



PRISCILA CAROLAINÉ BARROS

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E
MECÂNICA DE BIOCONCRETOS PRODUZIDOS COM A
CASCA DE CAFÉ (*Coffea arabica*)**

**LAVRAS - MG
2021**

PRISCILA CAROLAINÉ BARROS

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE
BIOCONCRETOS PRODUZIDOS COM A CASCA DE CAFÉ (*Coffea arabica*)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de Lavras
como parte das exigências do Curso de
Engenharia Civil, para a obtenção do título de
Bacharel.

Prof. Dr. Saulo Rocha Ferreira
Orientador

**LAVRAS - MG
2021**

PRISCILA CAROLAINÉ BARROS

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE
BIOCONCRETOS PRODUZIDOS COM A CASCA DE CAFÉ (*Coffea arabica*)**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de Lavras
como parte das exigências do Curso de
Engenharia Civil, para a obtenção do título de
Bacharel.

APROVADO em 25 de Novembro de 2021.

Prof. Dr. Saulo Rocha Ferreira, UFLA

Prof. Dr. Keoma Defáveri do Carmo e Silva, UFLA

Dr. M'hamed Yassin Rajiv da Gloria, UFRJ



PROF. DR. SAULO R. FERREIRA
UFLA/OEG
SIAPE: 2331277
55 35 3329-3117

Prof. Dr. Saulo Rocha Ferreira

Orientador

LAVRAS – MG

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por estar comigo em todos os momentos, por me dar força e sempre iluminar meus caminhos e me auxiliar em minhas decisões.

Aos meus pais, Carlos Giovane e Renilda, por todo o apoio, pela confiança e por estarem sempre presente em minha vida. Por fazerem parte de todas as minhas batalhas e não medirem esforços em me apoiar para que eu consiga vencê-las.

Aos meus amigos, Fabiana e Tauan, pela amizade, conversas, companheirismo e por sempre me ouvirem e apoiarem durante a graduação.

Ao professor Saulo Rocha Ferreira pela atenção durante o período de Atividade Vivencial Voluntária e pela orientação em todas as etapas deste trabalho.

Ao M'hamed Yassin, por todo auxílio durante o desenvolvimento desta pesquisa, sua ajuda foi de grande importância para a conclusão deste trabalho.

A todos os professores do Departamento de Engenharia que tive contato durante a graduação por todo incentivo e pela dedicação para tornar o curso de Engenharia Civil o melhor possível.

“Se você fizer do Altíssimo o seu abrigo, do Senhor o seu refúgio, nenhum mal o atingirá. ”

(Salmo 91)

RESUMO GERAL

A construção civil demanda a produção de grandes quantidades de materiais de construção. Sendo necessário, a extração de matérias-primas obtidas em grande parte de recursos naturais, causando assim, fortes impactos ambientais desde sua extração até a geração de resíduos em cada etapa do processo de produção e do final de sua vida útil na construção civil. Nesse cenário, é necessário obter novas soluções que diminuam os impactos ambientais, como por exemplo a utilização de resíduos da agroindústria e florestais. O café *Coffea arabica*, possui grande produção em diferentes estados brasileiros, o que gera uma quantidade considerável de resíduos que podem causar problemas ambientais se não descartados de maneira correta. Assim, uma boa possibilidade para aproveitar a casca de café, é a sua utilização para desenvolvimento de novos materiais para a indústria da construção civil. Esta pesquisa tem como objetivo a caracterização química e física da casca de café *Coffea arabica* bem como o desenvolvimento de bioconcreto produzido com a mesma e a caracterização física, mecânica e de condutividade térmica dos compósitos. O bioagregado passou por um tratamento preliminar para garantir a hidratação do cimento em água quente a 80 °C e por uma segunda lavagem em hidróxido de cálcio, e por análise de Espectroscopia Infravermelha com Transformada de Fourier (FTIR). A casca de café também passou por caracterização quanto à sua propriedade química e densidade básica. O bioconcreto foi produzido com 45% de casca de café em volume e sua matriz constituída por cimento Portland CPV de alta resistência inicial, metacaulinita e cinza volante. Foram executados ensaios de *flow table test* e de compressão uniaxial para 7 e 28 dias de idade dos corpos de prova. Para resistência à compressão uniaxial em 7 e 28 dias, os valores de 1,23 MPa e 1,16 MPa, respectivamente. O bioconcreto pode ser classificado como leve e possui boas características de trabalhabilidade e baixa condutividade térmica, apresentando considerável potencial para aplicações na indústria da construção.

Palavras-chave: Resíduo de casca de café. Bioconcreto. Microestrutura. Compressão.

ABSTRACT

Civil construction demands the production of large quantities of construction materials. It is necessary to extract raw materials obtained in large part from natural resources, thus causing strong environmental impacts from their extraction to the generation of waste at each stage of the production process and at the end of their useful life in civil construction. In this scenario, it is necessary to obtain new solutions that reduce environmental impacts, such as the use of agro-industry and forestry residues. Coffee *Coffea arabica* has large production in different Brazilian states, which generates a considerable amount of waste that can cause environmental problems if not disposed of correctly. Thus, a good possibility to use the coffee husk is its use for the development of new materials for the construction industry. This research aims at the chemical and physical characterization of coffee husk *Coffea Arabica* as well as the development of bioconcrete produced with it and the physical, mechanical and thermal conductivity characterization of the composites. The bioaggregate underwent a preliminary treatment to ensure the hydration of the cement in hot water at 80 °C and a second wash in calcium hydroxide, and by Infrared spectroscopy with Fourier transform (FTIR) analysis. The coffee husk also underwent characterization as to its chemical property and basic density. The bioconcrete was produced with 45% of coffee husk in volume and its matrix constituted by Portland CPV cement of high initial resistance, metakaolin and fly ash. Uniaxial for 7 and 28 days of age of the specimens. For uniaxial compressive strength at 7 and 28 days, the values of 1.23 MPa and 1.16 MPa, respectively. Bioconcrete can be classified as light and has good characteristics of workability and low thermal conductivity, presenting considerable potential for applications in the construction industry.

Keywords: Coffee husk residue. Bioconcrete. Microstructure. Compression.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE-INTRODUÇÃO GERAL.....	9
1 INTRODUÇÃO	9
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
2.1 O café <i>Coffea arabica</i>	10
2.2 Efeitos da produção de cimento e seu alto consumo	13
2.3 Bioconcretos de biomassa vegetal e cimento.....	14
2.3.1 Compatibilidade química entre o cimento e a biomassa	15
2.3.2 Substituição parcial do cimento por combinação de cinza volante e metacaulinita	16
2.3.3 Água de compensação.....	18
2.3.4 Dosagem do bioconcreto.....	19
2.5 Desempenho térmico de bioconcretos	20
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	20
REFERÊNCIAS.....	22
SEGUNDA PARTE – ARTIGO - DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE BIOCONCRETOS PRODUZIDOS COM CASCA DE CAFÉ <i>Coffea arabica</i>	25
1 25 INTRODUÇÃO	27
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
2.1 Materiais	28
2.2 Metodologia	29
2.2.1 Processamento da casca de café <i>Coffea arabica</i>	29
2.2.2 Caracterização físico-química da casca de café <i>Coffea arabica</i>.....	29
2.2.3 Tratamento do Bioagregado	30
2.2.4 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier – Reflectância total atenuada (FTIR- ATR).....	30
2.2.5 Produção do bioconcreto.....	31
2.2.6 Caracterização físico-mecânica dos bioconcretos.....	33
2.2.7 Ensaio de Condutividade térmica	33
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
3.1 Propriedades físico-químicas da casca de café <i>Coffea arabica</i>	34
3.2 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) da casca de café	36
3.3 Consistência e espalhamento.....	38
3.4 Propriedades físico-mecânica dos bioconcretos	39

