


## Caracterização reológica de pastas ternárias para o desenvolvimento de bioconcretos leves de casca de arroz

### Rheological characterization of ternary pastes for the development of lightweight rice-husk bio-concretes

Carolina Goulart Bezerra<sup>1</sup>, Solanda Oliveira<sup>2</sup>, Nicole Paga Hasparyk<sup>2</sup>, M'hamed Yassin Rajiv da Gloria<sup>1</sup>, Daniele Oliveira Justo dos Santos<sup>1</sup>, Alexandre de Castro Pereira<sup>2</sup>, Vivian Karla Castelo Branco Louback Machado Balthar<sup>1,3</sup>, Romildo Dias Toledo Filho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro, Núcleo de Ensino e Pesquisa em Materiais e Tecnologias de Baixo Impacto Ambiental na Construção Sustentável. Avenida Athos da Silveira Ramos, 149, 21941-972, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup>ELETRONBRAS Furnas, Departamento de Segurança de Barragens e Tecnologia. Av. Graça Aranha, 26, 20030-000, Goiânia, GO, Brasil.

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Estruturas. Av. Pedro Calmon, 550, 21941-485, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

e-mail: carol.goulart@numats.coc.ufrj.br; solanda@furnas.com.br; nicole@furnas.com.br; yassin@numats.coc.ufrj.br; daniele.justo@numats.coc.ufrj.br; alexcasp@furnas.com.br; vivian@numats.coc.ufrj.br; toledo@numats.coc.ufrj.br

#### RESUMO

Esta pesquisa experimental tem como objetivo produzir bioconcretos de casca de arroz (BCCs) com uma matriz de misturas ternárias de cimento, cinza da casca de arroz e cinza volante. A primeira etapa consistiu na avaliação da influência de um aditivo superplastificante e um aditivo polifuncional no comportamento reológico de pastas cimentícias. O objetivo dessa etapa foi testar diferentes teores dos aditivos a fim de desenvolver uma pasta fluida que, após a adição de altas frações volumétricas de casca de arroz (CA), permita obter BCCs leves que possuam trabalhabilidade adequada para adensamento por vibração mecânica. Realizou-se uma trituração e um tratamento químico da CA, no intuito de melhorar sua aderência com a matriz. Os resultados experimentais mostram que o aditivo do tipo PF apresentou melhor compatibilidade com a matriz a um teor de 0,3%. Assim, os BCCs produzidos apresentaram-se coesos e sem segregação, com espalhamento de  $210 \pm 30$  mm. A massa específica seca e a resistência à compressão foram determinadas aos 28 dias de idade. Com os resultados obtidos, os BCCs apresentaram massa específica entre 1000 e 1300 kg/m<sup>3</sup> e resistência à compressão superiores a 8,0 MPa, indicando a possibilidade de utilização na produção de painéis leves e autoportantes.

**Palavras-chave:** Bioconcretos leves; Casca de arroz; Reologia; Propriedades mecânicas; Combinações ternárias.

#### ABSTRACT

This experimental research aims to produce rice husk bio-concretes (RBCs) with a matrix of ternary mixtures of cement, rice husk ash and fly ash. The first step consisted in an evaluation of the influence of a superplasticizer additive and a polyfunctional additive on the rheological behavior of cementitious pastes. The purpose of this step was to test different levels of additives in order to develop a paste that, after adding high volumetric fractions of rice husk, allows obtaining RBCs that have adequate workability for compaction by mechanical vibration. A grinding and chemical treatment process was carried out on the rice husk to improve its adhesion with the matrix. The experimental results show that the PF type additive showed better compatibility with the ternary combination at an optimal content of 0.3%. Thus, the RBCs produced were cohesive, without segregation, with spreading of  $210 \pm 30$  mm. The dry specific mass and compressive strength of the RBCs were determined after 28 days of age. Based on the results obtained, the BCCs presented specific mass between 1000 and 1300 kg/m<sup>3</sup> and compressive strength higher than 8.0 MPa, indicating the possibility of use in the production of lightweight and load bearing panels.

**Keywords:** Lightweight bio-concretes; Rice husk; Rheology; Mechanical properties; Ternary mixtures.

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é reconhecida por utilizar em seu processo produtivo grandes quantidades de diferentes recursos naturais, causando expressivo impacto ambiental. KRAUSMANN *et al.* [1] afirmam que 75Gt/ano de materiais são extraídos da natureza e que 40% deste montante é representado por agregados e matérias-primas para a produção de cimento, dentre outros materiais de construção. Por isso, a busca por soluções que combinem a redução dos impactos ambientais decorrentes da extração de recursos naturais com os requisitos técnicos da construção civil torna-se uma necessidade crescente.

O emprego de resíduos agroindustriais como matéria prima no setor da construção, assim como o uso de materiais suplementares em substituição parcial ao cimento Portland em misturas cimentícias, são estratégias que visam mitigar a dependência de recursos de fontes não renováveis. Os resíduos agroindustriais são atrativos pelo fato de estarem disponíveis em grande quantidade e por serem resíduos de outro processo produtivo [2]. Estima-se uma produção anual global desses resíduos na ordem de 140 Gt e o Brasil está entre os quatro maiores produtores de resíduo de biomassa agrícola [3].

Entre os resíduos produzidos no Brasil, destaca-se a casca de arroz, obtida no processo de beneficiamento do arroz. No ano comercial 2020/2021, a produção de arroz foi estimada a 10,9 milhões de toneladas [4], sendo 20% à massa da casca. Em geral, a casca é queimada de forma não controlada ou transportada para aterro, gerando impactos ambientais negativos [5]. No entanto, o reaproveitamento deste material residual, que é abundante e renovável, na construção civil pode beneficiar a sustentabilidade da atividade agrícola, além de gerar materiais cimentícios suplementares de excelentes características [6–11] e elementos construtivos de baixo custo, leveza e impacto ambiental e eficiência energética [10, 12–16].

Segundo FAN *et al.* [17], os bioconcretos podem ser aplicados em telhados, estruturas pré-fabricadas, formas permanentes, barreiras acústicas, painéis de isolamento térmico e na produção de habitações de interesse social. Uma das principais características deste tipo de material é sua leveza, em decorrência do uso de bioagregados de baixa massa específica. No entanto, a depender do tipo de biomassa, de adensamento escolhido e de desempenho mecânico almejado, a produção de bioconcretos pode implicar em elevados consumos de cimento. No estudo realizado por GLORIA *et al.* [18], para a produção de bioconcretos contendo de 45% a 55% de casca de arroz com relações água/cimento variando entre 0,40 e 0,50 foram necessários consumos de cimento entre 630 e 775 kg/m<sup>3</sup>. Altos consumos de cimento elevam a pegada de carbono do bioconcreto, uma vez que para a produção de uma tonelada de cimento ocorre a liberação de cerca de uma tonelada de CO<sub>2</sub> para a atmosfera [19].

A substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares (MCS) tem sido uma solução amplamente adotada para a redução do consumo de cimento, em especial em compósitos reforçados com fibras vegetais [20–22]. A utilização de combinação de MCS tem sido bastante estudada nos últimos anos na produção de bioconcretos, destacando-se a combinação de cinza volante e metacaulinita [23]; cinza volante e escória de alto forno [24]; sílica ativa e cinza de casca de arroz [25]. Em sua pesquisa, ANDREOLA *et al.* [23] avaliaram os efeitos da substituição parcial de cimento por 30% de metacaulinita e 10%, 20%, 30% e 40% de cinza volante nas propriedades mecânicas de bioconcretos contendo 40% de partículas de bambu. Os pesquisadores observaram que o bioconcreto com 60% de substituição parcial do cimento por MCS apresentou uma resistência de cerca de 80% da resistência do bioconcreto de cimento Portland. Do ponto de vista ambiental, essa substituição de cimento mostrou-se uma estratégia bastante adequada para reduzir os impactos ambientais dos bioconcretos estudados [26].

