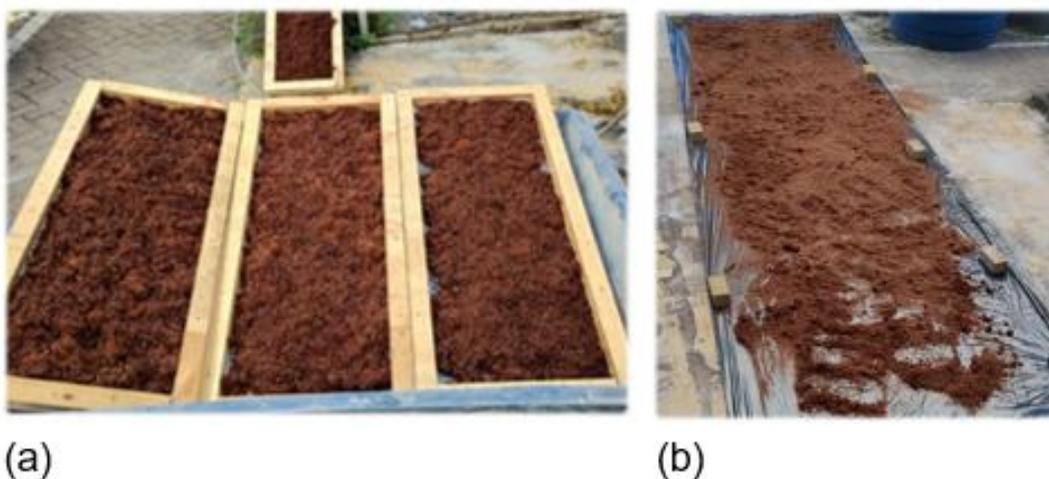
Após o tempo de imersão, o bioagregado foi retirado, disposto em peneiras e lavado com água corrente (Figura 5 b). Após a lavagem, o material ficou disposto ao ar livre, por vezes ao sol (Figura 6), sendo necessário aproximadamente uma semana para a secagem total.

Figura 5 – Tratamento do bioagregado



Legenda: (a) – imersão em solução alcalina; (b) lavagem do bioagregado com água corrente.

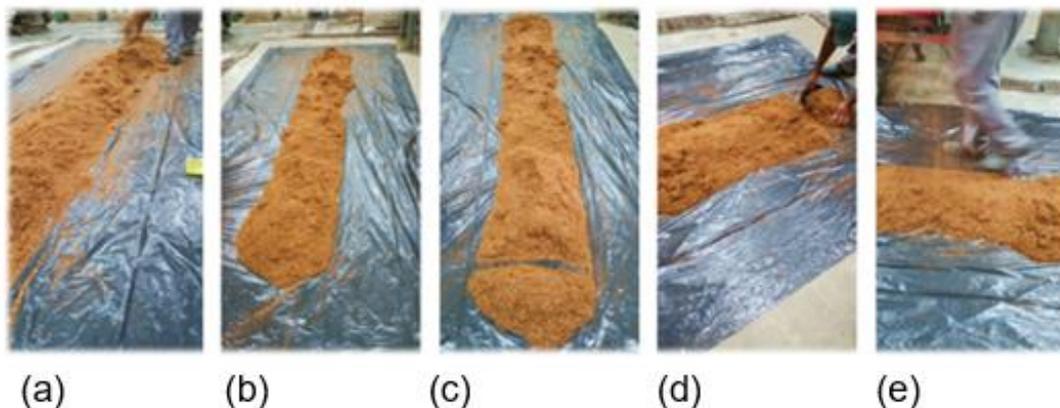
Figura 6 – Secagem do bioagregado



Legenda: (a) e (b) secagem do bioagregado disposto em peneiras e em lona, respectivamente.

O bioagregado seco foi então homogeneizado com a técnica de pilha alongada (Figura 7). Nessa técnica todo o material é lançado de modo a formar uma pilha alongada. O sentido de lançamento do material é revezado a cada porção a ser espalhada. Com todo o material na pilha, as partículas das pontas são separadas e relançadas (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011).

Figura 7 – Homogeneização do bioagregado



Legenda: (a) espalhamento em pilha alongada; (b) todo material na pilha; (c) e (d) separação das partículas das pontas; (e) relançamento das partículas das pontas na pilha alongada.

2.2.1.2 Densidade do bioagregado

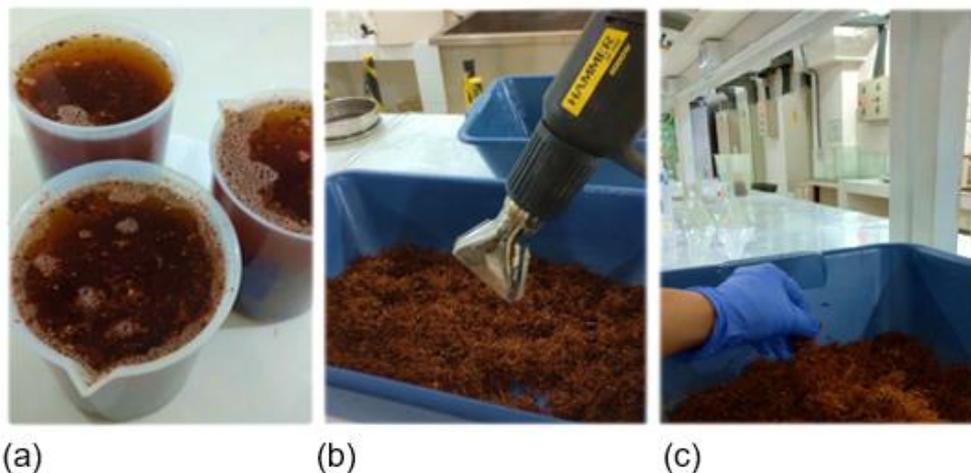
O ensaio de densidade do bioagregado foi realizado com base na NBR 16916 (ABNT, 2021). Foram separadas 3 amostras de 80 g do bioagregado homogeneizado, que ficaram imersas em água, para saturação, por 24 h, conforme pode ser observado na Figura 8 (a).

Cada amostra foi retirada da água, colocada em uma bandeja seca, submetida a uma corrente de ar suave e revolvida com frequência, visando a secagem uniforme, até a condição saturada com superfície seca. As Figura 8 (b) e 8 (c) mostram a realização dessa etapa.

A NBR 16916 (ABNT, 2021) determina a secagem dos grãos até que os mesmos não estejam mais fortemente aderidos entre si, devendo essa verificação ser realizada com o auxílio do tronco de cone e haste de compactação (Figura 9).

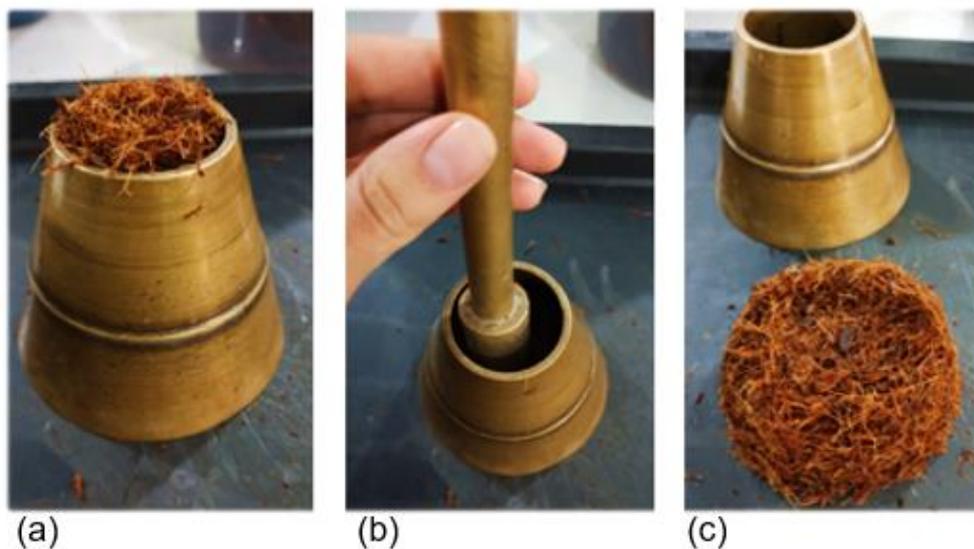
Porém, por conta da morfologia das partículas do bioagregado e dos vazios existentes, não houve desmoronamento como descrito na norma, o que definiria o estado de superfície seca. O mesmo foi observado por Andreola (2017) para o bioagregado de bambu. Dessa maneira, a condição saturada superfície seca foi determinada quando um papel seco absorvia pouca água ao tocar o bioagregado, seguindo o procedimento de Sá (2022).

Figura 8 – Processo de obtenção do bioagregado em condição saturada superfície seca.



Legenda: (a) bioagregado imerso em água; (b) corrente de ar para secagem do bioagregado; (c) revolvimento do bioagregado na secagem.

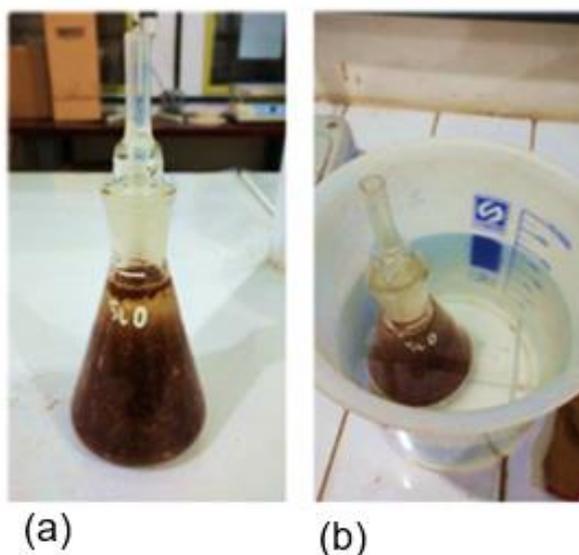
Figura 9 – Procedimentos para verificação da condição saturada superfície seca



Legenda: (a) bioagregado no tronco de cone; (b) aplicação de golpes; (c) bioagregado após a retirada do tronco de cone.

Posteriormente a amostra foi colocada no frasco indicado na norma e o conjunto (bioagregado e frasco) foi pesado. Colocou-se água até próximo a marcação indicada (500 ml) e movimentou-se o conjunto para eliminação de bolhas de ar. O conjunto foi colocado em um banho à temperatura constante por 1 h. A temperatura ambiente manteve-se em 23,5 °C. A Figura 10 mostra o material no frasco com água antes e durante o banho à temperatura constante.

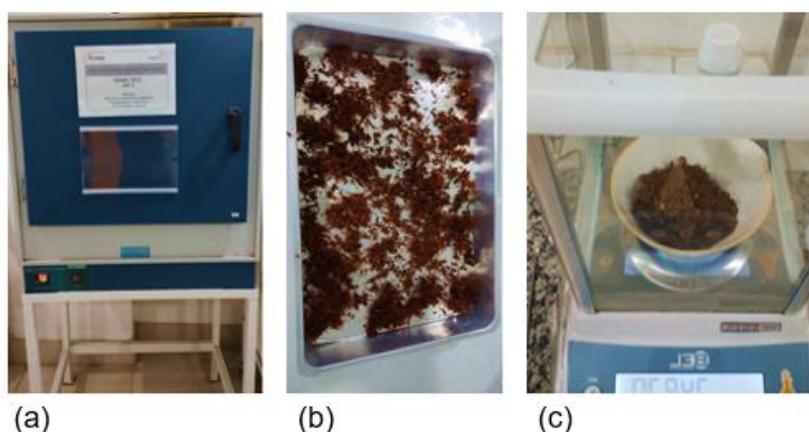
Figura 10 – Bioagregado no frasco indicado na norma para a determinação da densidade



Legenda: (a) bioagregado no frasco com água antes do banho;
(b) bioagregado no frasco com água durante banho.

Após 1 h, completou-se a água no frasco até a marcação de 500 ml e foi determinada a massa total (massa do material na condição saturada superfície seca mais a massa do frasco mais a massa da água). Em seguida a amostra foi retirada da água e colocada para secagem em estufa, com temperatura de 100° C, onde permaneceu até atingir constância de massa, sendo, então, pesada. A Figura 11 mostra a estufa de 100°, uma amostra no tabuleiro que foi à estufa e sendo pesada na balança de alta precisão.

Figura 11 – Secagem da amostra em estufa e posterior pesagem.



Legenda: (a) estufa de 100°; (b) amostra após passar pela estufa;
(c) pesagem da amostra em balança de alta precisão.