3.4.1 Densidade aparente	39
3.4.2 Resistência à compressão uniaxial	40
3.5 Condutividade térmica	42
4 CONCLUSÃO	43
AGRADECIMENTOS.....	44
REFERÊNCIAS	45

PRIMEIRA PARTE

INTRODUÇÃO GERAL

1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento da população mundial, está inteiramente ligado à grande produção de materiais de construção. Para a produção de materiais, é necessário a extração de matérias-primas, as quais, em quase toda sua totalidade são adquiridas através de recursos naturais. É importante considerar também os resíduos que são gerados no processo produtivo e na sua aplicação na construção. Os impactos ambientais são somados ao longo da cadeia produtiva da construção civil, durante o transporte, armazenamento, construção até o final de sua vida útil, provocando danos irreversíveis. Assim, é fundamental o estudo de novas fontes renováveis de materiais para a construção civil (ISAIA, 2017).

Dessa forma, os materiais compósitos a base de cimento são possíveis soluções para o setor de construção. Materiais que fazem substituições parciais da matriz de cimento por materiais suplementares e que utilizam como agregados matérias-primas não convencionais como os resíduos da agroindústria e florestais, e os de construção e demolição. Sendo assim, possibilita o uso adequado desses resíduos e um desenvolvimento sustentável a indústria da construção civil (SANTOS, 2020; ANDREOLA, 2017).

Esses materiais têm por vantagem a diminuição de impactos ambientais, provocados pela sua destinação incorreta no meio ambiente, bem como, baixo custo por serem de fácil acesso de obtenção e é uma fonte renovável de recursos. Os materiais lignocelulósicos além de propiciar o desenvolvimento sustentável à indústria da construção, ainda propicia uma melhor disposição para os resíduos que na maioria das vezes são descartados de modo inadequado, causando danos graves ao meio ambiente (DA GLORIA, 2020; FERREIRA, 2012).

O Brasil como o maior produtor de café mundial, também gera uma grande quantidade de resíduos no beneficiamento do fruto. A casca de café é um resíduo obtido através do processamento via seca do fruto e que existe em grande volume no Brasil. Existe poucos estudos de aproveitamento desse material, principalmente devido à grande quantidade de nutrientes presentes nas partículas da matéria-prima, o que torna o estudo desse material para uso na indústria de construção civil uma boa alternativa (VEGRO, 1994; BORÉM, 2011).

Portanto, esse Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo geral a produção de bioconcretos leves com incorporação de casca de café *Coffea arabica* como agregado, através da caracterização da casca de café *Coffea arabica* em suas propriedades físicas e químicas, bem como, avaliação do desempenho físico e mecânico dos bioconcretos utilizando casca de café.

Este trabalho teve por finalidade promover base científica às pesquisas futuras abrangendo esse resíduo agroindustrial, colaborando cientificamente com o desenvolvimento sustentável e valorizar o uso do material lignocelulósico como material alternativo.

O presente trabalho será exposto como artigo, sendo dividido em duas partes.

A primeira parte, denominada de Introdução Geral, é composta por:

- i. Uma introdução que determina o assunto e os objetivos a serem estudados e descreve a organização e apresentação do trabalho.
- ii. Um Referencial Teórico com as informações teóricas necessárias para o devido entendimento do trabalho.
- iii. Considerações finais com a perspectiva da autora em relação a contribuição do trabalho para seu conhecimento acadêmico e sua da análise dos resultados obtidos.

A segunda parte é composta por um artigo escrito de acordo com a norma de publicação periódica científica, e expõe de maneira detalhada o desenvolvimento, produção e caracterização do bioconcreto produzido com casca de café, bem como a caracterização do bioagregado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

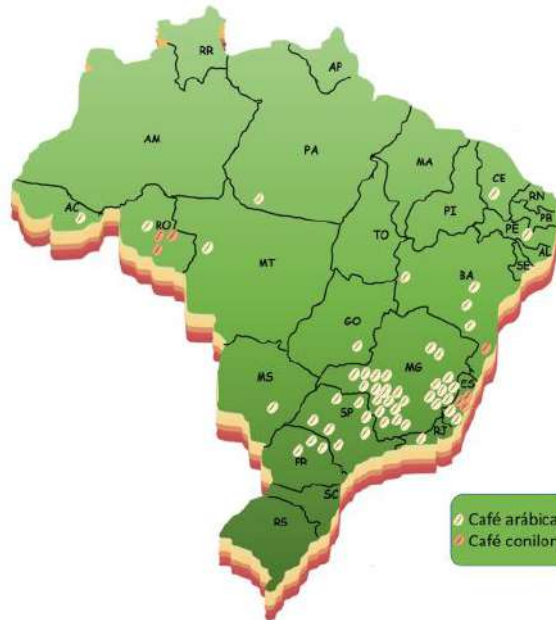
2.1 O café *Coffea arabica*

O gênero *Coffea* possui três espécies utilizadas na produção do café para consumo, o café arábica *Coffea arabica*, o café robusta *Coffea canephora* e o café liberiano *Coffea liberica*. Sendo o café arábica o mais importante das espécies comerciais. *Coffea* faz parte da subfamília Ixoroideae da tribo Coffeae DC (DAVIS, 2006).

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2019) o Brasil é o principal produtor e maior exportador mundial de café. O grão constitui um importante produto do agronegócio, tendo uma significativa influência econômica e social no país, sendo um grande gerador de empregos do setor agropecuário brasileiro. Os principais estados brasileiros produtores de café arábica são Minas Gerais, São Paulo e Paraná, os estados do Espírito Santo,

Bahia e Rondônia produzem em grande parte o café conilon (RURAL PECUÁRIA, 2016). A Figura 1 apresenta a distribuição da produção do café no Brasil.

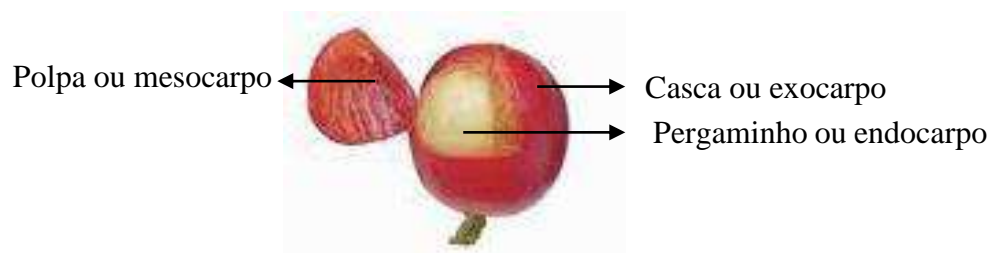
Figura 1 – Distribuição de produção do café no Brasil.



Fonte: Adaptado de Durán et al. (2016).