No que se refere ao processo de fabricação dos bioconcretos, é importante mencionar que a indústria utiliza principalmente a prensagem mecânica. Este método, além de consumir uma quantidade significativa de energia, inviabiliza a produção de bioconcretos *in loco* e com uso de mão de obra local, característica de construções de habitações, por exemplo [27]. Para superar tal limitação, GLORIA [27] e ANDREOLA *et al.* [23] propõem a utilização do método normalmente utilizado para produzir o concreto convencional, onde o uso de grandes maquinários é dispensável. Para permitir que o método de produção do concreto seja aplicável para bioconcretos, é necessário que o material apresente trabalhabilidade suficiente para ser moldado com facilidade, lançado e adensado por vibração mecânica sem segregação ou exsudação [27]. A dosagem racional de bioconcretos de serragem de madeira, bambu e casca de arroz realizada por GLORIA *et al.* [18] evidenciou a importância de compensar a água absorvida pelas biomassas durante a moldagem para garantir um adensamento por vibração mecânica. Essa compensação consistiu em adicionar, além da água de hidratação do cimento, uma quantidade de água destinada a ser absorvida pelas biomassas durante a mistura. Além da compensação de água, o uso de aditivos superplastificantes também contribuiu na obtenção de bioconcretos trabalháveis, conforme verificado por ANDREOLA *et al.* [23].

Diante do exposto, o presente trabalho apresenta um programa experimental desenvolvido visando a extensão do método proposto por GLORIA [27] para matrizes de cimento e cimento-metacaulinita-cinza

volante, para a dosagem de bioconcretos leves e de boa trabalhabilidade utilizando-se uma blenda ternária de cimento-cinza de casca de arroz-cinza volante e elevados teores de biomassa de casca de arroz (40%, 45% e 50%). Os bioconcretos foram caracterizados para determinação do espalhamento na mesa de consistência e para determinação da massa específica e comportamento tensão x deformação na compressão dos BCCs após 7 e 28 dias de idade.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

#### 2.1.1. Materiais cimentícios

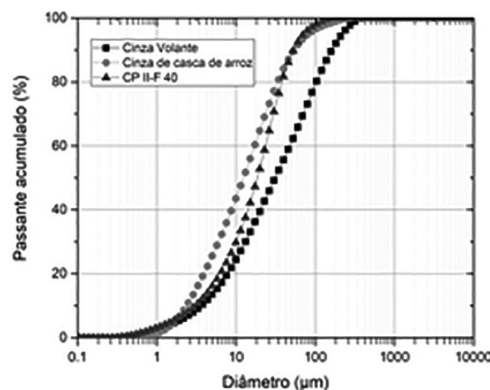
Os materiais cimentícios utilizados nesta pesquisa foram os seguintes: cimento Portland CP II-F-40 (*Lafarge-Holcim*), cinza volante – CV (*Pozo Fly*) e cinza da casca de arroz – CCA (*Silcca Nobre*). As composições químicas dos materiais cimentícios em óxidos foram determinadas em espectrômetro de fluorescência de raios X (FRX) por energia dispersiva, modelo EDX-720 da Shimadzu, enquanto suas perdas ao fogo foram obtidas de acordo com a norma [28]. As composições químicas estão apresentadas na Tabela 1, enquanto na Tabela 2 estão mostradas as propriedades físicas e mecânicas. Na Figura 1 estão apresentadas as curvas granulométricas dos materiais cimentícios, determinadas por ensaio de granulometria laser no equipamento Malvern Mastersizer 2000. O dispersante utilizado foi o álcool etílico absoluto P.A. para o CP II-F 40 e a água para as cinzas, com tempo de dispersão de 5 min e velocidade de 2150 rpm. As micrografias foram obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo Hitach TM 3000, com detector de elétrons retroespalhado, analisadas no modo COMPO, com baixo vácuo e tensão de aceleração de 15kv e estão ilustradas na Figura 2a (cimento), Figura 2b (CCA) e Figura 2c (CV).

**Tabela 1:** Composição química dos materiais cimentícios em %.

MATERIAL	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	MnO	K <sub>2</sub> O	SrO	TiO <sub>2</sub>	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaO	PF
CP II-F-40	11,47	3,15	4,02	66,70	3,62	0,08	0,54	0,31	–	0,27	–	–	9,78
CV	53,53	30,62	5,26	1,78	1,69	0,06	3,45	0,02	1,09	–	0,13	0,54	1,66
CCA	89,41	–	0,07	1,04	1,41	0,52	2,34	–	–	–	–	–	5,19

**Tabela 2:** Propriedades físicas e mecânicas dos materiais cimentícios.

PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS	CP II-F-40		CV	CCA
	3 dias	28 dias	–	–
Resistência à compressão (MPa)	≥15,0	≥40,0	–	–
Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3854		–	–
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2970		1920	2250



**Figura 1:** Curvas granulométricas dos materiais cimentícios.

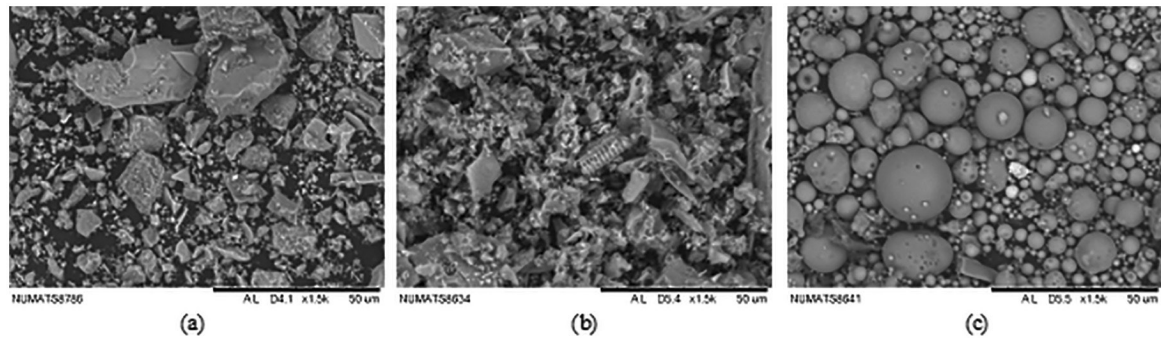


Figura 2: Micrografias dos materiais: (a) MEV do cimento; (b) MEV da CCA; (c) MEV da CV.

### 2.1.2. Casca de arroz

A casca de arroz (CA) foi fornecida pela empresa Camil Alimentos S.A., localizada no município de Itaqui, no estado do Rio Grande do Sul (Brasil). Com o objetivo de promover uma melhor compatibilidade com a matriz cimentícia, a CA foi tratada por imersão em solução alcalina preparada por diluição de 1,85 gramas de hidróxido de cálcio por litro de água. Esse tratamento consistiu na imersão, por duas horas, da casca de arroz na solução alcalina com a razão CA/água de 1:15 (em massa). Após o término da imersão, a casca foi retirada e seca ao ar livre durante 3 dias.

De acordo com CHABI *et al.* [29], o formato alongado da casca de arroz, semelhante a um barco (ver Figura 3a), dificulta o empacotamento entre as suas próprias partículas para elevadas frações volumétricas. De forma a beneficiar o empacotamento entre as partículas, CHABI *et al.* [29] e NDAZI *et al.* [30] propõem a trituração/moagem da CA. A CA empregada na pesquisa foi triturada em equipamento industrial Fragmaq (Modelo FT-75). Para cada 1 kg de casca, a trituração ocorreu por 8 segundos. A micrografia da CA após o processo de trituração é mostrada na Figura 3b. Observa-se que a moagem alterou a forma da casca, reduzindo o seu comprimento e promovendo o rasgamento da partícula. Irregularidades em sua superfície são também observadas em decorrência da ação dos dentes rolo do triturador utilizado.

