



**NAYANE PEREIRA FREIRE COELHO**

**EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE *BIOCHAR* DA CASCA DE  
CAFÉ SOBRE AS PROPRIEDADES DO CONCRETO**

**LAVRAS-MG  
2021**

**NAYANE PEREIRA FREIRE COELHO**

**EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE *BIOCHAR* DA CASCA DE CAFÉ SOBRE AS  
PROPRIEDADES DO CONCRETO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos Lignocelulósicos para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes  
Orientador  
Prof. Dr. Tiago José Pires de Oliveira  
Coorientador

**LAVRAS-MG  
2021**

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

Coelho, Nayane Pereira Freire.

Efeitos da utilização de biochar da casca de café sobre as  
propriedades do concreto / Nayane Pereira Freire Coelho. - 2021.  
83 p. : il.

Orientador(a): Rafael Farinassi Mendes.

Coorientador(a): Tiago José Pires de Oliveira.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Compósito cimentício. 2. Agregado poroso. 3. Pirólise  
convencional. I. Mendes, Rafael Farinassi. II. Oliveira, Tiago José  
Pires de. III. Título.

**NAYANE PEREIRA FREIRE COELHO**

**EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE *BIOCHAR* DA CASCA DE CAFÉ SOBRE AS  
PROPRIEDADES DO CONCRETO EFFECT OF THE USE OF COFFEE  
SHELL *BIOCHAR* ON THE CONCRETE PROPERTIES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos Lignocelulósicos para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 31/03/2021

Dr. Rafael Farinassi Mendes – UFLA

Dr. Maykmiller Carvalho Rodrigues - UFLA

Dr. David Cardoso Dourado – UNIFESSPA

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes  
Orientador

Prof. Dr. Tiago José Pires de Oliveira  
Coorientador

**LAVRAS-MG  
2021**

*Aos meus filhos, Joaquim e Matias.  
Dedico*

## AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por mais essa conquista em minha vida. A Nossa Senhora Aparecida por estar sempre comigo e intercedendo a Deus nos momentos que mais precisei.

Aos meus filhos, Joaquim e Matias, obrigada por vocês compreenderem minha ausência e por recarregarem diariamente as minhas energias. Foi o amor, o carinho e a alegria de vocês que me deram forças para chegar até aqui. Vocês são meus melhores presentes.

Ao meu Marido, obrigado pelo amor, apoio, compreensão e companheirismo durante essa jornada.

Aos meus pais e meus sogros, agradeço pelo carinho, oração e principalmente por todo o apoio durante essa etapa. Vocês foram meu braço direito nessa batalha. Minha eterna gratidão.

A todos os meus familiares e amigos, obrigada pelo incentivo e orações durante esses anos.

Aos professores Dr. Rafael Farinassi Mendes e Dr. Tiago José Pires de Oliveira, obrigada por toda a paciência e compreensão que tiveram comigo e principalmente por todos os ensinamentos passados durante as orientações.

Também agradeço ao professor Dr. Maykmiller Carvalho Rodrigues, pela colaboração nesse processo de pesquisa e também por compor a banca de avaliação.

Agradeço também os membros que compõem a banca, que gentilmente aceitaram participar e colaborar com esta pesquisa, obrigada pela oportunidade de discussão e enriquecimento deste trabalho.

Ao Núcleo de Estudos e Inovações em Materiais Compósitos (NEIMAC), agradeço a oportunidade de estar com vocês durante todo o mestrado. E de forma especial, gostaria de agradecer à Ticyane, Carol, Bruna, Nayara, Nayra, Juliana, Alan e o Tony por me ajudarem quando precisei.

Agradeço também a Fabiana e ao Felício por toda ajuda durante o processo de pirólise.

Agradecimentos às entidades de fomento CNPq, FAPEMIG e CAPES e também à Universidade Federal de Lavras, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais e ao Departamento de Engenharia, por disponibilizar uma excelente estrutura para o desenvolvimento do meu trabalho.

Finalmente, agradeço a todos que fizeram parte diretamente ou indiretamente desta caminhada.

## RESUMO

O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil, devido à facilidade de produção, pela disponibilidade das matérias primas e por apresentar boas propriedades de resistência e durabilidade, além da possível utilização para construção das mais variadas formas. Em sua produção é possível acrescentar aditivos para a melhoria de suas propriedades e nesse sentido, surgem pesquisas relacionadas à aplicação de *biochar* nesse compósito. O *biochar* apresenta propriedades interessantes, tais como porosidade elevada e boa adsorção de água. Quando associado aos produtos à base de cimento, ele pode proporcionar melhorias significativas de cura para o compósito. A casca de café é um resíduo agroindustrial que pode ser convertida em *biochar*, embora ainda seja descartada de forma inadequada, sem uma destinação condizente com a preservação ambiental. Contudo, ainda é pouco conhecido o efeito das propriedades do *biochar* na cura do concreto e sobre suas propriedades finais. Nesse sentido, esse estudo objetivou avaliar o efeito da utilização do *biochar* de casca de café sobre as propriedades físico-mecânicas, termo-acústicas e de durabilidade do concreto. A biomassa da casca de café foi pirolisada à temperatura de 450°C para produzir o *biochar*, o qual foi utilizado em substituição massa/massa do cimento, nas porcentagens de 1, 3 e 5%. Caracterizou-se o *biochar* quanto à massa unitária, granulometria, absorção de água e microestrutura. Primeiramente foram realizados os ensaios de inibição e de *slump test* dos concretos e posteriormente, produzidos os corpos de prova, sendo estes últimos avaliados quanto à resistência à compressão, resistência à tração, absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente, nas idades de cura de 7 e 28 dias. Ainda aos 28 dias, avaliou-se a condutividade térmica, absorção sonora e microestrutura. Com o propósito de analisar sua durabilidade, os concretos foram submetidos ao processo de envelhecimento acelerado e em seguida, novamente caracterizados. A incorporação de *biochar* da casca de café ao compósito proporcionou efeito significativo sobre as propriedades físico-mecânicas e térmica do concreto, além de promover a inibição das reações do cimento, devido ao fornecimento gradual da água absorvida pelo *biochar*. No entanto, o desempenho acústico do concreto não foi afetado com o uso de *biochar*. O concreto com 1% *biochar* apresentou menor densidade e condutividade térmica que o concreto controle, sendo que este também resistiu aos esforços mecânicos dimensionados para o traço. Sendo assim, a porcentagem de 1% de *biochar* foi considerada a melhor para a substituição do cimento, no concreto.

**Palavras-chaves:** Compósito cimentício. Agregado poroso. Pirólise convencional. Material lignocelulósico.

## ABSTRACT

Concrete is one of the most used materials in civil construction, due to its ease of production, the availability of raw materials and its good resistance and durability properties, in addition to the possible use for construction of the most varied forms. In its production it is possible to add additives to improve its properties and in this sense, research related to the application of biochar in this composite appears. The biochar has interesting properties, such as high porosity and good water adsorption. When combined with cement-based products, it can provide significant curing improvements for the composite. The coffee husk is an agro-industrial residue that can be converted into biochar, although it is still disposed of inappropriately, without a destination consistent with environmental preservation. However, the effect of biochar properties on curing concrete and its final properties is still poorly understood. In this sense, this study aimed to evaluate the effect of using the coffee husk biochar on the physical-mechanical, thermo-acoustic and durability properties of concrete. The biomass of the coffee husk was pyrolysed at a temperature of 450°C to produce the biochar, which was used in mass / mass substitution of cement, in the percentages of 1, 3 and 5%. The biochar was characterized in terms of unit mass, granulometry, water absorption and microstructure. Firstly, the inhibition and slump test tests of the concretes were carried out and, later, the specimens were produced, the latter being evaluated for compression strength, resistance to compression by compression, water absorption, apparent porosity and apparent density, in the ages of 7 and 28 days. Still at 28 days, thermal conductivity, sound absorption and microstructure were evaluated. In order to analyze its durability, the concretes were subjected to the accelerated aging process and then, again characterized. The incorporation of coffee husk biochar to the composite provided a significant effect on the physical-mechanical and thermal properties of the concrete, in addition to promoting the inhibition of cement reactions, due to the gradual supply of water absorbed by the biochar. However, the acoustic performance of the concrete was not affected by the use of biochar. The porous structure of the biochar was degraded with the accelerated aging of the composite. The concrete with 1% biochar showed lower density and thermal conductivity than the control concrete, which also resisted the mechanical efforts dimensioned for the mix. Thus, the percentage of 1% biochar was considered the best for replacing cement in concrete.

**Keywords:** Cementitious composite. Porous aggregate. Conventional pyrolysis. Lignocellulosic material.

## LISTA DE FIGURAS

### PRIMEIRA PARTE – REFERENCIAL TEÓRICO

Figura 1- Materiais básicos constituintes do concreto.....	15
Figura 2- Hidratação do cimento ao longo do tempo. ....	19

### SEGUNDA PARTE – ARTIGO

Figura 1- Resíduo de café in natura e triturado em moinho martelo. ....	40
Figura 2- Casca de café utilizada para a produção de <i>biochar</i> pelo processo convencional de pirólise. ....	41
Figura 3- <i>Biochar</i> da casca de café processada no moinho de facas tipo Willey. ....	42
Figura 4 - Granulometria do <i>biochar</i> da casca de café.....	51
Figura 5 - Imagem de microscopia óptica da partícula do <i>biochar</i> da casca de café ....	52
Figura 6 - Efeito do uso de diferentes concentrações de <i>biochar</i> sobre a curva de inibição da cura do concreto.....	54
Figura 7 - Índice de inibição dos concretos.....	55
Figura 8 - Efeito do uso de diferentes concentrações de <i>biochar</i> sobre o teste de <i>Slump test</i> .....	56
Figura 9 - Os efeitos da absorção de água pelo <i>biochar</i> sobre o abatimento do concreto. ....	57
Figura 10 - Densidade aparente do concreto produzido com diferentes concentrações de <i>biochar</i> e tempos de análise.....	59
Figura 11 - Porosidade aparente do concreto produzido com diferentes concentrações de <i>biochar</i> e tempos de análise.....	61
Figura 12 - Imagem de microscopia óptica dos concretos controle e com <i>biochar</i> , aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado. ....	63
Figura 13 - Absorção de água do concreto produzido com diferentes concentrações de <i>biochar</i> e tempos de análise.....	65
Figura 14 - Condutividade térmica do concreto produzido com diferentes concentrações de <i>biochar</i> e tempos de análise.....	70
Figura 15 - Barreira acústica do concreto produzido com diferentes concentrações de <i>biochar</i> e tempos de análise.....	72

## LISTA DE TABELAS

### PRIMEIRA PARTE – REFERENCIAL TEÓRICO

Tabela 1: Tipos de cimento Portland normalizados no Brasil. ....	18
Tabela 2: Características dos processos de pirólise .....	24
Tabela 3: Composição química da casca de café. ....	26

### SEGUNDA PARTE – ARTIGO

Tabela 1: Traço utilizado para a produção de concreto. ....	44
Tabela 2: Classificação segundo o índice de inibição. ....	45
Tabela 3: Relação entre trabalhabilidade e queda. ....	46
Tabela 4: Tipo e quantidade do corpo de prova para cada ensaio. ....	46
Tabela 5: Parâmetros adotados para os ensaios físicos e mecânicos. ....	47
Tabela 6: Resistência à compressão (MPa) do concreto produzido com diferentes concentrações de <i>biochar</i> e tempos de análise .....	66
Tabela 7: Resistência à tração (MPa) do concreto produzido com diferentes concentrações de <i>biochar</i> e tempos de análise .....	69

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE - REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>13</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
2.1 Concreto .....	15
2.2 Cimento.....	16
2.2.1 Tipos de cimento Portland .....	17
2.2.2 Processos de hidratação do cimento Portland .....	18
2.3 Agregados .....	21
2.4 <i>Biochar</i> .....	22
2.4.1 Pirólise .....	23
2.4.2 Resíduo de casca de café .....	25
2.4.3 <i>Biochar</i> em compósito à base de cimento .....	27
<b>3. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>29</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>30</b>
<b>SEGUNDA PARTE – ARTIGO .....</b>	<b>36</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>36</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>37</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>38</b>
<b>2 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>40</b>
2.1 Obtenção dos materiais .....	40
2.2 Produção do <i>biochar</i> .....	40
2.3 Propriedades do <i>biochar</i> .....	42
2.3.1 Massa Unitária.....	42
2.3.2 Granulometria .....	42
2.3.3 Absorção de água.....	43
2.3.4 Microestrutura.....	43
2.4 Definição do traço .....	43
2.4.1 Ensaio de inibição .....	44
2.4.2 Produção do Concreto.....	45
2.4.3 Slump test .....	45
2.4.4 Corpo de Prova .....	46
2.4.5 Durabilidade.....	46
2.5 Propriedades físico-mecânicas.....	47
2.6 Condutividade térmica.....	47
2.7 Barreira acústica.....	48
2.8 Microestrutura.....	49
2.9 Análise de dados.....	49
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>50</b>
3.1 Caracterização do <i>biochar</i> da casca de café .....	50
3.1.1 Rendimento .....	50

3.1.2 Granulometria do <i>biochar</i> .....	50
3.1.3 Massa unitária do <i>biochar</i> .....	51
3.1.4 Absorção de água no <i>biochar</i> .....	53
3.1.5 Análise de aptidão.....	53
3.2 Caracterização do compósito.....	56
3.2.1 Caracterização física dos concretos .....	56
3.2.1.1 Slump test .....	56
3.2.1.2 Densidade aparente .....	58
3.2.1.3 Porosidade aparente .....	59
3.2.1.4 Absorção de água.....	63
3.2.1.5 Resistência à compressão .....	66
3.2.1.6 Resistência à tração .....	68
3.2.1.7 Condutividade térmica.....	69
3.2.1.7 Barreira acústica.....	71
4 CONCLUSÃO.....	74
AGRADECIMENTOS .....	74
REFERÊNCIAS.....	75

## PRIMEIRA PARTE - REFERENCIAL TEÓRICO

### 1 INTRODUÇÃO

Um dos materiais mais utilizados no setor da construção civil é o concreto, sendo obtido por meio da mistura de cimento Portland, água e agregados naturais, como areia e brita. Essa mistura em proporções adequadas garante bom desempenho físico-mecânico ao material. No entanto, para algumas aplicações são necessárias certas alterações em suas propriedades, e para isso são utilizados aditivos. Essas substâncias adicionadas ao traço do compósito cimentício podem alterar suas propriedades no estado fresco e endurecido.

Sabe-se que o processo de cura é uma das etapas mais importantes da fase de endurecimento do concreto, e que é necessário adotar medidas para evitar a evaporação prematura da água tão importante para a hidratação do cimento. Dessa forma, a tomada de medidas eficazes para manutenção da quantidade de água adequada dentro da mistura poderá proporcionar melhorias significativas na resistência mecânica final do concreto.

Assim sendo, a incorporação de um agente de hidratação como agregado visa atender às exigências químicas do cimento, durante a fase de cura do concreto, além de proporcionar melhorias nas suas propriedades. Esse agente tem a capacidade de absorver a água e hidratar a mistura, evitando assim a evaporação precoce, que é a responsável pelo aparecimento de trincas, fissuras e outras falhas no concreto.

O *biochar* é um material que vem se destacando como armazenador de água, quando agregado aos diversos seguimentos tais como solos, argamassas, concretos, dentre outras aplicações. É de conhecimento que o *biochar* possui grande quantidade de carbono, altos volumes de poros e baixa densidade, além da grande variedade de biomassas disponíveis para a sua conversão termoquímica. No entanto, ainda são necessárias informações mais precisas sobre a quantidade ideal de *biochar* no compósito à base de cimento, bem como o efeito do tipo da biomassa utilizada e a sua composição química.

O Brasil ocupa o primeiro lugar na produção mundial cafeeira, sendo a casca de café uma biomassa abundante e que na maioria das vezes, encontra-se descartada de maneira inadequada no solo. Estudos analisam o emprego sustentável desse resíduo para a produção de bioabsorventes, biocombustíveis, biofilmes e inibidor de corrosão do aço (BIGLIARDI *et al.*, 2019; YAASHIKAA *et al.*, 2020). Dessa forma, implementam-se

benefícios econômicos ao setor agroindustrial e também se evitam os passivos ambientais.

Estudos têm destacado efeitos positivos na utilização do *biochar* em compósito à base de cimento, dos quais se destaca o auxílio na hidratação do cimento e na imobilização de agentes contaminantes; atuam também como reforço do compósito, além de proporcionar mais resistência quando submetido a altas temperaturas. Logo, a utilização do *biochar* interfere em todo o sistema de resistência mecânica da matriz cimentícia (AKHTAR & SARMAH, 2018; GUPTA *et al.*, 2020; GUPTA & KUA, 2017; WANG *et al.*, 2019; ZHAO *et al.*, 2019).

Embora haja estudos de *biochar* em compósitos cimentícios (GUPTA *et al.*, 2020; ZHAO *et al.*, 2019), até o presente momento, não existem relatos sobre os efeitos do *biochar* da casca de café nas propriedades físicas, mecânicas, térmicas e acústicas do concreto que o utiliza em seu traço.

Nesse contexto, este estudo objetivou avaliar os efeitos da utilização do *biochar* da casca de café, provindos do fruto maduro, sobre as propriedades físico-mecânicas, termo-acústicas e de durabilidade do concreto.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Concreto

Comumente utilizado em todo o mundo e com mais de 10 bilhões de toneladas produzidas todos os anos, o concreto destaca-se entre os materiais da construção civil e espera-se que a sua demanda aumente para 18 bilhões de toneladas, até 2050 (ASADI *et al.*, 2018; METHA & MONTEIRO, 2014).

Este material sintético é responsável por executar diversas estruturas, com formas e tamanhos variáveis. Para formar esse composto é necessária uma mistura, ou seja, o seu traço de formação consiste em cimento Portland, água e agregados de granulometria miúdo e/ou graúdo (Figura 1). Alguns traços podem ainda conter outros elementos, como aditivos minerais e/ou químicos (FERREIRA *et al.*, 2017; ROCHA & SILVA, 2017; YILMAZ & TURKEN, 2012).

Pode-se destacar como exemplos de adições a sílica ativa (subproduto resultante do processo de obtenção do ferro-silício e do silício-metálico); a cinza volante (material finamente particulado proveniente da queima de carvão pulverizado); metacaulim (mineral aluminossilicosa obtido, normalmente da calcinação das caulínicas e dos caulins de alta pureza. entre 700 e 900 °C) e a pozolana natural (material de origem vulcânica ou de origem sedimentar) (BARKAT *et al.*, 2019; SIDDIQUE & KLAUS, 2009). No caso de aditivos, os plastificantes e os superplastificantes são largamente empregados para reduzir a quantidade de água do concreto e possibilitar a trabalhabilidade necessária (KILINÇKALE & DOGAN, 2007; PIEKARCZYK *et al.*, 2017).

Figura 1- Materiais básicos constituintes do concreto.



A) Cimento; B) Agregado miúdo (Areia) e C) Agregado graúdo (Brita).

Fonte: Do autor (2021).

Cada material que integra o traço tem um papel importante na propriedade final do concreto. Pedra e cimento favorecem a resistência, enquanto a areia e a água interferem na consistência. Portanto, é importante conhecer as propriedades e características de cada material constituinte na mistura, a fim de garantir as propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade do concreto (ETXEBERRIA *et al.*, 2007).

## 2.2 Cimento

O Cimento Portland, também conhecido apenas como cimento, é um produto elaborado pelo empresário Joseph Aspdin, no ano de 1824, na ilha britânica de Portland. Trata-se de um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água (BARBOSA *et al.*, 2007; TAVARES & LUIZ, 1997).

O processo de fabricação do cimento subdivide em etapas como a extração de matéria-prima, a queima industrial e as adições de materiais. O calcário (fonte de CaO, sob a forma de carbonato de cálcio -  $\text{CaCO}_3$ ), principal matéria-prima na fabricação do cimento, é extraído de jazida subterrânea ou a céu aberto. Após o processo de extração, o calcário vai para britagem, etapa que o reduz às dimensões adequadas para o processo industrial. A argila (fonte de alumina -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) é outra matéria-prima essencial, extraída de lavras a céu aberto que também passam pelo britador. Tanto o calcário quanto a argila são preparados em um pré-homogenizador. Em seguida, essa matéria-prima é levada ao moinho cru, onde se transforma em uma farinha e dá início à homogeneização. Finalmente, essa “farinha” passa pelo pré-aquecedor e pelo forno (que chega a alcançar  $1450\text{ }^\circ\text{C}$ ), onde ocorre a queima (processo conhecido como clinquerização) até formar o clínquer (GAHARWAR *et al.*, 2016).

É importante ressaltar que para a produção do clínquer, além da mistura de calcário e argila, utiliza-se componentes corretivos para garantirem a composição química da mistura, dentro dos limites específicos (BATTAGIN, 2010). A matéria-prima corretiva usada na indústria cimentícia fornece elementos que não se encontram disponíveis nas matérias-primas principais tipo a areia para suprir a deficiência no teor de sílica, o minério de ferro como fonte de ferro e a bauxita para a deficiência de alumina. A quantidade desses materiais corretivos é pequena, em comparação com as matérias-primas principais (FORTES *et al.*, 2016). A moagem do clínquer adicionado de 3 a 5 %

de sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ), usado com o objetivo de regular o tempo de pega ou endurecimento inicial do produto, origina-se o cimento Portland comum.

Há vários tipos de cimento Portland, portanto suas diferentes composições fazem com que ele seja versátil e atende às diversas situações de aplicação.