De acordo com Borém (2008), o café possui um fruto carnoso, com pericarpo dividido em exocarpo conhecido como casca a parte mais externa do fruto, mesocarpo dito como mucilagem, e o endocarpo ou o chamado pergaminho, como pode ser observado na Figura 2. No processo de despulpa do café, são retiradas a casca e a mucilagem, denominado de polpa. Em relação à matéria seca do fruto tem-se cerca de 29% de casca, entre 22 a 31% de mucilagem e 12% de pergaminho.

Figura 2 – Esquema da estrutura do fruto do cafeeiro (*Coffea arabica*).



Fonte: Adaptado de Mesquita et al. (2016).

O processo de beneficiamento do grão do café é feito por meio de processamento via úmida ou por processamento via seca. O processo por via úmida faz a separação dos grãos de acordo com o grau de maturação, e depois é feita a despolpa do grão maduro, gerando resíduos sólidos e líquidos. Já o processo via seca, os frutos são secos de forma íntegra e depois passa por descascamento, gerando resíduos sólidos (DURÁN et al. 2016). Segundo Borém (2008), os resíduos líquidos possuem grande quantidade de material orgânico, com elevada concentração de sólidos totais e alta concentração de nitrogênio e potássio. Os resíduos sólidos, podem chegar a mais de 50% da massa do fruto seco, composto pela casca, mucilagem e pergaminho. Esse resíduo também é rico em potássio e outros nutrientes.

Para cada processamento os resíduos apresentam diferentes composições químicas. A polpa do café gerada em processamento via úmida possui em sua constituição química cerca de 1,5% de cafeína, 2,4% de ácidos clorogênicos e 3% de taninos. A casca do café gerada pelo processamento via seca apresenta, cerca de 43% de celulose, 7% de hemicelulose, 5% de taninos, 2,5% de ácidos clorogênicos, 1% de cafeína, entre 7 a 9,2% de proteína e 5,4% de minerais, entre outros. A mucilagem encontrada no grão seco, possui em sua maior parte água cerca de 84,2%, proteína 8,9%, açúcar 4,2%, peptídeos 0,9% e cinzas 0,7%. O pergaminho encontrado nos processos via seca e úmida é composto por principalmente celulose de 40 a 49%, hemicelulose entre 25 e 32%, lignina de 33 a 35% e minerais de 0,5 a 1%. E por fim, a película prateada liberada na torra do café, possui em sua maioria 24% de celulose e 17% de hemicelulose (DURÁN et al., 2016).

Os resíduos produzidos no beneficiamento do café, são destinados geralmente ao aproveitamento agrícola *in natura* como adubo orgânico, inclusive para própria lavoura de café, por possuir boas características para correção de solo e fertilizante, tanto para cobertura ou na própria cova para plantio. A casca possui vários nutrientes com potencial para fertilizante, em cada quilo de matéria seca pode ser encontrada, cerca de 47 g de potássio, 2 g de fósforo e 19 g de nitrogênio (MATOS, 2008).

Já existem estudos com aplicações alternativas para este resíduo. Costa, Torres e Leal (2019) estudaram a eficiência energética da casca de café como fonte de energia para secadores. Os pesquisadores concluíram que a casca de café dentre os combustíveis analisados apresentou qualitativamente a melhor eficiência energética, assim como um alto poder calorífico, possui maior quantidade disponível e é uma fonte renovável de energia, exibindo uma maior viabilidade de uso. Cavalcanti e Fernandes (2015), utilizaram os resíduos sólidos de café como agregado para briquetes e compósitos de madeira. Os autores propuseram métodos de execução

para produzir os briquetes e os compósitos de madeira, bem como, analisaram que a casca é um recurso energético a ser explorado e protegido que possui diferentes características, muitas delas similares à madeira natural ou carvão, apresentando potencial para produzir produtos que precisam de certa resistência e leveza, como também que sejam duráveis.

2.2 Efeitos da produção de cimento e seu alto consumo

A indústria cimenteira segundo a World Business Council for Sustainable Development (WBCSD, 2018), é a terceira maior consumidora de energia industrial do mundo, utilizando cerca de 7% de energia e a segunda maior emissora de CO₂, com cerca de 7% das emissões globais. Estima-se que com o crescimento da população mundial a produção de cimento deve aumentar entre 12 a 23% até 2050, levando ao aumento de 4% das emissões diretas de carbono mundial, somente pela indústria do cimento.

O cimento é extraído pela mineração da rocha calcária, depois da extração do calcário e argila, as matérias-primas são moídas e misturadas até obter um pó fino. A mistura então é levada para fornos, onde é calcinada em temperaturas entre 1200 a 1500 °C, em meio a esse processo, acontece fusão parcial do material e ocorre a formação dos grãos de clínquer, onde são resfriados e depois misturados a outros aditivos e moídos, sendo produzido o cimento (ACHTERNBOSH et al., 2003).

A produção do cimento acarreta danos ambientais em praticamente todas as fases do seu processamento, desde a extração da matéria-prima até o processamento final do produto, mesmo o setor aplicando novas tecnologias e utilizando equipamentos novos para melhorar a eficiência e diminuir os impactos ao meio ambiente, tem-se ainda levantamentos de indústrias que geram danos significativos em algumas regiões (MAURY; BLUMENSCHHEIN, 2012).

Segundo Mehta (2014) citado por Da Glória (2020) para cada tonelada de cimento produzida é liberado na atmosfera cerca de uma tonelada de CO₂. Mesmo na produção de compósitos com materiais alternativos, é utilizado uma grande quantidade de cimento em suas matrizes, sendo necessário a busca por alternativas para diminuir o consumo de cimento.

Os bioconcretos são estudados para desenvolvimento de materiais renováveis para a construção, mas mesmo esses produtos ainda apresentam um alto teor de consumo de cimento. Existem estudos na literatura que utilizam substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos para aplicação em bioconcretos. Da Gloria (2020) realizou substituição parcial do cimento por combinação de metacaulinita e cinza volante na produção de bioconcretos com

serragem de madeira como agregado, conseguindo resultados satisfatórios de trabalhabilidade e resistência mecânica para os bioconcretos. Caldas et al. (2019) avaliaram a pegada de carbono no ciclo de vida de bioconcretos utilizando partículas de bambu com matriz de cimento e matriz com substituição do cimento por matacaulinita e cinza volante. Os autores obtiveram resultados satisfatórios em relação à diminuição do impacto ambiental dos bioconcretos, principalmente os relacionados a mudanças climáticas.

2.3 Bioconcretos de biomassa vegetal e cimento

Os bioconcretos possuem geralmente matriz com cimento Portland ou cal aérea ou hidratada, em conjunto na maior parte com materiais pozzolânicos, como cinza volante, escória de alto forno e matacaulinita (AMZIANE; SONEBI, 2016). São constituídos geralmente com matriz de cimento e partículas de biomassa vegetal, como a madeira, o sisal e o bambu ou resíduos da agroindústria como a casca de arroz e a casca de coco (FAN et al., 2012; FERREIRA, 2016; ANDREOLA, 2017; SANTOS, 2020; MACEDO, 2010).

O bioconcreto de madeira tem sido empregado como material construtivo no formato de painéis desde os anos 70, quando surgiu na Europa. Esse material é feito geralmente com fibras de madeira, cimento e água, utilizando aditivos para acelerar a hidratação do cimento (MARTEINSSON; GUDMUNDSSON, 2018). Os aceleradores têm a função de eliminar os efeitos das substâncias solúveis em água presentes na madeira que prejudicam o endurecimento, bem como, de diminuir o tempo de cura (ZHENG TIAN; MOSLEMI, 1985).