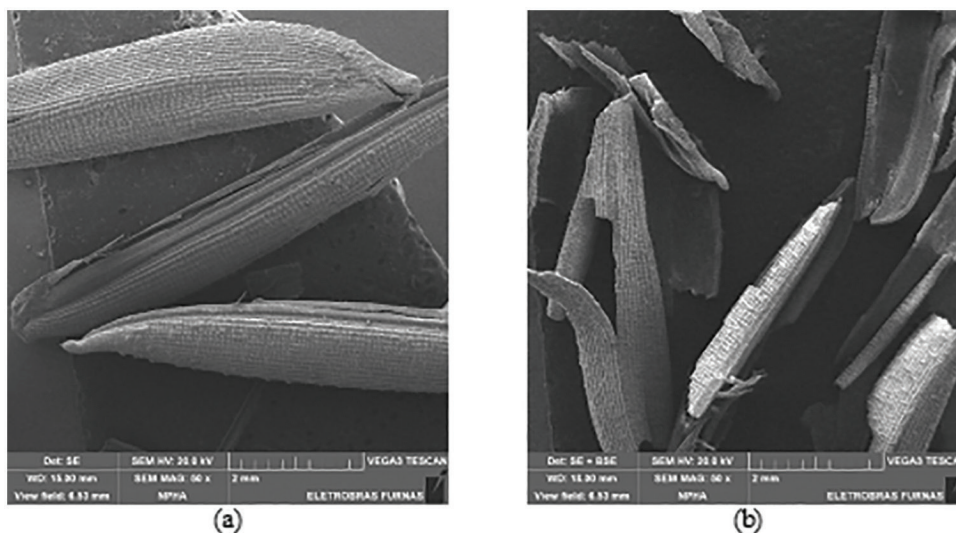


Figura 3: Micrografia da casca de arroz (a) natural; (b) triturada.

Após a trituração, procedeu-se à determinação da massa específica da CA tratada segundo a norma [31] e a determinação da sua absorção de água de acordo com o procedimento adotado por GLORIA [27]. Os resultados da massa específica e absorção de água foram iguais a  $400 \text{ kg/m}^3$  e 112%, respectivamente.

### 2.1.3. Aditivos químicos

Os seguintes aditivos dispersantes foram avaliados nas pastas: aditivo superplastificante a base de éter policarboxílico modificado (Glenium 51; Teor de sólidos igual a 33,0%); aditivo plastificante híbrido, do tipo



polifuncional, a base de lignossulfonato e aditivos especiais à base de éter policarboxilato (Masterpolyheed 322; Teor de sólidos igual a 32,8%). Outros dois aditivos químicos foram incorporados aos bioconcretos: agente modificador de viscosidade (VMA Rheomac UW410) e acelerador de pega (cloreto de cálcio).

## 2.2. Desenvolvimento da matriz

A matriz estudada para produzir os bioconcretos foi composta por cimento, cinza de casca de arroz e cinza volante na proporção de 45:25:30 (em massa), respectivamente, e relação água materiais cimentícios (a/mc) igual a 0,30. A escolha da matriz desta pesquisa visou substituir o cimento Portland por materiais cimentícios suplementares (SCM) para mitigar a pegada de carbono do bioconcreto, conforme realizado por CALDAS *et al.* [9]. O teor de 45% de cimento foi utilizado baseando-se no desempenho mecânico observado por AGUIAR *et al.* [32] e CALDAS *et al.* [9] que produziram bioconcretos de madeira com 40% e 50% de cimento, respectivamente. Quanto ao teor de cinza volante, foi fixado a 30% seguindo as recomendações de AGUIAR *et al.* [32] e conseqüentemente, a fração mássica de cinza de casca de arroz foi de 25%. Foi verificado nos estudos de LIMA e IWAKIRI [33] que até 30% de CCA podem ser empregado em bioconcretos de casca de arroz sem perda da resistência à compressão. Devido à alta capacidade de retenção de água das cinzas de casca de arroz, conforme evidenciado por VIEIRA *et al.* [15], realizou-se, em pastas, o estudo da reologia descrito em 2.2.1 de forma a escolher o aditivo químico de melhor desempenho com o sistema ternário utilizado.

### 2.2.1. Estudo de reologia de pastas

Para os estudos reológicos foi usado um reômetro modelo TA Instruments AR-G2 (Figura 4). Foi empregada a metodologia de fluxo rotacional para a avaliação reológica por geometria de placas paralelas, com diâmetro de 40 mm, espessura de amostra teste de 1 mm e temperatura controlada em  $23 \pm 1^\circ\text{C}$ . A taxa de cisalhamento no regime de fluxo variou de  $0 \text{ s}^{-1}$  a  $400 \text{ s}^{-1}$  com ciclos de aceleração e desaceleração. Foram adotados três ciclos, totalizando seis curvas de fluxo, em que foram relacionadas às taxas de cisalhamento com as tensões cisalhantes e com as viscosidades das pastas. Para análise do comportamento reológico, nesse trabalho, foram considerados apenas os fluxos intermediários de ensaio, isto é, fluxos 5 (aceleração) e 6 (desaceleração) do procedimento adotado.

Ambos os aditivos (plastificante e superplastificante) foram testados em pastas de cimento nos seguintes teores: 0,1%, 0,3%, 0,5% e 1%. Após a definição do melhor aditivo do ponto de vista reológico, foram realizados ensaios complementares em vários teores (variando de 0,1% a 1,5%) para a identificação do teor ótimo (no ponto de saturação).

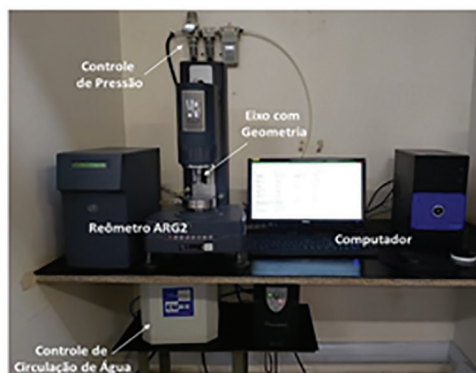


Figura 4: Reômetro de pasta.

## 2.3. Produção dos bioconcretos

Após a escolha do superplastificante foi iniciada a produção de BCC, tomando como referência os estudos realizados por GLORIA [27]. Os bioconcretos foram dosados para frações volumétricas de 40%, 45% e 50% de casca de arroz. A relação a/mc foi fixada em 0,30, e uma massa de água de compensação equivalente a 100% do valor da água de absorção da casca foi adicionada à mistura. Além disso, em relação à massa de ligante foram utilizados 2% de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ), para acelerar a pega dos BCC segundo o estudo realizado por ANDREOLA [34] e 0,2% de VMA, para melhorar a coesão seguindo as recomendações de PARIDAH *et al.* [12]. O consumo dos materiais por metro cúbico para os BCC40, BCC45 e BCC50 está apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3:** Consumo dos materiais (kg) para produzir 1 m<sup>3</sup> de bioconcreto.