### **2.2.1 Tipos de cimento Portland**

Os diferentes tipos de cimento produzidos têm suas características determinadas em função de sua aplicação. Por exemplo, os cimentos de alta resistência inicial, de baixo calor de hidratação, alta resistência a sulfatos, dentre outros. Além disso, as propriedades do cimento são influenciadas pelos compostos do clínquer, pelo uso de adições e pela sua finura (SALEH & RAHMAN, 2018). Desta forma, é fundamental conhecer os tipos de cimento Portland e suas aplicações, pois cada um apresenta características diferentes em sua composição e são indicados para situações específicas (SALEH & RAHMAN, 2018).

No Brasil são produzidos vários tipos de cimento Portland, sendo que cada um deles possui uma classificação distinta para utilização, feita com as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), definida na norma NBR 16697 (ABNT, 2018). Por exemplo, o cimento com a denominação “CP II F-32” é um cimento Portland (CP) tipo composto (II) com Fíler (F) (ABNT, 2018). Já os cimentos Portland de Baixo Calor de Hidratação e Resistente a Sulfato recebem a sigla “BC” e “RS” após a denominação usual, respectivamente (ABNT, 2018).

De acordo com a disponibilidade de cada região brasileira, alguns cimentos são de usos mais frequentes como, por exemplo, o cimento de Alta Resistência Inicial (CPV-ARI) utilizado na fabricação de estruturas pré-moldadas. Na Tabela 1 pode-se visualizar os tipos de cimento fabricados no Brasil de acordo com a norma NBR 16697 (ABNT, 2018), mediante as classes de resistência à compressão 25, 32 ou 40 MPa para o cimento comum, o composto e também de alto-forno (CP-I, CP-II e CP-III), além das classes 25 ou 32 MPa para o cimento pozolânico (CP-IV).

Tabela 1: Tipos de cimento Portland normalizados no Brasil.

<b>Nome técnico</b>	<b>Identificação do tipo</b>
Comum	CP I
Comum com adição	CP I-S
Composto com escória	<sup>1</sup> CP II-E
Composto com pozolana	<sup>1</sup> CP II-Z
Composto com fíler	<sup>1</sup> CP II-F
Alto-forno	<sup>2</sup> CP III
Pozolânico	<sup>3</sup> CP IV
Alta Resistência inicial	<sup>4</sup> CP V-ARI
Branco estrutural	CPB

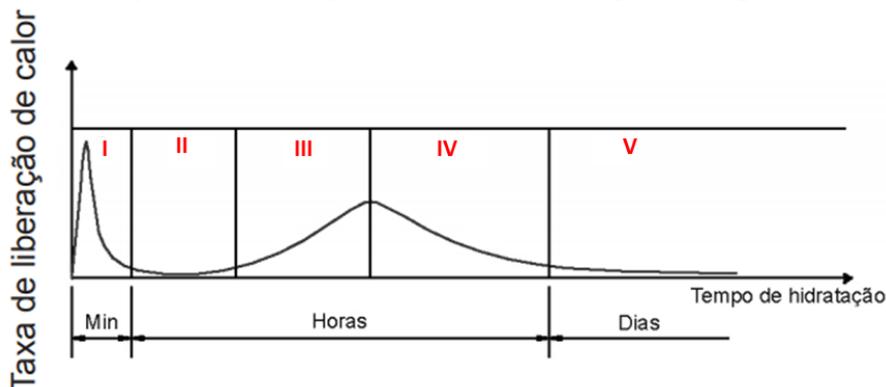
Fonte: (ABNT, 2018).

Dentre os cimentos fabricados e utilizados nas obras brasileiras (Tabela 1) destaca-se o CP II (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC, 2019), que representa mais de 60% dos cimentos disponíveis no mercado nacional (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP, 2018). O cimento Portland CP II é um material de composições intermediárias entre os cimentos. Esse tipo atende às necessidades da maioria das aplicações, ou seja, são versáteis e podem ser aplicados em todas as fases da obra (ABCP, 2002). Sabe-se que para obter a qualidade de desempenho esperados, o cimento necessita de hidratação durante todo o seu processo de cura.

### 2.2.2 Processos de hidratação do cimento Portland

Quando o cimento é misturado com a água, origina-se uma série de reações químicas denominadas hidratação. O mecanismo de hidratação do cimento reações químicas contínuas e exotérmicas pode ser dividido em cinco etapas, de acordo com o fluxo de calor, conforme Figura 2: I - estágio inicial (pré-indução) entre 0 e 15 min; II - período de indução (entre 15 min e 4 h); III - período de aceleração (entre 4 e 8 h), IV - período de desaceleração e endurecimento (8 e 24 h), V - estágio final ou de reação lenta (entre 1 e 28 dias) (CASTRO & PANDOLFELLI, 2009).

Figura 2- Hidratação do cimento ao longo do tempo.



Fonte: Adaptado de Castro e Pandolfelli (2009).

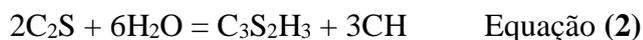
Os principais produtos formados pela reação do cimento com a água são o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), o hidróxido de cálcio ou portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), a etringita ( $\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{32}$  ou trissulfato hidratado) e aluminatos de cálcio. Os silicatos de cálcio hidratados influenciam na maioria das propriedades físicas e mecânicas do concreto em estado endurecido (CASTRO & PANDOLFELLI, 2009; JOLICOEUR & SIMARD, 1998; LYRA *et al.*, 2012; ROMANO *et al.*, 2016).

A primeira parte da curva (I) (Figura 2) corresponde ao pico inicial e se caracteriza pela combinação de reações exotérmicas de molhagem do cimento Portland com as reações iniciais de dissolução. Nesse estágio, ocorre uma rápida dissolução das espécies iônicas ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) e o sulfato de cálcio, na forma de hemihidrato, também se dissolve ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) até a saturação da solução. Ainda nessa fase, o  $\text{C}_3\text{A}$  (aluminato tricálcico) dissolve e reage com  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ , produz etringita (Equação 1) que precipitada à superfície do grão de cimento, forma uma capa gelatinosa. Essa deposição sobre a superfície do grão de cimento funciona como uma barreira entre o material não hidratado e a solução, causando uma elevação na concentração de íons dissolvidos na fase líquida, que estão em contato permanente com o grão anidro (CASTRO & PANDOLFELLI, 2009; JOLICOEUR & SIMARD, 1998; LYRA *et al.*, 2012; ROMANO *et al.*, 2016).



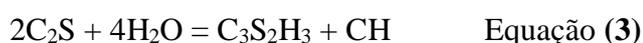
Durante o período de indução, que ocorre entre 15 min e 4 h, tem-se uma redução na velocidade das reações de hidratação. Isso ocorre devido à formação de uma camada de gel C-S-H (silicato de cálcio hidratado) ao redor das partículas de cimento, ou seja, ocorre a agregação de partículas coloidais não estruturadas na superfície do cimento,

formando uma camada de somente alguns nanômetros (CASTRO & PANDOLFELLI, 2009; JOLICOEUR & SIMARD, 1998; LYRA *et al.*, 2012; ROMANO *et al.*, 2016). Quando a camada de gel é rompida, a difusão iônica é facilitada e a velocidade da reação aumenta. Estes compostos hidratados são formados conforme equação 2 abaixo:



No período de aceleração, as reações de formação do C-S-H passam a ocorrer mais rapidamente, devido a saturação iônica da fase aquosa, resultando em resistência mecânica do cimento. É nesse período que ocorre o início e o fim de pega do cimento, que é influenciado pelo fenômeno de dissolução e precipitação, dentro de determinado equilíbrio. É importante destacar ainda que, ao ocorrer o crescimento de C-S-H, a área disponível para reação diminui e, conseqüentemente, o mesmo acontece na taxa da reação (CASTRO & PANDOLFELLI, 2009; JOLICOEUR & SIMARD, 1998; LYRA *et al.*, 2012; ROMANO *et al.*, 2016).

O período IV, conhecido como desaceleração e endurecimento (8 a 24h), é caracterizado por redução gradativa da taxa de reação e início de inversão na curva, após atingir o calor máximo liberado, tendendo a zero no final dessa etapa. As reações ocorridas nesse período são determinadas pelo fenômeno de difusão, que é influenciado por alguns fatores como: teor de água e área específica do cimento. Nesse período, as reações de formação do C-S-H reduzem, porém há formação de outras fases como: conversão de etringita em monossulfoaluminato de cálcio (AFm); hidratação da belita ( $\text{C}_2\text{S}$  – silicato dicálcico) residual e formação de etringita secundária. O AFm é formado quando acaba a reserva de cálcio disponível e a relação Al/SO<sub>3</sub> aumenta. Já a etringita secundária é formada a partir da reação tardia da gipsita com o C<sub>3</sub>A (CASTRO & PANDOLFELLI, 2009; JOLICOEUR & SIMARD, 1998; LYRA *et al.*, 2012; ROMANO *et al.*, 2016). A hidratação da belita origina o C-S-H de acordo com a equação 3:



A velocidade da hidratação irá depender do tipo de cimento utilizado e da sua composição. Além disso, fatores externos ou intempéries do tipo, como vento, temperatura e umidade do ar também podem ter grande influência no resultado. A moagem e a taxa de resfriamento adotadas, definem o tamanho e a distribuição das

partículas, as quais interferem na reatividade do clínquer. A velocidade de hidratação para cada composto do clínquer do cimento é distinta, sendo que a reatividade apresentada é, aproximadamente, a que se segue:  $C_3A > C_3S$  (Alita)  $> C_2S \approx C_4AF$  (Ferrita) (CASTRO & PANDOLFELLI, 2009; JOLICOEUR & SIMARD, 1998).

### 2.3 Agregados

Os agregados são definidos como os materiais granulosos e inertes constituintes das argamassas e dos concretos. São muito importantes no concreto, porque constituem cerca de 70 a 80 % da sua composição, influenciando assim, em várias de suas propriedades físico-químicas (AL-MAJEED *et al.*, 2018).

Os agregados podem ser classificados quanto à dimensão de suas partículas, sua origem e densidade. Com relação à dimensão de suas partículas, eles são divididos conforme a norma NBR NM 248/03 (ABNT, 2003) em agregados miúdos e agregados graúdos (Figura 1). Os agregados miúdos são areias naturais ou resultantes de britamentos de rochas estáveis, que no mínimo 85% dos grãos de maior tamanho passam na peneira de abertura 4,8 mm conforme a norma NBR NM 248/03 (ABNT, 2003). Já os agregados graúdos são britas provenientes de rochas estáveis, em que os grãos passam na peneira nominal de 152 mm, mas que pelo menos 85% do material em peso ficaram retidos na peneira de abertura 4,8 mm (ABNT, 2003; AMBROZEWICZ, 2012; SARTORT *et al.*, 2019).

Quanto a sua origem, os agregados podem ser classificados como naturais, artificiais e reciclados. Os naturais são os derivados de rochas existentes na crosta da Terra, encontrados na natureza já adequados para o uso, ou ainda, agregados britados, provenientes dos processos de cominuição de rochas, a fim de se adequarem ao uso como agregados para concreto. Os artificiais são aqueles resultantes de algum processo industrial, como por exemplo, a argila expandida. E por fim, os agregados reciclados são os resíduos industriais granulares, comprovadamente adequados ao uso como agregado do concreto, ou proveniente do beneficiamento do entulho de construção ou demolição (SARTORT *et al.*, 2019; SBRIGHI NETO, 2011).

Outro fator que define a classificação dos agregados é a sua massa específica aparente. Os agregados com densidade inferior a  $1120 \text{ kg/m}^3$  são classificados como leves e sua principal aplicação é na fabricação de concretos leves. Essa menor massa do agregado leve deve-se a sua microestrutura celular altamente porosa. Os agregados normais apresentam densidade entre  $1120 \text{ kg/m}^3$  e  $2080 \text{ kg/m}^3$  e são utilizados na

produção de concretos convencionais ou normais. Por fim, os agregados pesados, que apresentam densidade superior a  $2080 \text{ kg/m}^3$  (OLIVEIRA & ROSSI, 2012) são aplicados na fabricação de concretos pesados, utilizados para blindagens de radiação. Esses agregados têm maior massa devido à presença dos minerais de bário, ferro e titânio na estrutura.

É importante ressaltar que os agregados definem várias das características desejadas em um concreto, como por exemplo, a condutividade térmica. Mas, para isso é preciso usar conhecimentos específicos e tecnológicos quanto à dosagem exata desses materiais. O coeficiente de condutividade térmica é o termo básico para classificar o isolamento térmico do concreto. A condutividade térmica de um concreto com agregado leve é quase 50% menor que o concreto normal, devido aos micro e macro poros na sua estrutura, que os tornam mais leves. A condutividade térmica de um concreto normal é na faixa de 0,62 a 3,3 W/m K, enquanto que no concreto com agregado leve fica entre 0,4 - 1,89 W/m K (NOR *et al.*, 2016).

Levando em consideração a importância que os agregados podem proporcionar para a qualidade do concreto, esse trabalho utilizou o *biochar* da casca de café da despolpa do fruto maduro como um agregado leve e poroso, a fim de aplicá-lo como agente de hidratação durante a cura do cimento, bem como avaliar os efeitos sobre as propriedades físico-mecânicas, na melhoria do conforto térmico e acústico e na durabilidade do concreto, além de atender às normas de comercialização.

#### **2.4 Biochar**

O *biochar* é definido como um material rico em carbono, proveniente da carbonização de biomassa (matéria orgânica derivada de plantas e animais), sob baixa atmosfera de oxigênio, segundo o processo denominado pirólise. Pode-se citar como exemplos de biomassa as cascas de café, o bagaço de cana-de-açúcar, o babaçu, soja, a grama, entre outros (TOMCZYK *et al.*, 2020).

No processo de pirólise são gerados três produtos diferentes, que é o biogás no estado gasoso, no líquido o bioóleo e o *biochar* que se apresenta na fase sólida, contendo orgânicos não convertidos e também resíduos carboníferos (produzidos a partir da decomposição parcial ou completa de componentes da biomassa), bem como uma fração mineral (TOMCZYK *et al.*, 2020).

A diversidade de aplicações do *biochar* depende de suas propriedades físico-químicas, que são regidas principalmente pelas condições de pirólise (temperatura e taxa de aquecimento) e pela matéria-prima original (JINDO *et al.*, 2014).

Atualmente, o *biochar* tem sido utilizado em uma grande variedade de aplicações como, por exemplo, na produção de energia, agricultura, sequestro de carbono, bio-refinaria, entre outros. Além disso, o *biochar* fornece uma estratégia alternativa para o gerenciamento de resíduos orgânicos (PANWAR *et al.*, 2019).

Na agricultura, o *biochar* também pode ser utilizado para melhorar a fisiologia do solo. Mediante a sua característica porosa, pode ser utilizado como dissipador de nutrientes e oferecer benefícios ao terreno quanto ao aumento da produtividade, além de auxiliar no gerenciamento de resíduos das culturas (STOCKMANN *et al.*, 2013)

Zhang *et al.* (2016) realizaram um experimento para avaliar a ação do *biochar* no balanço líquido de gases do efeito estufa. Durante o experimento, verificou-se que as emissões de CH<sub>4</sub> no solo foram entre 72-80 % mais baixas, nas parcelas alteradas por *biochar*, do que na sem correção. Além disso, foi relatado que o solo alterado pelo *biochar* melhorou a capacidade de drenagem de gases do efeito estufa.

Outra aplicação muito interessante do *biochar* é no tratamento de águas residuais. Gwenzi *et al.* (2017) observaram em seus estudos, que os sistemas de tratamento de água à base de *biochar* são tecnologias sustentáveis de baixo custo, para o fornecimento de água limpa.

Em relação ao aspecto financeiro do Brasil, a viabilidade econômica do *biochar* ainda é difícil de ser mensurada, visto que o processo de pirólise está em desenvolvimento (MARCELINO *et al.*, 2020). Sua produção ainda é incipiente e os processos ainda não são amplamente aplicados, porém Burns *et al.* (2014) acreditam que o setor ainda será mais rentável, quando efetivar a consolidação do mercado de carbono.

Contudo, essas características do *biochar* são dependentes do tipo de biomassa e da sua conversão termoquímica, no processo de pirólise.

#### **2.4.1 Pirólise**

A pirólise se baseia na decomposição térmica da matéria orgânica aquecida na ausência de oxigênio atmosférico, para a produção de gás pirolítico (biogás), óleo (líquido pirolenhoso ou bio-óleo) e carvão (*biochar*). O aquecimento é controlado por faixas de temperatura e fornece a energia necessária para romper ligações nas estruturas das

macromoléculas presentes na biomassa (MOTA *et al.*, 2015). O calor fornecido à biomassa provoca rupturas e recombinações nas ligações químicas e nas interações físicas. Ainda, fraciona a estrutura molecular da biomassa e libera compostos orgânicos de diversos tipos que podem ser usados como combustíveis ou insumos químicos.

A primeira etapa de reação da pirólise é caracterizada pela quebra térmica das ligações químicas ocasionadas pela termólise da biomassa. Durante essa etapa, podem submeter-se a reações adicionais como quebra de ligações, de onde surgem os compostos voláteis, fase gasosa, e ainda podem promover reações de condensação/polimerização para formarem compostos maiores (fase líquida e sólida dos produtos). Na segunda etapa da pirólise, as espécies voláteis continuam sofrendo reações heterogêneas com os sólidos residuais e/ou reações homogêneas em fase gasosa (WANG *et al.*, 2020).

É importante ressaltar, que as espécies formadas na primeira etapa da pirólise são principalmente produtos de eliminação simples ou de radicais formados por clivagem homolítica de ligações químicas. Se os radicais saem da zona de aquecimento rapidamente, eles podem evitar reações secundárias indesejáveis, uma vez que eles não têm tempo para reagir com o material não pirolisado ou entre si. Por outro lado, se o aquecimento for lento ou a quantidade de amostra for grande, há a possibilidade de os radicais reagirem entre si ou com outros não pirolisados, à medida que se difundem pelo reator de pirólise (HUBER *et al.*, 2006; LUENGO *et al.*, 2008; MOTA *et al.*, 2015).

Existem três processos de pirólise no mundo, a pirólise lenta ou convencional, a pirólise rápida e a pirólise ultrarrápida e também são divididas conforme as condições operacionais (BRIDGWATER, 2003), conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Características dos processos de pirólise

Processo	Condições operacionais			Rendimento		
	Tempo de residência	Temperatura (°C)	Taxa de aquecimento	Líquido (%p/p)	Sólido (%p/p)	Gás (%p/p)
Lenta (convencional)	Horas/dias	300-600	Baixa	30	35	35
Rápida	0,5-5s	400-650	Alta	75	12	13
Ultrarrápida	<0,5s	1000	Muito alta	5	10	85

Fonte: Adaptado de Bridgwater (2003), Huber *et al.* (2006) e Mohan *et al.* (2006).

A pirólise convencional proporciona o maior rendimento de *biochar* (BRIDWATER, 2003). Até o início dos anos 1900 a pirólise lenta da madeira foi uma tecnologia muito comum nas indústrias, onde eram obtidos como principais produtos o carvão, ácido acético, metanol, e etanol a partir da madeira (HUBER *et al.*, 2006; LUENGO *et al.*, 2008; MOTA *et al.*, 2015). A pirólise lenta caracteriza-se por pequenas taxas de aquecimentos e temperatura máxima em torno de 600 °C, bem como o tempo de permanência entre 5-30 min da biomassa no reator, produzindo o biogás, bio-óleo e *biochar* (HUBER *et al.*, 2006; MOTA *et al.*, 2015).

Veiga *et al.* (2017) avaliaram condicionadores de solo utilizando *biochar* de madeiras de *Eucalyptus urophylla*, *Corymbia citriodora* e cascas de café provindos do processo de pirólise lenta e concluíram que a casca de café apresentou melhores resultados para as características físicas, químicas e térmicas comparada aos demais materiais.

#### **2.4.2 Resíduo de casca de café**

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020), o Brasil é o maior produtor e exportador de café do mundo. O cultivo do café evoluiu de maneira significativa ao longo do desenvolvimento histórico e econômico do Brasil (VOLS *et al.*, 2019). No quesito produção, a liderança mundial do Brasil deve-se à abundância e à fertilidade do território e também ao clima favorável do país que favorece a produtividade do café (VOLS *et al.*, 2019).

A cafeicultura é uma atividade caracterizada por gerar grandes volumes de resíduos agroindustriais que necessitam de destinos apropriados, a fim de evitar passivos ambientais e ainda proporcionar benefícios econômicos. Além disso, a crescente preocupação com os problemas ambientais tem aumentando o interesse de pesquisadores a respeito da destinação desses resíduos agroindustriais (BELTRÁN-RAMÍREZ *et al.*, 2019; VALES *et al.*, 2019).

Os resíduos agroindustriais têm se destacado em diferentes pesquisas por todo o mundo, visto que alguns de seus constituintes são matérias-primas que podem gerar uma variedade diversificada de produtos industriais. Atualmente, essa situação continua prevalecendo e aumentará progressivamente no futuro (KUMAR *et al.*, 2018). Na agroindústria, diversas biomassas estão sujeitas a processos unitários distintos para

agregarem valores a diferentes resíduos da agricultura (BELTRÁN-RAMÍREZ *et al.*, 2019).

A casca de café é um dos principais resíduos agrícolas gerados. Durante a despolpa, o setor cafeeiro gera uma quantidade significativa em volume de casca de café, cerca de 50% (EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO ESTADO DE MINAS GERAIS - EMATER, 2016). Esse resíduo é oriundo do processamento do café cereja por via seca, ou seja, o café cereja passa pelas etapas de secagem e beneficiamento com a retirada da casca. É importante ressaltar que o processamento via seca é o mais utilizado em território nacional (PANDEY *et al.*, 2000; ZOCCA *et al.*, 2014).