Os bioconcretos são compósitos que apresentam em sua maioria baixa densidade, portanto são considerados materiais leves, com boa condutividade térmica, resistência mecânica satisfatórias, não produzem ignição ao fogo, e possuem resistência à umidade (DA GLORIA, 2015; AGUIAR, 2020). Segundo Latorraca (2000) que utilizou partículas de madeira na produção de painéis de compósitos, a granulometria das partículas possui efeitos significativos na resistência à compressão axial, no tempo de hidratação e em relação ao índice de inibição ao fogo, os finos produzem índices mais elevados.

Para a produção de bioconcretos existem diversas dificuldades que são prejudiciais nos desempenhos desses compósitos em maior escala. Dentre as dificuldades, está a incompatibilidade química do cimento com a biomassa, o longo tempo de pega e a degradação das fibras do bioagregado em ambiente alcalino (FERREIRA, 2012).

Os bioconcretos podem ser aplicados como material para isolamento térmico e acústico, em telhados, estruturas pré-fabricadas, formas permanentes, na construção de casas de baixo custo, pavimentação e isolamento estrutural em construções com painéis em métodos modernos de construção (FAN et al., 2012).

2.3.1 Compatibilidade química entre o cimento e a biomassa

De acordo com Beraldo (1997), os compósitos são dependentes das características da biomassa, é muito difícil se obter produtos com qualidade quando a mistura é feita com partículas em seu estado natural. Isso acontece devido a reações químicas complexas que ocorrem entre os constituintes da mistura, dando origem ao fenômeno da incompatibilidade química entre o cimento e a biomassa.

Na literatura encontramos estudos que ligam o problema de incompatibilidade ao teor de extrativos presentes na biomassa. Fan et al. (2012) estudaram a compatibilidade de partículas de madeira tropical com matriz de cimento Portland na produção de compósitos, e observou que na medida que aumenta o teor de partículas de madeira a compatibilidade dos compósitos diminui, bem como, a compatibilidade da biomassa com o cimento está diretamente relacionada aos componentes químicos presente na biomassa.

Hachmi e Campbell (1989) citado por Latorraca (2000) estudaram a compatibilidade entre cimento e madeira, indicaram como retardadores da velocidade da reação de hidratação do cimento, os açúcares simples, que fixam na superfície da madeira durante a secagem, e provocam a interação de inibição entre o cimento e a biomassa. E também, podem causar reduções da resistência dos painéis, extrativos não polares, como os terpenos, resinas e gorduras. Os autores ligam a propriedade alcalina do cimento à conversão parcial da hemicelulose na interface cimento-madeira, causando o retardo da velocidade de hidratação do cimento.

Existem estudos que tratam de modos inibidores para redução de extrativos na biomassa, para diminuir a influência causada para a hidratação do cimento. Da Gloria (2015) desenvolveu bioconcretos com serragem de madeira, utilizando cinco lavagens em água quente a 80 °C por 1 hora, para retirada de extrativos da serragem e melhorar a compatibilidade química entre o cimento e a madeira. Após a desmoldagem, observou que todos os compósitos apresentaram boa coesão, todos estavam em estado endurecido, mesmo os que possuíam menor teor de cimento, e confirmando a eficácia do tratamento.

Beraldo (1997) na produção de compósitos com bambu, estudou diferentes tipos de tratamento, tanto físicos comparando a partícula natural com a tratada por meio de lavagem a 80 °C por 2 horas, quanto químicos na utilização de 3% cloreto de cálcio em relação à massa de cimento. Na mineralização fez a imersão das partículas em solução aquosa com 5% de silicato de sódio, e depois uma imersão em solução saturada com 30% de sulfato de alumínio. O autor concluiu que a utilização das partículas lavadas foi mais eficiente do que as de partículas naturais, independente do cimento usado e do tratamento químico empregado, ou seja, a utilização do tratamento das partículas é essencial para a eliminação parcial de substâncias que atrapalham a pega do cimento.

Da Gloria (2020) estudou diferentes tipos de tratamentos para a serragem de madeira utilizada para a produção dos bioconcretos, sendo, uma lavagem em água a 80 °C, uma imersão alcalina em temperatura ambiente por 1 hora, e uma imersão alcalina em temperatura ambiente por 2 horas. A solução alcalina foi produzida com uma razão CH/H₂O 1,85 de g/l. Para realizar os tratamentos foi utilizada a relação massa água/serragem de 10. Segundo o estudo feito, após 7 dias de cura os bioconcretos foram levados a ensaio de compressão. Os compósitos produzidos com 1 hora de imersão alcalina tiveram resultados inferior em relação aos com lavagem em água quente, e a imersão alcalina de 2 horas proporcionou o melhor resultado. Assim, o autor definiu que esse resultado ocorreu, devido ao fato de 2 horas de imersão alcalina ter sido suficiente para retirada de maior teor de extrativos e para dissolver os produtos da hemicelulose.

A adição de biomassa na produção de compósitos de cimento para torna-los mais leves ocasiona reações complexas na mistura, tanto pela porosidade específica do biogregado quanto pela porosidade apresentada pela matriz cimentícia ou das interações entre matriz-madeira (BENDERINA et al., 2007).

2.3.2 Substituição parcial do cimento por combinação de cinza volante e metacaulinita

Na literatura encontramos estudos que utilizam diferentes traços de matriz cimentícia com combinações de metacaulinita e cinza volante na produção de bioconcretos. Da Gloria (2020) produziu bioconcretos com substituições do cimento por combinações de diferentes quantidades de metacaulinita e cinza volante. Assim, como Ferreira (2016) e Toledo Filho et al. (2009) desenvolveram dosagens de bioconcretos visando a melhoraria da durabilidade da fibra de sisal, como também produzir uma matriz livre de hidróxido de cálcio, e melhorar a

trabalhabilidade característica, com o uso conjunto de materiais pozolânicos na produção dos compósitos. Da Gloria (2020), utilizou para o bioconcreto de referência 50% de serragem e fator água/materiais cimentícios de 0,35, foram utilizados 30% de metacaulinita e 40% de cinza volante na matriz com substituição do cimento por materiais pozolânicos. Foram testados diferentes fatores de água/materiais cimentícios, os quais são, 0,35 – 0,40 – 0,45, e também 3 teores volumétricos de serragem 40%, 45% e 50%. Os bioconcretos obtidos foram classificados leves sendo o de menor densidade o bioconcreto com maior teor de serragem e o de maior densidade o de menor teor de serragem. Em relação a resistência à compressão dos bioconcretos, os que utilizaram menor relação a/mc e serragem obtiveram maior resistência à compressão. Os bioconcretos com matriz pozolânica apresentaram maior sensibilidade à variação de água de hidratação do que os bioconcretos contendo apenas cimento como ligante.

Caldas et al. (2019) produziram bioconcretos de madeira com referência de 100% de cimento com 45 % de biomassa para estudo do desempenho do ciclo de carbono desses compósitos. Também foram produzidos compósitos com substituição de 60% em massa de cimento por 30% de metacaulinita e 45% de serragem em volume. E também, com substituição de 70% em massa de cimento por 30% de metacaulinita e 40% de cinza volante e 45% de serragem em volume. Em relação ao desempenho de carbono desses bioconcretos, foi possível observar que os compósitos com maior teor de cinza volante apresentaram melhor performance quando comparado ao com 100% em massa de cimento.