MISTURA	C	CA	CCA	CV	A <sub>H</sub>	A <sub>C</sub>	CaCl <sub>2</sub>	Adi	VMA
BCC40	375,82	160,00	208,79	250,55	250,55	179,20	16,70	2,51	1,67
BCC45	344,50	180,00	191,39	229,67	229,67	201,60	15,31	2,30	1,53
BCC50	313,18	200,00	173,99	208,79	208,79	224,00	13,92	2,09	1,39

C: Cimento; CA: casca de arroz; CCA: Cinza da casca de arroz; CV: Cinza volante; CaCl<sub>2</sub>: cloreto de cálcio; A<sub>H</sub>: Água de hidratação; A<sub>C</sub>: Água de compensação; Adi: Aditivo escolhido; VMA: Agente modificador de viscosidade.

Os bioconcretos foram produzidos em uma argamassadeira com capacidade de 5 litros. Antes de ser adicionado à mistura, o cloreto cálcio foi diluído em metade da água, enquanto o superplastificante escolhido, na outra metade. O procedimento de mistura foi iniciado a partir da homogeneização dos materiais granulares secos (C, CA, CCA e CV) na cuba da argamassadeira durante 1 minuto. Em seguida, a água foi adicionada continuamente durante 2 minutos e, posteriormente, a argamassadeira permaneceu desligada por 30 segundos para a raspagem do material aderido na cuba. Por fim, o VMA foi adicionado ao material e o conjunto foi misturado por mais 2 minutos.

Após a confecção de cada bioconcreto, o material fresco foi lançado em moldes cilíndricos, previamente limpos e lubrificados por óleo mineral, em três camadas. Cada camada do bioconcreto foi adensada em mesa vibratória (frequência de 68 Hz) por 10 segundos. Os corpos de prova foram mantidos por 24 horas nos moldes e protegidos da perda de umidade. Após a desmoldagem, estes foram levados para a câmara seca (umidade relativa de 60% e temperatura de 21 ± 2 °C), onde permaneceram até completarem as idades de ensaio.

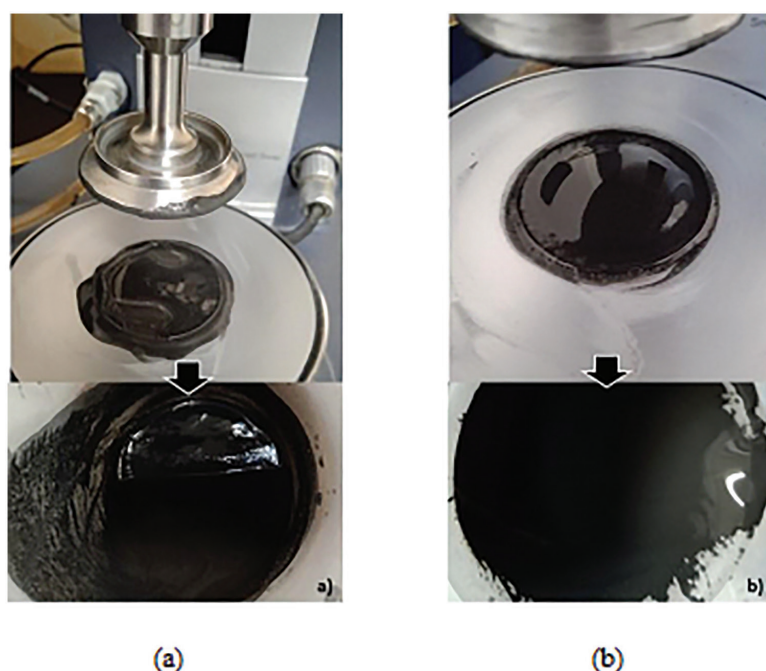
#### 2.4. Caracterização dos bioconcretos

Os bioconcretos foram avaliados no estado fresco por meio do ensaio de consistência [35] numa mesa de diâmetro 60 cm. No estado endurecido determinou-se a massa específica seca [30] aos 28 dias e comportamento tensão- deformação na compressão [36] nas idades de 7 e 28 dias. Os ensaios foram realizados em corpos de prova cilíndricos (diâmetro 50 mm, altura 100 mm), em uma prensa *Wykeham Farrance* de capacidade 250 kN, na velocidade de 0,3 mm/min. A deformação axial consistiu na média fornecida por dois transdutores elétricos (LVDTs) posicionados diametralmente opostos na região central do corpo de prova.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Estudo de reologia das pastas

O estudo reológico em pasta permitiu avaliar o melhor aditivo e teor a ser empregado nas misturas ternárias, com base nos parâmetros de viscosidade e taxa de cisalhamento. Na Figura 5 pode ser observado o aspecto de duas



**Figura 5:** Aspecto das duas misturas com o aditivo a) superplastificante – SP e b) polifuncional – PF.

das misturas testadas, especificamente no teor de 0,3%, para os dois aditivos químicos avaliados. Evidencia-se, como será discutido em detalhes mais adiante, um comportamento indesejável por parte do superplastificante utilizado. A mistura na presença desse aditivo não ficou homogênea, havendo a sua segregação e deposição no fundo do recipiente, prejudicando a trabalhabilidade e sugerindo uma pasta dilatante.

Nas Figuras 6 e 7, são apresentados os comportamentos reológicos das pastas com aditivos SP e PF, respectivamente. As porcentagens referem-se aos teores do aditivo plastificante utilizado; já as indicações R5 e R6 referem-se às rampas (steps) de aceleração e desaceleração, respectivamente. Nessas figuras são apresentados os vários teores de aditivos testados em relação ao material cimentício, variando de 0,1% a 1%. Com o primeiro aditivo eleito para uso, tipo superplastificante (SP), as misturas não se mostraram trabalháveis devido à segregação observada, conforme Figura 7a, na qual se observa material depositado no fundo do béquer. Com o uso do aditivo polifuncional (PF), observou-se compatibilidade adequada com a mistura ternária avaliada (ver Figura 7b). Na Figura 6c observou-se uma pequena oscilação da viscosidade da pasta 0,5%, entre as taxas cisalhantes  $75 \text{ s}^{-1}$  e  $150 \text{ s}^{-1}$ . Isso ocorreu por alguma aglomeração de partículas da amostra, mas sem relevância na determinação do comportamento reológico ou qualquer impacto de determinação de viscosidade dessa pasta, pois o ciclo de volta R6 evidencia a estabilidade estrutural da amostra.

Além da análise visual, procedeu-se a avaliação reológica completa prevista no programa experimental. Apresenta-se na Figura 6a comparação das pastas de referência com as pastas contendo SP e na Figura 7 com as pastas contendo PF nos teores 0,1%, 0,3%, 0,5% e 1%. As pastas executadas com o uso do aditivo SP mostraram um comportamento dilatante, que é caracterizado pelo aumento da viscosidade do fluido à medida que a taxa de cisalhamento aumenta, conforme pode ser observado na Figura 7c. Nas pastas produzidas com a utilização do aditivo SP o comportamento observado foi pseudoplástico, com a redução da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, conforme exibido na Figura 6b. As viscosidades das pastas produzidas com o aditivo SP se mostraram, em média, 45% maiores que as pastas do aditivo PF.