A casca é rica em compostos como cafeína, taninos e polifenóis, além de nutrientes e compostos orgânicos (Tabela 3). Sabe-se que os dados quantitativos da composição orgânica podem variar de acordo com o tipo e a eficiência de processamento do café, variedade da colheita, tipo de solo, clima, dentre outros fatores (GOUVEA *et al.*, 2009; PANDEY *et al.*, 2000).

Tabela 3: Composição química da casca de café.

	<b>Casca de Café Beneficiamento via seca (g.100g<sup>-1</sup> de material seco)</b>
Proteína	8,0 – 11,0
Lipídios	0,5 – 3,0
Minerais	3,0 – 7,0
Carboidratos	58,0 – 85,0
Cafeína	aproximadamente 1,0
Taninos	aproximadamente 5,0

Fonte: Gouvea *et al.* (2009).

Novas tecnologias têm sido desenvolvidas com a finalidade de transformar esses resíduos agrícolas em produtos de maior valor agregado. Até o momento, as aplicações da casca de café se limitam à produção de fertilizantes, ração animal, composto, entre outros (BANU *et al.*, 2020). No entanto, estudos voltadas para o setor de biorrefinaria, têm proposto a utilização da casca de café na fabricação de biocombustíveis, biofilmes de PLA, inibidor de corrosão do aço e também na produção de micro e nano cristais de celulose (BIGLIARDI *et al.*, 2019). Mais uma utilização promissora, é a produção de

bioabsorventes, por meio da conversão da casca de café em *biochar* (YAASHIKAA *et al.*, 2020).

Kiggundu e Sittamukyoto (2019) exploraram com êxito algumas alterações no solo, a partir da aplicação de *biochar* da casca de café. Os resultados mostraram que os solos alterados com *biochar* apresentaram maior capacidade de retenção de água e melhor reabastecimento de nutrientes, quando comparados aos solos livres de *biochar*.

Ao comparar os *biochars* de *Eucalyptus urophylla* e *Corymbia citriodora*, como *biochar* da casca de café, constatou-se que esse último apresentou maiores teores de lignina, extrativos, cinzas e carbono fixo. Assim sendo, esses componentes químicos, contribuem para que o *biochar* da casca de café apresente maior potencial de utilização como condicionador de solos (VEIGA *et al.*, 2017).

Recentemente, Guimarães *et al.* (2020) destacaram em seu trabalho outra aplicação importante para o *biochar* da casca de café como bom adsorvente de Fe (II), em soluções aquosas.

#### **2.4.3 Biochar em compósito à base de cimento**

Quanto ao uso do *biochar* em produtos cimentícios, Mrad e Chehab (2019) investigaram a viabilidade da sua utilização como material alternativo sustentável, em argamassas cimentícias. Nesse estudo foi realizada uma caracterização físico-química do *biochar*, antes da sua inclusão na argamassa. A incorporação do *biochar* de resíduos sólidos urbanos, em substituição parcial da areia na argamassa, foi avaliada com base em índices de desempenho que incluíram resistência à compressão e suas propriedades estruturais. As análises dos resultados experimentais forneceram diretrizes e recomendações quanto à incorporação limitada a 15% de *biochar*, totalmente saturado antes da sua incorporação nas argamassas cimentícias.

Em publicação de Wang *et al.* (2020) apresentaram um método inovador e propício à sustentabilidade, relacionado a incorporação do *biochor* de madeira em compostos de cimento e concreto, pela cura em atmosfera de CO<sub>2</sub>. As análises termogravimétricas (TGA) e a difração de raios X (DRX) revelaram que a inserção de *biochar* possibilitou a formação de hidratos adicionais do cimento, em razão da regulação de umidade. Desse modo, não acelerou e nem retardou o processo de hidratação, de acordo com os resultados apontados de calorimetria isotérmica. Em especial, a inclusão de 1% de *biochar* elevou em 8,9% a resistência à compressão de compósitos. Porém, a

adição de 5% do mesmo *biochar* diminuiu tal resistência, em razão da sua estrutura porosa e quebradiça. Verificou-se também, que a combinação entre *biochar* e cura CO<sub>2</sub> remete a uma tecnologia verde, em busca de melhorias nas propriedades dos compósitos de cimento e do concreto.

Estudos relataram que o *biochar* também pode ser aplicado como um aditivo em compósitos à base de cimento, a fim de melhorar a hidratação do material, e atuar positivamente na capacidade de retenção de água (RUAN *et al.*, 2019) e cura interna (GUPTA *et al.*, 2018).

Gupta e Kua (2020) utilizaram *biochar* e sílica ativa na mistura do traço da argamassa e obtiveram redução de 50% na absorção capilar de água, quando comparado ao controle.

O *biochar* apresenta propriedades interessantes, como baixa densidade e uma elevada porosidade que permite absorver a água e dissipá-la lentamente. Então o *biochar* associado a produtos cimentícios pode proporcionar melhorias na hidratação da massa cimentícia, durante o seu período de cura (GUPTA *et al.*, 2018; GUPTA & KUA, 2020; WANG *et al.*, 2020).

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em busca de melhorias efetivas para o compósito à base de cimento, uma alternativa apropriada é a utilização de *biochar* em substituição ao cimento, a fim de proporcionar benefícios ao concreto. Então, com a incorporação de partículas lignocelulósicas pirolisadas ao cimento, esse trabalho pretendeu destinar melhorias nas características físicas e mecânicas do concreto e principalmente, favorecer a hidratação do compósito, bem como diminuir a densidade e a condução térmica, além de dar uma destinação adequada ao resíduo cafeeiro.

Essa incorporação é resultado de pesquisas recentes que vêm ganhando destaque, devido aos bons resultados encontrados por pesquisadores, no entanto, ainda é necessário classificar o *biochar* da casca de café para essa utilização, bem como definir a melhor porcentagem a ser utilizada, sendo este o principal foco desse estudo.

## REFERÊNCIA

- AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Novel biochar-concrete composites: manufacturing, characterization and evaluation of the mechanical properties. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 616, p. 408-416, 2018.
- AL-MAJEED, E. A.; HEKMAT, D.; AL-MOHNIA, M. S.; ABDULMAJEED, E. The effect of Palm Kernel Powder on compressive strength and absorption of Portland cement Mortar. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, Tamilnadu, v. 9, 2018.
- AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de construção: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório**. São Paulo: PINI, 2012.
- ASADI, I.; SHAFIGH, P.; HASSAN, Z. F. B. A.; MAHYUDDIN, N. B. Thermal conductivity of concrete - a review. **Journal of Building Engineering**. DOI: 10.1016/j.jobbe.2018.07.002, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico de utilização do cimento Portland**. Boletim Técnico 106, 7 ed. São Paulo, p. 28, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Cimento: Diferentes tipos e aplicações**. São Paulo, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Agregados - Determinação da composição granulométrica - NBR NM 248**, Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Cimento Portland - Requisitos - NBR 16697**, Rio de Janeiro, 2018.
- BANU, J. R.; KAVITHA, S.; KANNAH, R. Y.; PREETHI, M. D. K.; ATABANI, A. E.; KUMAR, G.; **Biorefinery of spent coffee grounds waste: Viable pathway towards circular bioeconomy**. *Bioresource Technology*, v. 302, 2020.
- BARBOSA, A. V. H.; CAZAL, C.; NASCIMENTO, A. C. A.; VALVERDE, D. F. S.; VALVERDE, R. S.; SOBRAL, A. P. V. **Propriedades do cimento Portland e sua utilização na Odontologia: revisão de literatura**. *Pesq Bras Odontoped Clín Integr*, v. 7, p. 89-94, 2007.
- BARKATA, A.; KENAI, S.; MENADIA, B.; KADRIB, E.; SOUALHIB, H. **Effects of local metakaolin addition on rheological and mechanical performance of self-compacting limestone cement concrete**. *Journal of Adhesion Science and Technology*. <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1571737>.
- BATTAGIN, A. F. O cimento Portland no Brasil. IN: *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. Ed. ISAIA, G.C. 2. ed. - São Paulo: **Editora Ibracon**, p.761-790, 2010.
- BELTRÁN-RAMÍREZ, F. I.; TAMAYO, D.O.; CORONA, I.C.; CERVANTES, J.L.N.G.; CLAUDIO, J.deJ.E.; RODRÍGUEZ, E.Q. Agro-Industrial waste revalorization: the

growing biorefinery. *In*: ABOMORA, A. E. F. (ed.). **Biomass for bioenergy: recent trends and future challenges**. London: IntechOpen, 2019.

BIGLIARDI, S. C., TORO, R. O.; CHIRALT, A.; Using lignocellulosic fractions of coffee husk to improve properties of compatibilised starch-PLA blend films, **Food Packaging and Shelf Life**, v.22, 2019.

BRIDGWATER, A. V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Engineering Journal**, v. 91, n. 2-3, p. 87-102, 2003.

BURNS, C. et al. **The economics of biochar production: a review**. Nevada: University of Nevada, 2014.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil**. *Cerâmica*. v. 55, p. 18-32, 2009.

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Manual do café: colheita e preparo** (*Coffea arábica* L.). Belo Horizonte: EMATER-MG, 2016. 52 p.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARI, A.; BIZINOTTO, M.B.; Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 735-742, 2007.

FERREIRA, C. R.; TAVARES, S. S.; FERREIRA, B. H. M.; FERNANDES, A. M.; FONSECA, S. J. G.; OLIVEIRA, C. A. S.; TEIXEIRA, R. L. P.; GOUVEIA, L. L. A. Comparative Study About Mechanical Properties of Structural Standard Concrete a Concrete with Addition of Vegetable Fibers. **Materials Research**, v. 20, p. 102-107, 2017.

FORTES, G. M.; LOURENÇO, R. R.; MONTINI, M.; GALLO, J. B.; RODRIGUESA, J. A. Synthesis and Mechanical Characterization of Iron Oxide Rich Sulfobelite Cements Prepared Using Bauxite Residue. **Materials Research**, v. 19, p. 276-284, 2016.

GAHARWAR, A. S.; GAURAV, N.; SINGH, A. P.; GARIYA, H. S; BHOORA. A Review Article on Manufacturing Process of Cement, Environmental Attributes, Topography and Climatological Data Station: IMD, Sidhi M.P. **Journal of Medicinal Plants Studies**, v. 4, p. 47-53, 2016.

GOUVEIA, B.M.; TORRES, C.; FRANCA, A.S.; OLIVEIRA, L.S.; OLIVEIRA, E.S. Feasibility of ethanol production from coffee husks. **Biotechnol Letters**, v. 31, p.1315-1319, 2009.

GUIMARÃES, T.; TEIXEIRA, A. P. C.; OLIVEIRA, A. F.; LOPES, R. P. Biochars obtained from arabica coffee husks by a pyrolysis process: characterization and application in Fe(II) removal in aqueous systems. **New J. Chem.** v. 44, p. 3310-3322, 2020.

GUPTA, S., KUA, H.W.; Factors determining the potential of biochar as a carbon capturing and sequestering construction material: critical review. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.29, n.9, p.1-14, 2017.

GUPTA, S., KUA, H.W. Combination of Biochar and Silica Fume as Partial Cement Replacement in Mortar: Performance Evaluation Under Normal and Elevated Temperature. **Waste Biomass Valorization**, v.11, p. 2807–2824, 2020.

GUPTA, S.; KUA, H. W.; KOH, H. J.; Use of biochar as carbon sequestering additive in cement mortar. **Cement & Concrete Composites**, Barking, v. 87, p. 110-129, 2018.

GWENZI, W.; CHAUKURA, N.; NOUBACTEP, C.; MUKOME, F. N. Biochar-based water treatment systems as a potential low-cost and sustainable technology for clean water provision. **Journal of Environmental Management**, v. 197, p.732-749, 2017.

HUBER, G. W.; IBORRA, S.; CORMA, A. Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts, and engineering. **Chemical Reviews**, v. 106, p. 4044-4098, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola Municipal 2019**. Brasília: IBGE, 2020.

JINDO, K.; MIZUMOTO, H.; SAWADA, Y.; SANCHEZ-MONEDERO, M. A.; SONOKI, T. Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. **Biogeosciences**, v. 11, p. 6613-6621, 2014.

JOLICOEUR, C.; SIMARD, M.-A. Chemical admixture cement interactions: phenomenology and physico-chemical concepts. **Cement & Concrete Composites**, Barking, v. 20, p. 87-101, 1998.

KIGGUNDU, N.; SITTAMUKYOTO, J. Pyrolysis of Coffee Husks for Biochar Production. **Journal of Environmental Protection**, v. 10, p. 1553-1564, 2019.

KILINÇKALE, F. M.; DOGAN, G. G. Performance of concretes produced with superplasticizer. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 103, p. 3214-3219, 2007.

KUMAR, P.; DUHAN, S.; DUHAN, J. Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review. **Bioresources and Bioprocessing**, Singapura, v. 5, n. 1, p. 1-15, 2018.

LUENGO, C. A.; FELFLI, F. E. F.; BEZZON, G. Pirólise e torrefação de biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; GÓMEZ, E. O.; LORA, E. E. S. **Biomassa para energia**. Campinas: Ed. Unicamp, Cap. 5, 2018, p. 333-351.

LYRA, J.S.; ROMANO, R.C.O.; PILEGGI, R.G.; GOUVÊA, D. Consolidação de pastas cimentícias contendo policarboxilatos: um estudo calorimétrico e reológico. **Cerâmica**, v. 58; p. 137-143, 2012.

MARCELINO, I. P.; LOSS, A.; ANDRADE, M. A. N.. Aspectos gerais do uso do biochar para sustentabilidade com ênfase aos atributos edáficos: a revisão. **Revista Gestão & sustentabilidade ambiental**, Florianópolis, v. 9, n. esp., p. 301-319, maio 2020

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MOHAN, D.; PITTMAN, C. U.; STEELE, P. H. Pyrolysis of wood/Biomass for Biooil: a critical review. **Energy Fuels**, Washington, v. 20, n. 3, p. 848-889, 2006.

MOTA, F. A. S.; VIEGAS, R. A.; LIMA, A. A. S.; SANTOS, F. F. P.; CASELLI, F. T. R. **Pirólise da biomassa lignocelulósica: uma revisão pyrolysis of lignocellulose biomass: A review**. *Revista GEINTEC – ISSN: 2237-0722*. v. 5, p.2511-2525, 2015.

MRAD, R.; CHEHAB, G. Mechanical and microstructure properties of Biochar – Based mortar: an internal curing agent for PCC. **Sustainability**, London, v. 11, n. 9, p. 2491, 2019.

NOR, A. M.; YAHYA, Z.; ABDULLAH, M. M. A. B.; RAZAK, R. A.; EKAPUTRI, J. J.; FARIS, M. A.; HAMZAH, H. N. Review on the Manufacturing of Lightweight Aggregates Using Industrial By-Product. **MATEC Web of Conferences**, Les Ulis, v. 78, 2016.

OLIVEIRA, D. R. C.; ROSSI, C. R. C. **Concretes with red mud coarse aggregates**. *Mat. Res.* v.15, 2012.

PANWAR, N. L.; PAWAR, A.; SALVI, B. L. **Comprehensive review on production and utilization of biochar**. *SN Applied Sciences*, v. 1, p. 168, 2019.

PANDEY, A. SOCCOL, C. R.; NIGAM, P. ;BRAND, D. ;MOHAN, R.; ROUSSOS, S. **Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses**. *Biochemical Engineering Journal*. v. 6. p. 153-162, 2000.

PIEKARCZYK, B. L.; MIERA, P.; SZWABOWSKI, J. **Plasticizer and Superplasticizer Compatibility with Cement with Synthetic and Natural Air-Entraining Admixtures**. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, v. 245, p 1-9, 2017.

ROCHA, P.A.S.; SILVA, K.I. da. **Study of Beamss Performance on Fire by the Fibers Model**, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, v. 33, p. 65-71, 2017.

ROMANO, R. C. O.; FUJII, A. L.; SOUZA, R. B.; TAKEASHI, M. S.; PILEGGI, R. G.; CINCOTTO, M. A. **Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita**. *Cerâmica*, v. 62, p. 215-223, 2016.

RUAN, X.; SUN, Y.; DU, W.; TANG, Y.; LIU, Q.; ZHANG, Z.; DOHERTY, W.; FROST, R.L.; QIAN, G.; TSANG, D.C.W.; **Formation, characteristics, and applications of environmentally persistent free radicals in biochars: A review**. *Bioresource Technology*, v. 281, p. 457-468, 2019.

SALEH, H. M.; RAHMAN, R. O. A. Introductory chapter: properties and applications of cement-based materials. *In: SALEH, H. M.; RAHMAN, R. A. Cement based materials*. London: IntechOpen, 2018.

SARTORTI, A. L.; BARBOSA, L. S.; ROCHA, A. F. H.; PASCHALIS, H. ; **Influência do agregado miúdo na resistência à compressão do concreto**. *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, São Paulo, v. 19, p. 83-98, 2019.

SBRIGHI NETO, C. **Agregados naturais, britados e artificiais para concretos**. *In: ISAIA, G. C. (ed.). Concreto: ciência e tecnologia*. São Paulo: Ibracon, v. 1, p. 233-260, 2011.

SIDDIQUE, R.; KLAUS J. **Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review**. *Appl Clay Sci*. v. 43, p. 392-400, 2009.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual 2019**. Rio de Janeiro: SNIC, 2019. 44 p.

STOCKMANN, U.; ADAMS, M. A.; CRAWFORD, J. W. **The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon**. *Agric Ecosyst Environ*, v. 164, p. 80-99, 2013.

TAVARES, A.; LUIZ, N. Cimento Portland Composto e Cimento Portland Pozolânico - Propriedades físico mecânicas e de durabilidade. **Itapessoca Agroindustrial S.A.**, Goiânia, 1997. 4p.

TOMCZYK, A.; SOKOŁOWSKA, Z.; BOGUTA, B. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 19, p. 191-215, 2020.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/coffee.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2020.

VALES, R. C.; LIMA, A. A.; BEZERRA, I. F. O. The use of Coffee Residues in the Cultivation of vegetables. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 6, 2019.

VOLSI, B.; TELLES, T. S.; CALDARELLI, C. E.; CAMARA, M. R. The dynamics of coffee production in Brazil. **PLoS ONE**, v. 14, p. 1-15, 2019.

VEIGA, T. R. L. A.; LIMA, J. T.; DESSIMONI, A. L. A.; PEGO, M. F. F.; SOARES, J. R.; TRUGILHO, P. F. Different plant biomass characterizations for biochar production. **Cerne**, Lavras, v. 23, p. 529-536, 2017.

WANG, L.; CHEN, L.; TSANG, D. C. W.; GUO, B.; YANG, J.; SHEN, Z.; HOU, D.; OK, Y. S.; POON, C. S. Biochar as green additives in cement-based composites with carbon dioxide curing. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, 2020.

YAASHIKAA, P. R. *et al.* A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. **Biotechnology Reports**, Lund, v. 28, 2020.

YILMAZ, U. S.; TURKEN, H. The effects of various curing materials on the compressive strength characteristic of the concretes produced with multiple chemical admixtures. **Scientia Iranica A**, v. 19, p. 77-83, 2012.

ZHANG, Y.; LIN, F.; WANG, X.; ZOU, J.; LIU S. Annual accounting of net greenhouse gas balance response to biochar addition in a coastal saline bioenergy cropping system in China. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 158, p. 39-48, 2016.

ZHAO, M.; JIA, Y.; YUAN, L.; QIU, J.; XIE, C. Experimental study on the vegetation characteristics of biochar-modified vegetation concrete. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 206, p. 321-328, 2019.

ZOCA, S. M.; PENN, C. J.; ROSOLEM, C. A.; ALVES, A. R.; NETO, L. O.; MARTINS, M. M. **Coffee processing residues as a soil potassium amendment.** {HYPERLINK "<https://link.springer.com/journal/40093>"}, v. 3, p. 155-165, 2014.

## SEGUNDA PARTE – ARTIGO

EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE *BIOCHAR* DA CASCA DE CAFÉ SOBRE AS PROPRIEDADES DO CONCRETO

## RESUMO

O concreto é um dos materiais mais utilizados e indispensáveis na construção civil, devido a sua boa capacidade de resistência, durabilidade e moldabilidade. Seus componentes são basicamente o cimento, agregados graúdos (brita) e miúdos (areia), entretanto, ainda pode ser acrescentado aditivos com o objetivo de melhorar o seu desempenho. O *biochar* obtido da biomassa pirolisada, possui altos volumes de poros e apresenta boa absorção de umidade, por isso, quando aplicado a matrizes cimentícia, pode auxiliar no processo de hidratação do cimento. A casca de café é um resíduo abundante no setor agroindustrial que pode ser convertido em *biochar*, porém ainda são desconhecidos os efeitos da aplicação desse tipo de *biochar* no concreto. Nesse contexto, este estudo objetivou avaliar os efeitos da utilização do *biochar* da casca de café sobre as propriedades físico-mecânicas, termo-acústicas e de durabilidade do concreto. O *biochar* foi obtido a partir da pirólise da casca de café na temperatura de 450 °C. As substituições do cimento pelo *biochar* foram realizadas nas porcentagens de 1, 3 e 5% massa/massa. O *biochar* foi caracterizado quanto à massa unitária, granulometria, absorção de água e microestrutura. Antes da produção dos corpos de prova, foram realizados os ensaios de inibição e *slump test*. As amostras foram avaliadas com relação à resistência à compressão, resistência à tração, absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente, aos 7 e 28 dias de cura. Aos 28 dias de cura também avaliou-se os corpos de prova com relação à condutividade térmica, absorção sonora e microestrutura. A fim de analisar a durabilidade do compósito, os corpos de prova passaram pelo processo de envelhecimento acelerado. A utilização de *biochar* da casca de café promoveu influência significativa sobre as propriedades físico-mecânica e térmica do concreto. Houve inibição das reações de hidratação do cimento, com a liberação gradual da água presente nos poros do *biochar*. Não houve influência do uso de *biochar* no desempenho acústico do concreto. O concreto com 1% *biochar*, obteve menor densidade e condutividade térmica ao ser comparado com o concreto controle, além de ter resistido aos esforços mecânicos exigidos pela norma. Logo, a incorporação de 1% de *biochar* foi constatada a melhor porcentagem para ser substituída no concreto.