A partir das equações da NBR 16916 (ABNT, 2021) foi calculada a densidade do bioagregado na condição seca (Equação 1), e na condição saturada superfície seca (Equação 3).

$$\rho_S = \frac{m_A}{V - V_a} \quad (1)$$

Onde,

ρ_S é a densidade do agregado na condição seca (g/cm³);

m_A é a massa da amostra seca em estufa a (105 ± 5) °C (g);

V é o volume do frasco calibrado (cm³);

V_a é o volume de água adicionada ao frasco, de acordo com seguinte equação (cm³):

$$V_a = \frac{m_D - m_C}{\rho_a} \quad (2)$$

onde,

m_C é a massa do conjunto formado pela massa da amostra na condição saturada superfície seca, mais a massa do frasco (g);

m_D é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, mais a massa do frasco, mais a massa da água (g);

ρ_a é a densidade da água na temperatura do banho (g/cm³).

$$\rho_{SSS} = \frac{m_B}{V - V_a} \quad (3)$$

onde,

ρ_{SSS} é a densidade do agregado na condição saturada superfície seca (g/cm³)

m_B é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g)

V e V_a estão apresentados na Equação (1).

2.2.1.3 Absorção de água do bioagregado

A absorção de água do bioagregado foi calculada inicialmente a partir da Equação 4, seguindo a NBR 16916 (ABNT, 2021), que considera a massa do material

na condição saturada superfície seca e a massa do material após a secagem em estufa.

$$Abs = \frac{m_B - m_A}{m_A} \times 100 \quad (4)$$

Onde,

Abs é a absorção de água (%);

m_A é a massa da amostra seca em estufa a $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ (g);

m_B é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g).

Baseado nos procedimentos de Da Gloria (2020) realizou-se também um ensaio para verificar a absorção de água do bioagregado no processo de mistura. Para tal, 300 g do bioagregado foi colocado no misturador e foram adicionados 3 L de água. Foi usada a velocidade 1 e a mistura ocorreu por 3,5 min. Após a mistura, o material foi colocado em peneiras de abertura de 300 μm para o escoamento da água não absorvida (Figura 12), onde permaneceu por aproximadamente 10 min, sendo pesado em seguida. A absorção foi calculada de acordo com a Equação 5. Optou-se por usar como absorção de água a média dos resultados das duas formas de ensaio.

Figura 12 – Bioagregado em peneiras para escoamento da água.



$$A(\%) = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \quad (5)$$

Onde,

A é a absorção de água bioagregado (%);

m_u é a massa do material úmido (g);

m_s é a massa do material seco (g).

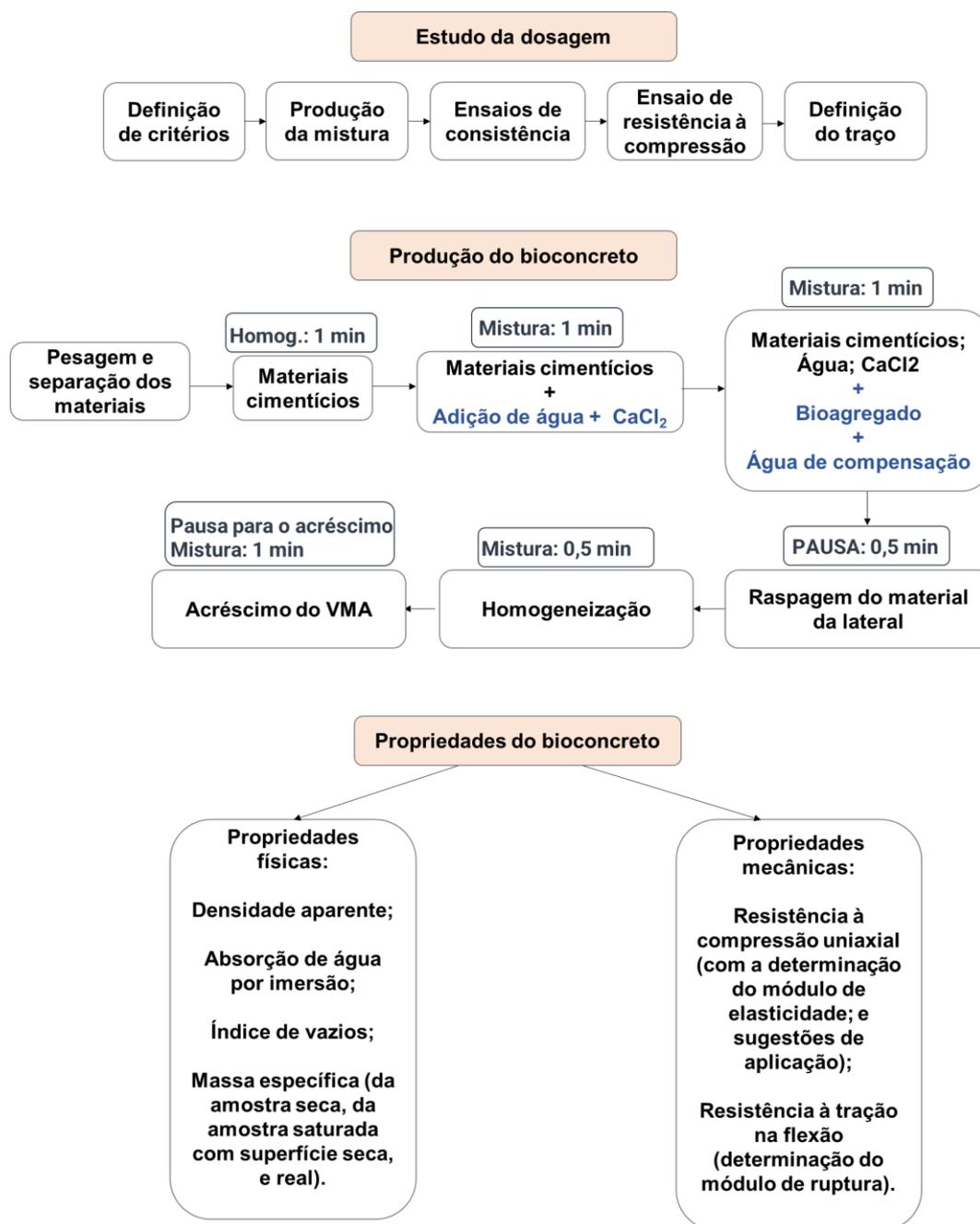
2.2.1.4 Massa específica, granulometria e composição química dos materiais cimentícios

A massa específica dos materiais cimentícios foi determinada no picnômetro de gás hélio da marca Micromeritics®. A distribuição granulométrica do cimento, da cinza volante e da metacaulinita foi determinada através do equipamento Mastersizer® 2000 da empresa Malvern Instruments Ltda. Nesse equipamento ocorre a dispersão da amostra em meio aquoso para a determinação da granulometria de partículas de escala milimétrica a escala nanométrica. O fluido dispersante utilizado foi o etanol para o cimento, e a água para a cinza volante e a metacaulinita. A composição química dos materiais cimentícios foi obtida pelo ensaio de fluorescência de raios-X (FRX), com equipamento de modelo EDX-720 da Shimadzu.

2.3 Parte II – Bioconcreto

A Figura 13 resume os procedimentos realizados na Parte II dos métodos, que trata da produção e caracterização do bioconcreto.

Figura 13 - Parte II do método



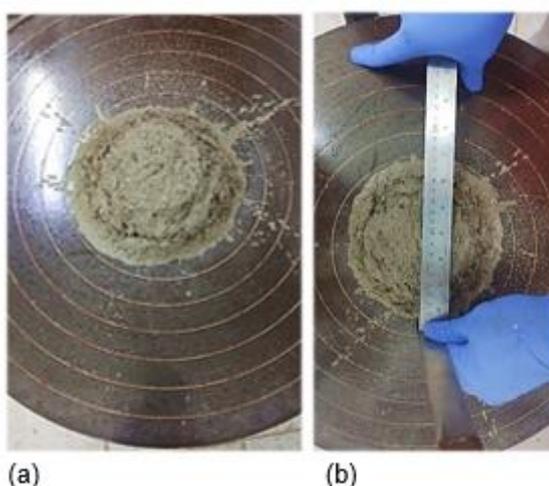
2.3.1 Estudo da dosagem do bioconcreto

Para a produção do bioconcreto teve-se como base inicial os seguintes critérios:

- a) Fator água/materiais cimentícios (a/mc) de 0,30, seguindo os estudos de Sá (2022), que obteve resistência à compressão a partir de 5 MPa com fração volumétrica de 45% de bioagregado de bambu.
- b) Água de compensação correspondente ao resultado do ensaio de absorção de água do bioagregado;
- c) Redução do consumo do cimento com a substituição desse material por metacaulinita em 30%, e cinza volante em 40%. Essa proporção foi definida com base nos estudos de Da Gloria (2020) que observou baixa alteração na resistência e na trabalhabilidade dos compósitos com essa substituição.
- d) Aditivo acelerador de pega a base de cloreto de cálcio no teor de 3% da massa dos materiais cimentícios, conforme estudos anteriores (DA GLORIA, 2020; SANTOS, 2020; SÁ, 2022). O uso desse aditivo tem como intuito acelerar as reações de hidratação da fração aglomerante, uma vez que materiais pozolânicos apresentam reatividade mais lenta que a do cimento (SANTOS, 2020).
- e) Índice de consistência mínimo de 180 ± 5 mm com o intuito de produzir bioconcretos trabalháveis e adensáveis por vibração mecânica.

A primeira mistura foi realizada com 45% de bioagregado. Essa mistura atingiu índice de consistência de 180 mm, porém apresentou exsudação inadequada conforme pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 – Ensaio de consistência.



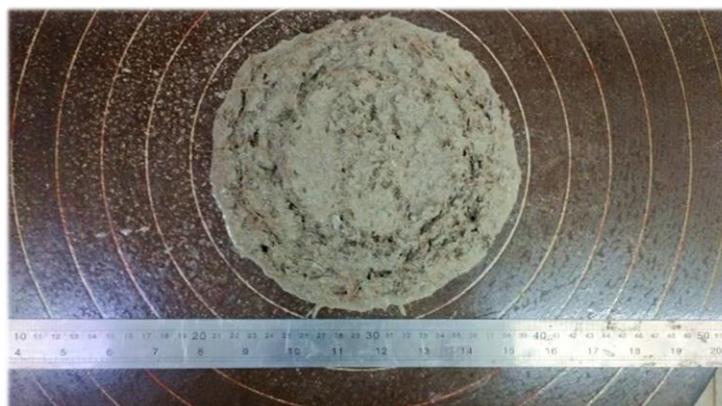
Legenda: (a) Mistura na mesa de consistência;
(b) Medição do espalhamento.

Optou-se então pelo uso do agente modificador de viscosidade (VMA) no teor de 0,1% da massa de materiais cimentícios e a nova mistura apresentou índice de

consistência de 155 mm. Por conta disso, reduziu-se o teor do VMA para 0,07% e foi feita uma mudança no processo de mistura. Inicialmente todos os materiais secos foram depositados no misturador, antes da adição da água. No novo processo de mistura, foi feita primeiro a pasta, e em seguida foi adicionado o bioagregado e o restante da água.

A Figura 15 é referente à mistura com 45% de bioagregado que apresentou melhor resultado, feita considerando as mudanças apresentadas, e que atingiu índice de consistência de 180 mm.

Figura 15 – Mistura com 45% de bioagregado na mesa de consistência.



A mistura citada acima foi moldada e submetida a ensaio de resistência à compressão uniaxial aos 7 dias. A resistência foi de 2,5MPa.

Optou-se por usar a fração máxima de bioagregado de 40% visando-se melhores resultados de índice de consistência e resistência à compressão. Também foram produzidos bioconcretos com frações de 30% e 35% de bioagregado. As misturas com 30%, 35% e 40% de bioagregado receberam as identificações C30, C35 e C40, respectivamente.

2.3.2 Consumo de materiais

A Tabela 2 mostra o consumo de materiais por m³.