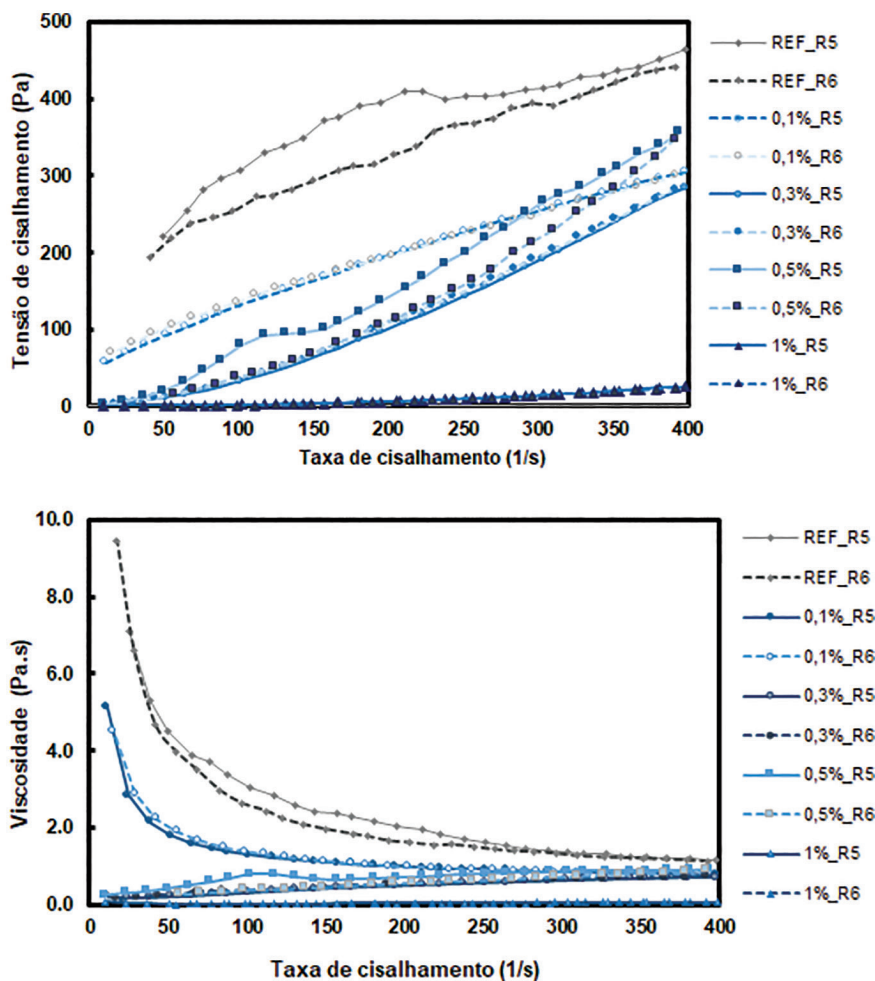


Figura 6: Aditivo SP: (a) Tensão de cisalhamento; (b) Viscosidade com a pasta de Referência; (c) Viscosidade sem a pasta de Referência.

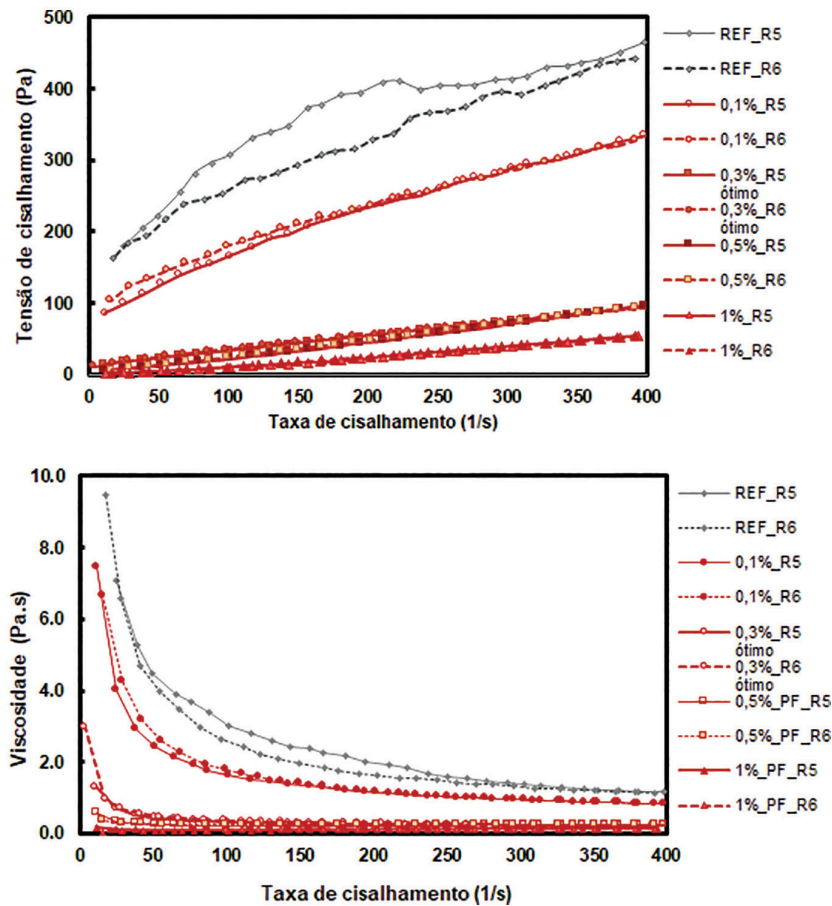


Figura 7: Aditivo PF: (a) Tensão de cisalhamento; (b) Viscosidade.

Em relação à tensão de cisalhamento, ocorre um aumento de esforços cisalhantes conforme é aumentado o teor de aditivo para as pastas produzidas com o aditivo SP, já indicando uma desestabilização do fluido. No teor de 1%, com a maior quantidade de aditivo empregada no estudo, são observadas baixas viscosidades, conforme apresentado na Figura 6a. Isso evidencia a falta de consolidação da pasta, com ocorrência de segregação da mistura, e consequente exsudação da água, resultando, portanto, no comportamento reológico observado decorrente da interferência dessa exsudação. Para as pastas com aditivo SP, foram observados comportamentos normais, isto é, houve uma efetiva redução da tensão de cisalhamento e da viscosidade com o aumento do teor de aditivo utilizado, conforme exibido na Figura 7.

De modo geral as pastas com aditivos não apresentaram área de histerese, ou seja, observou-se que os ciclos de ensaio, na aceleração e desaceleração, praticamente se sobrepõem, evidenciando fluidos homogêneos e de estrutura bem consolidada. Enquanto a pasta de referência, sem aditivo, apresentou um comportamento tixotrópico, com a redução da viscosidade ao longo do período de ensaio. Isso é observado pela curva de aceleração apresentando valores de tensão de cisalhamento superiores aos valores da curva de desaceleração, sendo o grau de tixotropia determinado pela área de histerese (área entre as curvas).

Quanto à tensão de escoamento, observa-se que a pasta de referência e as pastas com teor de 0,1%, para os dois aditivos, apresentaram tensão de escoamento significativamente superior às tensões de escoamento das pastas com teores iguais ou superiores a 0,3%. Desse modo, torna-se relevante estudar a otimização do teor de aditivo por meio da determinação do ponto de saturação.

Utilizando-se o aditivo PF pelas considerações reológicas supramencionadas, foi determinado ponto de saturação desse aditivo. Nota-se na Figura 8 que a partir do teor de 0,3% de aditivo não foi observada mudança considerável de viscosidade concluindo-se, assim, que não é necessário fazer o uso de teores maiores do que 0,3% nas misturas ternárias estudadas.