**Palavras-chaves:** Compósito cimentício. Agregado poroso. Pirólise convencional. Material lignocelulósico.

## **EFFECT OF THE USE OF COFFEE SHELL BIOCHAR ON THE CONCRETE PROPERTIES**

### **ABSTRACT**

Concrete is one of the most used and indispensable materials in civil construction, due to its good resistance, durability and moldability. Its components are basically cement, coarse aggregates (crushed stone) and fine aggregates (sand), however, additives can still be added in order to improve its performance. The biochar obtained from pyrolyzed biomass, has high pore volumes and has good moisture absorption, so when applied to cementitious matrices, it can assist in the cement hydration process. The coffee husk is an abundant residue in the agro-industrial sector that can be converted into biochar, but the effects of applying this type of biochar to concrete are still unknown. In this context, this study aimed to evaluate the effects of using the coffee husk biochar on the physical-mechanical, thermo-acoustic and durability properties of concrete. The biochar was obtained from pyrolysis of the coffee husk at a temperature of 450 °C. The substitutions of cement for biochar were carried out in percentages of 1, 3 and 5% mass / mass. The biochar was characterized in terms of unit mass, particle size, water absorption and microstructure. Before the production of the specimens, the inhibition and slump tests were carried out. Both at 7 and 28 days. Subsequently, at 7 and 28 days, samples were evaluated for compressive strength, tensile strength, water absorption, apparent porosity and apparent density. At 28 days of curing, the specimens were also evaluated for thermal conductivity, sound absorption and microstructure. In order to analyze the durability of these composite properties, the specimens underwent an accelerated aging process. The use of coffee husk biochar promoted a significant influence on the physical-mechanical and thermal properties of the concrete. There was inhibition of cement hydration reactions, with the gradual release of water present in the pores of the biochar. There was no influence of the use of biochar on its concrete acoustic performance. The concrete with 1% biochar, obtained lower density and thermal conductivity when compared with the control concrete, besides having resisted the mechanical efforts required by the standard. Therefore, the incorporation of 1% biochar was found to be the best percentage to be replaced in concrete.

**Keywords:** Cementitious composite. Porous aggregate. Conventional pyrolysis. Lignocellulosic material.

## 1 INTRODUÇÃO

No setor da construção civil, o concreto é o material mais consumido no mundo (GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION, 2021), sendo utilizados desde as edificações mais simples até as estruturas de grande complexidade e dimensão. Dentre outros aspectos, esse fato se deve, à sua moldabilidade quando no estado fresco e alta resistência, quando no estado endurecido (LIU *et al.*, 2020).

O concreto é um material constituído por cimento, água, agregado miúdo e agregado graúdo (ROCHA & da SILVA, 2017). Os agregados são materiais muito importantes na composição do concreto, pois influenciam em várias de suas propriedades físico-químicas (AL-MAJEED *et al.*, 2018). Além disso, nesses compósitos podem conter adições e aditivos químicos com a finalidade de melhorar ou modificar suas propriedades básicas (FERREIRA *et al.*, 2017).

O *biochar* é definido como um material rico em carbono, com baixa densidade, elevada porosidade e boa absorção de água (GUPTA *et al.*, 2018). Ele é proveniente do processo de pirólise, que consiste na decomposição termoquímica da biomassa em temperaturas de 300 a 1300°C em uma atmosfera inerte (ZHANG *et al.*, 2019; TOMCZYK *et al.*, 2020). Diversas biomassas podem ser utilizadas para produção do *biochar*, como madeira, casca de arroz, bagaço de cana, casca de amendoim, resíduo de alimentos, casca de café, dentre outras (KHAN *et al.*, 2018; KOSAIYAKANON e KUNGSANANT, 2018; VYAVAHARE *et al.*, 2018; WAQAS *et al.*, 2018; XU *et al.*, 2018).

A produção mundial de café em 2020 foi de aproximadamente 11 milhões de toneladas (USDA, 2020). De acordo com EMATER (2016), durante o processo de descascamento do café, cerca de 50% do volume representa a cereja, o restante são os resíduos deste processo, no caso a casca de café. Sabe-se que a cafeicultura é uma atividade que gera grandes volumes de resíduos agroindustriais, os quais necessitam de destinos apropriados a fim de evitar passivos ambientais, além de proporcionar benefícios econômicos (BELTRÁN-RAMÍREZ *et al.*, 2019; VALES *et al.*, 2019). Nos tempos atuais as práticas agrícolas e florestais são as principais responsáveis pela grande produção dos resíduos de biomassa. Anualmente são geradas cerca de 140 Gt de resíduos em todo o mundo, e isso gera problemas consideráveis de manejo, pois a biomassa descartada causa impactar negativo no meio ambiente (TRIPATHI *et al.*, 2019).

As pesquisas têm demonstrado impactos positivos na aplicabilidade do *biochar* a matriz à base cimento, tais como a colaboração na hidratação do cimento e na imobilização de contaminantes; reforço com fibras de auto cura; melhorias na energia de fraturas e na resistência a altas temperaturas, bem como considerável interferência direta ou indiretamente em todo o sistema de resistência mecânica do compósito cimentício (GUPTA & KUA, 2017; AKHTAR & SARMAH, 2018; ZHAO *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2020; GUPTA *et al.*, 2020).

Embora haja estudos sobre o emprego de *biochar* em compósitos cimentícios (WANG *et al.*, 2020; GUPTA *et al.*, 2020), até o presente momento, nenhuma pesquisa foi encontrada sobre o efeito de diferentes concentrações de *biochar* da casca de café sobre as propriedades físicas, mecânicas, térmicas e acústicas do concreto.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi produzir um concreto que utilize o *biochar* provindo da casca de café, provindos do fruto maduro, e que esse compósito tenha capacidade suficiente para atender aos quesitos de resistência mecânica exigidas pelas normas. Ao mesmo tempo, pretende-se empregar esse agregado leve e poroso como reservatório de água, para manter a hidratação do cimento durante seu período de cura. Visa-se ainda, avaliar os efeitos de diferentes porcentagens de *biochar* sobre as propriedades físico-mecânicas, termo-acústicas e de durabilidade do concreto.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

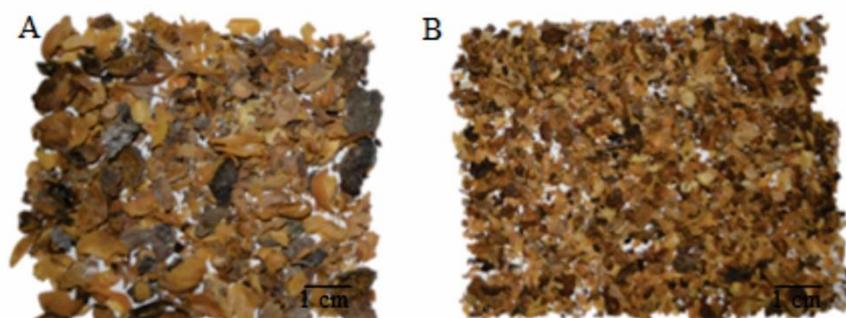
### 2.1 Obtenção dos materiais

A casca de café utilizada para obtenção de *biochar* foi procedente do resíduo agroindustrial da Inovacafé, localizada na Universidade Federal de Lavras, situada na cidade de Lavras, Minas Gerais, Brasil. A casca foi obtido pelo processo de descacador por via seca do café da espécie *Coffea Arabica*. Os demais componentes utilizados para a produção do concreto foram o cimento CII F -32, a areia média (agregado miúdo) e a brita 0 (agregado graúdo).

### 2.2 Produção do *biochar*

O *biochar* foi preparado a partir da casca de café, um resíduo gerado durante o processo de descascamento do fruto. Antes da produção, o material passou por separação manual a fim de remover outros tipos de resíduos nele presentes. Em seguida, a casca de café foi triturada em moinho martelo, com peneira de malha de 9,5 mm, para a redução do seu tamanho, conforme visualizado na Figura 1. Após esse procedimento, o resíduo permaneceu em estufa de circulação forçada de ar, durante 24 h na temperatura de  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ , sendo posteriormente levado para a pirólise.

Figura 1 - Resíduo de café in natura e triturado em moinho martelo.



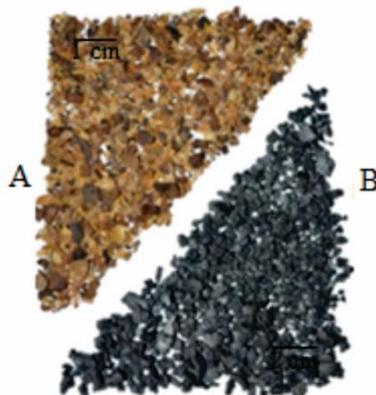
A) Resíduo da casca de café coletado; B) Resíduo da casca de café triturado.

Fonte: Do autor (2021).

A pirólise foi realizada pelo processo convencional, sendo processados 300 g de material por vez, a uma temperatura de  $450^{\circ}\text{C}$  e taxa de aquecimento de  $0,15^{\circ}\text{C/s}$ , mantendo-se constante a temperatura final estabelecida por período de 60 min. Após a conclusão do processo de pirólise, o equipamento foi resfriado de forma natural, até

atingir a temperatura ambiente. A Figura 2 mostra o *biochar* de resíduo do café produzido por pirólise convencional.

Figura 2 - Casca de café utilizada para a produção de *biochar* pelo processo convencional de pirólise.



A) Antes da pirólise; B) Depois da pirólise.

Fonte: Do autor (2021).

No final do processo, o *biochar* resfriado naturalmente foi retirado da mufla, armazenado em um recipiente lacrado e para a pesagem da biomassa pirolisada. Calculou-se o rendimento obtido na transformação da casca de café em *biochar*, de acordo com a Equação 1:

$$R = \left( \frac{mf}{mi} \right) \times 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

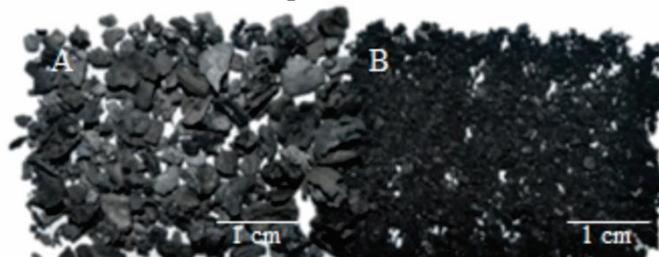
R: rendimento do processo de pirólise (%);

mf: massa final depois da pirolise(g);

mi: massa inicial antes da pirolise (g).

Após todo o processo de manufatura, passou-se o produto pelo moinho de facas tipo Willey com peneira de 1 mm, conforme a Figura 3. Em seguida, realizou-se o seu armazenamento em recipiente lacrado.

Figura 3 - *Biochar* da casca de café processada no moinho de facas tipo Willey.



A) *Biochar* de casca de café após ser pirolisada; B) *Biochar* de casca de café após moagem.  
Fonte: Do autor (2021).

### 2.3 Propriedades do *biochar*

O *biochar* foi submetido aos ensaios de massa unitária, granulometria e absorção máxima de água. Para o emprego do *biochar* na matriz de compósitos cimentícios, efetuou-se a análise de aptidão, mediante a avaliação do ensaio de inibição.

#### 2.3.1 Massa Unitária

A massa unitária em estado solto é a razão entre a massa do *biochar* lançado em um recipiente e o volume deste recipiente. Portanto, o volume total da amostra inclui o espaço vazio entre os agregados e seus poros. A massa unitária do material foi determinada segundo procedimentos dos padrões ASTM C 29 (ASTM, 2017). Primeiramente o material analisado foi despejado em um recipiente de volume conhecido, retirou-se o seu excesso do recipiente e após esse processo, o material foi pesado. Repetiu-se essa ação por três vezes. O cálculo da densidade aparente média foi realizado com a relação entre massa e volume.

#### 2.3.2 Granulometria

A análise granulométrica do *biochar* foi realizada de acordo com o teste padrão da ASTM C 136 (ASTM, 2019), que determina a classificação da distribuição da partícula para o uso do agregado fino no concreto. Antes do ensaio, a amostra foi colocada na estufa em temperatura de 100°C, por um período de 24 horas. No ensaio as peneiras foram agitadas mecanicamente por 10 minutos e em seguida o *biochar* foi retirado de cada uma delas e pesado. Após o processo de pesagem, calculou-se a porcentagem de partículas em cada peneira, o que possibilitou calcular a curva granulométrica, a dimensão máxima característica e também o módulo de finura, obtido pela soma das porcentagens

acumuladas dividida por 100. A dimensão máxima característica correspondeu à abertura nominal em milímetro, na qual o agregado apresentou uma porcentagem retida acumulada igual ou inferior a 5% em massa. A curva granulométrica representou graficamente as porcentagens retidas acumuladas em relação à dimensão da abertura de cada peneira.

### **2.3.3 Absorção de água**

A amostra de *biochar* foi colocada em um recipiente para secagem em estufa, a uma temperatura de 105 °C, durante 24 horas. Conforme os procedimentos destacados por Gupta *et al.* (2018), foram utilizados para essas análises coletores de filtros de papéis, pesados e identificados para receberem o material. Primeiramente, a metade dos coletores receberam 2 g de *biochar* da casca de café e a outra metade dos coletores sem *biochar*, aturam como controle. Todos os coletores foram pesados e depois imersos em água por 24 horas. Após esse tempo, retirou-se cada amostra fazendo uma secagem suave para retirar o excesso de água e efetuou-se uma nova pesagem para a determinação da absorção do *biochar*, sem a influência da absorção dos coletores.

### **2.3.4 Microestrutura**

A caracterização de microestrutura do *biochar* da casca de café foi realizada com o equipamento U500X, da marca Cooling Tech Microscope, conforme os procedimentos de ensaios feitos por Narciso *et al.* (2020).

## **2.4 Definição do traço**

A Tabela 1 apresenta o traço do concreto, com fator água/cimento 0,48, que foi utilizado para a fabricação dos corpos de prova. O traço foi dimensionado para atingir classe de resistência de 25 MPa aos 28 dias de cura. Para a produção dos compósitos foram analisados três tratamentos com utilização de *biochar*. Foram avaliadas as substituições massa/massa de cimento nas proporções de 1, 3 e 5%, além de um tratamento controle, sem a utilização de *biochar*.

Tabela 1 : Traço utilizado para a produção de concreto.

Traço de concreto para fck = 25MPa em %				
Tratamento	CPII F – 32	Biochar	Areia	Brita
Controle	23,27	0,00	27,47	49,26
1% BCC	23,04	0,23	27,47	49,26
3% BCC	22,58	0,70	27,47	49,26
5% BCC	22,11	1,16	27,47	49,26

\*BCC: *biochar* de casca de café

#### 2.4.1 Ensaio de inibição

A metodologia de Hofstrand *et al.* (1984) foi adotada para analisar a aptidão do material em função da evolução da temperatura de hidratação do cimento. Mediante o monitoramento da temperatura de reação, foi possível utilizá-la como parâmetro para determinar o índice de inibição.

A amostra seguiu a dosagem baseada no traço utilizado para o concreto de 25 MPa. Realizou-se a mistura individual em *Becker* dos tratamentos: controle, 1, 3 e 5% BCC, além de uma pasta de cimento (com fator água/cimento de 0,48), homogêneos manualmente, por um período de 4 minutos. Em seguida, a porção foi transferida para a caixa de isopor e os cabos termopares tipo K, introduzidos na mistura para obtenção dos dados. Estes foram acoplados a um coletor de dados, onde as leituras foram armazenadas. As caixas lacradas, completamente isoladas por lã de vidro, permaneceram dentro de uma caixa térmica. Desta forma, criou-se um sistema hermético, de modo que o calor obtido através da reação exotérmica do cimento não dissipou no ambiente. Posteriormente, o equipamento foi ligado e realizou-se as leituras das temperaturas em intervalos de um minuto, durante o período de 24 horas.

Segundo Hachmi, Moslemi e Campbell (1990), o índice de inibição é calculado pela Equação 2.

$$I = \left[ \left( \frac{t_2 - t'2}{t'2} \right) \times \left( \frac{T'2 - T_2}{T'2} \right) \times \left( \frac{S' - S}{S'} \right) \right] \times 100 \quad \text{Equação (2)}$$

Em que:

I: índice de inibição;

t<sub>2</sub>: tempo para atingir a máxima temperatura (pasta de matriz com *biochar*);

T<sub>2</sub>: temperatura máxima de hidratação (pasta de matriz com *biochar*);

S: taxa máxima de variação de temperatura no decorrer do tempo (pasta de matriz com *biochar*);

t'<sub>2</sub>: tempo para atingir a máxima temperatura (pasta padrão);

T'<sub>2</sub>: temperatura máxima de hidratação (pasta padrão);

$S'$ : taxa máxima de variação de temperatura no decorrer do tempo (pasta padrão).

Mediante o índice de compatibilidade calculado, a interação do *biochar* com a matriz cimentícia pode ser classificada nas seguintes categorias, conforme mostra a Tabela 2.

Tabela 2 : Classificação segundo o índice de inibição.

<b>Índice de inibição</b>	<b>Classificação</b>
$I < 10$	Baixa Inibição
$10 \leq I < 50$	Moderada Inibição
$50 \leq I \leq 100$	Alta Inibição
$I > 100$	Extrema inibição

Fonte: Okino *et al.* (2005)

### 2.4.2 Produção do Concreto

Para a produção do concreto, 50% da água do traço foi utilizada para saturar o *biochar* durante 24 horas antes da mistura. A areia passou pela secagem em estufa a 100 °C ( $\pm 5^\circ\text{C}$ ), por 24 horas. O processo de mistura ocorreu individualmente para cada tratamento, em uma betoneira com capacidade de 120 litros. Depositou-se a brita, a areia, o cimento e a proporção de *biochar* saturado, que foram homogeneizados em betoneira, durante 2 minutos. Em seguida, inseriu-se o restante da água e todos os produtos foram misturados por mais 5 minutos, para nova homogeneização.

### 2.4.3 Slump test

O ensaio de abatimento foi o primeiro teste realizado no concreto, com o objetivo de avaliar a sua plasticidade de acordo com os padrões da ASTM C 143 (ASTM, 2020). Inicialmente preencheu-se o molde cônico em 3 camadas, sendo o concreto adensado em cada uma das etapas, com 25 golpes de bastão metálico. Dando continuidade, regularizou-se o topo do cone, procedendo à remoção da gola e do molde de forma contínua e lenta. A leitura da análise ocorreu pela medida de abatimento, aferida do ponto médio do concreto até o topo do molde. Essa leitura de abatimento do concreto teve por objetivo o monitoramento da qualidade do concreto em estado fresco, a fim de avaliar a sua trabalhabilidade durante o preparo e garantir que o fator água/cimento fosse dosado adequadamente no produto, seguindo os parâmetros da Tabela 3.

Tabela 3 : Relação entre trabalhabilidade e queda.

<b>Trabalhabilidade</b>	<b>Abatimento (mm)</b>
Muito baixo	0 – 25
Baixo	25 – 50
Médio	50 – 100
Alta	100 - 175

Fonte: ASTM C 143 (ASTM, 2020).

#### 2.4.4 Corpo de Prova

O processo de moldagem e cura do concreto seguiu os padrões da norma ASTM C31 (ASTM, 2019). Na Tabela 4 estão especificadas as dimensões e quantidades de corpos de prova de cada teste realizado.

Tabela 4 : Tipo e quantidade do corpo de prova para cada ensaio.

<b>Tipo de teste</b>	<b>Dimensões dos corpos de prova (<math>\phi</math> = diâmetro; h = altura)</b>	<b>Quantidade (un)</b>
Resistência à compressão	$\phi$ 10 cm e h=20 cm	36
Resistência à tração	$\phi$ 10 cm e h=20 cm	36
Absorção de água	$\phi$ 10 cm e h=20 cm	36*
Porosidade aparente	$\phi$ 10 cm e h=20 cm	36*
Densidade aparente	$\phi$ 10 cm e h=20 cm	36*
Condutividade térmica	30 x 30 x 3 cm	24
Absorção sonora	$\phi$ 10 cm e h=2 cm	24

\* para os testes de absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente foram utilizados os mesmos corpos de prova.

#### 2.4.5 Durabilidade

A análise de envelhecimento acelerado do concreto possibilitou a avaliação do comportamento do concreto com o uso de *biochar*, mediante sua exposição à ação das intempéries. A metodologia adotada obedeceu ao procedimento de molhagem e secagem do material, conforme descrito nos padrões da norma ASTM D 559 (ASTM, 2003).

Os corpos de prova de concreto sofreram seis ciclos de envelhecimento. Cada ciclo foi composto por imersão em água por 5 horas e secagem em estufa por 42 horas, com temperatura aproximada de 70° C.

## 2.5 Propriedades físico-mecânicas

O concreto foi avaliado conforme a idade de cura e as normas listadas na Tabela 5, a fim de determinar as suas propriedades físico-mecânicas.