Tabela 2 – Consumo de materiais por m³ de bioconcreto produzido

Fração volumétrica do bioagregado	Identificação da mistura	Casca (Kg)	Cimento (Kg)	Metacaulinita (Kg)	Cinza volante (Kg)	Água total (kg)	CaCl ₂ (kg)	VMA (kg)
30%	C30	108,00	301,42	301,42	401,90	506,62	30,142	0,70
35%	C35	126,00	279,89	279,89	373,19	519,29	27,98	0,65
40%	C40	144,00	258,36	258,36	344,49	531,96	25,83	0,60

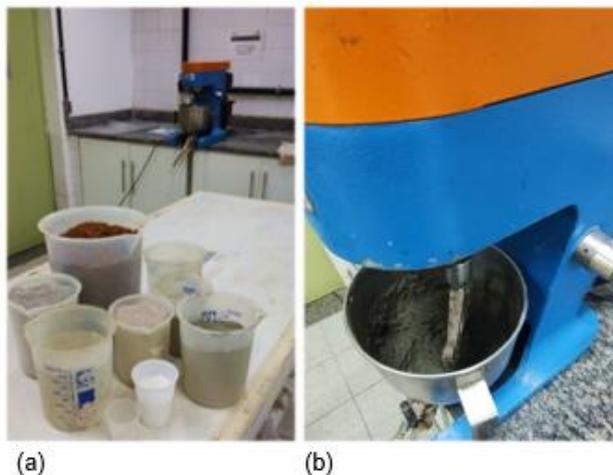
2.3.3 Produção do bioconcreto

O processo de produção se deu da seguinte forma:

- a) Pesagem e separação dos materiais;
- b) Diluição do aditivo acelerador de pega a base de cloreto de cálcio na água de hidratação;
- c) Junção e homogeneização dos materiais cimentícios por aproximadamente 1 min (primeiramente em um saco propício e posteriormente na argamassadeira);
- d) Mistura por 1 min na argamassadeira na velocidade 1, concomitantemente à adição gradual da água de hidratação com o aditivo acelerador de pega;
- e) Acréscimo do bioagregado e da água de compensação gradualmente, ao misturar por mais 1 min na velocidade 1 na argamassadeira;
- f) Pausa da argamassadeira por aproximadamente meio minuto para a raspagem de material das laterais da cuba;
- g) Mistura por meio minuto para homogeneização;
- h) Acréscimo do VMA e mistura por mais 1 min.

A Figura 16 mostra os materiais separados após pesagem e a mistura na argamassadeira de 5 L.

Figura 16 – Materiais para a mistura.



Legenda: (a) Materiais pesados e separados;
(b) Mistura na argamassadeira.

2.3.4 Ensaio de consistência

Os ensaios de consistência foram realizados logo após os processos de mistura. Foram seguidos os procedimentos da norma NBR 13276 (ABNT, 2016). Foram utilizados: molde tronco cônico, soquete metálico, mesa de consistência, régua, espátula, pano úmido. Uma parte da mistura foi adicionada em 3 camadas ao tronco cônico sobre a mesa de consistência limpa e umedecida com o pano. Na primeira, na segunda e na terceira camada aplicaram-se 15, 10 e 5 golpes respectivamente, fazendo-se o rasamento na última camada. O pano úmido foi passado novamente sobre a mesa ao redor do molde, que foi retirado. Aplicaram-se 30 golpes com o acionamento da manivela da mesa de consistência e, após, foram aferidas 3 medidas de diâmetro do espalhamento para determinar o índice de consistência, que é a média dessas 3 medidas. Na Figura 17, pode ser observada a mesa de consistência, o molde tronco cônico e o soquete metálico utilizados.

Figura 17 – Instrumentos para ensaio de consistência



2.3.5 Moldagem dos corpos de prova

O Quadro 2 apresenta a quantidade e as dimensões dos corpos de prova (CP) produzidos de acordo com os ensaios aos quais foram submetidos.

Quadro 2 - Quantidade e dimensões de corpos de prova.

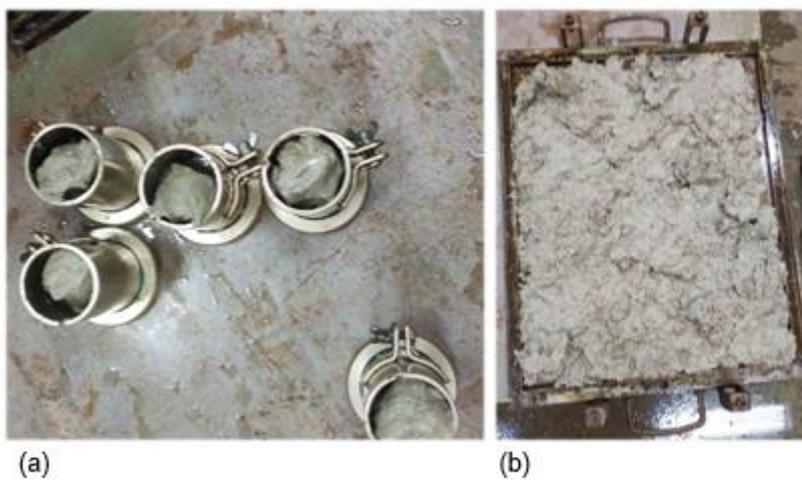
Ensaio	Tipo de CP	Dimensões dos CP	Quantidade de CP por mistura	Quantidade de misturas
Resistência à compressão aos 7 dias	Cilíndrico	ø50 mm x 100 mm	5	3
Resistência à compressão aos 28 dias e densidade aparente	Cilíndrico	ø50 mm x 100 mm	5	3
Resistência à tração na flexão aos 28 dias	Prismático	400mm x 50mm x 15 mm	5	3
Absorção total de água	Cilíndrico	ø50 mm x 100 mm	5	3

Os corpos de prova prismáticos foram obtidos a partir do corte do material moldado em formato de prisma com as dimensões: 400 x 500 x 15 mm.

Cada mistura foi produzida com uma das frações volumétricas pré-determinadas (30%, 35% e 40%) de bioagregado. O resultado de cada ensaio foi considerado a média dos resultados dos 5 corpos de prova ensaiados por mistura.

Os moldes foram previamente lubrificados para receberem as misturas e foi usada uma mesa vibratória para o adensamento do material nos moldes. O preenchimento dos moldes cilíndricos se deu em 3 camadas, e a mesa vibratória foi acionada por 10 s após o enchimento de cada camada. Na Figura 18, pode-se observar os moldes sobre a mesa vibratória, sendo preenchidos com o bioconcreto.

Figura 18 – Preenchimento dos moldes com o bioconcreto



Legenda: (a) Moldes cilíndricos; (b) Molde prismático.

Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos em ambiente protegido contra a perda de umidade por 24 h. Passado esse tempo, foram realizadas as desmoldagens e os corpos de prova foram armazenados em câmara seca até a idade de ensaio. A Figura 19 mostra alguns corpos de prova depois de endurecidos.

Figura 19 – Corpos de prova cilíndricos endurecidos.



2.3.6 Densidade aparente

Antes da realização dos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias, aferiram-se a massa e o volume de cada corpo de prova para obtenção da densidade, seguindo a Equação 6. A densidade aparente dos bioconcretos produzidos foi considerada a média dos valores de densidade obtidos para os corpos de prova de cada mistura.

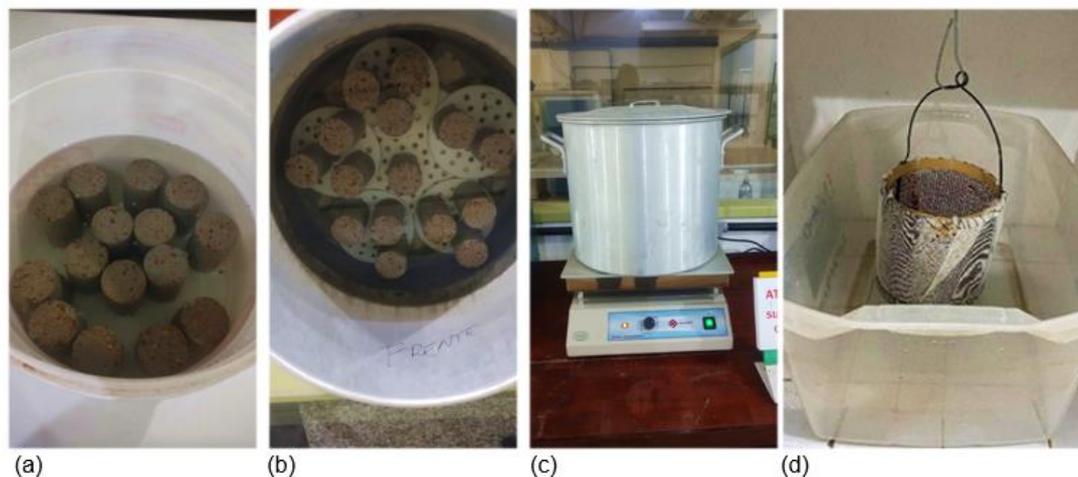
$$\rho = \frac{\text{massa do CP}}{\text{volume do cp}} \quad (6)$$

2.3.7 Absorção total de água por imersão, índice de vazios e massa específica

A absorção de água por imersão, o índice de vazios e a massa específica foram determinados seguindo a norma NBR 9778 (ABNT, 2005). Foram ensaiados 5 corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, após 28 dias da moldagem, para cada uma das três misturas.

Os corpos de prova permaneceram em câmara seca até atingirem a idade do ensaio. Foram então colocados em estufa com temperatura de 100 ° C, onde permaneceram por 4 dias até atingirem constância de massa, quando então foi aferida a massa seca dos corpos de prova. A etapa seguinte foi colocar os corpos de prova imersos em água, conforme Figura 20 (a), onde ficaram por 72 h. Após as 72 h os corpos de prova foram colocados em um recipiente com água por 5 h, que foi levado progressivamente a ebulição, mantendo-se constante o volume de água. Essa etapa pode ser observada nas Figuras 20 (b) e 20 (c). Foi aguardado o resfriamento e então realizada a pesagem das amostras saturadas e a pesagem hidrostática, usando os instrumentos da Figura 20(d).

Figura 20 – Ensaio de absorção total de água.



Legenda: (a) Saturação dos corpos de prova; (b) corpos de prova no recipiente para ebulição; (c) recipiente para ebulição na chapa aquecedora; (d) pesagem hidrostática.

A absorção total, o índice de vazios e a massa específica foram calculados a partir das Equações, 7, 8, 9, 10 e 11.

$$A_t = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \quad (7)$$

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (8)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (9)$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (10)$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (11)$$

Onde,

A_t é a absorção de água (%);

I_v é o índice de vazios (%);

ρ_s é a massa específica da amostra seca (-);

ρ_{sat} é a massa específica da amostra saturada (-);

ρ_r é a massa específica real (-);

m_{sat} é a massa da amostra saturada (g);

m_s é a massa da amostra seca em estufa (g);

m_i é a massa da amostra na pesagem hidrostática (g).

2.3.8 Resistência à compressão uniaxial, módulo de elasticidade e verificação de possíveis aplicações de acordo com a classe de resistência

Foram realizados ensaios de resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias. Um dia antes dos ensaios, as bases dos corpos de prova foram retificadas em um equipamento próprio para essa função.

Para esse ensaio, foi utilizada a máquina de ensaio universal da fabricante Shimadzu, com capacidade para 1000 kN. A velocidade de deslocamento foi de 0,3 mm/min. Foram utilizados sensores do tipo LVDTs (*linear variable differential transformer*) acoplados ao corpo de prova para a obtenção das deformações verticais. A Figura 21 mostra um corpo de prova sendo submetido ao ensaio.

Figura 21 – Ensaio de resistência à compressão uniaxial.



Foram seguidas as normas NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 8522-1 (ABNT, 2021) para a determinação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, que é uma medida de rigidez do material.

Para a verificação de possíveis aplicações de acordo com a classe de resistência foi seguida a proposta de classes de resistência de Sá (2022), apresentada no Quadro 3, que foi baseada nas referências IPT (2009) e NBR 6136 (ABNT, 2016).

Quadro 3 - Classes de resistência à compressão para bioconcretos.

Classe	Fração volumétrica de biomassa	Matriz	Aplicação	Resistência à compressão mínima aos 28 dias (MPa)
BC00	Elevada	Cal e argila; cimento.	Forros, paredes de vedação. Isolantes térmicos e acústicos. Necessário o uso de estrutura auxiliar.	Inferior à 1,0 MPa
BC01	Elevada	Cimento	Paredes de vedação. Isolantes térmicos e acústicos. Uso não estrutural	1,0 MPa
BC04	Média	Cimento	Blocos de alvenaria estrutural.	4,0 MPa
BC10	Baixa	Cimento	Painel.	10,0 MPa

Fonte: Sá, 2022 (Adaptado).

2.3.9 Resistência à tração na flexão

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram realizados aos 28 dias. Os corpos de prova foram preparados antes do ensaio, com corte e retífica necessários.

Os ensaios foram realizados na máquina de ensaio universal modelo Shimadzu AGX, com capacidade para 100 kN. A velocidade de deslocamento foi de 0,1 mm/min. A distância entre os apoios foi de 300 mm. Foi usado um LVDT acoplado ao equipamento e posicionado no meio da face inferior do corpo de prova, conforme pode ser observado na Figura 22. O módulo de ruptura (MOR), que representa a resistência máxima na flexão foi calculada conforme a Equação 12.