### 3.2. Índices de consistência dos bioconcretos

Os espalhamentos dos bioconcretos estudados estão apresentados na Figura 9. Observando-se as fotografias nota-se que todas as misturas se apresentam coesas, sem qualquer segregação e exsudação após o ensaio



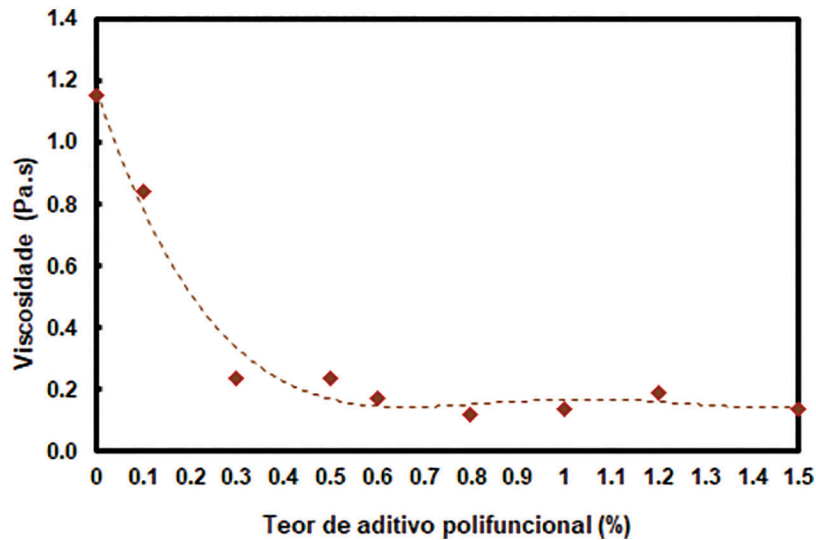


Figura 8: Curva de ajuste do ponto de saturação de aditivo das pastas produzidas com o Aditivo PF.

de consistência. Os BCC40, BCC45 e BCC50 apresentaram índices de consistência de 240, 190 e 185 mm, respectivamente. Conforme registros da literatura, esses valores obtidos indicam que os BCCs são trabalháveis e podem ser adensados por vibração mecânica [27, 32]. O estudo realizado nas pastas indicou o aditivo mais eficiente para emprego nos BCCs, uma vez que, por exemplo, o espalhamento do bioconcreto BCC45 sem o aditivo foi 150 mm e essa mistura não demonstrou a coesão observada com o emprego do aditivo.

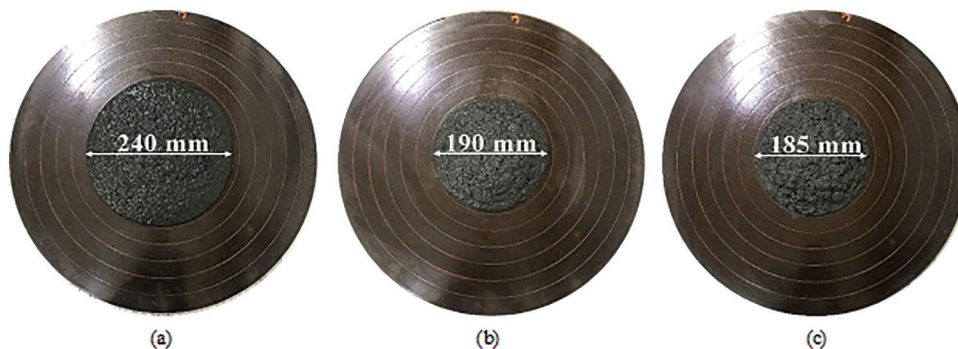


Figura 9: Espalhamentos dos bioconcretos com casca de arroz: (a) BCC40; (b) BCC45; (c) BCC50.

### 3.3. Massa específica e resistência à compressão dos bioconcretos

Os resultados obtidos indicam que o incremento da fração volumétrica do bioagregado de casca de arroz reduziu a massa específica dos bioconcretos devido a estrutura celular da biomassa utilizada. Os valores de massa específica seca dos bioconcretos foram iguais a 1150 kg/m<sup>3</sup> (BCC40), 1060 kg/m<sup>3</sup> (BCC45) e 980 kg/m<sup>3</sup> (BCC50), caracterizando-se todos como bioconcretos leves.

As curvas tensão versus deformação dos bioconcretos BCC40, BCC45 e BCC50 estão mostradas na Figura 10. Na Tabela 4 e Figura 11 são apresentados os valores de resistência à compressão ( $f_c$ ) e módulo de elasticidade (E) aos 7 e 28 dias, bem como a densidade para os três bioconcretos testados.

Os BCC40, BCC45 e BCC50 apresentaram um comportamento linear até 55%, 48% e 44% da tensão de ruptura, seguido por um comportamento não linear até atingir a tensão máxima. A fase pós-pico nas duas idades caracterizou-se por um aumento de deformação sem decréscimo significativo da resistência, exceto para o BCC40 (28 dias), que apresentou uma redução gradual de tensão, na ordem de 35% até a deformação de 35000  $\mu\epsilon$ . Este comportamento dúctil foi provocado pelas biomassas cuja presença, em alto volume, promoveram uma maior absorção de energia e um melhor controle de propagação das fissuras nos bioconcretos.

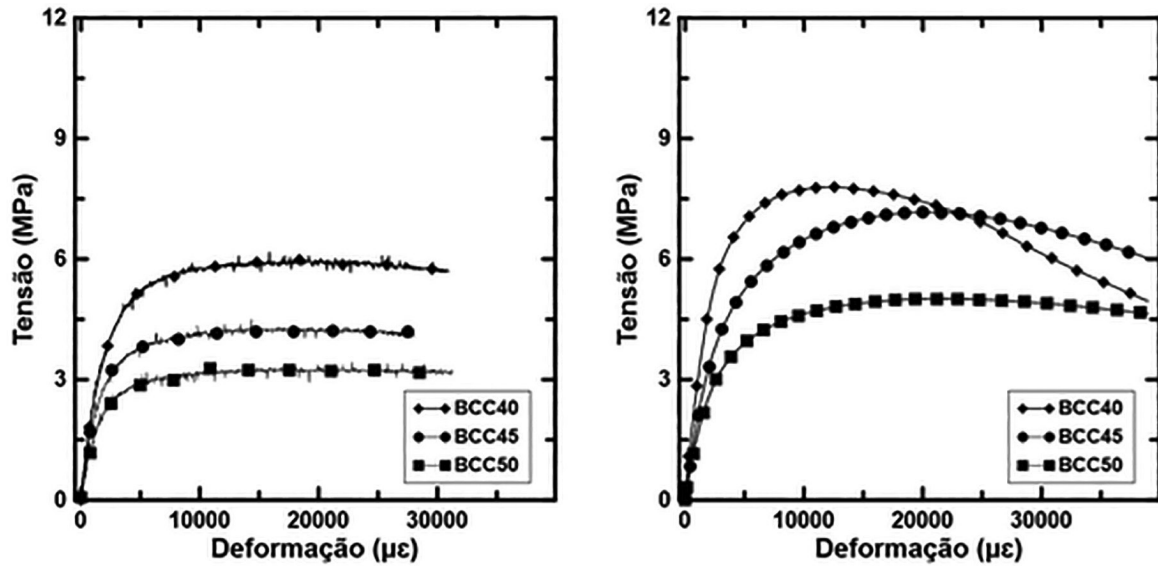


Figura 10: Curvas típicas tensão *versus* deformação dos BCC: (a) Idade de 7 dias; (b) Idade de 28 dias.

Tabela 4: Resistências à compressão e módulos de elasticidade dos BCC aos 7 e 28 dias (coeficientes de variação em % entre parênteses).