Tabela 5: Parâmetros adotados para os ensaios físicos e mecânicos.

Ensaio	Norma	Idade
Resistência à compressão ( $f_{ck}$ )	ASTM C 39 (ASTM, 2020)	7, 28 dias e envelhecido
Resistência à tração ( $f_{tk}$ )	ASTM C 496 (ASTM, 2017)	7, 28 dias e envelhecido
Absorção de água	ASTM C 642 (ASTM, 2013)	7, 28 dias e envelhecido
Porosidade aparente	ASTM C 642 (ASTM, 2013)	7, 28 dias e envelhecido
Densidade aparente	ASTM C 642 (ASTM, 2013)	7, 28 dias e envelhecido

## 2.6 Condutividade térmica

Esse ensaio visou obter o fluxo de calor que atravessa o compósito cimentício, a partir da taxa de transferência de calor da superfície inferior à superfície superior do concreto, tendo o propósito de atender à norma de desempenho térmico de edificações NBR 15220 (ABNT, 2015).

Esse método consistiu em analisar a condutividade térmica da amostra, por meio de dois nichos separados por um porta amostra. O nicho inferior continha atuadores de calor, que se mantiveram em uma temperatura de 45°C. Como fonte de calor usou-se uma lâmpada incandescente de 100 W. Esse calor chegou à amostra por meio de radiação e um termopar registrou a temperatura, anterior da amostra. O calor que ultrapassou a amostra analisada foi registrado por um segundo termopar localizado acima da amostra, ou seja, na câmara superior do equipamento.

Para todos os tratamentos, aos 28 dias de cura e envelhecidos, três amostras foram avaliadas individualmente, em um período de 7 horas, com os dados coletados a cada 12 segundos. A radiação da lâmpada foi determinada usando um medidor de radiação solar Instrutherm, modelo MES-100. A condutividade foi calculada conforme Equação 3.

$$K = \frac{P.E}{\Delta T} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

K: condutividade térmica (W/m°C);

P: radiação por medida de área ( $W/m^2$ );

E: espessura do corpo de prova (m);

$\Delta T$ : variação de temperatura observada ( $^{\circ}C$ ).

## 2.7 Barreira acústica

Para determinação da propriedade de barreira acústica foi utilizado um método alternativo, fundamentado nas diferentes normas já existentes, como a NBR 15575 (ABNT 2013), ISO 717 (ABNT, 2013) e ISO 10847 (1997), que tratam do desempenho em edificações habitacionais, classificação do isolamento acústico nos edifícios e barreiras externas ao ruído, respectivamente.

Esse método consistiu em analisar a atenuação do ruído pela amostra em testes comparativos, por meio de dois nichos separados por furo para passagem do som pelas amostras. As caixas foram produzidas com painéis de fibras de média densidade (MDF), revestidos internamente com placas de isopor (15mm) e também por manta de espuma acústica de 30 mm sobreposta. Para cada tratamento foram avaliadas três amostras com diâmetro de 10 cm e espessura de 2 cm.

Na realização desse ensaio, os corpos de prova de concreto foram individualmente acoplados a uma divisória, ou seja, um porta amostra de MDF com revestimentos acústicos (isopor e espuma acústica), o qual foi colocado entre os nichos. O calibrador acústico de 94 decibéis (dB) foi utilizado como emissor de som e posicionado no nicho superior, a 5 cm de distância da amostra. Para a captação do som foi utilizado o decibelímetro encaixado ao furo central (1,5 cm de diâmetro) do porta amostra, com distância de 1 cm do concreto, fechado no nicho inferior. Dessa maneira o som passou em uma única direção, com tempo de 200 segundos de ensaio.

Ao final de cada ensaio, o decibelímetro foi conectado ao computador para a transcrição dos valores e cálculos. Os primeiros 60 segundos foram excluídos do cálculo, a fim de eliminar os ruídos iniciais da montagem das caixas e início do teste.

Esse ensaio possibilitou a identificação da barreira acústica que cada corpo de prova de concreto oferece, por meio da Equação 4.

$$BA = 94 - X \quad \text{Equação (4)}$$

*Sendo:*

BA= barreira acústica, em dB.

94 = valor do calibrador acústico, em dB.

x = valor resultante em cada ensaio, em dB.

## 2.8 Microestrutura

A caracterização da microestrutura dos concretos foi realizada por meio de ensaios de microscopia óptica, utilizando o equipamento U500X, da marca Cooling Tech Microscope. A amostra analisada proveio de uma área da fratura do corpo de prova, na qual realizou-se o teste de resistência à compressão com idade de 28 dias e no envelhecimento acelerado.

## 2.9 Análise de dados

Para as propriedades físico-mecânicas, os diferentes tratamentos foram analisados em um delineamento inteiramente casualizado, no esquema fatorial 4x3, com três concentrações de *biochar* (1, 3 e 5%) e um tratamento controle, em três períodos de caracterização (7 e 28 dias de cura e após envelhecimento acelerado). Para as propriedades térmica e acústica, os tratamentos foram analisados em um delineamento inteiramente casualizado, no esquema fatorial 4 x 2, com três concentrações de *biochar* (1, 3 e 5%) e um tratamento controle, em dois períodos de caracterização (28 dias de cura e após envelhecimento acelerado).

Os dados obtidos na caracterização do *biochar* e dos compósitos foram submetidos à análise de variância e em seguida ao teste de Scott-knott ao nível de significância de 5%, utilizando o programa SISVAR (FERREIRA, 2015). Os resultados obtidos foram comparados com as normas ASTM C39 (ASTM, 2020) e ASTM C496 (ASTM, 2017) para a resistência mecânica, ASTM E 903 (ASTM, 2020) para a condutividade térmica e NBR 15575 (ABNT, 2013) para a absorção sonora.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização do *biochar* da casca de café

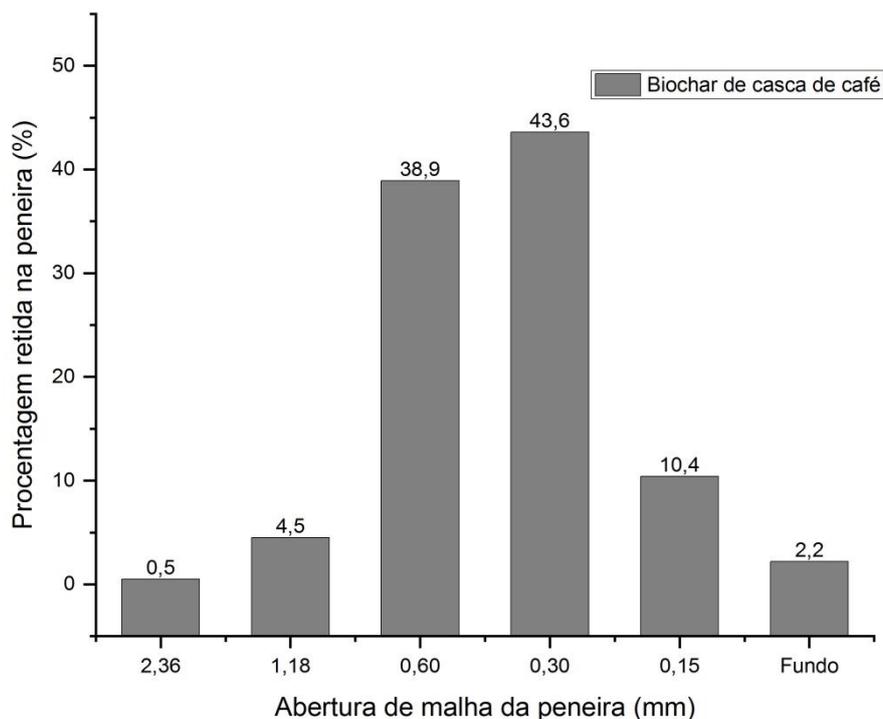
##### 3.1.1 Rendimento

No processo de pirólise na temperatura de 450°C, a biomassa da casca de café obteve rendimento de 32,27% em *biochar*. Na utilização da biomassa da casca de café processada nessa mesma temperatura, Veiga *et al.* (2017) obteve um rendimento de aproximadamente 40%. Essa diferença de valores está relacionada aos demais critérios operacionais empregados na pirólise, tais como o valor adotado para a taxa de aquecimento e o tempo de permanência com temperatura final estabelecida no reator. O rendimento obtido está próximo da afirmação de Bridgwater (2003), que relata rendimento de 35% em *biochar*, para as biomassas em geral, quando são utilizadas temperaturas entre 300 a 600°C no reator.

Sabe-se que o rendimento do *biochar* tende a diminuir à medida que a temperatura operacional do reator é aumentada (PARK *et al.*, 2014). Portanto, a temperatura mais elevada na pirólise proporciona uma maior área de superfície e quantidade significativa de volume poroso em sua estrutura (GUPTA & KUA, 2018), que resulta em perda na densidade do *biochar* causada pela carbonização, desidratação, desvolatilização e despolimerização da biomassa (ZHANG *et al.*, 2016), o que, conseqüentemente, ocasiona a redução no rendimento. Portanto, o tipo de biomassa utilizada, bem como as condições adotadas no processo de pirólise interferem no percentual de rendimento do *biochar*.

##### 3.1.2 Granulometria do *biochar*

A Figura 4 mostra a classificação granulométrica do *biochar* da casca de café como um agregado fino, mantendo maior concentração nas peneiras com abertura de malha 0,60 e 0,30mm, o que totalizou em 82,44% de toda a amostra analisada na dimensão granulométrica.

Figura 4 - Granulometria do *biochar* da casca de café

O *biochar* da casca de café apresentou o módulo de finura de 3,3 e dimensão máxima característica de 1,18 mm. A importância da utilização de agregados com diferentes granulometrias na matriz cimentícia é o fato de proporcionar melhor preenchimento e acomodação entre elas, gerando melhor empacotamento no compósito (OLIVEIRA *et al.*, 2000; GUPTA *et al.*, 2020). Desse modo, o tamanho das partículas influencia na densidade do novo material, bem como na ocupação dos espaços anteriormente vazios (KWAN *et al.*, 2014).

Diante disso, é possível afirmar que o emprego do *biochar* proporciona uma melhor acomodação entre os agregados do compósito e evita espaços vazios no concreto, influenciando as propriedades físicas, mecânicas e térmicas dos compósitos (CUTHBERTSON *et al.*, 2019).

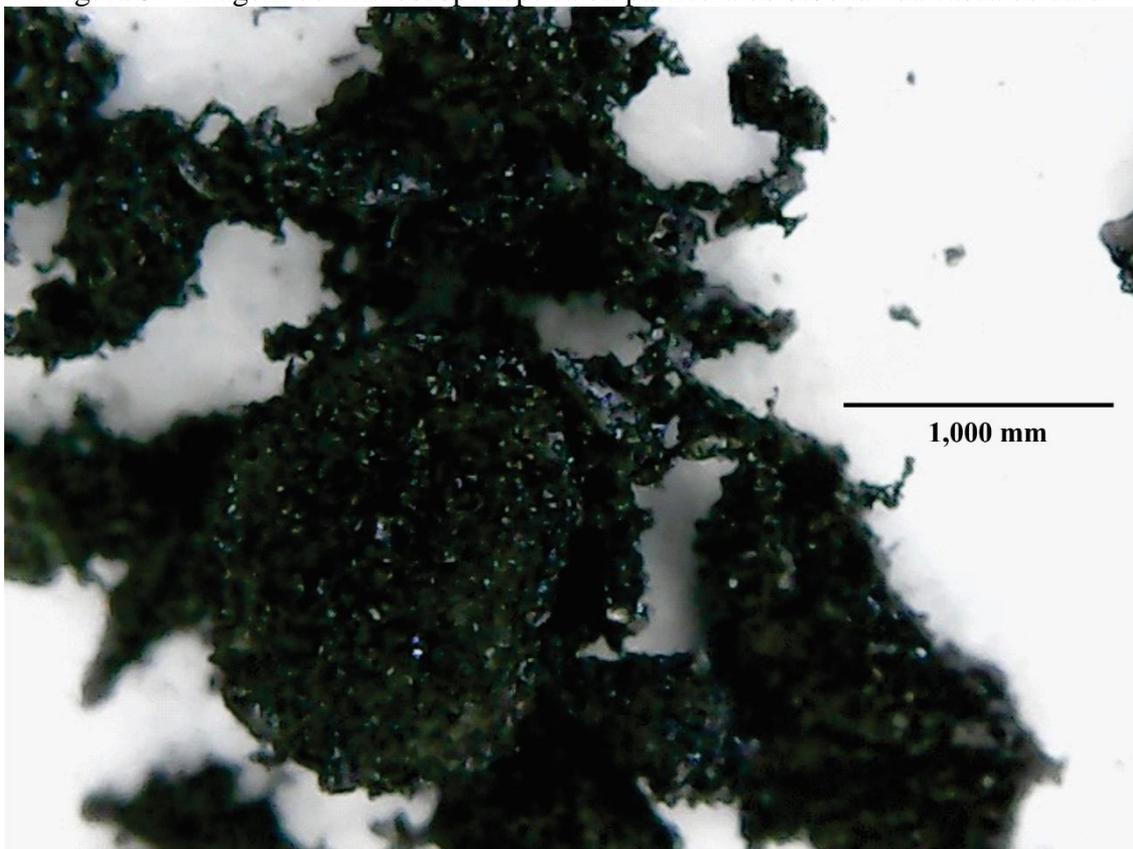
### 3.1.3 Massa unitária do *biochar*

O *biochar* da casca de café apresentou massa unitária de 0,29 g/cm<sup>3</sup>, que é considerada baixa, pois de acordo com Pastor Villegas *et al.* (2006), os *biochars*

produzidos com diversos tipos de madeiras exibem massa unitária entre 0,30 a 0,45 g/cm<sup>3</sup>. Pode-se inclusive citar de modo geral, que os *biochars* apresentam massa compreendida com o volume da partícula em torno de 0,35 g/cm<sup>3</sup> (MANGRICH *et al.*, 2011).

A baixa massa unitária do *biochar* é uma característica física fundamental na sua aplicação, pois segundo Oliveira *et al.* (2012), um material com baixa densidade exibe altos índices de espaços vazios, que o caracteriza como um elemento poroso. Na Figura 5, pode-se observar a estrutura porosa do *biochar*.

Figura 5 - Imagem de microscopia óptica da partícula do *biochar* da casca de café



A formação dos poros no *biochar* ocorre durante a pirólise, devido à evasão de substâncias orgânicas e elementos voláteis (AKHTAR & SARMAH, 2018; MRAD & CHEHAB, 2019), que resultam em perda da densidade da biomassa (ZHANG *et al.*, 2016) e conseqüentemente, em redução na massa unitária.

### 3.1.4 Absorção de água no *biochar*

O *biochar* da casca de café obteve a capacidade de absorção de água de 4,33 g/g. Gupta *et al.* (2018), obtiveram para o *biochar* da serragem de madeira na temperatura de 500 °C a absorção de água de 8,30 g/g, dos restos de arroz e dos restos mistos de alimentos as absorções foram de 4,50 g/g e 3,00 g/g, respectivamente.

Sabe-se que a absorção está associada aos poros presentes na superfície do *biochar* (AKHTAR & SARMAH, 2018; GUPTA *et al.*, 2018), os quais são decorrentes do processo de produção, e são influenciados pelas reações termoquímicas e pela temperatura utilizada na pirólise (BIRD & ASCOUGH, 2012). Esses fatores geram a diferenciação dos poros em tamanho, formato e propensão, ou seja, microporos, mesoporos e macroporos que influenciam nas suas propriedades (ASKSRI *et al.*, 2015).

Yu *et al.* (2009) constataram que o *biochar* pirolisado a 700°C mostrou-se mais eficaz na absorção de substância líquida, porque durante a conversão termoquímica gera maior volume de poros que o *biochar* produzido a 350°C. Mediante essas propriedades, o *biochar* pode ser utilizado como um agregado de hidratação (GUPTA *et al.*, 2018), pois a água absorvida e retida em sua superfície (MRAD & CHEHAB, 2019) é lentamente dissipada no compósito, durante o período de endurecimento, e assim proporciona a hidratação do cimento e auxilia na sua cura interna (CHOI *et al.*, 2012).

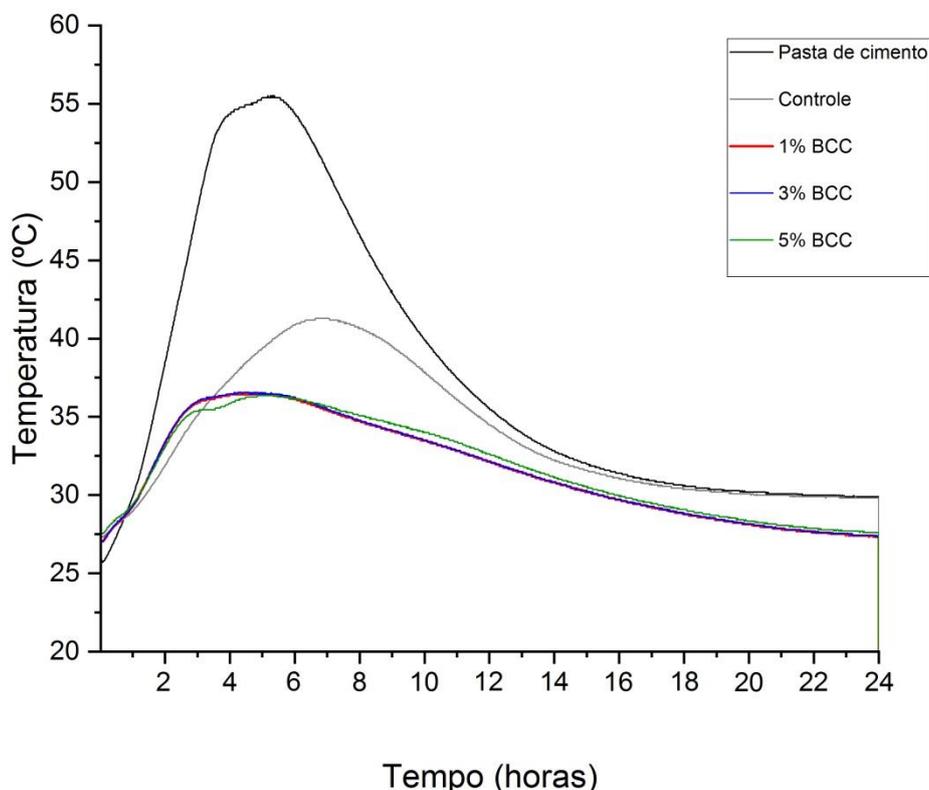
### 3.1.5 Análise de aptidão

A Figura 6 apresenta as curvas obtidas pelo ensaio de inibição da cura do cimento, com a sua substituição do cimento pelo *biochar* da casca de café, nas porcentagens de 1, 3 e 5% para a produção do concreto.

Observou-se que a pasta de cimento, utilizada como parâmetro de comparação para as demais curvas de inibição, obteve uma temperatura máxima de hidratação de 55,51 °C, que ocorreu no tempo de 5h 10min de ensaio. Além disso, notou-se que a curva do concreto controle foi menor, apresentando 41,28 °C no pico da temperatura de hidratação, no tempo de 6h 38min de cura. Esse atraso no tempo para o pico da curva e a menor temperatura aconteceram devido à incorporação dos agregados (areia e brita). Verificou-se também que ao adicionar *biochar* no concreto, houve um achatamento na curva de hidratação do cimento, com a redução do pico máximo da temperatura de

hidratação, que aconteceram antecipadamente aos tempos dos demais compósitos analisados.

Figura 6 - Efeito do uso de diferentes concentrações de *biochar* sobre a curva de inibição da cura do concreto



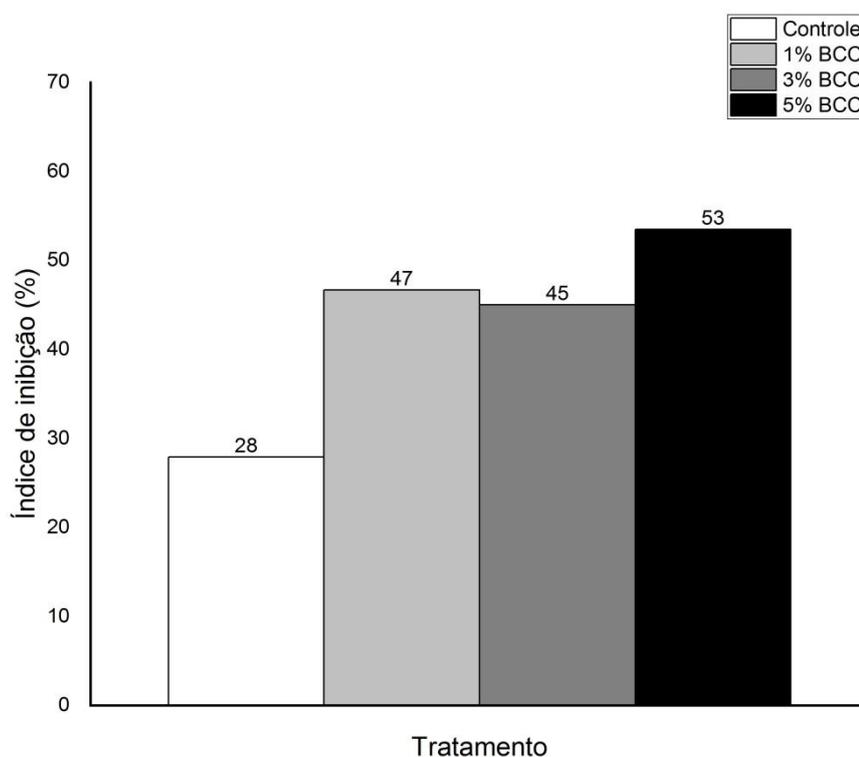
Constatou-se que as reações de inibição foram praticamente as mesmas nas diferentes porcentagens de *biochar* da casca de café utilizadas na produção do concreto. Notou-se ainda, que o *biochar* disponibilizou água durante as reações químicas, as quais são responsáveis pelo aumento da temperatura do compósito. Essa ação foi comprovada pela redução da temperatura, na qual o *biochar* proporcionou inibição das reações nos concretos tratados. Logo, mesmo com esse novo arranjo da temperatura, as matrizes continuaram sendo influenciadas pelo abastecimento de água do *biochar*, demandando de um maior tempo para o processo de cura do concreto.