Santos (2020) produziu bioconcretos com fração volumétrica de 45% de casca de arroz, com substituição parcial da matriz de cimento por 30% de metacaulinita e 10% cinza volante, e relações de a/mc de 0,63 – 0,69 – 0,76. Os bioconcretos com substituição parcial do cimento por pozolanas obtiveram menor espalhamento quando comparados aos bioconcretos produzidos com cimento, mas não interferiu na dispersão das misturas. Em relação ao desempenho mecânico tiveram um aumento significativo no ganho de resistência à compressão quando comparado com às misturas sem pozolanas.

Silva (2019) também estudou a performance da utilização de matriz de cimento com combinação de metacaulinita e cinza volante na produção de bioconcretos com partículas de bambu, sendo feita substituições de 25%, 35% e 45% de bioagregado em relação ao volume da mistura. Com substituição parcial da matriz cimentícia por 30% de metacaulinita e 10% de cinza volante, relação a/c de 0,40 fixada e 3% de cloreto de cálcio em relação aos materiais cimentícios. Os bioconcretos estudados apresentaram para resistência a compressão, em 7 dias valores entre 9,73 a 20,03 MPa e em 28 dias valores de 12,30 a 21,05 MPa. Os resultados

encontrados nesse estudo mostraram que o uso de cloreto de cálcio e dos materiais pozolânicos contribuíram para maior desempenho na resistência à compressão dos compósitos.

2.3.3 Água de compensação

Andreola (2017) explica que para a produção de bioconcretos é essencial a utilização de métodos racionais para compensação de água da mistura, devido ao fato das biomassas apresentarem alta porosidade e ter facilidade de absorver água. O teor de água de compensação escolhido, baseou-se no melhor método para eliminar a segregação e exsudação, sendo então utilizada o teor equivalente a saturação das partículas. Santos (2020) utiliza o conceito que, na produção de compósitos de cimento e biomassa é necessário o uso da quantidade adequada de água nas misturas para manter a saturação do bioagregado, permitir a hidratação do cimento e garantir a consistência da mistura.

É encontrado em alguns estudos o uso de adição de água de compensação na produção de compósitos com biomassas tanto de origem florestal quanto as de origem de resíduos agroindustriais. De acordo com Neville (1997) citado por Latorraca (2000) é importante para que se tenha a completa hidratação do cimento, e que sejam produzidas com relação água/cimento igual a 0,5 em massa. Em casos que as misturas dos compósitos sejam mantidas em ambientes adequados, podem produzidas com relação água/cimento maior que 0,38 em relação a massa, se a mistura apresentar água disponível em seu exterior. Todo o cimento irá de hidratar, porém apresentará poros capilares. Segundo Latorraca (2000) uma relação de água/cimento 0,4 em massa, apresenta bons resultados. E é necessário a adição de água até o ponto de saturação da matéria-prima, levando em consideração o teor de umidade da biomassa.

Da Gloria (2020) em seu estudo define que a água de hidratação é água necessária para hidratar o cimento e garantir uma boa trabalhabilidade à mistura, já a água de compensação é a quantidade de água capaz de saturar a biomassa. O método de cálculo proposto pelo autor, está disposto na Equação 1.

$$A_{comp} = \frac{m_b - m}{m} \times 100 \quad \text{Equação 1.}$$

Onde:

- A_{comp} : água de compensação da biomassa (%);
- m_b : massa da biomassa úmida (g);

- m: massa da biomassa seca (g).

2.3.4 Dosagem do bioconcreto

Ferreira (2012) visando uma dosagem para matriz que fosse livre de hidróxido de cálcio, e que apresentasse bom comportamento reológico e mecânico, através do estudo do consumo de hidróxido de cálcio por meio de ensaios termogravimétricos obteve a composição de materiais cimentícios. Estabelecendo assim, o consumo de materiais cimentícios e o traço de referência. Aguiar (2020), assim como Andreola et al. (2019) utilizou traços com matrizes com cimento e materiais suplementares com o objetivo de reduzir o consumo de cimento e melhorar a resistência mecânica dos bioconcretos. Em ambos os estudos a diminuição do consumo de cimento foi feita combinando a substituição parcial da matriz cimentícia por materiais pozolânicos.

Da Gloria (2020) determinou que a dosagem dos bioconcretos é a definição das propriedades dos seus componentes, sendo eles, os bioagregados, a água, os ligantes e alguns aditivos em casos que sejam necessários, tendo como objetivo alcançar os requisitos adequados de trabalhabilidade e aplicabilidade para os bioconcretos. Em estado fresco é esperado que o bioconcreto apresente a trabalhabilidade necessária para o transporte, lançamento e adensamento sem que ocorra segregação. E em estado endurecido o bioconcreto deve apresentar resistência mecânica e durabilidade. O autor desenvolveu a Equação 2, para calcular a relação entre consumo de cimento, água e materiais cimentícios.

$$C = V \times \frac{1 - V_f}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{a/mc}{\rho_a \times \%c} + \frac{\%mk}{\rho_{mk} \times \%c} + \frac{\%cv}{\rho_{cv} \times \%c}} \quad \text{Equação 2.}$$

Onde:

- C: consumo de cimento;
- V: volume da mistura;
- V_f : Fração volumétrica de biomassa;
- a/mc: fator água/materiais cimentício;
- ρ_c : massa específica do cimento;
- ρ_a : massa específica da água;
- ρ_{mk} : massa específica da metacaulinita;
- ρ_{cv} : massa específica da cinza volante;

- %c: teor de cimento na matriz cimentícia;
- %mk: teor de matacaulinita na matriz cimentícia;
- %cv: teor de cinza volante na matriz cimentícia.

2.5 Desempenho térmico de bioconcretos

O uso de materiais compósitos é uma boa possibilidade na produção de produtos que necessitem de um bom desempenho térmico e acústico, considerando que sua melhor característica é melhorar as propriedades finais do material. Esses materiais além de utilizar em sua maioria resíduos florestais como serragem de madeira ou resíduos gerados na agricultura, o que torna a matéria-prima de fácil acesso e uma adequada solução de uso para esses resíduos, também possibilita a melhoria do desempenho como material isolante térmico e acústico (PACHLA, 2019; AGUIAR, 2020).

Krüger et al. (2009) estudaram o desempenho térmico de painéis de madeira-cimento através do fluxo de calor da temperatura interna com medições em células de teste, usando 36% de serragem na produção dos compósitos. O autor obteve uma condutividade térmica de 0,29 W/ mK, para o painel com 17 mm de espessura, valor maior do que o desempenho térmico para placas de cimento-madeira, de acordo com a norma NBR 15220-2 (ABNT, 2008). Foi possível observar no estudo que uma maior densidade do material, resultaria em uma maior condutividade térmica. Pode-se dizer que a utilização de painel duplo pode alcançar um desempenho térmico comparável a materiais convencionais utilizados em construções populares como o uso de paredes de tijolos com reboco em ambas as faces.