MISTURA	$f_{c7d}$ (MPa)	$f_{c28d}$ (MPa)	$E_{7d}$ (GPa)	$E_{28d}$ (GPa)
BCC40	5,83 (3,90)	7,99 (4,73)	2,54 (3,95)	2,84 (5,56)
BCC45	4,32 (6,76)	7,39 (3,67)	2,02 (3,16)	2,01 (3,72)
BCC50	3,47 (4,37)	4,99 (6,07)	1,57 (2,64)	1,60 (4,07)

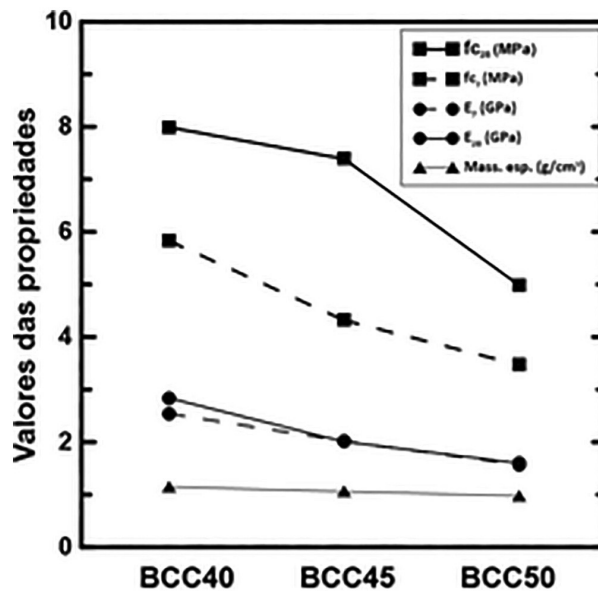
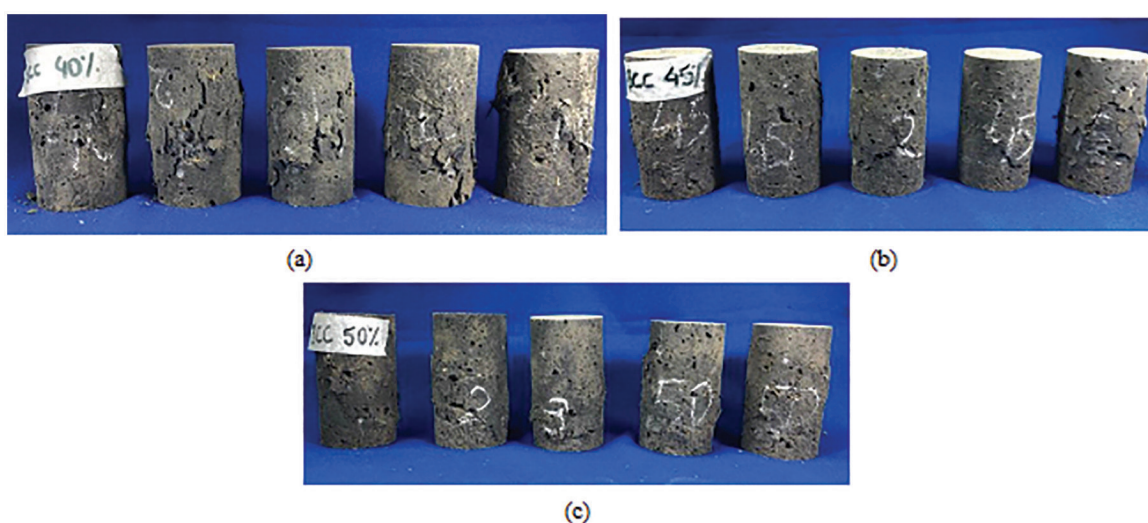


Figura 11: Valores de massa específica, resistência à compressão e módulo de elasticidade dos bioconcretos estudados.

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 4 e na Figura 11, pode ser concluir que a resistência e a rigidez dos bioconcretos aumentaram com a idade de cura e com a diminuição do volume de bioagregados. Aos 7 dias, o BCC40 apresentou resistência superior aos BCC45 e BCC50 (26% e 40%, respectivamente). De 7 para 28 dias, os valores de resistência dos BCC40, BCC45 e BCC50 aumentaram em 37%, 71% e 44%, respectivamente. Esse ganho pode ser atribuído ao processo de hidratação e da reação pozolânica da matriz ternária utilizada. No que refere à rigidez dos bioconcretos, aos 7 dias de idade, o módulo do BCC40 foi

20% e 38% superior aos módulos dos bioconcretos BCC45 e BCC50, respectivamente. Aos 28 dias, a mesma tendência de resultados foi observada. No entanto, observou-se que de 7 para 28 dias, os BCC45 e BCC50 não apresentaram aumento de rigidez, enquanto um ganho de 12% foi observado no BCC40 entre essas idades. Os valores de resistência à compressão apresentados pelos BCC desse estudo foram superiores aos registrados pelos BCC desenvolvidos por GLORIA *et al.* [18] para os teores de 45% e 50% de casca de arroz. No entanto, é importante destacar que a matriz empregada era composta por 100% de cimento (sem adições minerais) e uma relação água/cimento entre 0,40 e 0,50 [18], e do presente estudo essa relação foi bem inferior, e ficou em 0,30 com base na água de hidratação. Conforme esperado, os valores de resistência à compressão seguem a mesma tendência que as massas específicas, ou seja, quanto menor o volume de biomassa, mais denso o bioconcreto e melhor o seu desempenho mecânico.

Os aspectos visuais dos corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão aos 28 dias de cura estão ilustrados na Figura 12. Observando-se os modos de ruptura nota-se os BCC apresentaram modos de ruptura por cisalhamento e colunar (tração). Embora tenha ocorrido a variação na fração de casca de arroz entre os bioconcretos, não foi observada a alteração no modo de ruptura observado, conforme observado na literatura [18, 23, 27].



**Figura 12:** Modos de ruptura na compressão aos 28 dias: (a) BCC40; (b) BCC45; (c) BCC50.

#### 4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados pode-se concluir que o aditivo do tipo polifuncional (PF), apresentou melhor compatibilidade com a matriz estudada, composta pela combinação ternária de cimento, cinza volante e cinza de casca de arroz, mostrando um comportamento pseudoplástico, indicado pela redução da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento da pasta. Ainda, as pastas com o aditivo PF apresentaram redução da tensão de cisalhamento e da viscosidade com o aumento do teor utilizado. No que se refere à tensão de escoamento, observou-se que nas misturas com teores de aditivo iguais ou superiores a 0,3% as tensões foram significativamente inferiores à tensão de escoamento da pasta de referência. Assim, com base nos estudos reológicos realizados, conclui-se que o aditivo PF no teor de 0,3% foi o de maior efetividade de aplicação nas misturas ternárias testadas.

O uso do aditivo tipo PF e do teor eleito no estudo reológico permitiu a confecção de bioconcretos trabalháveis e com propriedades satisfatórias que permitiram a adição de altas frações volumétricas de casca. A trituração realizada com a casca de arroz permitiu a inserção de até 50% deste bioagregado, em volume. Os resultados mecânicos mostraram que o aumento do volume de casca provoca uma gradual redução de resistência e de rigidez dos bioconcretos, com aumento na deformabilidade e capacidade de absorção energia das misturas. Os resultados mecânicos obtidos indicam que todos os BCC estudados apresentam potencial de aplicação em painéis leves e isolantes, trazendo como potencial benefício o aumento da eficiência energética das edificações.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve apoio financeiro e de infraestrutura de Furnas Centrais Elétricas SA/ANEEL, por meio do projeto de P&D FURNAS ANEEL n. 0394-1719-2017, intitulado “USO DE BIO-CONCRETOS E BIO-MMFs DE BAIXO IMPACTO AMBIENTAL VISANDO O AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE PRÉ-