Figura 22 – Ensaio de resistência à tração na flexão.



$$MOR = \frac{3 \times F_{max} \times l_1}{2 \times b t^2} \quad (12)$$

Onde,

MOR = resistência na flexão

F_{max} = carga máxima (N)

l_1 = distância entre apoios (mm)

b = largura do corpo de prova (mm)

t = espessura do corpo de prova (mm)

2.3.10 Análises estatísticas

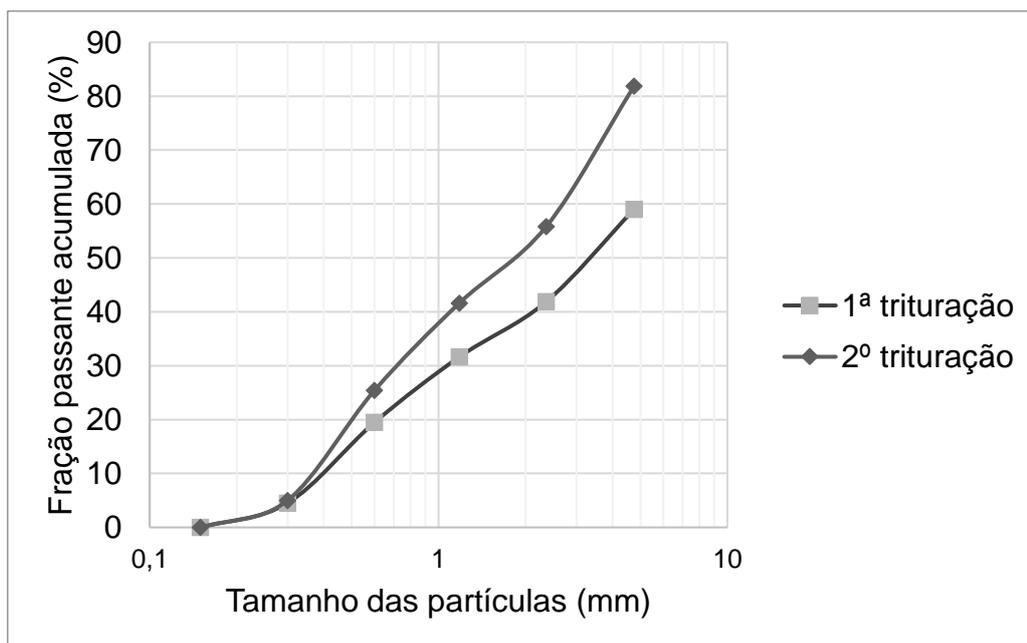
Os resultados das propriedades dos bioconcretos foram expressas como “média \pm desvio padrão”. Para verificar as amostras quanto à distribuição normal e homogeneidade de variâncias foram realizados os testes *Shapiro-Wilk* e *Levene*, respectivamente. Quando as amostras apresentaram distribuição normal, a significância estatística dos resultados foi avaliada pela análise de variância (ANOVA) a um fator e nível de confiança de 95% ($\alpha=0,05$). A comparação entre grupos foi realizada por meio do teste de Tukey, quando as amostras apresentaram homogeneidade de variâncias, e do teste de Games-Howell, quando as amostras não apresentaram homogeneidade de variâncias. Amostras que não apresentaram distribuição normal foram submetidas ao teste Kruskal-Wallis para verificação da significância estatística dos resultados e ao teste Dwass-Steel-Critchlow-Fligner para comparações entre grupos. As análises foram realizadas no software *jamovi*, versão 2.5 (THE JAMOVI PROJECT, 2024) e as tabelas geradas estão apresentadas no Anexo I deste trabalho.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Bioagregados

Ao realizar o peneiramento após a primeira trituração, 39% do bioagregado ficou retido na peneira de abertura de 4,75 mm; 16% ficou retido na peneira de 2,36 mm; 10% ficou retido na peneira de 1,18 mm. O material retido na peneira de 4,75 mm foi novamente triturado e peneirado. Após esses procedimentos, o material retido na peneira de 4,75 mm passou para 18%; o material retido na peneira de 2,36 mm passou para 26%; e o material retido na peneira de 1,18 mm para 14%. O Gráfico 4 apresenta as curvas granulométricas obtidas a partir dos peneiramentos realizados.

Gráfico 4 – Curvas granulométricas do bioagregado



A partir das equações da NBR 16916 (ABNT, 2021) apresentadas no capítulo 2 deste trabalho, foi calculada a densidade do bioagregado na condição seca, e o valor foi de 0,36 g/cm³. E foi calculada a densidade do bioagregado na condição saturada superfície seca, cujo valor foi de 1,07 g/cm³.

A absorção de água do bioagregado calculada a partir da equação da NBR 16916 (ABNT, 2021), que considera a massa do material na condição saturada

superfície seca e a massa do material após a secagem em estufa foi de 196%. A absorção de água obtida a partir do ensaio realizado para obter o valor da absorção de água no processo da mistura, com base em Da Gloria (2020), conforme explicitado no capítulo 2, foi de 185%. Dessa forma, a absorção de água considerada para determinar a quantidade de água de compensação necessária foi de 190% da massa do bioagregado, média dos valores obtidos nos dois ensaios.

A tabela 3 resume os resultados obtidos de: densidade e absorção de água dos bioagregados, de acordo com a NBR 16916 (ABNT, 2021); absorção de água obtida no processo de mistura, com base em Da Gloria (2020), e da compensação de água necessária considerada.

Tabela 3 - Resumo de propriedades do bioagregado

Propriedades físicas do bioagregado	
Densidade do bioagregado na condição seca (NBR 16916 (ABNT, 2021))	0,36 g/cm ³
Densidade do bioagregado na condição saturada superfície seca (NBR 16916 (ABNT, 2021))	1,07 g/cm ³
Absorção de água do bioagregado (NBR 16916 (ABNT, 2021))	196%
Absorção de água do bioagregado no processo de mistura (DA GLORIA, 2020)	185%
Absorção de água adotada para cálculo da compensação de água necessária	190%

3.2 Materiais cimentícios

A tabela 4 apresenta a massa específica do cimento, da metacaulinita e da cinza volante, obtidas por picnometria.

A Tabela 5 apresenta a composição química do cimento, da cinza volante e da metacaulinita obtidas pelo ensaio de fluorescência de raios-X (FRX).

Tabela 4 – Massa específica dos materiais cimentícios

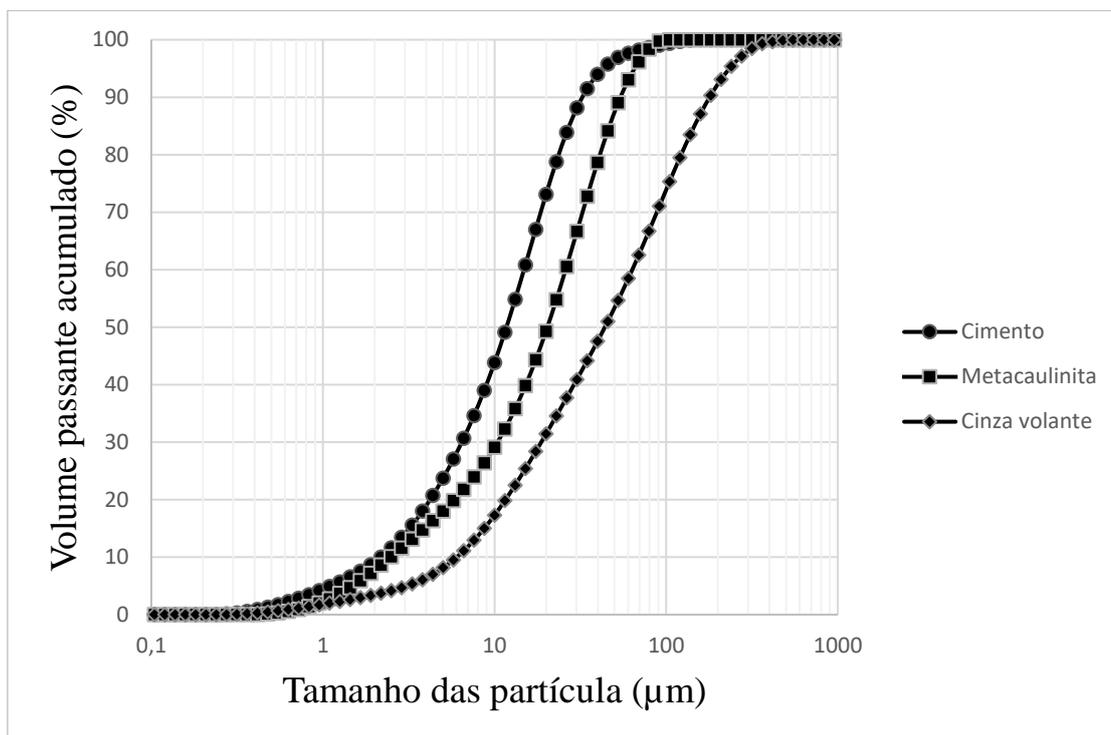
Massa específica (g/cm ³)	
Cimento	3,16
Metacaulinita	2,62
Cinza volante	2,13

O Gráfico 5 apresenta as curvas granulométricas dos materiais. Pode-se observar na curva granulométrica do cimento D90 igual a 32,5 µm, D50 igual a 11,7 µm, D10 igual a 2,18. Na curva granulométrica da metacaulinita observa-se D90 igual a 54,14 µm, D50 igual a 20,32 µm, D10 igual a 2,49 µm. E na curva granulométrica da cinza volante observa-se D90 igual a 179,27 µm, D50 igual a 43,91 µm, D10 igual a 6,01 µm.

Tabela 5 - Composição química da cinza volante

Elemento químico	Cimento	Cinza volante	Metacaulinita
SiO ₂	14,13%	49,01 %	56,86%
Al ₂ O ₃	3,83%	32,55 %	35,17%
Fe ₂ O ₃	4,67%	7,37 %	3,00%
K ₂ O	0,48%	3,85 %	0,45%
CaO	72,21%	2,80 %	0,15%
SO ₃	3,78%	1,61 %	1,44%
TiO ₂	0,33%	1,58 %	2,12%
BaO	-	0,67 %	0,67%
Tm ₂ O ₃	-	0,16 %	-
ZrO ₂	0,02%	0,16 %	0,10%
MnO	0,12%	0,06 %	-
ZnO	0,02%	0,06 %	0,02%
Rb ₂ O	-	0,04 %	-
SrO	0,36%	0,03 %	-
Y ₂ O ₃	-	0,02 %	0,01%
NbO	-	0,01 %	-
CuO	0,40%	-	-

Gráfico 5 - Curvas granulométricas dos materiais cimentícios.

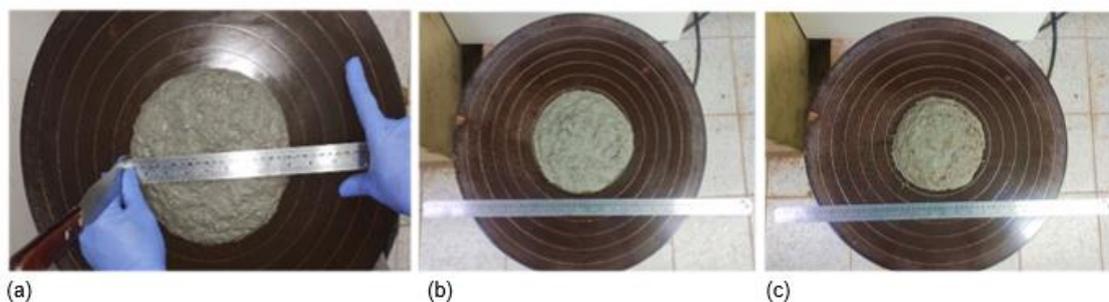


3.3 Bioconcreto

3.3.1 Consistência

No estado fresco, foi verificado o índice de consistência para os três tipos de mistura (Figura 23).

Figura 23 - Ensaio de consistência.

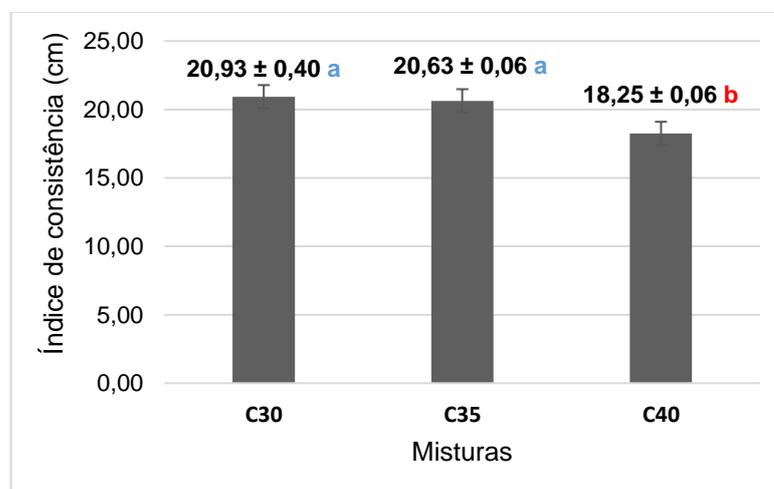


Legenda: (a) mistura C30; (b) mistura C35; (c) mistura C40.