Aguiar (2020) e Da Gloria (2015) estudaram o desempenho térmico de bioconcretos com serragem de madeira com diferentes teores de biomassa. Aguiar (2020) utilizou amostras com teores de biomassa de 40%, 50% e 60% e obteve valores de condutividade térmica 0,47 - 0,36 - 0,29 W/mK. Da Gloria (2015) utilizou relações de cimento/serragem em massa de 0,5 - 1 - 2 - 2,25 - 2,5 - 3, e alcançou resultados de condutividade térmica entre 0,06 a 0,535 W/mK. Ambos os autores observaram que com a diminuição da densidade da mistura como consequência do aumento de biomassa adicionada, ocasiona a diminuição da condutividade térmica do material, ou seja, a melhoria do desempenho térmico desses materiais.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa corrobora que a casca de café *Coffea arabica* apresenta características satisfatórias para aplicação em novos produtos para indústria da construção civil, apresenta baixa densidade, podendo ser comparada a algumas madeiras, característica importante para produzir materiais com baixa densidade, e possui alto teor de lignina. Também é um material de fácil obtenção no Brasil e com baixo valor agregado por se tratar de um resíduo da agricultura e também se trata de uma matéria prima renovável.

Portanto, a sua utilização na produção de bioconcretos mostra a possibilidade de aproveitar esse resíduo como matéria prima no desenvolvimento de novos produtos e fornece base para futuras pesquisas sobre a casca de café *Coffea arabica*.

Este trabalho possibilitou o desenvolvimento pleno da estudante em sua formação, tornando possível a aplicação e entendimento de conteúdos estudados em disciplinas cursadas, além de fornecer contato com experiências práticas e conceitos que não foram vistos na graduação.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A.L.D. **Estabilidade térmica e reação ao fogo do bio-concreto de madeira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p.115. 2020.
- ACHTERNBOSCH, M. et al. **Heavy metals in cement and concrete resulting from the co-incineration of wastes in cement kilns with regard to the legitimacy of waste utilization**. Umweltbundesamt, Berlin, p. 199, 2003.
- ANDREOLA, V. M. **Caracterização física, mecânica e ambiental de bio-concretos de bambu**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 118. 2017.
- ANDREOLA, V. M. et al. **Partial replacement of cement by combination of fly ash and metakaolin in bamboo bio-concretes**. 3rd International Conference on Bio-Based Building Materials, 2^a edição, v. 37, p. 102-106, 2019.
- AMZIANE, S.; SONEBI, M. **Overview on bio-based building material made with plant aggregate**. RILEM Technical Letters, v. 1, p. 31-38, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro, p. 34. 2008.
- BERALDO, A. L. **Bambu-cimento: Alternativa para construções rurais**. I Encontro nacional sobre edificações e comunidades sustentáveis, Canela, p. 145-150, 1997.
- BORÉM, F. M. **Pós – Colheita do Café**. 1^a edição. Lavras: UFLA, 2008.
- CALDAS, L. et al. **Dynamic life cycle carbon assessment of three bamboo bio-concretes in Brazil**. 3rd International Conference on Bio-Based Building Materials, 2019.
- CAVALCANTI, W. M.; FERNANDES, M. A. **Técnicas de uso dos resíduos sólidos de Café como agregado para briquetes/péletes e compósitos de madeira**. Convibra, 2015.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Levantamento indica produção de 50,9 milhões de sacas de café em 2019**. Conab, 2019. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/2894-levantamento-indica-producao-de-50-92-milhoes-de-sacas-de-cafe-em-2019>>. Acesso em: 01 nov. 2021.
- COSTA, R. A. B.; TORRES, C. S.; LEAL, K. N. S. **Estudo da geração de energia utilizando biomassa da casca de café**. Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências, 2019.
- DA GLORIA, M.Y.R. **Desenvolvimento e caracterização de painéis sanduíches de concreto com núcleo leve e faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal**. Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p.133. 2015.

DA GLÓRIA, M.Y.R. **Comportamento experimental e numérico de bioconcretos de madeira e de painéis sanduíches com faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 182, 2020.

DAVIS, A. P. et al. **An annotated taxonomic conspectus of the genus *Coffea* (Rubiaceae)**. Botanical Journal of the Linnean Society, v. 152, p. 465-512, 2006.

DURÁN, C. A. A. et al. **Café: Aspectos Gerais e seu Aproveitamento para além da Bebida**. Revista Virtual de Química, v. 9, n. 1, 2016. Disponível em: <<http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/ClaudiaNoPrelo.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2021.

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

FERREIRA, S. R. **Influência da hornificação na aderência fibra-matriz e no comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, p. 129. 2012.

FERREIRA, S. R. **Effect of surface treatments on the structure, mechanical, durability, and bond behavior of vegetable fibers for cementitious composites**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 217. 2016.

ISAIA, G.C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. In: JOHN, V.M. **Materiais de Construção e o Meio Ambiente**. 3ª edição. São Paulo, IBRACON, 2017. p. 114-154. Disponível em: <<http://ppgec.poli.usp.br/wp-content/uploads/sites/277/2017/05/VMJOHN-Materiais-e-o-meio-ambiente-2017-09-30-1.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2021.

KRÜGER, E. L. et al. **Thermal analysis of wood-cement panels: Heat flux and indoor temperature measurements in test cells**. Construction and Building Materials, v. 23, p. 2299-2305, 2009.

LATORRACA, J. V. F. ***Eucalyptus ssp.* Na produção de painéis de cimento-madeira**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, p. 208. 2000.

MACEDO, J. S. **Desenvolvimento de biocompósitos à base de polihidroxitirato e resíduos do processamento de fibras de casca de coco**. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 159, 2010.

MARTEINSSON, B.; GUDMUNDSSON, E. **Cement bonded particle boards with different types of natural fibres – using carbon dioxide injection for increased initial bonding.** Journal of Composite Materials, v.8, p. 29-43, 2018.

MAURY, M. B.; BLUMESCHEIN, R. N. **Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente.** Sustentabilidade em Debate, Brasília, v.3, n.1, p. 75-96, 2012.

MATOS, A. T. Tratamento de resíduos no pós-colheita: In: BOREM, F. M., **Pós- colheita do Café.** Lavras: UFLA, 2008, p. 170-171.

MESQUITA, C. M. et al. **Manual do café: colheita e preparo.** Belo Horizonte: EMATER – MG, 2016, p. 52.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** Ibracon, 2014.

RURAL PECUÁRIA. **Brasil:** Mapa representativo das Regiões produtoras de café. Rural Pecuária, 2016. Disponível em: <[https://ruralpecuaria.com.br/tecnologia-e-manejo/cafe/ brazil-map-representativo-das-regioes-produtoras-de-cafe.html](https://ruralpecuaria.com.br/tecnologia-e-manejo/cafe/brazil-map-representative-of-the-regions-producing-coffee.html)>. Acesso em: 01 nov. 2021.

SANTOS, D. O. J. **Desenvolvimento de painéis sanduíches leves com faces em compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal e núcleo em bioconcreto de casca de arroz.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 167. 2020.

SILVA, N. A. **Estudo da aderência bambu-bioconcreto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p.129. 2019.

VEGRO, C.L.R.; CARVALHO, F. C. **Disponibilidade e utilização de resíduos gerados no processamento agroindustrial do café.** Informações Econômicas, São Paulo, v.24, n.1, p.9-16, 1994.