A hidratação do cimento acontece de forma gradual com a utilização de *biochar* na composição da matriz, visto que esse agregado retém água em sua estrutura porosa, proporcionando a elevação da umidade interna do concreto, além de aumentar a

hidratação do cimento (GUPTA *et al.*, 2019; MO *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2019), o que resulta em melhorias nas propriedades mecânicas do concreto (CHOI *et al.*, 2012).

Com a obtenção da temperatura máxima e o tempo de pico da curva, determinou-se o índice de inibição para a pasta de cimento e para todos os concretos apresentados na Figura 7.

Figura 7 - Índice de inibição dos concretos



Verificou-se que os concretos com 1 e 3% de *biochar* tiveram ligeira igualdade nos resultados do índice de inibição e que o concreto 5% BCC apresentou o maior índice de inibição (53%). Logo, os tratamentos com *biochar* da casca de café obtiveram diferença significativa em relação ao controle. Mediante o efeito do *biochar* na hidratação do cimento, os compósitos 1% BCC e o 3% BCC foram classificados de acordo com os parâmetros de Okino *et al* (2004), como matriz cimentícia de moderada inibição, sendo que o controle também se enquadrou nessa classe de inibição. No entanto, o 5% BCC se classificou na categoria de alta inibição.

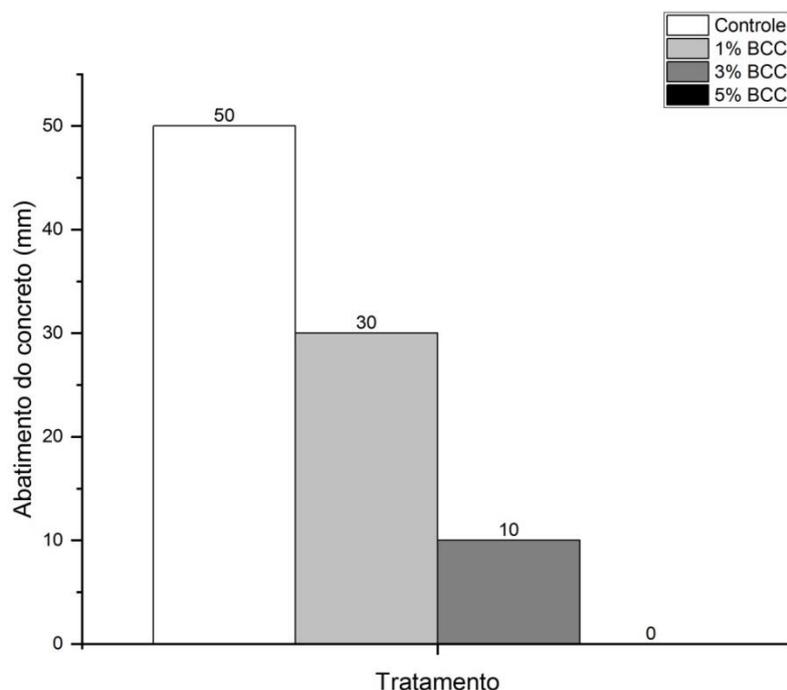
## 3.2 Caracterização do compósito

### 3.2.1 Caracterização física dos concretos

#### 3.2.1.1 Slump test

A Figura 8 apresenta os valores encontrados no *slump test* para os tratamentos avaliados para produção do concreto. Foi possível observar as interferências do uso de *biochar* da casca de café na consistência da massa. Ficou evidente que o aumento da porcentagem desse agregado na mistura resultou na diminuição da fluidez da massa, e consequentemente gerou menor abatimento do concreto.

Figura 8 - Efeito do uso de diferentes concentrações de *biochar* sobre o teste de *Slump test*



Segundo Gupta *et al.* (2018), a maior absorção de água pelo agregado (*biochar*) limita a quantidade de líquido à disposição para a fluidez da massa, o que reduz a sua trabalhabilidade. Conforme ocorrido nos tratamentos de 3 e 5% BCC, observou-se que a redução do nível de abatimento e a perda da trabalhabilidade estão associadas à utilização de maior porcentagem do *biochar* da casca de café no concreto.

Figura 9 - Os efeitos da absorção de água pelo *biochar* sobre o abatimento do concreto.



A) *Slump test* do concreto controle; B) *Slump test* do concreto 1% BCC; C) *Slump test* do concreto 3% BCC; D) *Slump test* do concreto 5% BCC.

Fonte: Do autor (2021).

A Figura 9 mostra a quantidade de água escoada nos concretos, bem como o seu abatimento durante o ensaio. À medida que aumentou a porcentagem de *biochar* nos tratamentos para a obtenção do concreto, a disponibilidade de água para a massa fresca diminuiu, uma vez que ficou retida nos poros do *biochar*. Conforme estudos, as biomassas que passaram pelo processo de combustão, a baixo nível de oxigênio, aumentam a sua quantidade relativa de carbono e também de poros (LEHMANN *et al.*, 2011; DOWNIE *et al.*, 2012; LEHMANN & JOSEPH, 2015). De acordo com CHOI *et al.* (2012), a elevada taxa de carbono, assim como a porosidade do *biochar*, demandam maior quantidade de água, para que o compósito cimentício ganhe uma boa trabalhabilidade. Porém, Praneeth *et al.* (2021) alertam que a adição de água, com a finalidade de equilibrar a trabalhabilidade do compósito com *biochar*, resulta em diminuição das suas propriedades mecânicas.

Dessa forma, o *biochar*, rico em carbono, com elevada porosidade, baixa massa unitária e alta absorção de água, promove maior retenção de água da mistura do concreto nos seus poros, e conseqüentemente, a massa de concreto perde a sua fluidez e trabalhabilidade. GUPTA *et al.* (2018) e SIRICO *et al.* (2020) também observaram efeito da alta absorção de água do *biochar* e a sua relação com a baixa trabalhabilidade.

Segundo a norma ASTM C143 (ASTM, 2020), apenas o concreto controle e 1% BCC são admissíveis para aplicação, ou seja, possuem boa trabalhabilidade e fluidez. Desta forma, os tratamentos com 3 e 5% de *biochar* da casca de café não contemplam plasticidade adequada, o que os tornam difíceis de serem aplicados e moldados.

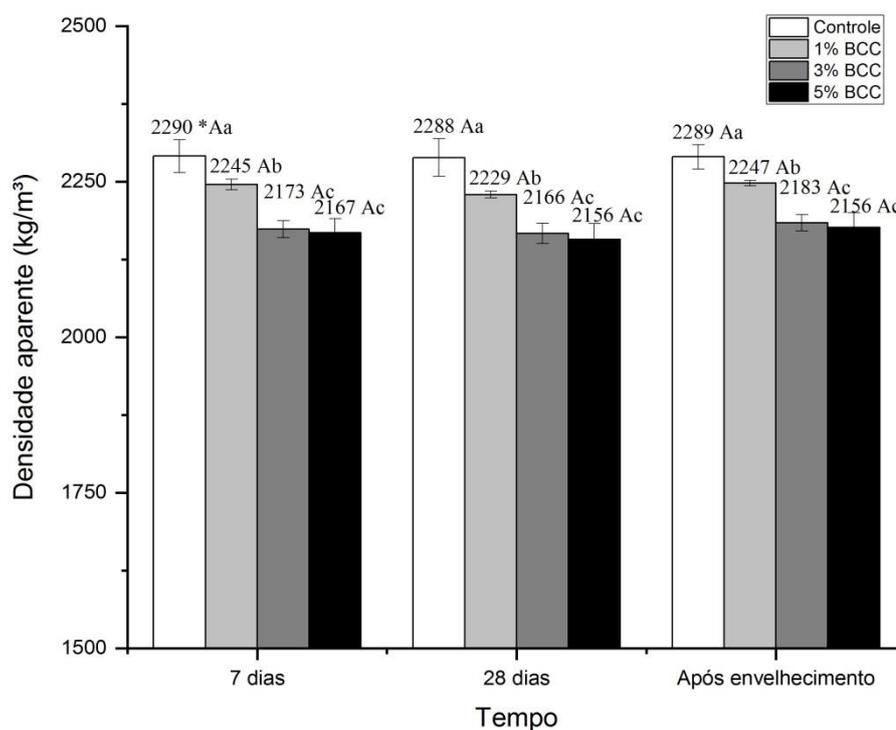
### 3.2.1.2 Densidade aparente

Na Figura 10 é possível observar o efeito da utilização das diferentes porcentagens de *biochar* e dos períodos de análise sobre a densidade aparente do concreto. Não houve interação entre tempo de cura e a utilização de *biochar* em diferentes porcentagens para a densidade dos concretos analisados.

No entanto, quando avaliado cada tratamento, dentro de um determinado período, foi possível observar o efeito significativo da utilização do *biochar* sobre a densidade dos compósitos. O concreto controle obteve em todos os períodos a maior densidade, diferenciando-se estatisticamente dos concretos com *biochar*. Os concretos com 3 e 5% BCC obtiveram os menores valores de densidade, apresentando igualdade estatística entre si. Os concretos com 1% BCC diferenciaram-se estatisticamente de todos os compósitos analisados, obtendo densidade intermediária em relação as demais formulações.

A diminuição da densidade aparente está relacionada à porcentagem de *biochar* da casca de café incorporada ao concreto, pois à medida que se aumentou a massa do *biochar* diminuiu-se, na mesma proporção, a massa de cimento, promovendo aumento de porosidade do compósito e redução da massa específica das matérias primas que são utilizadas na mistura. Estudos afirmam que o *biochar* é um material que possui baixa densidade, devido aos seus altos volumes de poros (CHOI *et al.*, 2012; GUPTA & KUA, 2018) oriundos da degradação parcial da celulose, lignina e outras substâncias, sendo o processo termoquímico o responsável pela modificação das características da biomassa pirolisada (AWAD *et al.*, 2012).

Figura 10 - Densidade aparente do concreto produzido com diferentes concentrações de *biochar* e tempos de análise



\*Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas, comparando os tempos de análises (7 e 28 dias e após envelhecimento), e pelas mesmas letras minúsculas, comparando os tratamentos dentro de cada período de análise não diferenciam estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância.

Gupta *et al.*(2018) também constataram a diminuição de densidade na utilização de até 8% de *biochar*, em substituição ao cimento na argamassa. Pesquisas relatam que o uso de agregado leve e poroso propicia a diminuição da densidade aparente, em função do preenchimento das cavidades e da forma de ocupação dos componentes na mistura do concreto (SAGMEISTER, 1999; THIENEL, 2000; GARRECHT *et al.*, 2011).

Embora os tratamentos com *biochar* da casca de café tenham apresentado redução na densidade, ainda não podem ser classificados como concreto leve (ASTM C567, 2019).

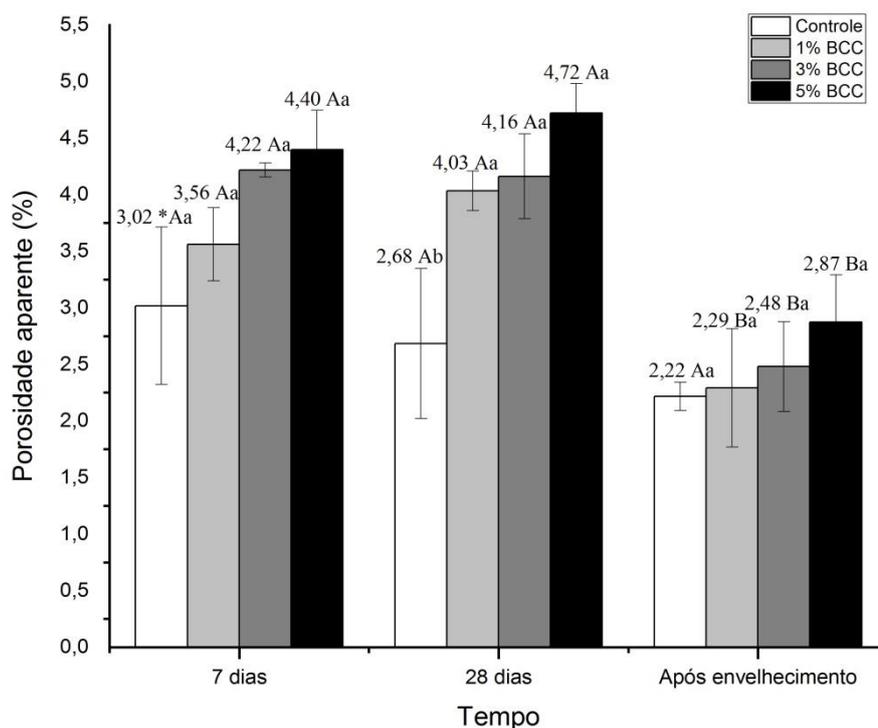
### 3.2.1.3 Porosidade aparente

Na Figura 11 é possível observar o efeito da utilização das diferentes porcentagens de *biochar* e dos períodos de análise sobre a porosidade do concreto. Não houve interação

entre o tempo de análise e a utilização de *biochar* em diferentes porcentagens sobre a porosidade do concreto.

Ao avaliar a porosidade dentro de cada período analisado, não foi observada diferença estatística entre os concretos com diferentes porcentagens de *biochar*. Contudo, em relação a formulação controle, constatou-se um efeito significativo dos tratamentos no período de 28 dias de cura, com o um aumento da porosidade dos compósitos que receberam *biochar* da casca de café. Esse resultado pode estar relacionado ao fato de que aos 7 dias, o concreto ainda está em fase de endurecimento e a estrutura do compósito não está finalizada, pois prosseguem as reações químicas entre o cimento e a água (DIXIT *et al.*, 2019; GOLLA *et al.* 2021). Porém, ocorrem as diferenciações entre os tratamentos analisados aos 28 dias, pois as reações de hidratação no concreto controle já estão em sua fase de estabilização, enquanto para os tratamentos com *biochar* ainda está sendo liberado água para promover a continuidade das reações químicas, fato que promove maior índice de inibição da cura do cimento (Figura 7) e maior porosidade para essas formulações.

Figura 10 - Porosidade aparente do concreto produzido com diferentes concentrações de *biochar* e tempos de análise



\*Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas, comparando os tempos de análises (7 e 28 dias e após envelhecimento), e pelas mesmas letras minúsculas, comparando os tratamentos dentro de cada período de análise não diferente estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância.

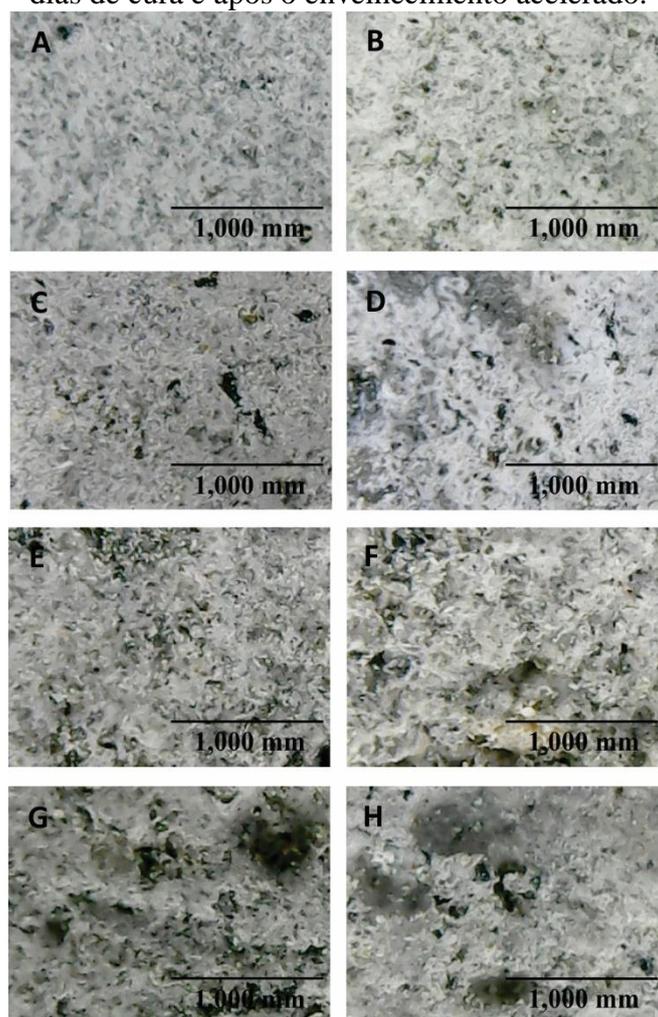
Ao comparar cada tratamento em função dos tempos analisados, observou-se que o controle manteve-se estável em relação a todas as idades de cura. Os demais tratamentos com *biochar* foram iguais estatisticamente nas idades de 7 e 28 dias, mas apresentaram redução significativa da porosidade aparente após o envelhecimento acelerado.

Com a saída da água para promover a continuidade da cura do cimento, ocorre também a liberação dos espaços que a água ocupava nos poros, promovendo a elevação da porosidade do compósito dos compósitos aos 28 dias em relação aos compósitos aos 7 dias (Figura 11). Segundo Xu *et al.* (2019), os poros do *biochar* são oriundos dos escapes de substâncias voláteis e orgânicas da biomassa utilizada na pirólise convencional. Logo, o *biochar* possui baixa densidade devido a sua microestrutura celular altamente porosa, e quando aplicado ao concreto, proporciona a elevação do percentual de porosidade do compósito (GUPTA *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2020).

Enquanto com o envelhecimento o material lignocelulósico passa a ser degradado em função da alcalinidade da matriz, que interagem com o material lignocelulósico, dissolvendo a lignina e a hemicelulose existentes, debilitando a conexão entre as células da fibra (FILHO *et al.*, 2000; MENDES *et al.*, 2017; DIXIT *et al.*, 2019; TEIXEIRA *et al.* 2020), e por consequência promovendo a mineração do material (KUZYAKOV *et al.*, 2009; SANDER & EL-ZEHERY, 2012), o que em associação com a continuidade da cura do cimento, e a sua reprecipitação, (DIXIT *et al.*, 2019; RIFAI *et al.*, 2020), promove o fechamento dos poros dos compósitos, como pode ser visualizado na Figura 12. Segundo Kuzyakov *et al.* (2009), o envelhecimento do *biochar* proporciona a decomposição mais rápida do material, permitindo a redução da porosidade do concreto.

Zhão *et al.* (2019) observaram a diminuição de 2,8% da porosidade em concreto com 5 kg/m<sup>3</sup> de *biochar* de madeira. Gupta *et al.* (2020) também constatou redução de aproximadamente 32% da porosidade do concreto com 2% de *biochar* de pó de madeira em comparação ao controle.

Figura 12 - Imagem de microscopia óptica dos concretos controle e com *biochar*, aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado.



A) Formação de poros no concreto controle aos 28 dias; B) Formação de poros no concreto controle após envelhecimento; C) Formação de poros no concreto 1% BCC aos 28 dias; D) Formação de poros no concreto 1% BCC após envelhecimento; E) Formação de poros no concreto 3% BCC aos 28 dias; F) Formação de poros no concreto 3% BCC após envelhecimento; G) Formação de poros no concreto 5% BCC aos 28 dias; H) Formação de poros no concreto 5% BCC após envelhecimento.

#### 3.2.1.4 Absorção de água

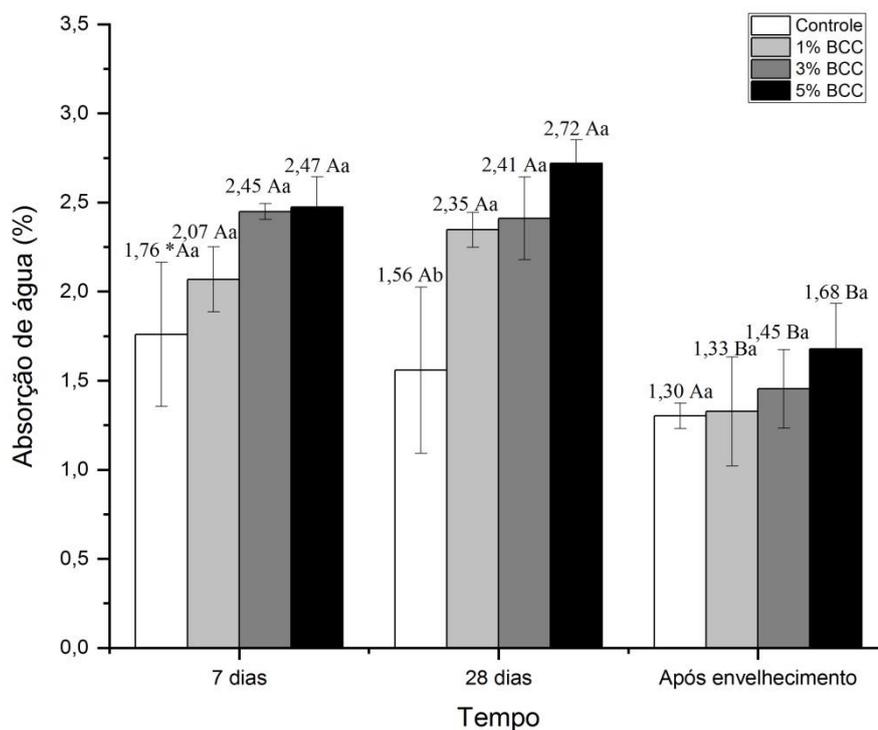
Na Figura 13 estão apresentados os valores médios da absorção de água dos concretos aos 7 e 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado, para cada um dos tratamentos avaliados. Não houve interação entre tempo de análise e a porcentagem de utilização de *biochar* para a propriedade de absorção de água. Analisando a absorção de água dentro de cada período analisado, observou-se que houve efeito significativo dos tratamentos apenas quando avaliado o período de cura de 28 dias. Do mesmo modo que se verificou na porosidade dos compósitos, os concretos com utilização de *biochar* diferenciaram-se do tratamento controle, obtendo os maiores valores médios de absorção

de água. Observou-se ainda que não houve diferença entre os tratamentos, empregado diferentes porcentagens do *biochar*.