Todas as misturas apresentaram índice de consistência acima do mínimo pré-determinado (180 ± 5 mm), os resultados estão apresentados no Gráfico 6. Os valores do índice de consistência reduziram com o aumento do percentual de bioagregado, corroborando as observações de outros autores a respeito da aplicação de biomassa em compósitos cimentícios, como Lertwattanakul e Suntijitto (2015) que aplicou fibras de coco em compósito cimentício e Sá (2022) que produziu bioconcretos de bambu. Esse fato pode ser explicado pela elevada porosidade que as biomassas apresentam, o que acarreta em excessiva capacidade de absorção de água (SOUZA, 2006). A compensação de água realizada, no entanto, reduz a interferência desse fator à trabalhabilidade das misturas.

A análise de variância mostrou que há diferença entre os grupos (p -valor $<0,001$), e o teste de Tukey mostrou que não há diferença significativa entre o índice de consistência das misturas C30 e C35, mas há diferença entre o resultado do índice de consistência dessas misturas e o da mistura C40, cerca de 12%. As letras a e b no Gráfico 6 indicam a diferença entre os resultados. As misturas produzidas por Sá (2022) com 35% e 40% de bioagregado de bambu, apresentaram índice de consistência estatisticamente iguais (240 mm e 235,5 mm, respectivamente), e a mistura produzida com 45% de bioagregado de bambu apresentou índice de consistência de 202,5 mm, 14% inferior ao índice de consistência da mistura com 40%. Além das características da biomassa empregada, o uso ou não de aditivos, e até mesmo a energia e o tipo de movimento do misturador podem influenciar na consistência das misturas (SANTOS, 2020).

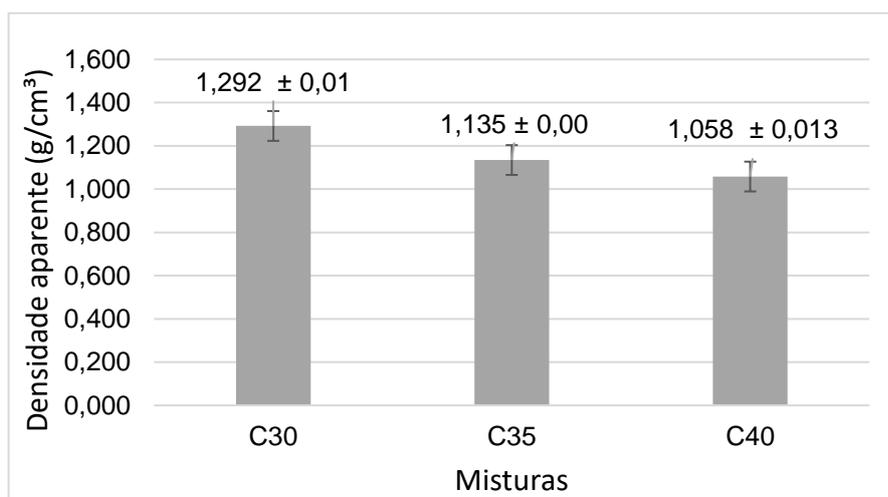
Gráfico 6 – Índice de consistência



3.3.2 Densidade aparente

Os valores de densidade aparente estão apresentados no Gráfico 7. Nota-se redução na densidade com o aumento do percentual de bioagregado, o que Agopyan et al. (2005) relacionam com o fato de a biomassa ser um material mais leve e poroso. A análise de variância e o teste de Tukey mostraram diferença entre os resultados. A mistura C40 apresentou densidade aparente 7% menor que a mistura C35, e 18% menor que a mistura C30. Os resultados foram inferiores aos obtidos por Sá (2022) com o mesmo método, para bioconcretos de bambu: 1,34 g/cm³ para misturas com 35% de bambu; 1,24 g/cm³ para misturas com 40% de bambu e 1,17 g/cm³ para misturas com 45% de bambu.

Gráfico 7 - Densidade aparente g/cm³



3.3.3 Absorção total de água por imersão, índice de vazios e massa específica

Os resultados apresentados na Tabela 6, mostram que o aumento da fração volumétrica de bioagregado elevaram o índice de vazios e a absorção de água dos bioconcretos. Os resultados de massa específica da amostra seca foram semelhantes aos obtidos no cálculo de densidade aparente, no item 3.3.2. Brasileiro, Vieira e Barreto (2013) que também usaram biomassa de coco, obtiveram absorção de água

em torno de 40% para o traço semelhante ao da mistura C30, coerente com o resultado deste estudo. Os autores ressaltam que a porosidade da medula de coco, biomassa usada, contribui para aumentar a porosidade e a absorção de água dos compósitos produzidos, além de reduzir a densidade.

A absorção de água e o índice de vazios se mostrou superior aos do bioconcreto de bambu de Sá (2022), ao se comparar as frações volumétricas usadas. Esse fato pode estar relacionado a características da própria biomassa. O bioagregado de bambu apresenta absorção de água em torno de 70% no processo de mistura, de acordo com SÁ (2022), enquanto o bioagregado de mesocarpo de coco apresentou absorção de água acima de 150%.

A análise estatística mostrou igualdade entre os resultados de massa específica real das 3 misturas. Para os demais parâmetros, foi constatada diferença estatística ao se comparar os resultados das 3 misturas.

Tabela 6 – Resultados de absorção total de água, índice de vazios e massa específica.

Parâmetro	C30	C35	C40
Absorção de água por imersão (%)	44,09 ± 0,015	49,39 ± 0,01	55,74 ± 0,01
Índice de vazios (%)	48,77 ± 0,01	51,63 ± 0,004	54,35 ± 0,004
Massa específica da amostra seca	1,11 ± 0,02	1,04 ± 0,01	0,97 ± 0,01
Massa específica da amostra saturada	1,59 ± 0,02	1,56 ± 0,01	1,52 ± 0,005
Massa específica real	2,16 ± 0,05	2,16 ± 0,01	2,13 ± 0,01

3.3.4 Resistência à compressão uniaxial, módulo de elasticidade e verificação de possíveis aplicações de acordo com a classe de resistência

A Tabela 7 apresenta os resultados médios de resistência à compressão (f_c) e módulo de elasticidade (E) obtidos a partir dos resultados dos ensaios de 5 corpos de prova, para as misturas aos 7 dias e aos 28 dias.

Tabela 7 - Resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade

Mistura	f_{c7} (MPa)	E_7 (GPa)	f_{c28} (MPa)	E_{28} (GPa)
C30	$8,81 \pm 0,22$	$7,08 \pm 0,31$	$10,26 \pm 0,32$	$7,38 \pm 0,62$
C35	$5,94 \pm 0,21$	$4,53 \pm 0,24$	$5,38 \pm 0,30$	$4,03 \pm 0,34$
C40	$3,98 \pm 0,16$	$3,01 \pm 0,16$	$3,44 \pm 0,14$	$3,09 \pm 0,55$

É possível observar redução tanto na resistência à compressão quanto no módulo de elasticidade com o aumento do teor de bioagregado. Esse comportamento também foi observado em outros estudos, como no de Andreola (2017), em que a resistência à compressão aos 28 dias para a mistura com 45% de bioagregado foi de 4,20 MPa e para a mistura com 50% de bioagregado foi de 2,57 MPa, e o módulo de elasticidade para essas misturas foi de 2,35 GPa e 2,01 GPa, respectivamente. Essa relação da resistência à compressão e do módulo de elasticidade com a fração volumétrica de bioagregado pode estar relacionada ao fato de as partículas vegetais serem materiais mais flexíveis e com menor capacidade de absorção de cargas que a matriz cimentícia, conforme explicado por Brasileiro, Vieira e Barreto (2013).

A análise de variância e o teste de Tukey mostraram que há diferença estatística (p -valor $< 0,001$) entre os valores de resistência à compressão tanto aos 7 dias, quanto aos 28 dias, entre as misturas verificadas. Da mesma forma, para os resultados do módulo de elasticidade também foi verificada diferença estatística entre as misturas aos 7. A comparação entre grupos do módulo de elasticidade aos 28 dias mostrou que há diferença significativa entre as misturas C30 e C35, e C30 e C40; e que não há diferença significativa entre as misturas C35 e C40.

Nota-se maior diferença no resultado de resistência à compressão para a mistura C30 em comparação às demais. Aos 28 dias, a diferença entre a resistência à compressão das misturas C30 e C35 foi de aproximadamente 50%; a diferença entre a resistência das misturas C30 e C40 foi de aproximadamente 60%; e a diferença entre a resistência das misturas C35 e C40 foi de aproximadamente 30%.

O resultado da mistura C30 se mostrou condizente com os resultados obtidos por Sá (2022) para o bioconcreto de bambu, e as misturas C35 e C40 apresentaram resultados inferiores. O autor usou fator A/C de 0,30 e obteve resistências de 5,95 (para a mistura com 45% de bioagregado) a 9,96 MPa (para a mistura com 35% de bioagregado).

Seguindo as classes de resistência propostas por Sá (2022) e apresentadas no capítulo 2 deste trabalho, a mistura C30 atingiu a resistência mínima para a classe BC10, bem próxima ao limite de 10 MPa, de bioconcretos com baixa fração volumétrica de biomassa e possibilidade de aplicação em painéis. A mistura C35 se enquadrou na classe BC04, cuja resistência mínima aos 28 dias é de 4 MPa e apresenta a possibilidade de aplicação em blocos de alvenaria estrutural. A mistura C40 se enquadrou na classe BC01, para uso não estrutural, podendo ser aplicada em paredes de vedação, isolantes térmicos e acústicos.

Os Gráficos 8 e 9 apresentam as curvas tensão *versus* deformação dos ensaios de resistência à compressão aos 7 e aos 28 dias, respectivamente, para as 3 misturas. É possível notar que as misturas com menor fração de bioagregado resistiram a cargas maiores. Percebe-se também que após o atingimento da tensão máxima, o decaimento da resistência ocorre de forma menos abrupta com o aumento da deformação para as misturas C35 e C40, que possuem maior fração de biomassa, e, dessa maneira, maior deformabilidade. De acordo com Amziane e Sonebi (2016), o bioconcreto pode ser classificado como um material elastoplástico dúctil devido a combinação da flexibilidade dos bioagregados com a matriz cimentícia rígida.

A Figura 24 apresenta os corpos de prova após os ensaios de resistência à compressão.

Figura 24 – Corpos de prova após ensaio de resistência à compressão.



Legenda: (a) C30 – 7 dias; (b) C30 – 28 dias; (c) C35 – 7 dias; (d) C35 – 28 dias; (e) C40 – 7 dias; (f) C40 – 28 dias.

Gráfico 8 – Curvas tensão versus deformação aos 7 dias.

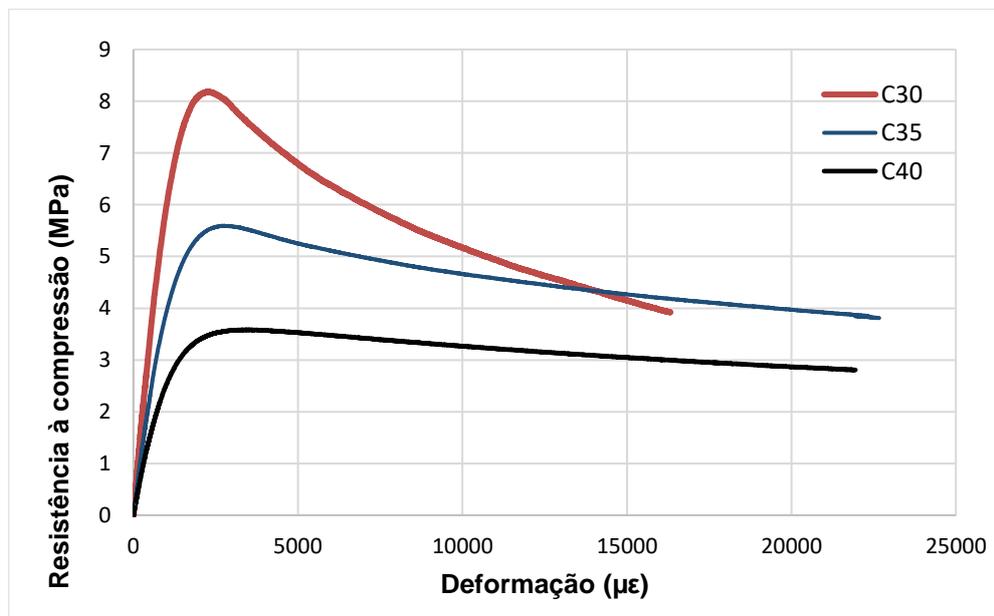
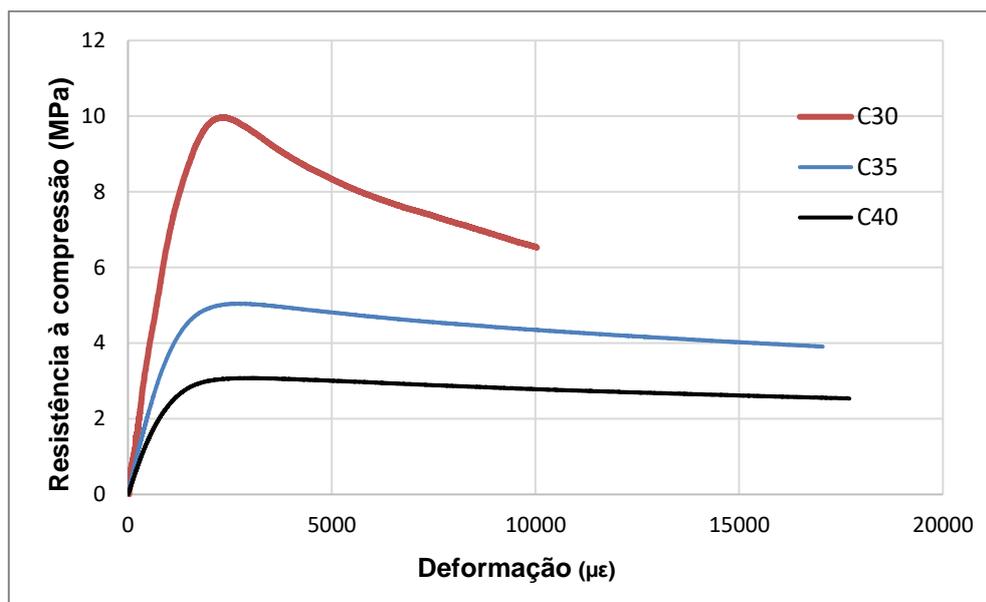


Gráfico 9 - Curvas tensão versus deformação aos 28 dias.