TOLEDO FILHO, R. D. et al. **Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates.** Construction and Building Materials, v. 23, p. 2409-2420, 2009.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Cement technology roadmap shows how the path to achieve CO₂ reductions up to 24% by 2050.** Wbcds, 2018. Disponível em: < <https://www.wbcds.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/News/Cement-technology-roadmap-shows-how-the-path-to-achieve-CO2-reductions-up-to-24-by-2050>>. Acesso em: 02 nov. 2021.

ZHENG TIAN, L.; MOSLEMI, A. A. **Influence of chemical additives on the hydration characteristics of western larch wood-cement-water mixtures.** Forest Products Journal, v. 35, n. 7, p. 37-43, 1985.

SEGUNDA PARTE

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DE BIOCONCRETOS PRODUZIDOS COM CASCA DE CAFÉ *Coffea arabica*

Priscila Carolaine Barros; Saulo Rocha Ferreira; M'hamed Yassin da Gloria

RESUMO

O café, *Coffea arabica* é uma espécie originária da Etiópia, e a maior parte de sua produção se dá em países da América Central e do Sul, sendo o Brasil o maior produtor mundial, tendo como destaque os estados de Minas Gerais e São Paulo como maiores produtores do país. Devido ao alto volume de café produzido anualmente, tem-se uma considerável quantidade de resíduos gerados em seu beneficiamento. Os resíduos resultantes da limpa do cafeeiro, contêm elevadas concentrações de materiais orgânicos e inorgânicos que podem causar poluição do solo e de lençóis freáticos, se descartados de maneira inadequada. Existem poucos estudos em relação ao aproveitamento desse material, utilizando-o apenas como adubo orgânico e algumas pesquisas como potencial energético. Portanto, essa pesquisa teve por objetivo a caracterização química e física da casca de café *Coffea arabica*, bem como, avaliar sua utilização como agregado no desenvolvimento de bioconcretos leves, avaliando suas propriedades físicas e mecânicas e de condutividade térmica. O bioagregado foi caracterizado quanto a sua composição química e densidade básica. Foi realizada também análise da espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). O resíduo passou por um pré – tratamento em água quente a 80° C, e logo depois em uma imersão em hidróxido de cálcio, sendo utilizado esse processo para evitar o atraso na hidratação do cimento. Para o bioconcreto produzido foi utilizado em sua matriz Cimento Portland CPV- ARI, metacaulinita e cinza volante, com relação água/materiais cimentícios de 0,35 e 3% de cloreto de cálcio em relação a massa de cimento, e 45% de casca de café em volume. Foi adicionado 180% de água de compensação. Foram realizados ensaios de compressão uniaxial após 7 e 28 dias de idade. O ensaio de resistência à compressão uniaxial obteve valores para 7 e 28 dias de 1,23 MPa e 1,16 MPa, respectivamente. Os bioconcretos podem ser classificados como leves com uma densidade de 1,19 g/cm³ e possuem uma boa condutividade térmica de 0,32 W/mK. Os compósitos produzidos apresentaram potencial para aplicação na indústria da construção civil.

Palavras-chave: Casca de café. Bioconcretos. Matéria-prima. Material Lignocelulósicos. Materiais cimentícios.

DEVELOPMENT AND PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF BIOCONCRETE PRODUCED WITH COFFEE HUSK *Coffea Arabica*

Priscila Caroline Barros; Saulo Rocha Ferreira; M'hamed Yassin da Gloria

ABSTRACT

Coffee, *Coffea Arabica*, it is a species originating in Ethiopia, and nowadays most of its production takes place in Central and South American countries, with Brasil being the largest producer in the world Minas Gerais and São Paulo state are highlighted as the largest producers in the country. Due to the high volume of coffee annually production, there is a considerable amount of waste generated in its processing. The residues resulting from the cleaning of the coffee tree contain high concentrations of organic and inorganic materials that can cause soil and groundwater pollution if disposed improperly. There are few studies regarding the use of this residue, using its an organic fertilizer and as an energy production. Therefore, this research aimed at the chemical and physical characterization of *Coffea arabica* coffee husks, as well as at evaluating its use as an aggregate in the development of lightweight bioconcrete, evaluating its physical and mechanical properties and thermal conductivity. The bioaggregate was characterized as to its chemical composition and basic density. Infrared spectroscopy with Fourier transform (FTIR) was also performed. The residue went through a pre-treatment in hot water at 80°C, and soon after in an immersion in calcium hydroxide, this process being used to avoid delay in the hydration of the cement. For the bioconcrete production, it was used in its matrix Portland CPV-ARI Cement, metakaolin and fly ash, with a water/cementitious material ratio of 0.35 and 3% of calcium chloride in relation to the cement mass, and 45% of the peel coffee in volume. 180% make-up water was added. Uniaxial compression tests were performed after 7 and 28 days of age. The uniaxial compressive strength test obtained values for 7 and 28 days of 1.23 MPa and 1.16 MPa, respectively. Bioconcretes can be classified as lightweight with density of 1,19 g/cm³ and a good thermal conductivity of 0,32 W/mK. The composites produced showed potencial for application in the civil construction industry.

Keywords: Coffee husks. Bioconcrete. Feedstock. Lignocellulosic Material. Cementitious materials.

1 INTRODUÇÃO

O setor de construção civil, é responsável por utilizar uma grande parte de recursos naturais e depositar uma quantidade exorbitante de resíduos no meio ambiente. Estima-se que a construção civil utiliza mais de 50% dos recursos naturais do planeta, sendo a maior parte não renovável. Além, de gerar mais de 500 kg/hab.ano de resíduos de construção e demolição, a esse valor ainda deve ser adicionado a quantidade de resíduos produzidos na extração e beneficiamento dos materiais, o qual não há estimativas previstas (CBS, 2009; ISAIA, 2017).

Segundo o Global Alliance for Buildings and Construction (2020), o setor de edificações no ano de 2020, foi responsável pelo consumo de 28% do total de energia global em relação a emissão de CO₂, considerando a indústria de construção de edifícios essa porcentagem aumenta para 38% do total de emissão global de CO₂ em relação à energia. O alto consumo energético na indústria da construção civil, enfatiza a necessidade de reduzir urgentemente os impactos ambientais causados por esse setor, como a busca por novos materiais e técnicas construtivas que permitam a execução de uma construção verde (DA GLORIA, 2020).

Os bioconcretos se apresentam como uma alternativa para reduzir impactos ambientais, podendo ser produzidos com bioagregados que substituem de forma parcial ou total os agregados convencionais (LIMA et. al., 2019; DA GLORIA et al., 2020). O Brasil como um dos maiores produtores agrícolas do mundo, conseqüentemente apresenta uma grande quantidade de resíduos descartados de maneira inadequada que podem causar diversos problemas ambientais. A preocupação ambiental e a diminuição de recursos naturais, incentiva a procura por alternativas para aproveitar esses materiais como matéria prima para a produção de bioconcretos (SANTOS, 2020; CALDAS et al., 2019).