Notou-se uma relação direta entre porosidade e absorção de água do concreto com *biochar*. Desta forma, assim como explicado para a porosidade, os compósitos da formulação controle com 28 dias passam a apresentar uma estrutura mais fechada devido a estabilização da cura do cimento, enquanto os concretos com *biochar* ainda estão em processo de cura e com a matriz com maior porosidade (Figura 12), o que afeta de forma direta a absorção de água do material.

A interferência na retenção de água do compósito com *biochar* deve-se ao agregado pirolisado que retém mais água que o cimento e a areia, em razão dos poros presentes em sua superfície (PRANTH *et al.*, 2021; RUAN *et al.*, 2019; CHOI *et al.*, 2012). Gupta *et al.* (2018) relataram que os altos volumes de poros e a capacidade de absorção do *biochar* também influenciam no aumento simultâneo das propriedades de porosidade e absorção de água, aos 28 dias de cura, e que essas propriedades se encontram totalmente associadas.

Figura 13 - Absorção de água do concreto produzido com diferentes concentrações de *biochar* e tempos de análise



\*Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas, comparando os tempos de análises (7 e 28 dias e após envelhecimento), e pelas mesmas letras minúsculas, comparando os tratamentos dentro de cada período de análise não diferente estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância.

Ao comparar os resultados obtidos para cada tratamento em diferentes tempos (7, 28 dias e após envelhecimento), observou-se que apenas o controle não apresentou diferença significativa. Os demais tratamentos obtiveram uma redução significativa na absorção de água após o envelhecimento. O que se deve a redução da porosidade (Figura 11 e 12), uma vez que ocorreu a degradação do *biochar* com o envelhecimento, em função da sua mineralização e pH alcalino da matriz cimentícia, como também foi observado nos estudos de Hamer *et al.* (2004) e Kuzyakov *et al.* (2009), e a continuidade de cura da matriz (RIFAI *et al.*, 2020; ZHÃO *et al.*, 2020).

### 3.2.1.5 Resistência à compressão

A Tabela 6 mostra o efeito da utilização das diferentes porcentagens de *biochar* e dos períodos de análise sobre a resistência à compressão do concreto. Verificou-se interação significativa entre os tratamentos e os tempos avaliados.

Houve efeito significativo das porcentagens de *biochar* sobre a resistência a compressão dos concretos ao longo do tempo. Aos 7 dias de cura o concreto controle e com 1% BCC apresentaram igualdade estatística, obtendo os maiores resultados para o período, e diferenciando-se estatisticamente dos demais tratamentos.

No entanto, aos 28 dias de cura e após o envelhecimento acelerado o tratamento controle se diferenciou de todos os tratamentos com *biochar*, obtendo o maior valor médio de resistência. No Período de 28 dias todos os tratamentos com *biochar* se diferenciaram estatisticamente, sendo menor o valor de resistência quanto maior foi a porcentagem de *biochar* utilizada. Este fato pode ser explicado pela diminuição do cimento e pelos resultados de plasticidade (Figura 8), densidade (Figura 10) e porosidade observado para cada formulação (Figura 11 e 12).

Tabela 6: Resistência à compressão (MPa) do concreto produzido com diferentes concentrações de *biochar* e tempos de análise

<b>Tratamento</b>	<b>7 dias</b>	<b>28 dias</b>	<b>Após envelhecimento</b>
<b>Controle</b>	21,47 <sup>(0,56)*</sup> Ca	27,81 <sup>(0,93)</sup> Ba	32,93 <sup>(0,57)</sup> Aa
<b>1% BCC</b>	20,63 <sup>(0,83)</sup> Ca	23,17 <sup>(0,22)</sup> Bb	27,86 <sup>(0,79)</sup> Ab
<b>3% BCC</b>	16,32 <sup>(0,22)</sup> Cb	18,32 <sup>(0,52)</sup> Bc	26,46 <sup>(0,50)</sup> Ab
<b>5% BCC</b>	10,28 <sup>(0,82)</sup> Bc	11,76 <sup>(0,58)</sup> Bd	18,29 <sup>(0,67)</sup> Ac

\*Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas, comparando os tempos de análises (7 e 28 dias e após envelhecimento), e pelas mesmas letras minúsculas, comparando os tratamentos dentro de cada período de análise não diferente estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância.

Para a utilização do concreto este deve estar de acordo com as exigências da ASTM C 39 (ASTM, 2020), ou seja, os concretos devem atingir no mínimo 78% e 100% da resistência à compressão projetada aos 7 e 28 dias de cura, respectivamente. Sendo assim, apenas o tratamento controle e com 1% BCC atingiram o resultado superior à porcentagem almejada (19,5 MPa) para 7 dias de cura. Enquanto aos 28 dias de cura apenas o tratamento controle atingiu os 25 MPa. Esse resultado está associado à inibição na hidratação do cimento causada pelo *biochar* pré-saturado (Figura 7), o qual retardou o

processo de endurecimento devido o tempo gasto para fornecimento de água para realização das reações químicas necessárias.

A utilização do *biochar* pré-saturado reduz consideravelmente a quantidade de água livre no interior da matriz, diminuindo as vias de evaporação da umidade (HIJAZIN & LOPEZ, 2011; GUPTA & KUA, 2018). Essa água presente nos poros do *biochar* é ofertada de forma gradativa ao ambiente interno promovendo continuamente a umidade na matriz cimentícia, durante o seu estágio de endurecimento (CHOI *et al.*, 2012; LYRA *et al.*, 2011; GUPTA & KUA, 2018). Devido a essa ação, acontece uma desaceleração da reação química no compósito, prolongando a fase aquosa, que segundo Lyra *et al.* (2012) e Romano *et al.* (2016) é quando ocorre a formação do silicato de cálcio hidratado pela saturação iônica. Essa hidratação resulta na melhor densificação e contribui para o desenvolvimento da resistência do compósito cimentício (MINDESS *et al.*, 2003; GUPTA & KUA, 2018).

Após o envelhecimento acelerado, verificou-se que os concretos com 1% BCC e 3% BCC ultrapassaram a resistência calculada de 25 MPa, o que demonstra que o processo de endurecimento dos concretos com *biochar* necessita de mais tempo, devido à hidratação gradual do cimento. Constatou-se a continuidade do aumento da resistência à compressão de todos concretos, durante o processo de cura e que o controle foi se diferenciando com maior capacidade de resistir às forças de compressão. Embora o tratamento com 5% BCC também tenha reagido dessa forma, este não atingiu a resistência esperada, devido ao efeito mais destacado da utilização de maiores quantidades de *biochar*, que acarretou em maior quantidade de poros ao compósito (Figura 12).

Os poros do *biochar*, que durante a hidratação do cimento serviram de reservatório para o fornecimento de água à matriz (MUTHUKRISHNAN *et al.*, 2019), tornaram-se poros vazios. Portanto, o uso excessivo do *biochar* aumenta a quantidade de espaços vazios (GUPTA *et al.*, 2018), que são os principais causadores de trincas dentro do compósito, além de ocasionar a diminuição da sua resistência mecânica (ODIMEGWU *et al.* (2018).

Akhtar e Sarmah (2018) confirmam que pequenas quantidades de *biochar* podem ser incorporadas ao concreto para fins estruturais. Conforme seus estudos, a resistência projetada para o concreto foi atingida quando utilizaram cinco dosagens diferentes (0,10; 0,25; 0,50; 0,75 e 1,00%) de *biochar* da cama de frango, da polpa e lama de papel, e também da casca de arroz. Esses pesquisadores ainda observaram a redução da resistência dos tratamentos com *biochar* ao compará-los com o controle. No estudo em argamassa,

Gupta *et al.* (2018) também constataram resultados positivos para a resistência à compressão, substituindo o cimento em até 1% de *biochar* do resíduo de madeira e dos restos de alimentos.

### 3.2.1.6 Resistência à tração

Na Tabela 7 observa-se o efeito da utilização das diferentes porcentagens de *biochar* e dos períodos de análise sobre a resistência à tração do concreto. Verificou-se interação significativa entre os tratamentos e os tempos avaliados.

Houve efeito significativo das diferentes porcentagens de utilização do *biochar* dentro dos períodos avaliados. O concreto controle e com 1% BCC se mostraram iguais estatisticamente em todos os períodos avaliados, diferenciando-se estatisticamente dos demais tratamentos e obtendo os maiores valores de resistência. Enquanto os concretos com 3% de BCC apresentaram igualdade estatística com o tratamento controle e 1% de BCC quando analisados aos 28 dias e após o envelhecimento acelerado.

Os concretos com 5% BCC, foram o que atingiram as menores resistências em todos os períodos avaliados, evidenciando o excesso de utilização desse agregado e seu efeito prejudicial em maiores porcentagens. Esse fato está associado a maior porcentagem de substituição do cimento e a maior interferência na porosidade aparente, bem como na resistência à compressão, conforme relatado anteriormente (GUPTA *et al.*, 2018).

Desta forma, quando se retira menores frações de cimento para a incorporação do *biochar*, o resultado é uma ligeira diminuição de silicato de cálcio hidratado, o que não ocasiona prejuízo na redução da resistência do concreto (AKHTAR & SARMAH, 2018). Contudo, a abundância de poros, provindos das partículas excedentes do *biochar*, enfraquece o compósito de forma acentuada, inviabilizando sua utilização (MUTHUKRISHANAN *et al.*, 2019).

Tabela 7: Resistência à tração (MPa) do concreto produzido com diferentes concentrações de *biochar* e tempos de análise

Tratamento	7 dias	28 dias	Após envelhecimento
Controle	2,55 <sup>(0,12)*</sup> Ca	2,63 <sup>(0,16)</sup> Ba	2,86 <sup>(0,11)</sup> Aa
1% BCC	2,58 <sup>(0,12)</sup> Ba	2,81 <sup>(0,21)</sup> Aa	3,04 <sup>(0,11)</sup> Aa
3% BCC	2,13 <sup>(0,21)</sup> Bb	2,46 <sup>(0,13)</sup> Aa	2,77 <sup>(0,10)</sup> Aa
5% BCC	1,73 <sup>(0,03)</sup> Ac	2,03 <sup>(0,06)</sup> Ab	1,94 <sup>(0,08)</sup> Ab

\*Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas, comparando os tempos de análises (7 e 28 dias e após envelhecimento), e pelas mesmas letras minúsculas, comparando os tratamentos dentro de cada período de análise não diferente estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância.

De acordo com a norma ASTM C496 (ASTM, 2017), a resistência à tração projetada deve ser de 2,56 MPa, aos 28 dias de cura. Sendo assim, o concreto 1% BCC atingiu essa capacidade de carga aos 7 dias de idade e o concreto 3% BCC obteve o resultado apenas após o envelhecimento acelerado. Os concretos com 5% de BCC não atingiram a resistência mínima necessária. Gupta *et al.* (2020) conseguiram atingir a resistência à tração calculada para o concreto, inclusive com capacidade de carga superior à obtida pelo controle, quando utilizadas as porcentagens de *biochar* de pó de madeira misturada.

### 3.2.1.7 Condutividade térmica

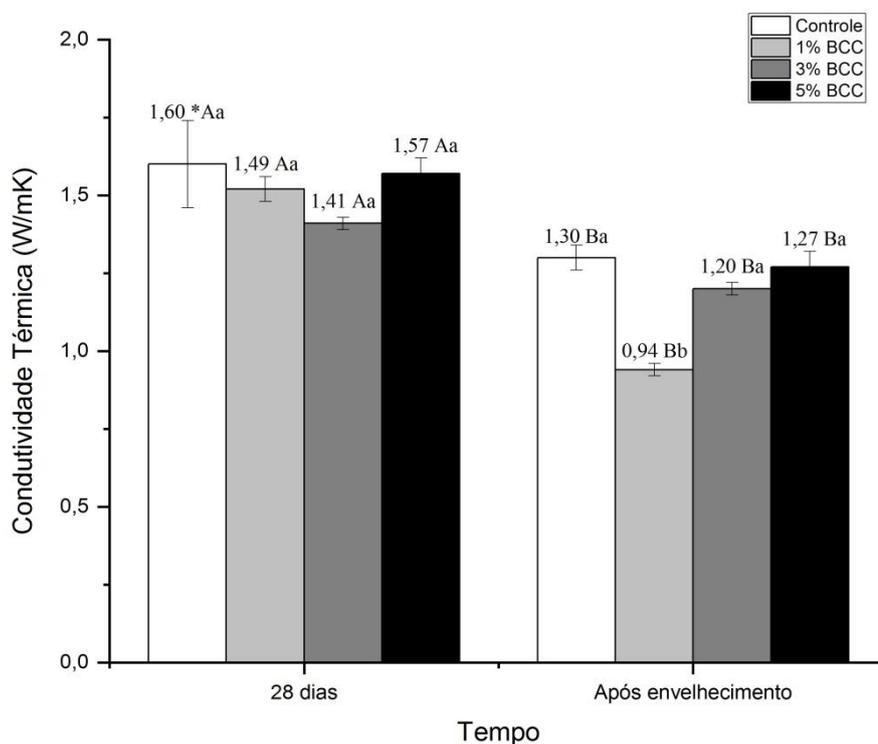
A Figura 14 apresenta o efeito da utilização do *biochar* sobre a condutividade térmica do concreto, nos tempos de 28 dias de cura e após envelhecimento.

Houve interação significativa entre os tratamentos e os tempos analisados. Ao analisar a condutividade térmica dentro de cada período, observou-se efeito significativo dos tratamentos apenas no período após envelhecimento acelerado. Constatou-se que o concreto com 1% BCC resultou em menor condutividade térmica em relação aos demais tratamentos. Esse fato pode ter ocorrido devido à forma de ocupação desse agregado leve e poroso no concreto, que em menor quantidade, prejudicam o empacotamento dos componentes da mistura, gerando maior porosidade que o tratamento controle, contudo, não ao ponto para promover a criação da rede de partículas e poros interligados, que serviriam como fonte de transmissão de calor no concreto.

Estudos comprovam que, um material composto por partículas empacotadas possui condutividade térmica mais elevada do que aquelas interligadas por presença de ar (OLIVEIRA *et al.*, 2000; FROTA & SCHIFFER, 2005), que a condutividade térmica de um concreto com agregado leve é menor do que em um concreto normal, em razão do

micro e macro poros em sua estrutura (NOR *et al.*, 2016). Logo, a utilização de *biochar* resulta em menor transmissão do calor, devido as suas características de baixa densidade e maior composição de poros (GUPTA & KUA, 2017).

Figura 14 - Condutividade térmica do concreto produzido com diferentes concentrações de *biochar* e tempos de análise



\*Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas, comparando os tempos de análises (7 e 28 dias e após envelhecimento), e pelas mesmas letras minúsculas, comparando os tratamentos dentro de cada período de análise não diferente estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância.

Ao comparar o efeito dos tempos de 28 dias e após envelhecimento em cada tratamento, averiguou-se que todos os tratamentos apresentaram menor condução térmica depois do processo de envelhecimento acelerado. Este fato pode estar associado à decomposição da partícula do *biochar* na matriz cimentícia, modificando a rede de condutividade térmica.

A decomposição da lignina enfraquece as ligações entre fibra e matriz, diminuindo a vida útil do compósito (FILHO *et al.*, 2000; AGOPYAN *et al.*, 2005). A separação dos

filamentos, causados pela degradação da lignina, ocasiona mudança nos volumes do material lignocelulósico, dentro da matriz de cimento (AGOPYAN *et al.*, 2005).

Cuthbertson *et al.* (2019), relataram a diminuição da condutividade térmica quando utilizaram o *biochar* como enchimento de concreto. Na aplicação de 2% de biomassa residual pirolisada, atingiram a redução de 0,192W/mK, em relação ao concreto controle. Com base na American Society for Testing and Materials (ASTM E903, 2020), espera-se uma condutividade térmica de 1,75 W/mK para um concreto normal. Desta forma, todos os tratamentos produzidos apresentaram valores inferiores ao estipulado pela norma. Além disso, foi comprovado que os concretos com *biochar* da casca de café demonstraram redução expressiva de 27 a 46% na condutividade térmica após o envelhecimento acelerado.

### 3.2.1.7 Barreira acústica

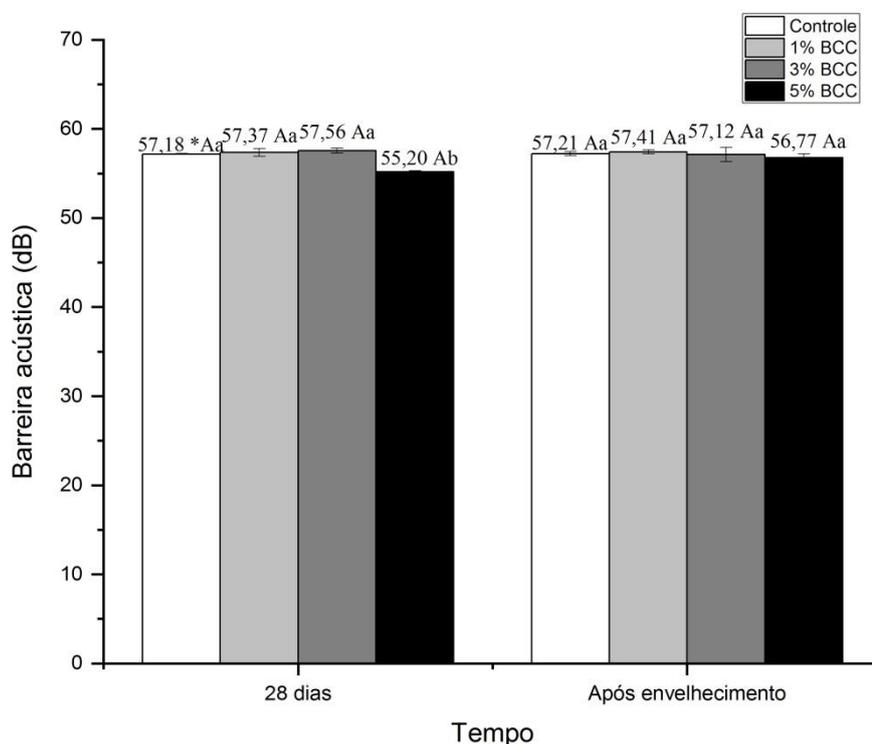
A Figura 15 mostra a influência das diferentes concentrações de *biochar* na barreira acústica dos concretos, nos tempos de 28 dias e após envelhecimento. Não houve interação entre os tratamentos e os tempos avaliados. Observando os resultados dos níveis de ruídos que foram obstruídos a passagem pelos concretos, constatou-se efeito significativo apenas aos 28 dias de cura. O concreto com 5% *biochar* da casca de café diferenciou-se estatisticamente dos demais tratamentos, apresentando a menor eficiência em relação aos demais concretos analisados. Este fato pode ter ocorrido em razão da alta porcentagem desse agregado no compósito, o que proporcionou maior volume de poros, os quais podem favorecer a conexão entre os mesmos e dificultar a função do compósito obtido como barreira acústica.

Os agregados porosos interferem no resultado final do desempenho acústico do concreto (KIM & LEE, 2010). Pesquisas relatam que o tamanho dos poros e a sua distribuição são alguns dos fatores que interferem na propagação do som dentro do material (JIN *et al.*, 2010; KIM & LEE, 2010; ZHAO *et al.*, 2010). Portanto, o excesso de agregado poroso eleva a quantidade de poros no compósito e modifica a ocupação das partículas nos vazios, resultando no aumento do canal de transmissão do som e consequentemente prejudica a eficiência da barreira acústica (ZHAO *et al.*, 2010).

Contudo, observa-se que após o envelhecimento acelerado, o tratamento com 5% de BCC passou a apresentar igualdade estatística em relação aos demais tratamentos, o

que se deve a continuidade da hidratação do cimento e o fechamento dos poros do material (Figura 12).

Figura 15 - Barreira acústica do concreto produzido com diferentes concentrações de *biochar* e tempos de análise



\*Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas, comparando os tempos de análises (7 e 28 dias e após envelhecimento), e pelas mesmas letras minúsculas, comparando os tratamentos dentro de cada período de análise não diferente estatisticamente pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de significância.

Com exceção do tratamento com 5% de BCC, os concretos mantiveram-se estáveis nos dois períodos analisados. Este resultado está correlacionado com a densidade aparente do concreto, já que está também não sofreu alteração significativa com o passar do tempo (Figura 12).

De acordo com Carrasco & Azevedo (2003) a densidade do material afeta a velocidade da propagação da onda ultrassônica, assim como os agregados utilizados (tipo, tamanho e gradação), a sua espessura e porosidade, além dos aditivos utilizados na mistura (ZHANG *et al.*, 2019).