3.3.5 Resistência à tração na flexão

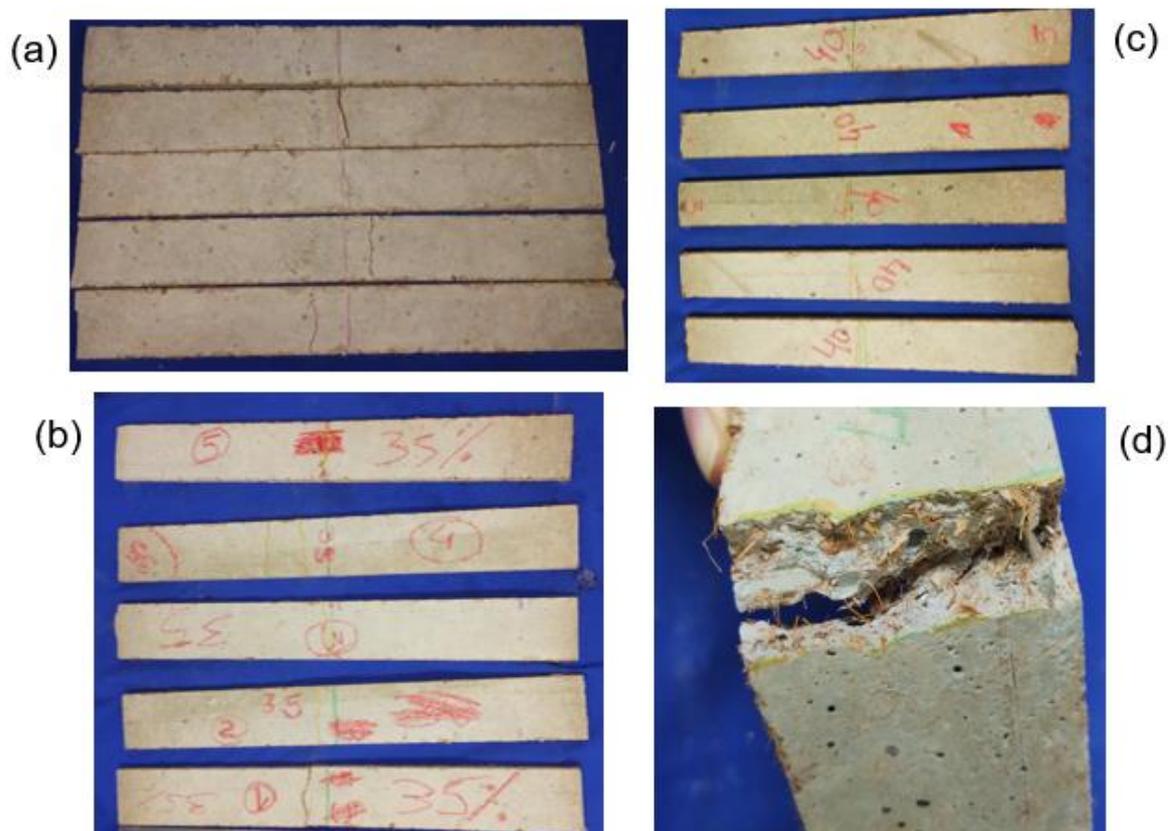
A Tabela 8 apresenta os resultados de módulo de ruptura (MOR) das 3 misturas aos 28 dias. Assim como na resistência à compressão, a mistura com menor fração de bioagregado também apresentou maior resultado de MOR.

Além da fração volumétrica de biomassa, o tipo de biomassa também pode proporcionar diferenças na resistência mecânica (SÁ, 2022). Andreola (2017) e SÁ (2022) também observaram redução dos valores de MOR com o aumento da fração volumétrica de bioagregado, porém os autores obtiveram valores relativamente superiores usando bioagregado de bambu. Para misturas com relação água/cimento de 0,40, Andreola (2017) obteve MOR de 1,85 e 1,46 para misturas com 45% e 50% de bioagregado. Sá (2022), para as misturas com 35%, 40% e 45% de bioagregado, obteve MOR de 2,26, 2,11, e 1,54 respectivamente.

O teste de Tukey mostrou que os resultados das misturas C35 e C40 são estatisticamente iguais, conforme ilustrado com as letras na Tabela 8. E o resultado da mistura C30 foi 30% maior que o da mistura C35. A Figura 25 apresenta os corpos de prova após os ensaios de resistência à tração na flexão. Em alguns corpos de prova foi observada a ocorrência de mais de uma fissura. De acordo com Sá (2022)

isso está relacionado ao fato de as partículas de bioagregado conseguirem distribuir as tensões ao proporcionar ruptura lenta e dúctil do material.

Figura 25 – Corpos de prova após o ensaio de resistência à tração na flexão.



Legenda: (a) C30 – 28 dias; (b) C35 – 28 dias; (c) C40 – 28 dias; (d) região da fissura.

Tabela 8 – Módulo de ruptura

Mistura	MOR (MPa)
C30	1,86 ± 0,25 a
C35	1,29 ± 0,26 b
C40	0,92 ± 0,21 b

CONCLUSÕES

A partir dos estudos experimentais apresentados, foi possível concluir que:

- A consistência do bioconcreto pode ser comprometida com o aumento do teor de bioagregado, porém o uso de aditivo e a compensação de água permitiram o alcance de trabalhabilidade e índices de consistência adequados.
- As propriedades físicas analisadas a partir do ensaio de absorção total de água demonstraram que, quanto maior a fração volumétrica de bioagregado aplicada, maior absorção de água ocorreu e maior índice de vazios foi verificado.
- O uso do bioagregado permite que os bioconcretos sejam materiais leves, e foi possível identificar que o aumento da fração volumétrica do bioagregado do mesocarpo do coco reduziu a densidade dos bioconcretos.
- Foi possível identificar a redução da resistência à compressão e do módulo de elasticidade com o aumento da fração volumétrica de bioagregado do mesocarpo do coco. Os resultados obtidos para frações de 30% e 35% mostraram a possibilidade do uso do bioconcreto com funcionalidade estrutural, principalmente em blocos. A mistura com 30% de bioagregado chegou a atingir o limite mínimo de resistência para aplicação em painéis. O bioconcreto com fração volumétrica de 40% de bioagregado apresentou possibilidade do uso em paredes de vedação sem função estrutural.
- O módulo de ruptura também apresentou redução com o aumento da fração volumétrica do bioagregado.
- O comportamento observado do bioconcreto produzido com mesocarpo do coco se mostrou semelhante ao de bioconcretos produzidos em estudos com outras biomassas. Notou-se, no entanto, a tendência de menores valores de resistência mecânica, menores valores de densidade e maiores valores de índice de vazios, ao se comparar com bioconcretos de bambu, por exemplo. O que pode indicar que o

bioagregado de mesocarpo de coco pode se enquadrar melhor em aplicações não estruturais, com função de vedação e de melhor isolamento térmico.

Dessa maneira, as investigações deste trabalho confirmam o potencial que os resíduos de coco têm para retornarem à cadeia produtiva promovendo concomitantemente novas soluções para os desafios com o meio ambiente inerentes à indústria da construção civil. Identifica-se, no entanto, a necessidade de mais estudos, e sugere-se, por exemplo: estudos de propriedades de longa duração, como absorção de água por capilaridade e retração; ensaios de envelhecimento naturais e acelerados para verificar a durabilidade; verificação de propriedades térmicas e análise do ciclo de vida dos bioconcretos com bioagregado do mesocarpo do coco.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, M. S.; MCGREGOR, F.; FERROUKHI, M. Y. The use of pith in the formulation of lightweight bio-based composites: Impact on mechanical and hygrothermal properties. *Construction and Building Materials*, v. 259, n. 120573, p. 120573, out. 2020.
- AGOPYAN, V.; SAVASTANO JUNIOR, H; JOHN, V. M; CINCOTTO, M. A. Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: An overview. *Cement and Concrete Composites*, v. 27, n. 5, maio 2005.
- AGUIAR, A. L. D. *Estabilidade térmica e reação ao fogo do bioconcreto de madeira*. 2020. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.
- AMZIANE, S.; SONEBI, M. Overview on Biobased Building Material made with plant aggregate. *RILEM Technical Letters*, v. 1, jun. 2016.
- ANDREOLA, V. M. *Caracterização física, mecânica e ambiental de bio-concretos de bambu*. 2017. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- ANDREOLA, V. M.; DA GLORIA, M. Y. R.; SANTOS, D. O. J.; TOLEDO FILHO, R. D. Partial replacement of cement by combination of fly ash and metakaolin in bamboo bioconcretes. *Academic Journal of Civil Engineering*, v. 37, n. 2, jun. 2019.
- ANGULO, S; FIGUEIREDO, A. Concreto com agregados reciclados. In: ISAIA, G. C. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 2ª Ed. Instituto Brasileiro de Concreto – IBRACON, 2011. P. 1731-1767.
- ARENA, N.; LEE, J.; CLIFT, R. Life Cycle Assessment of activated carbon production from coconut shells. *Journal of Cleaner Production*, v. 125, jul. 2016.
- ASIM, M.; UDDIN, G. M.; JAMSHAD, H.; RAZA, A.; TAHIR, Z. R.; HUSSAIN, U.; SATTI, A. N.; HAYAT, N.; ARAFAT, S. M. Comparative experimental investigation of natural fibers reinforced light weight concrete as thermally efficient building materials. *Journal of building engineering*, v. 31, n. 101411, set. 2020.
- 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 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos*. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7211: Agregados para concreto - Requisitos*. Rio de Janeiro, 2022.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8522-1: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação, parte 1: Módulos estáticos à compressão*. Rio de Janeiro, 2021b.
- 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 - Determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água*. Rio de Janeiro, 2021a.
- AYRILMIS, N.; JARUSOMBUTI, S.; FUEANGVIVAT, V.; BAUCHONGKOL, P.; WHITE, H. W. Coir fiber reinforced polypropylene composite panel for automotive interior applications. *Fibers Polymers*, v. 12, nov. 2011.
- BERALDO, A. Bambu-cimento: alternativa para construções rurais. *Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis*, v. 1, p. 145-150, 1997.
- BERALDO, A. L. Compuestos de biomassa vegetal y cemento. In: BORRÁS, V. A.; SAVASTANO JUNIOR, H.; ARJONA, S. D.; MANZANO RAMÍREZ, A. (editores). *Aprovechamiento de residuos agro-industriales como fuente sostenible de materiales de Construcción*. Valencia: CYTED - Universitat Politècnica de València, 2014, p. 301-326.
- BHATTACHARYYA D., SUBASINGHE A., KIM N.K. *Natural fibers: Their composites and flammability characterizations*, 2015.
- BOŠKOVIĆ, I.; RADIVOJEVIĆ, A. Life cycle greenhouse gas emissions of hemp-lime concrete wall constructions in Serbia: The impact of carbon sequestration, transport, waste production and end of life biogenic carbon emission. *Journal of building engineering*, v. 66, n. 105908, maio 2023.
- BRAINER, M. S. C. P. Produção de coco: o Nordeste é destaque nacional. *Caderno Setorial ETENE*, Fortaleza, ano 3, nº 6, dez. 2018.
- BRAINER, M. S. C. P.; XIMENES, L. F. Produção de coco – soerguimento das áreas tradicionais do Nordeste. *Caderno Setorial ETENE*, ano 5, n. 127, ago. 2020.
- BRASIL. LEI Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF.
- BRASILEIRO, G. A. M.; VIEIRA, J. A. R.; BARRETO, L. S. Use of coir pith particles in composites with Portland cement. *Journal of Environmental Management*, v. 131, dez. 2013.