DIOS PÚBLICOS”, e da parceria da COPPETEC/UFRJ. Os autores agradecem o apoio da empresa Eletrobras Furnas no financiamento da pesquisa e aos técnicos que contribuíram com este estudo.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] KRAUSMANN, F., GINGRICH, S., EISENMENGER, N., *et al.*, “Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century”, *Ecological Economics*, v. 68, n. 10, pp. 2696–2705, 2009. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.007>.
- [2] TRIPATHI, N., HILLS, C.D., SINGH, R.S., *et al.*, “Biomass waste utilization in low-carbon products: harnessing a major potential resource”, *npj Climate and Atmospheric Science*, v. 2, n. 1, pp. 35, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1038/s41612-019-0093-5>.
- [3] BENTSEN, N.S., FELBY, C., “Technical potentials of biomass for energy services from current agriculture and forestry in selected countries in Europe, The Americas and Asia”, *Forest & Landscape*, n. 55, pp. 1–31, 2010.
- [4] COÊLHO, J.D., *Arroz: produção e mercado*, Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste, 2021.
- [5] ANTONIO, J., TADEU, A., MARQUES, B., *et al.*, “Application of rice husk in the development of new composite boards”, *Construction & Building Materials*, v. 176, pp. 432–439, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.028>.
- [6] GIVI, A.N., ABDUL RASHID, S., ABDULAZIZ, F.N., *et al.*, “Contribution of rice husk ash to the properties of mortar and concrete: a review”, *The Journal of American Science*, v. 6, n. 3, pp. 157–165, 2010.
- [7] JAMIL, M., KAISH, A.B.M.A., RAMAN, S.N., *et al.*, “Pozzolanic contribution of rice husk ash in cementitious system”, *Construction & Building Materials*, v. 47, pp. 588–593, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.088>.
- [8] ANTIOHOS, S.K., PAPADAKIS, V.G., TSIMAS, S., “Rice husk ash (RHA) effectiveness in cement and concrete as a function of reactive silica and fineness”, *Cement and Concrete Research*, v. 61–62, pp. 20–27, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.04.001>.
- [9] CALDAS, L.R., GLORIA, M.Y.R., PITTAU, F., *et al.*, “Environmental impact assessment of wood bio-concretes: Evaluation of the influence of different supplementary cementitious materials”, *Construction & Building Materials*, v. 268, n. 25, pp. 12114, 2020.
- [10] CALDAS, L.R., GLORIA, M.Y.R., PITTAU, F., *et al.*, “Environmental impact assessment of wood bio-concretes: Evaluation of the influence of different supplementary cementitious materials”, *Construction & Building Materials*, v. 268, pp. 121146, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121146>.
- [11] ANANDARAJ, S., RAJESHKUMAR, V., PREETHY, R.L., *et al.*, “Strength properties of luffa fibre reinforced concrete containing RHA as cement replacement”, *Materials Today: Proceedings*, v. 52, pp. 1817–1820, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.471>.
- [12] PARIDAH, M.T., JULIANA, A.H., ZAIDON, A., *et al.*, “Nonwood-based composites”, *Current Forestry Reports*, v. 1, n. 4, pp. 221–238, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s40725-015-0023-7>.
- [13] FARUK, O., BLEDZKI, A.K., FINK, H.P., *et al.*, “Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010”, *Progress in Polymer Science*, v. 37, n. 11, pp. 1552–1596, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>.
- [14] RAMAMOORTHY, S.K., SKRIFVARS, M., PERSSON, A., “A review of natural fibers used in biocomposites: plant, animal and regenerated cellulose fibers”, *Polymer Reviews*, v. 55, n. 1, pp. 107–162, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/15583724.2014.971124>.
- [15] VIEIRA, A.P., TOLEDO FILHO, R.D., TAVARES, L.M., *et al.*, “Effect of particle size, porous structure and content of rice husk ash on the hydration process and compressive strength evolution of concrete”, *Construction & Building Materials*, v. 236, pp. 117553, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117553>.
- [16] CALDAS, L., MENEZES, A., GLORIA, M.Y.R., *et al.*, Carbon footprint and water scarcity assessment of wood bio-concretes: evaluation of different life cycle impact methods”, In: *International Conference on Non-conventional Materials and Technologies*, Nairobi, IC-NOCMAT, 2019.
- [17] FAN, M., NDIKONTAR, M.K., ZHOU, X., *et al.*, “Cement-bonded composites made from tropical woods: compatibility of wood and cement”, *Construction & Building Materials*, v. 36, pp. 135–140, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.089>.



- [18] GLORIA, M.Y.R., ANDREOLA, V.M., SANTOS, D.O.J., *et al.*, “A comprehensive approach for designing workable bio-based cementitious composites”, *Journal of Building Engineering*, v. 34, pp. 101696, 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101696>.
- [19] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M., *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*, IBRACON, 2014.
- [20] MELO FILHO, J.A., “Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal”, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.
- [21] FIDELIS, M.E.A., “Desenvolvimento e caracterização mecânica de compósitos cimentícios têxteis reforçados com fibras de juta”, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.
- [22] FERREIRA, S.R., “Effect of surface treatments on the structure, mechanical, durability, and bond behavior of vegetable fibers for cementitious composites”, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.
- [23] ANDREOLA, V.M., GLORIA, M.Y.R., SANTOS, D.O.J., *et al.*, “Partial replacement of cement by combination of y ash and metakaolin in bamboo bio-concretes”, *Academic Journal of Civil Engineering*, v. 37, n. 2, pp. 102–106, 2019.
- [24] LIMA, A.J.M., IWAKIRI, S., “Utilização de resíduos de *Pinus* spp., cinza volante e escória de alto forno em compósitos cimento-madeira”, *Floresta*, v. 42, n. 3, pp. 639–650, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v42i3.17310>.
- [25] LIMA, A.J.M., IWAKIRI, S., “Utilização de resíduos do desdobro de toras de pinus spp, sílica ativa e cinza de casca de arroz em compósito cimento-madeira”, *Scientia Forestalis*, v. 38, n. 87, pp. 459–469, 2010.
- [26] CALDAS, L.R., GLORIA, M.Y.R., PITTAU, F., *et al.*, “Environmental impact assessment of wood bio-concretes: Evaluation of the influence of different supplementary cementitious materials”, *Construction & Building Materials*, v. 268, n. 25, pp. 12114, 2020.
- [27] GLORIA, M.Y., “Comportamento experimental e numérico de bioconcretos de madeira e painéis sanduíches com faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal”, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2020.
- [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR NM 18: cimento Portland: análise química: determinação de perda ao fogo*, Rio de Janeiro, ABNT, 2012.
- [29] CHABI, E., LECOMTE, A., ADJOVI, E.C., *et al.*, “Mix design method for plant aggregates concrete: Example of the rice husk”, *Construction & Building Materials*, v. 174, n. 20, pp. 233–243, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.097>.
- [30] NDAZI, B.S., KARLSSON, S., TESHA, J.V., *et al.*, “Chemical and physical modifications of rice husks for use as composite panels”, *Composites. Part A, Applied Science and Manufacturing*, v. 38, n. 3, pp. 925–935, 2007. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.07.004>.
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 16916: Agregado miúdo: determinação da densidade e da absorção de água*, Rio de Janeiro, ABNT, 2021.
- [32] AGUIAR, A.L.D., GLORIA, M.Y.R., TOLEDO FILHO, R.D., “Influence of high temperatures on the mechanical properties of wood bio-concretes”, *Construction Technologies and Architecture*, v. 1, pp. 61–68, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/CTA.1.61>.
- [33] LIMA, A.J.M., IWAKIRI, S., “Utilização de resíduos do desdobro de toras de *Pinus* spp, sílica ativa e cinza de casca de arroz em compósito cimento-madeira”, *Scientia Forestalis*, v. 38, n. 87, pp. 459–469, 2010.
- [34] ANDREOLA, V.M., “Durabilidade ao intemperismo natural e ao ataque biológico de bio-concretos de bambu”, Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2021.
- [35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR-13276: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação do índice de consistência*, Rio de Janeiro, ABNT, 2016.
- [36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, *ABNT NBR 5739: concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*, Rio de Janeiro, ABNT, 2018.