Para as edificações habitacionais a norma NBR 15575 (ABNT, 2013), exige uma barreira acústica de 40 dB entre os pisos de cada edificação. Portanto, todos os concretos com *biochar* da casca de café atenderam aos níveis solicitados para as barreiras acústicas e podem ser aplicados na concretagem da laje ou no contrapiso.

#### 4 CONCLUSÃO

A inserção do *biochar* da casca de café limitou a quantidade de água livre na mistura do concreto fresco, promovendo a hidratação de forma mais gradativa, e resultando na extensão do ciclo de cura do concreto.

Para as propriedades físicas foi observado efeito da concentração de *biochar* apenas para a densidade do compósito, sendo menor a densidade quanto maior a porcentagem de *biochar* utilizada. Não houve efeito da concentração do *biochar* sobre as propriedades de porosidade e absorção de água. Os concretos obtiveram maiores valores de porosidade e absorção de água, em relação ao tratamento controle, apenas quando avaliados aos 28 dias de cura.

O uso do *biochar* resultou em diminuição significativa da resistência a compressão dos concretos. Apesar disso, após o envelhecimento acelerado os compósitos com até 3% BCC atendem as especificações normativas. Em relação a resistência a tração, os tratamentos com 1 e 3% apresentaram desempenho comparável ao concreto controle, atendendo as especificações normativas.

Não foi observado efeito destacado do uso do *biochar* sobre a barreira acústica dos concretos. Em relação a condutividade térmica, os compósitos com 1% de *biochar* apresentaram o melhor desempenho.

Com o envelhecimento acelerado dos concretos tratados, os *biochar* obtiveram sua estrutura porosa degradada, o que ocasionou a redução da porosidade e da absorção de água do compósito. De forma geral, é indicado o uso de 1% de *biochar* de casca de café na produção de concreto, o que permite a obtenção de resistência à compressão e à tração comparáveis a formulação controle, e ainda promovem menor densidade e melhor isolamento térmico ao concreto.

Não é indicado o uso de concentrações de 5% ou mais de *biochar* na produção de concreto, pois resulta em elevados valores de porosidade e absorção de água, e em reduções significativas quanto a resistência mecânica.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecimentos às entidades de fomento Fapemig, CNPq (bolsas processos nº 130340/2019 e nº 167920/2019) e CAPES; à Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JÚNIOR, H.; JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Developments on vegetable fibre-cement based materials in São Paulo, Brazil: an overview. **Cement & Concrete Composites**, Barking, v. 27, p. 527-536, 2005.

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Novel biochar-concrete composites: Manufacturing, characterization and evaluation of the mechanical properties. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 616, p. 408-416, 2018.

AL-MAJEED, E. A.; HEKMAT, D.; AL-MOHNIA, M.S.; ABDULMAJEED, E.; The effect of Palm Kernel Powder on Compressive Strength and absorption of Portland Cement Mortar. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, Tamilnadu, v. 9, n. 10, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate - ASTM C 29**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field - ASTM C 31**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens - ASTM C 39**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates - ASTM C 136**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete - ASTM C 143**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens - ASTM C 496**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete - ASTM C 567**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete - ASTM C 642**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test Method for Determining Density of Structural Lightweight Concrete – ASTM C567**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Métodos de teste padrão para umedecimento e secagem de misturas de solo compactado com cimento - ASTM D 559**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Método de Teste Padrão para Absorção Solar, Refletância e Transmitância de Materiais Usando Esferas Integradas - ASTM E903**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

ASADI, I.; SHAFIGH, P.; HASSAN, Z. F. B. A.; MAHYUDDIN, N. B. Thermal conductivity of concrete - A review. **Journal of Building Engineering**. DOI: 10.1016/j.jobee.2018.07.002, 2018.

ASKARI, R.; TAHERI, S.; HEJAZI, S. H. Thermal conductivity of granular porous media: a pore scale modeling approach. **AIP Advances**, College Park, v. 5, n. 9, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento - NBR 12655**, Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social - NBR 15220**, Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais - NBR 15575-1**, Rio de Janeiro, 2013

AWAD, Y.M.; BLAGODATSKAYA, E.; OK, Y.S.; KUZYAKOV, Y.; Effects of polyacrylamide, biopolymer, and biochar on decomposition of soil organic matter and plant residues as determined by  $^{14}\text{C}$  and enzyme activities. **European Journal of Soil Biology** Montrouge, v. 48, p. 1-10, 2012

BELTRÁN-RAMÍREZ, F. I. *et al.* Agro-Industrial waste revalorization: the growing biorefinery. *In*: ABOMORA, A. E. F. (ed.). **Biomass for bioenergy: recent trends and future challenges**. London: IntechOpen, 2019.

BIRD, M.I.; ASCOUGH, P.L.; Isotopes in pyrogenic carbon: a review. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 42, p. 1529-1539, 2012.

BRIDGWATER, A. V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Engineering Journal**, v. 91, n. 2-3, p. 87-102, 2003.

CARRASCO, E. V. M.; AZEVEDO JÚNIOR, A. P. Avaliação não destrutiva de propriedades mecânicas de madeiras através de ultra-som – fundamentos físicos e resultados experimentais. **Cerne**, Lavras, v. 9, n. 2, p. 178-191, 2003.

CHOI, W. C.; YUN, H. D.; LEE, J. Y. Mechanical properties of mortar containing biochar from pyrolysis. **Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection**, Seoul, v.16, p. 67–74, 2012.

CUTHBERTSON, D.; BERARDI, U.; BRIENS, C.; BERRUTI, F. Biochar from residual biomass as a concrete filler for improved thermal and acoustic properties. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 120, p. 77-83, 2019.

DIXIT, A. GUPTA, S.; PANG, S.D.; KUA, H.W. Waste Valorisation using biochar for cement replacement and internal curing in ultra-high performance concrete. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 238, 2019.

DOWNIE, A.; CROSKY, A.; MUNROE, P. Physical properties of biochar. *In*: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (ed.). **Biochar for environmental management**. London: Routledge, 2012. p. 45-64.

EMPRESA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Manual do café: colheita e preparo** (Coffea arábica L.). Belo Horizonte: EMATER-MG, 2016. 52 p.

FERREIRA, C. R.; TAVARES, S. S.; FERREIRA, B. H. M.; FERNANDES, A. M.; FONSECA, S. J. G.; OLIVEIRA, C. A. S.; TEIXEIRA, R. L. P.; GOUVEIA, L. L. A. Comparative Study About Mechanical Properties of Structural Standard Concrete a Concrete with Addition of Vegetable Fibers. **Materials Research**, v. 20, p. 102-107, 2017.

FERREIRA, D. F.; **Sisvar: a computer statistical analysis system**. Ciência e Agrotecnologia, UFLA, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.

FILHO, R.D.T.; SCRIVENER, K.; ENGLAND, G.L.; GHAVAMI, K.. Durability of Alkali-Sensitive Sisal and Coconut Fibers in Cement Mortar Composites. **Cement and Concrete Composites**. v. 22, p. 127-143, 2000.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 7. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2005. v. 1.

GARRECHT, H.; BÖTZOW, A.G., WETZEL, M. Lightweight aggregate concretes (LAC 2) with open structure and minimized density. **BFT International**, Gutersloh, v. 2, p. 116-119, 2011.

GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. **Reuters Breaking Views – Concrete action**, London, 2021

GOLLA, S.Y.; KUMAR, K.R.; KHAN, M.D.I.; RAHUL, C.; RAJ, K.P. Structural performance of exterior beam-column joint using biochar impregnated pond ash concrete, **Materials Today: Proceedings**, v. 39, p. 467-471, 2021.

GUPTA, S.; DIXIT, A.; KUA, H.; PANG, S.D. Waste valorisation using biochar for cement replacement and internal curing in ultra-high performance concrete. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 238, 2019.

GUPTA, S., KUA, H.W.; Factors determining the potential of biochar as a carbon capturing and sequestering construction material: critical review. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.29, n.9, p.1-14, 2017.

GUPTA, S.; KUA, H. W.; PANG, S. D. Effect of biochar on mechanical and permeability properties of concrete exposed to elevated temperature. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 234, 2020.

GUPTA, S.; KUA, H. W.; KOH, H. J. Application of biochar from food and wood waste as green admixture for cement mortar. **Science of the Total Environment**, v. 619-620, p. 419-435, 2018.

GUPTA, S.; KUA, H.W.; Effect of water entrainment by pre-soaked biochar particles on strength and permeability of cement mortar. **Construction and Building Materials**, Guildford, v.159, p. 107-125, 2018.

GUPTA, S.; KUA, H. W.; KOH, H. J.; Use of biochar as carbon sequestering additive in cement mortar. **Cement and concrete composites**, v. 87, p. 110-129, 2018.

HACHMI, M. H.; MOSLEMI, A. A; CAMPBELL, A. G.; A new technique to classify the compatibility of wood with cement. **Wood Science and Technology**, v. 24, p. 345-354, 1990.

HAMER, U.; MARSCHNER, B.; BRODOWSKI, S.; AMELUNG, W.; Interactive priming of black carbon and glucose mineralization. **Organic Geochemistry**, v. 35, p. 823-830, 2004.

HIJAZIN, G.H.; LOPEZ, M.; Extending internal curing to concrete mixtures with W/C higher than 0.42. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 25, p. 1236-1242, 2011.

HOFSTRAND, A. D.; MOLESMI, A. A.; GARCIA, J. F. Curing characteristics of particles from nine northern Rocky Mountain species mixed with portland cement. **Forest Products Journal**, Madison, v. 34, n. 2, p. 57-61, Feb. 1984.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **Acoustics – In-situ determination of insertion loss of outdoor noise barriers of all types. - ISO 10847**, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO): **Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements- Part 1: Airborne sound insulation - ISO 717-1**, 2013.

JIN, L.B.; TIAN, B.; LIU, Y.; NIU, K.M.; Research on noise reduction performance of porous cement concrete pavement. **Road**, v.7, p. 75-79, 2010.

KHAN, M. A.; KHAN, S.; DING, X.; KHAN, A.; ALAM, M. The effects of biochar and rice husk on adsorption and desorption of cadmium on soils with different water conditions (upland and saturated). **Chemosphere**, v. 193, p. 1120-1126, 2018.

KIGGUNDU, N.; SITTAMUKYOTO, J. Pyrolysis of Coffee Husks for Biochar Production. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 10, p. 1553-1564, 2019.

KIM, H.K.; LEE, H.K.; Influence of cement flow and aggregate type on the mechanical and acoustic characteristics of porous concrete. **Appl. Acoust.**, v.71, p. 607-615, 2010.

KOSAIYAKANON, C.; KUNGSANANT, S. Adsorption of Reactive Dyes from Wastewater Using Cationic Surfactant-modified Coffee Husk Biochar. **Warasan Singwaetlom lae Sappayakon Tammachat**, v.18, p.21-32, 2018.

KUZYAKOV, Y.; SUBBOTINA, I.; CHEN, H.Q.; BOGOLOMOVA, I.; XU, X.. Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by <sup>14</sup>C labeling. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, p. 210-219, 2009.

KWAN, A. K. H.; NG, P. L.; HUEN, K. Y. Effects of fines content on packing density of fine aggregate in concrete. **Construction And Building Materials**, n. 61, p.270-277, 2014.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S.; Biochar for environmental management: an introduction. In: *LEHMANN, J.; JOSEPH, S.* (ed.). **Biochar for environmental management**. London: Routledge, 2015. p. 33-46.

LEHMANN, J.; RILLIG, M.C.; THIES, J.; MASIELLO, C.A.; HOCKADAY, W.C.; CROWLEY, D.; Biochar effects on soil biota—a review. **Soil Biol. Biochem.**, v. 43, p. 1812-1836, 2011.

LIU, G.; CHENG, W.; CHEN, L.; PAN, G.; LIU, Z. Rheological properties of fresh concrete and its application on shotcrete. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 243, n. 4, 2020.

LYRA, J.S.; ROMANO, R.C.O.; PILEGGI, R.G.; GOUVÊA, D. Consolidação de pastas cimentícias contendo policarboxilatos: um estudo calorimétrico e reológico. **Cerâmica**, v. 58; p. 137-143, 2012.

MANGRICH, Antonio S.; MAIA, Claudia M. B. F.; NOVOTNY, Etelvino H.. Biocarvão: as terras pretas de índios e o sequestro de carbono. **Ciência Hoje**, v. 47, n. 281, p.48-52, 2011.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F.; DARWIN, D. **Concrete**. 2. ed. Hoboken: Prentice Hall, 2003.

MO, L.; FANG, J.; HUANG, B.; WANG, A.; DENG, M. Combined effects of biochar and MgO expansive additive on the autogenous shrinkage, internal relative humidity and

compressive strength of cement pastes. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 229, 2019.

MOHR, B. J.; BIERNACKI, J. J.; KURTIS, K. E. Supplementary cementitious materials for mitigating degradation of kraft pulp fiber-cement composites. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 37, n. 11, p. 1531-1543, 2007.

MRAD, R.; CHEHAB, G. Mechanical and microstructure properties of Biochar – Based mortar: an internal curing agent for PCC. **Sustainability**, London, v. 11, n. 9, p. 2491, 2019.

MUTHUKRISHNAN, S.; GUPTA, S.; KUA, H.W.; Application of rice husk biochar and thermally treated low silica rice husk ash to improve physical properties of cement mortar. **Theoretical and Applied Fracture Mechanics**, Amsterdam, v. 104, 2019.

NARCISO, C. R. P.; REIS, A. H. S.; MENDES, J. F.; NOGUEIRA1, N. D.; MENDES, R. F. Potential for the Use of Coconut Husk in the Production of Medium Density Particleboard. **Waste Biomass Valor**, 2020.

NOR, A. M.; YAHYA, Z.; ABDULLAH, M. M. A. B.; RAZAK, R. A.; EKAPUTRI, J. J.; FARIS, M. A.; HAMZAH, H. N. A Review on the Manufacturing of Lightweight Aggregates Using Industrial By-Product. **MATEC Web of Conferences**, Les Ulis, v. 78, 2016.

NGUYEN, B.T.; LEHMANN, J.; Black carbon decomposition under varying water regimes, **Organic Geochemistry**, v. 40, p. 846-853, 2009.

ODIMEGWU, T.C.; ZAKARIA, I.; ABOOD, M.M.; NKETSIAH, C.B.K.; AHMAD, M.; Review on different beneficial ways of applying alum sludge in a sustainable disposal manner. **Civil Engineering Journal**, Tehran, v. 4, p. 2230-2241, 2018.

OKINO, E. Y. A.; SOUZA, M. R. de; SANTANA, M. A. E.; ALVES, M. V. de S.; SOUSA, M. E. de; TEIXEIRA, D. E.; Cement-bonded wood particleboard with a mixture of eucalypt and rubberwood. **Cement & Concrete Composites**, Barking, v. 26, p. 729-734, 2004.

OLIVEIRA, D. R. C.; ROSSI, C. R. C. Concretes with red mud coarse aggregates. **Materials Research**, v.15, 2012.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000. 224 p.

PASTOR-VILLEGAS, J.; PASTOR-VALLE, J. F.; MENESES RODRÍGUEZ, J. M.; GARCÍA, M. Study of commercial wood charcoals for the preparation of carbon Adsorbents. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 76, n. 1-2, p. 103-108, 2006.

PARK, J.; LEE, Y.; RYU, C.; PARK, Y.K. Slow pyrolysis of rice straw: analysis of products properties, carbon and energy yields. **Bioresource Technology**, Essex, v. 155, p. 63-70, 2014

PRANEETH, S.; SAAVEDRA, L.; ZENG, M.; DUBEY, B.K.; SARMAH. A.K.; Biochar admixed lightweight, porous and tougher cement mortars: Mechanical, durability and micro computed tomography analysis. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 750, 2021.

RAJENDRAN, K. LIN, R.; WALL, D.M.; MURPHY, J.D. **Sustainable resource recovery and zero waste approaches**. St. Louis: Elsevier, 2019. 304 p.

RIFAI, M.A. EL-HASSAN, H.; EL-MAADDAWY, T.; ABED, F. Durability of basalt FRP reinforcing bars in alkaline solution and moist concrete environments. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 243, 2020.

ROMANO, R. C. O.; FUJII, A. L.; SOUZA, R. B.; TAKEASHI, M. S.; PILEGGI, R. G.; CINCOTTO, M. A. Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita. **Cerâmica**, v. 62, p. 215-223, 2016.

ROCHA, P.A.S.; SILVA, K.I. da. Study of Beamss Performance on Fire by the Fibers Model, **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, v. 33, p. 65-71, 2017.

RUAN, X.; SUN, Y.; DU, W.; TANG, Y.; LIU, Q.; ZHANG, Z.; DOHERTY, W.; FROST, R.L.; QIAN, G.; TSANG, D.C.W.; Formation, characteristics, and applications of environmentally persistent free radicals in biochars: A review. **Bioresource Technology**, v. 281, p. 457-468, 2019.

SAGMEISTER, B.; Optimization of the mixture of no-fines lightweight concrete. **BFT International**, Gutersloh, v. 11, p. 70-77, 1999.

SANDER, B.; EL-ZEHERY, T. Efeito do "biochar" na mineralização da matéria orgânica do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 5, p. 665-671, 2012.

SIRICO, A.; BERNARDI, P.; BELLETTI, B.; MALCEVSCHI, A.; DALCANALE, E.; DOMENICHELLI, I.; MORETTI, E.; Mechanical characterization of cement-based materials containing biochar from gasification. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 246, 2020.

TEIXEIRA, J.N.; SILVA, D.W.; VILELA, A.P.; JUNIOR, H.S.; BRANDÃO, L.E.V.S.; MENDES, R.F. Lignocellulosic materials for fiber cement production. **Waste and Biomass Valorization**, Heidelberg, v.11, p. 2193–2200, 2020.

THIENEL, K. C. Precast elements of lightweight concrete with a porous matrix 2000. **BFT International**, Gutersloh, v. 1, p. 62-72, 2000.

TRIPATHI, N.; HILLS, C. D.; SINGH, R. S.; ATKINSON, C. J. Biomass waste utilisation in low-carbon products: harnessing a major potential resource. **Nature Partner Journals Climate and Atmospheric Science**, v. 2, n. 35, p. 1-10, 2019.

TOMCZYK, A.; SOKOŁOWSKA, Z.; BOGUTA, B. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 19, p. 191-215, 2020.

VALES, R. C.; LIMA, A. A.; BEZERRA, I. F. O. The use of Coffee Residues in the Cultivation of vegetables. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 6, 2019.

VEIGA, T. R. L. A.; LIMA, J. T.; DESSIMONI, A. L. A.; PEGO, M. F. F.; SOARES, J. R.; TRUGILHO, P. F. Different plant biomass characterizations for biochar production. **Cerne**, Lavras, v. 23, p. 529-536, 2017.

VYAVAHARE, G. D. ; GURAV, R. G.; JADHAV, P. P.; PATIL, R. R.; AWARE, C. B.; JADHAV, J. P. Response surface methodology optimization for sorption of malachite green dye on sugarcane bagasse biochar and evaluating the residual dye for phyto and cytogenotoxicity. **Chemosphere**, Oxford, v.194, p. 306-315, 2018.

XU, J.; ZHANG, X.; SUN, C.; HE, H.; DAI, Y.; YANG, S.; LIN, Y.; ZHAN, X.; LI, Q.; ZHOU, Y. Catalytic Degradation of Diatrizoate by Persulfate Activation with Peanut Shell Biochar-Supported Nano Zero-Valent Iron in Aqueous Solution. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, Basel, v. 15, 2018.

XU, Y.L. Compressive strength and size effect research on pervious concrete. **Jiangxi University of Science and Technology**, Ganzhou, 2019.

WANG, L.; CHEN, L.; TSANG, D. C. W.; GUO, B.; YANG, J.; SHEN, Z.; HOU, D.; OK, Y. S.; POON, C. S. Biochar as green additives in cement-based composites with carbon dioxide curing. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, 2020.

WANG, D.; JIANG, P.; ZHANG, H.; YUAN, W. Biochar production and applications in agro and forestry systems: A review. **Science of the Total Environment**, v. 723, 2020.

WAQAS, M.; NIZAMI, A. S.; ABURIAZAIZA, A. S.; BARAKAT, M. A.; ISMAIL, I. M. I.; RASHID, M. I. Optimization of food waste compost with the use of biochar. **Journal of Environmental Management**, v. 216, p. 70-81, 2018.

YU, X. Y.; YING, G. G.; KOOKANA, R. S. Reduced plant uptake of pesticides with biochar additions to soil. **Chemosphere**, Amsterdam, v. 76, p. 665-671, 2009.

ZHANG, Y.; LIN, F.; WANG, X.; ZOU, J.; LIU S. Annual accounting of net greenhouse gas balance response to biochar addition in a coastal saline bioenergy cropping system in China. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 158, p. 39-48, 2016.

ZHANG, Y.; CUI, Y.; CHEN, P.; LIU, S.; ZHOU, N.; DING, K.; FAN, L.; PENG, P.; MIN, M.; CHENG, Y.; WANG, Y.; WAN, Y.; LIU, Y.; LI, B.; RUAN, R.. Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches, **Elsevier**, c. 14, p. 193-206, 2019.

ZHAO, M.; JIA, Y.; YUAN, L.; QIU, J.; XIE, C. Experimental study on the vegetation characteristics of biochar-modified vegetation concrete. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 206, p. 321-328, 2019.

ZHAO, J. WANG, M.; CHANG, J.M.; YAO, Y.; CUI, Q. Sound insulation property of wood–waste tire rubber composite, **Composites Science and Technology**, v. 70, n. 14, p. 2033-2038, 2010.