- CALDAS, L. R.; DA GLORIA, M. Y. R., SANTOS, D. O. J.; ANDREOLA, V. M.; PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D. Carbon footprint of bamboo particles, rice husk and wood shavings-cement composites. *Academic Journal of Civil Engineering*, v. 35, n. 2, jun. 2017.
- CHABANNES, M.; BÉNÉZET, J.; CLERC, L.; GARCIA-DIAZ, E. Use of raw rice husk as natural aggregate in a lightweight insulating concrete: An innovative application. *Construction and Building Materials*, v. 70, nov. 2014.
- CHABI, E.; LECOMTE, A.; ADJOVI, E. C.; DIEYE, A.; MERLIN, A. Mix design method for plant aggregates concrete: Example of the rice husk. *Construction and Building Materials*, v. 174, jun. 2018.
- COCO LEGAL. Sustentabilidade. Tudo legal Indústria e Comércio, Rio de Janeiro, RJ [s.d]. Disponível em: <<https://www.cocolegal.com.br/sustentabilidade>>. Acesso em: jun. 2021.
- COLOMBO, R.; ZACCARIAS, H. I. S. Gestão dos resíduos do coco verde no município de São Paulo: estudo de caso e alternativa de aproveitamento sustentável. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 12., 2021. *Anais...* Salvador: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais (IBEAS), 2021.
- DA GLORIA, M. Y. R. Comportamento experimental e numérico de bioconcretos de madeira e de painéis sanduíches com faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal. 2020. 160 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.
- DA GLORIA, M. Y. R.; ANDREOLA, V. M.; SANTOS, D. O. J.; PEPE, M.; TOLEDO FILHO, R. D. A comprehensive approach for designing workable bio-based cementitious composites. *Journal of Building Engineering*, v. 34, fev. 2021.
- DA GLORIA, M. Y. R.; TOLEDO FILHO, R. D. Innovative sandwich panels made of wood bio-concrete and sisal fiber reinforced cement composites. *Construction and Building Materials*, v. 272, fev. 2021.
- DITTENBER, D. B.; GANGARAO, H. V. S. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Composites. Part A, Applied science and manufacturing*, v. 43, n. 8, ago. 2012.
- FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics, 2023. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data>>. Acesso em: 11 mar. 2024.
- FONTES, H. R.; FERREIRA, J. M. S. *A cultura do coqueiro*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006.
- FRAZÃO, C.; BARROS, J.; TOLEDO FILHO, R. D.; FERREIRA, S.; GONÇALVES, D. Development of sandwich panels combining Sisal Fiber-Cement Composites and Fiber-Reinforced Lightweight Concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 86, fev. 2018.

GOMEZ-CAMPOS, A.; SABLAYROLLES, C.; HAMELIN, L.; ROUILLY, A.; EVON, P.; VIALLE, C. Towards fossil-carbon free buildings: Production and environmental performance of innovative sound absorbing panels made from sunflower straw. *Journal of Cleaner Production*, v. 400, maio 2023.

GUNASEKARAN, K.; KUMAR, P. S.; LAKSHMIPATHY, M. Mechanical and bond properties of coconut shell concrete. *Construction and building materials*, v. 25, n. 1, jan. 2011.

GUPTA, M.; SRIVASTAVA, R.; BISARIA, H., Potential of jute fibre reinforced polymer composites: a review. *International Journal of Fiber and Textile Research*, v. 5, ago. 2015.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção Agrícola Municipal, 2022*. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457>>. Acesso em: 11 mar. 2024.

IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R.; CUNHA, A. B.; PRATA, J. G.; HARA, M.; BILA, N. F.; LUIS, R.C.G.; ARAÚJO, R. D. Technological properties of cement-wood panels produced with eucalypt particles. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v. 14, n. 3, dez. 2015.

IWAKIRI, S.; VIANEZ, B. F.; WEBER, C.; TRIANOSKI, R.; ALMEIDA, V. C. Avaliação das propriedades de painéis aglomerados produzidos com resíduos de serrarias de nove espécies de madeiras tropicais da Amazônia. *Acta Amazonica*, v. 42, n. 1, p., mar. 2012.

KOŇÁKOVÁ, D.; VEJMELOVÁ, E.; ČÁCHOVÁ, M.; SIDDIQUE, J. A. Treated Coconut Coir Pith as Component of Cementitious Materials. *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2015, 2015.

LACERDA, M. S.; LEITÃO, F. O coco verde no contexto da economia circular: uma revisão sistemática da literatura. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 14, n. 3, jun. 2021.

LEITÃO, R. C.; ARAÚJO, A. M.; SOUSA, O. L.; FREITAS-NETO, M. A.; VIANA, M. B.; BRITO, C. R. F.; SOUSA, A. B.; ROSA, M. F.; PINTO, G. A. S.; SANTAELLA, S. T. Tratamento Biológico do Líquido da Casca do Coco-Verde. *Boletim de pesquisa e desenvolvimento Embrapa Agroindústria Tropical*. Fortaleza, 2010. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/177521/1/BP10005.pdf>>. Acesso em: 17 nov. 2022.

LERTWATTANARUK, P.; SUNTIJITTO, A. Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications. *Construction and Building Materials*, v. 94, jul. 2015.

LIMA, P. R. L. *Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal*. 2004. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

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

LIU, H.; LI, Q.; NI, S. Assessment of the engineering properties of biomass recycled aggregate concrete developed from coconut shells. *Construction and Building Materials*, v. 342, ago. 2022.

MA, K.; FENG, J.; LONG, G.; XIE, Y. Effects of mineral admixtures on shear thickening of cement paste. *Construction and Building Materials*, v. 126, 2016.

MATI-BAOUCHE, N.; DE BAYNAST, H.; LEBERT, A.; SUN, S.; LOPEZ-MINGO, C. J. S.; LECLAIRE, P.; MICHAUD, P. Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulating bio-based composite made from sunflower stalks particles and chitosan. *Industrial Crops and Products*, v. 58, jul. 2014.

MATTOS, A. L. A.; ROSA, M. F.; CRISOSTOMO, L. A.; BEZERRA, F. C.; CORREIA, D.; VERAS, L. G. C. *Beneficiamento da Casca de Coco Verde*. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2011. 38 p.

MAZHOUD, B.; COLLET, F.; PRÉTOT, S.; LANOS, C. Effect of hemp content and clay stabilization on hygric and thermal properties of hemp-clay composites. *Construction and building materials*, v. 300, n. 123878, set. 2021.

MELO FILHO, J. A. *Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal*. 2012. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

NAWAB, M. S.; ALI, T.; QURESHI, M. Z.; ZAID, O.; KAHLA, N. B.; SUN, Y.; ANWAR, N.; AJWAD, A. A study on improving the performance of cement-based mortar with silica fume, metakaolin, and coconut fibers. *Case studies in construction materials*, v. 19, n. e02480, dez. 2023.

NIRO, J. F. V. M.; KYRIAZOPOULOS, M.; Bianchi, S.; MAYER, I; EUSEBIO, D. A.; ARBOLEDA, J. R.; LANUZO, M. M.; PICHELIN, F. Development of medium - and low - density fibreboards made of coconut husk and bound with tannin-based adhesives. *International Wood Products Journal*, v. 7, n. 4, dez. 2016.

NUNES, L. A.; SILVA, M. L. S.; GERBER, J. Z.; KALID, R. A. Waste green coconut shells: Diagnosis of the disposal and applications for use in other products. *Journal of Cleaner Production*, v. 255, mai. 2020.

NUNES, L. A.; SILVA, M. L. S.; GERBER, J. Z.; KALID, R. A. Waste green coconut shells: Diagnosis of the disposal and applications for use in other products. *Journal of Cleaner Production*, v. 255, mai. 2020.

NUNES, M. U. C.; SANTOS, J. R.; SANTOS, T. C. Tecnologia para Biodegradação da Casca de Coco Seco e de Outros Resíduos do Coqueiro. *Circular Técnica 46 - Embrapa Tabuleiros Costeiros*. Aracaju, 2007. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/158629/1/ct-46.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2022.

OLIVEIRA, J. C. G. *Processos de valorização dos resíduos do coco*. 2017. 95 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

PÉREZ VALDOVINOS, A. S.; RAMIREZ RIVERA, M.; CORREA FUENTES, D. A.; MORENO PEÑA, J. R.; ARCEO DÍAZ, S. Analysis on the mechanic resistance and water absorption capacity of prototype mortar with residual coconut mesocarp and fiber aggregates. *Journal of physics. Conference series*, v. 1672, n. 1, 2020.

PICHAIPILLAI, S.; NITHYANANDAM, M.; KALIYANNAN, S. K.; GOPALAKRISHNAN, D.; PADMANABAN, P. Strength attributes of clay and coconut shell as a partial substitute for cement and coarse aggregate in concrete. *AIP Conf. Proc*, v. 2782, n. 1, jun. 2023.

PIMENTEL, L.L. *Telhas onduladas à base de cimento portland e resíduos de pinus caribaea*. 2000. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2000.

QUIÑONES-BOLAÑOS, E.; GÓMEZ-OVIEDO, M.; MOUTHON-BELLO, J.; SIERRA-VITOLA, L.; BERARDI, U.; BUSTILLO-LECOMPTE, C. Potential use of coconut fibre modified mortars to enhance thermal comfort in low-income housing. *Journal of Environmental Management*, v. 277, jan. 2021.

RIO DE JANEIRO (RJ). Decreto Rio nº 50868 de 31 de maio de 2022. Atualiza o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos – PMGIRS (Período 2021-2024) da Cidade do Rio de Janeiro. *Diário Oficial do Município do Rio de Janeiro*, Ano XXXVI, n. 52, 1 jun. 2022. Disponível em: <https://www.rio.rj.gov.br/documents/91370/12940548/Decreto-Rio-No50868_Atualiza-o-PMGIRS_2021-a-2024-do-RJ.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2023.

SÁ, T. S. W. *Efeito da adição de solo nas propriedades mecânicas e termo-húgricas do bioconcreto de bambu*. 2022. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

SÁEZ-PÉREZ, M. P.; BRÜMMER, M.; DURÁN-SUÁREZ, J. A. A review of the factors affecting the properties and performance of hemp aggregate concretes. *Journal of Building Engineering*, v. 31, set. 2020.

SANTOS, D. O. J. *Desenvolvimento de painéis sanduíche leves com faces em compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal e núcleo em bioconcreto de casca de arroz*. 2020. 144 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -

Programa de Pós graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

SASSONI, E.; MANZI, S.; MOTORI, A.; MONTECCHI, M.; CANTI, M. Novel sustainable hemp-based composites for application in the building industry: Physical, thermal and mechanical characterization. *Energy and Buildings*, v. 77, jul. 2014.

SILVEIRA, M. N. L.; MENALI, L. O.; DA GLORIA, M. Y. R.; TOLEDO FILHO, R. D.; FERREIRA, S. R. Use of cactus wood cereus jamacaru as aggregate in lightweight bioconcrete production. In: Brazilian Conference on Composite Materials, 4., 2018 *Anais...* ABEC Publicações, 2018.

SOUSA, M. I. C.; RÊGO, J. H. S. Effect of nanosilica/metakaolin ratio on the calcium alumina silicate hydrate (C-A-S-H) formed in ternary cement pastes. *Journal of Building Engineering*, v. 38, jun. 2021.

SOUZA, A. A. C. *Utilização de resíduos da indústria madeireira para fabricação de chapas cimento-madeira*. 2006. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, 2006.

SUAZO, F. J. A.; CARREGOSA, J. D. C.; OLIVEIRA, R. M. P. B.; ACCHAR, W. Mechanical performance and healing process improvement of cement-coir pith particle composites by accelerated carbonation. *Revista Materia*, v. 25, n. 2, p. 1–16, 2020.

SUDIN, R.; SWAMY, N. Bamboo and wood fibre cement composites for sustainable infrastructure regeneration. *Journal of Materials Science*, v. 41, n. 21, nov. 2006.

TALHA, N. S.; SULAIMAN, S. In situ transesterification of solid coconut waste in a packed bed reactor with CaO/PVA catalyst. *Waste management (New York, N.Y.)*, v. 78, ago. 2018.

TEIXEIRA, J. N.; SILVA, D. W.; VILELA, A. P.; SAVASTANO JUNIOR, H.; VAZ, L. E. V. S. B.; MENDES, R. F. Lignocellulosic Materials for Fiber Cement Production. *Waste and Biomass Valorization*, v. 11, dez. 2020.

THE JAMOVİ PROJECT. *Jamovi*. Versão 2.5. Disponível em: <<https://www.jamovi.org>>. Acesso em: abr. 2024.

TOLEDO FILHO, R. D. *Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: caracterização experimental*. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

TOLEDO FILHO, R. D.; ENGLAND, G. L.; GHAVAMI, K. Comportamento em compressão de argamassas reforçadas com fibras naturais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 1, p. 79-88, 1997.

TOLEDO FILHO, R. D.; DA GLORIA, M. Y. R.; ANDREOLA, V. M. Durability of bio-based building materials. *Academic Journal of Civil Engineering*, v. 37, n. 2, jun. 2019.

UDHAYASANKAR, R.; KARTHIKEYAN, B. A Review of Coconut Shell Reinforced Composites. *Journal of ChemTech Research*, v. 8, n. 11, 2015.

VAN ELK, A.G.H.P. *Estudo de instrumentos e diretrizes da gestão integrada e do gerenciamento de resíduos sólidos no âmbito da política nacional de resíduos sólidos*. Projeto Prociência. 2021.

VERO COCO. Sustentabilidade. ANCAR Agroindustrial Ltda., São Pedro da Aldeia, RJ, c2023. Disponível em: <<https://verococo.com.br/sustentabilidade/>>. Acesso em: jun. 2022.

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

YADAV, M.; AGARWAL, M. Biobased building materials for sustainable future: An overview. *Materials today: proceedings*, v. 43, p. 2895–2902, 2021.

ANEXO I

Análises estatísticas

Índice de consistência

ANOVA a um fator (Fisher)

	F	gl1	gl2	p
Índice de consistência	113	2	6	< .001

Descritivas de Grupo

	Fração de bioagregado	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
Índice de consistência	C30	3	20.9	0.4041	0.2333
	C35	3	20.6	0.0577	0.0333
	C40	3	18.3	0.0577	0.0333

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
Índice de consistência	0.859	0.093

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
Índice de consistência	4.61	2	6	0.061

Teste Post-Hoc de Tukey – Índice de consistência

		C30	C35	C40
C30	Diferença média	—	0.300	2.67 ***
	p-value	—	0.338	< .001
C35	Diferença média		—	2.37 ***
	p-value		—	< .001
C40	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

Densidade aparente

Estadística Descritiva

	Mistura	DENSIDADE APARENTE (g/cm ³)
N	C30	5
	C35	5
	C40	5
Mediana	C30	1.29
	C35	1.14
	C40	1.06
W de Shapiro-Wilk	C30	0.930
	C35	0.874
	C40	0.812
p Shapiro-Wilk	C30	0.598
	C35	0.283
	C40	0.102
25º percentil	C30	1.29
	C35	1.13
	C40	1.06
50º percentil	C30	1.29
	C35	1.14
	C40	1.06
75º percentil	C30	1.29
	C35	1.14
	C40	1.07

ANOVA a um fator (não-paramétrica)

Kruskal-Wallis

	χ^2	gl	p
DENSIDADE APARENTE (g/cm ³)	12.5	2	0.002

Comparações múltiplas Dwass-Steel-Critchlow-Fligner

Comparações múltiplas - DENSIDADE APARENTE (g/cm³)

		W	p
C30	C35	-3.69	0.024
C30	C40	-3.69	0.024
C35	C40	-3.69	0.024

Absorção de água por imersão

ANOVA a um fator (Fisher)

	F	gl1	gl2	p
Absorção total de água por imersão (%)	144	2	12	< .001

Descritivas de Grupo

	Mistura	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
Absorção total de água por imersão (%)	C30	5	0.441	0.01498	0.00670
	C35	5	0.494	0.00833	0.00373
	C40	5	0.557	0.00772	0.00345

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
Absorção total de água por imersão (%)	0.982	0.982

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
Absorção total de água por imersão (%)	1.51	2	12	0.261

Teste Post-Hoc de Tukey – Absorção total de água por imersão (%)

	C30	C35	C40
C30	Diferença média	—	-0.0529 ***
	p-value	—	< .001
C35	Diferença média	—	-0.0636 ***
	p-value	—	< .001
C40	Diferença média	—	—
	p-value	—	—

Nota. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

Índice de vazios

ANOVA a um fator (Welch)

	F	gl1	gl2	p
Índice de vazios (%)	85.4	2	7.33	< .001

Descritivas de Grupo

	Mistura	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
Índice de vazios (%)	C30	5	0.488	0.01184	0.00529
	C35	5	0.516	0.00375	0.00168
	C40	5	0.543	0.00386	0.00173

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
Índice de vazios (%)	0.958	0.661

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
Índice de vazios (%)	4.05	2	12	0.045

Teste Post-hoc de Games-Howell

		C30	C35	C40
C30	Diferença média	—	-0.0287 **	-0.0558 ***
	p-value	—	0.009	< .001
C35	Diferença média		—	-0.0271 ***
	p-value		—	< .001
C40	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

Massa específica da amostra seca

ANOVA a um fator (Fisher)

	F	gl1	gl2	p
Massa específica da amostra seca	123	2	12	< .001

Descritivas de Grupo

	Mistura	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
Massa específica da amostra seca	C30	5	1.106	0.01921	0.00859
	C35	5	1.046	0.01026	0.00459
	C40	5	0.975	0.00727	0.00325

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
Massa específica da amostra seca	0.970	0.860

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
Massa específica da amostra seca	2.18	2	12	0.155

Teste Post-Hoc de Tukey – Massa específica da amostra seca

		C30	C35	C40
C30	Diferença média	—	0.0608 ***	0.1314 ***
	p-value	—	< .001	< .001
C35	Diferença média		—	0.0706 ***
	p-value		—	< .001
C40	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

Massa específica da amostra saturada

Estatística Descritiva

	Mistura	Massa específica da amostra saturada
N	C30	5
	C35	5
	C40	5
Mediana	C30	1.60
	C35	1.56
	C40	1.52
Desvio-padrão	C30	0.0189
	C35	0.00669
	C40	0.00480
W de Shapiro-Wilk	C30	0.700
	C35	0.853
	C40	0.973
p Shapiro-Wilk	C30	0.010
	C35	0.203
	C40	0.894
25º percentil	C30	1.60
	C35	1.56
	C40	1.52
50º percentil	C30	1.60
	C35	1.56
	C40	1.52
75º percentil	C30	1.60
	C35	1.56
	C40	1.52

ANOVA a um fator (não-paramétrica)

Kruskal-Wallis

	χ^2	gl	p
Massa específica da amostra saturada	11.6	2	0.003

Comparações múltiplas Dwass-Steel-Critchlow-Fligner

Comparações múltiplas - Massa específica da amostra saturada

		W	p
C30	C35	-3.10	0.072
C30	C40	-3.69	0.024
C35	C40	-3.69	0.024

Massa específica real

Estatística descritiva

	Mistura	Massa específica real
N	C30	5
	C35	5
	C40	5
Mediana	C30	2.19
	C35	2.16
	C40	2.13
W de Shapiro-Wilk	C30	0.889
	C35	0.792
	C40	0.867
p Shapiro-Wilk	C30	0.354
	C35	0.069
	C40	0.254
25º percentil	C30	2.14
	C35	2.16
	C40	2.13
50º percentil	C30	2.19
	C35	2.16
	C40	2.13
75º percentil	C30	2.19
	C35	2.16
	C40	2.15

ANOVA a um fator (não-paramétrica)

Kruskal-Wallis

	χ^2	gl	p
Massa específica real	4.88	2	0.087

Resistência à compressão aos 7 dias

ANOVA a um fator (Fisher)

	F	gl1	gl2	p
Resistência à compressão ao 7 dias (MPa)	734	2	12	< .001

Descritivas de Grupo

	Mistura	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
Resistência à compressão ao 7 dias (MPa)	C30	5	8.81	0.225	0.1008
	C35	5	5.95	0.211	0.0942
	C40	5	3.99	0.158	0.0708

Verificação de Pressuposto

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
Resistência à compressão ao 7 dias (MPa)	0.962	0.726

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
Resistência à compressão ao 7 dias (MPa)	0.398	2	12	0.680

Teste Post-Hoc de Tukey – Resistência à compressão ao 7 dias (MPa)

		C30	C35	C40
C30	Diferença média	—	2.87 ***	4.82 ***
	p-value	—	< .001	< .001
C35	Diferença média		—	1.96 ***
	p-value		—	< .001
C40	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

Resistência à compressão aos 28 dias

Estatística Descritiva

	Mistura	Resistência à compressão ao 28 dias (MPa)
N	C30	5
	C35	5
	C40	5
Mediana	C30	10.3
	C35	5.48
	C40	3.42
Desvio-padrão	C30	0.322
	C35	0.304
	C40	0.143
W de Shapiro-Wilk	C30	0.784
	C35	0.704
	C40	0.940
p Shapiro-Wilk	C30	0.060
	C35	0.010
	C40	0.665
25º percentil	C30	10.3
	C35	5.47
	C40	3.40
50º percentil	C30	10.3
	C35	5.48
	C40	3.42
75º percentil	C30	10.4
	C35	5.52
	C40	3.46

ANOVA a um fator (não-paramétrica)

Kruskal-Wallis

	χ^2	gl	p
Resistência à compressão ao 28 dias (MPa)	12.5	2	0.002

Comparações múltiplas Dwass-Steel-Critchlow-Fligner

Comparações múltiplas - Resistência à compressão ao 28 dias (MPa)

		W	p
C30	C35	-3.69	0.024
C30	C40	-3.69	0.024
C35	C40	-3.69	0.024

Módulo de elasticidade aos 7 dias

ANOVA a um fator (Fisher)

	F	gl1	gl2	p
Módulo de elasticidade ao 7 dias (Gpa)	349	2	12	< .001

Descritivas de Grupo

	Mistura	N	Média	Desvio-padrão	Erro-padrão
Módulo de elasticidade ao 7 dias (Gpa)	C30	5	7.06	0.306	0.1370
	C35	5	4.52	0.245	0.1097
	C40	5	3.01	0.162	0.0725

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
Módulo de elasticidade ao 7 dias (Gpa)	0.948	0.500

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
Módulo de elasticidade ao 7 dias (Gpa)	0.539	2	12	0.597

Teste Post-Hoc de Tukey – Módulo de elasticidade ao 7 dias (Gpa)

		C30	C35	C40
C30	Diferença média	—	2.55 ***	4.05 ***
	p-value	—	< .001	< .001
C35	Diferença média		—	1.50 ***
	p-value		—	< .001
C40	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

Módulo de elasticidade aos 28 dias

Estatística Descritiva

	Mistura	Módulo de elasticidade ao 28 dias (Gpa)
N	C30	5
	C35	5
	C40	5
Mediana	C30	7.25
	C35	3.91
	C40	3.00
Desvio-padrão	C30	0.617
	C35	0.341
	C40	0.546
W de Shapiro-Wilk	C30	0.927
	C35	0.763
	C40	0.902
p Shapiro-Wilk	C30	0.579
	C35	0.039
	C40	0.423
25º percentil	C30	6.97
	C35	3.89
	C40	2.77
50º percentil	C30	7.25
	C35	3.91
	C40	3.00
75º percentil	C30	7.58
	C35	3.97
	C40	3.14

ANOVA a um fator (não-paramétrica)

Kruskal-Wallis

	χ^2	gl	p
Módulo de elasticidade ao 28 dias (Gpa)	10.8	2	0.004

Comparações múltiplas Dwass-Steel-Critchlow-Fligner

Comparações múltiplas - Módulo de elasticidade ao 28 dias (Gpa)

		W	p
C30	C35	-3.69	0.024
C30	C40	-3.69	0.024
C35	C40	-2.51	0.178

Resistência à tração na flexão – Módulo de elasticidade (MOR) aos 28 dias

ANOVA a um fator (Fisher)

	F	gl1	gl2	p
Módulo de ruptura (MOR) aos 28 dias (MPa)	19.4	2	12	< .001

Verificação de Pressupostos

Teste à Normalidade (Shapiro-Wilk)

	W	p
Módulo de ruptura (MOR) aos 28 dias (MPa)	0.915	0.161

Teste à Homogeneidade de Variâncias (Levene)

	F	gl1	gl2	p
Módulo de ruptura (MOR) aos 28 dias (MPa)	0.167	2	12	0.848

Teste Post-Hoc de Tukey – Módulo de ruptura (MOR) aos 28 dias (MPa)

		C30	C35	C40
C30	Diferença média	—	0.571 **	0.943 ***
	p-value	—	0.007	< .001
C35	Diferença média		—	0.372
	p-value		—	0.074
C40	Diferença média			—
	p-value			—

Nota. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001