O Brasil é o maior produtor de café do mundo. Segundo, a Companhia Nacional de Abastecimento em 2020, o país produziu um total de 61,62 milhões de sacas de 60 kg, desses 47,37 milhões de sacas são de café arábica e 14,25 milhões de café conilon. Estudos indicam que a produção de café gera uma grande quantidade de resíduos sólidos, a casca que consiste no primeiro resíduo gerado no processamento do fruto corresponde cerca de 29% da matéria seca do fruto e o pergaminho cerca de 12 %, o que consiste em aproximadamente 41% do fruto é resíduo (BORÉM, 2008). Considerando a quantidade de café produzido no país, é gerado também uma grande quantidade de resíduos sólidos no beneficiamento do café o que torna esse produto uma boa fonte de matéria prima para a produção de materiais inovadores para uso na

construção civil, em destaque a região Sudeste com os estados de Minas Gerais e São Paulo, como maiores produtores de café no país (VEGRO et al.,1994; CAFÉ NO BRASIL, 2017).

Na literatura existem diversos estudos da utilização de resíduos lignocelulósicos na produção de compósitos cimentícios, uma alternativa de grande interesse para a indústria de construção civil, pelo menor custo de produção desses materiais e a diminuição da utilização de recursos não renováveis (FERREIRA, 2012; FREIRE et. al., 2011; SILVA et. al., 2018; SOARES et. al., 2017; LIMA et al.,2012; FERREIRA et al., 2020). Silveira et al. (2018) fizeram uso de diferentes partículas de madeira de cacto *Cereus jamacuru* como bioagregado na produção de bioconcretos obtendo bons resultados em relação a propriedades físicas e mecânicas, como também demonstraram vantagens no pré-tratamento da biomassa e do uso de aceleradores de pega para o desempenho do produto final.

Caldas et.al., (2019) fez a substituição de parte do cimento Portland por cinza volante e metacaulinita e Lima et. al., (2012) substituiu parte do cimento Portland por cinza volante e escória de alto forno. Esses autores observaram que mesmo substituindo parte do material ligante o cimento por materiais pozolânicos foi possível obter bons resultados de trabalhabilidade e de resistência mecânica. Tendo ainda o benefício ambiental, com o aproveitamento de um material que seria descartado de forma inadequada no meio ambiente. Esses compósitos apresentam também baixa condutividade térmica, produzidos com bioagregados de madeira, fibras de sisal, casca de arroz, bambu, entre outros (DA GLÓRIA, 2020; SANTOS, 2020; DA GLORIA et al.,2020).

Neste contexto, o objetivo deste estudo é desenvolver bioconcretos leves com incorporação da casca de café *Coffea arabica* como agregado, através da caracterização da casca de café *Coffea arabica*, e análise das propriedades físicas e mecânicas dos bioconcretos de casca de café e a utilização desse resíduo na construção civil como material alternativo.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os bioconcretos foram produzidos utilizando a casca de café *Coffea arabica*, fornecida pela Agência InovaCafé no campus da Universidade Federal de Lavras – UFLA, localizada no município de Lavras, na região do sul de Minas Gerais.

Nesta pesquisa, foi utilizado o cimento CP V de alta resistência inicial produzido pela empresa Holcim. A metacaulinita foi fornecida pela empresa Metacaulim do Brasil e a cinza volante pela empresa Pozofly.

Para a lavagem do bioagregado utilizou-se água a partir da rede de abastecimento da cidade de Lavras no estado de Minas Gerais, e para a produção dos bioconcretos utilizou-se a água fornecida pela rede de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.

Cloreto de cálcio P.A anidro da empresa Proquímios foi utilizado para compensar o efeito negativo na hidratação do cimento promovido pelos açúcares presentes nas cascas.

2.2 Metodologia

2.2.1 Processamento da casca de café *Coffea arabica*

A casca de café passou primeiramente por um processo de secagem em ambiente aberto ao sol por 3 dias. Esse processo foi realizado para remoção da água livre e evitar sua fermentação. Através do peneiramento em peneirador mecânico foram obtidas as propriedades físicas da casca natural. O teor de umidade foi analisado de acordo com NBR 9939 (ABNT, 2011), a densidade básica e a absorção de água pela NBR 11941 (ABNT, 2003) e a densidade aparente pela NBR 16916 (ABNT, 2021).

Os ensaios foram feitos pelo Laboratório de Construção Civil (LCC, UFLA).

2.2.2 Caracterização físico-química da casca de café *Coffea arabica*

A densidade básica da casca e sua absorção de água foi obtida através de um procedimento modificado citado na norma NBR 11941 (ABNT, 2003). O material ficou submerso em água até sua saturação seguida da aferição de sua massa e volume, seguindo os parâmetros da norma específica citada anteriormente. Após 72 horas na estufa a 103 ± 2 °C, foi mensurada sua massa seca.

Para a determinação da composição química o material foi moído em moinho de facas e peneirado para obter partículas entre 0,25 a 0,40 mm para a completa reação aos reagentes utilizados em análises químicas, de acordo com a norma NBR 14660 (ABNT, 2004). O teor de

extrativos foi obtido através de uma adaptação da norma NBR 7989 (ABNT, 2010), como também o teor de lignina insolúvel foi obtido através dos procedimentos mensurados nesta.

A determinação dos teores de cinzas seguiu os parâmetros disposto na norma NBR 13999 (ABNT, 2017). Para obter o teor de holocelulose foi feita a diferença em relação aos outros componentes moleculares e minerais da biomassa.

Os ensaios citados foram executados nos laboratórios de Construção Civil (LCC, UFLA), na Unidade Experimental de Produção de Madeira (UEPAM, UFLA), e de Materiais cerâmicos (UFLA).

2.2.3 Tratamento do Bioagregado

Foi utilizada a lavagem da casca de café em água aquecida como um tratamento para melhoria da compatibilidade química entre o cimento e a casca (DA GLÓRIA, 2020; DA GLÓRIA, 2015). A casca de café apresenta uma grande quantidade de nutrientes, como por exemplo o potássio, o que pode apresentar a necessidade de mais de uma lavagem. Nesse trabalho, foi observada a quantidade de lavagens necessárias através da diferença de coloração em cada ciclo. A casca foi lavada em água quente a 80 °C por uma hora, utilizando a relação de 1 g/60ml entre massa de partícula e volume de água (FERREIRA et al., 2020).

Após a primeira lavagem, as partículas foram separadas e lavadas novamente em solução alcalina com hidróxido de cálcio por 2 horas, utilizando 1,85 g/l entre massa de hidróxido de cálcio e volume de água e em relação em massa de água/casca de 10, como proposto por (DA GLÓRIA, 2020).

Os procedimentos de tratamento dos bioagregados foram feitos nos laboratórios de Construção Civil (LCC, UFLA) e do Núcleo de Ensino e Pesquisa em Materiais e Tecnologias de Baixo Impacto Ambiental na Construção Sustentável (NUMATS/COPPE, UFRJ).

2.2.4 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier – Reflectância total atenuada (FTIR- ATR)

Os ensaios de FTIR-ATR foram utilizados para avaliar a eficiência dos processos de lavagem do bioagregado. Para este teste foram analisadas amostras de partículas em estado natural, com 1, 2 e 3 lavagens.

Através do método de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) acoplada a um acessório de reflexão total atenuada (ATR) utilizando um espectrômetro FTIR Varian 600-IR Series equipado com GladiATR da Pike Technologies para medições FTIR-ATR, foram analisadas amostras de partículas de casca de café com tamanho máximo das partículas de 0,250 mm. As amostras foram varridas de 4000 a 400 cm^{-1} com 32 scans médios por espectro com uma resolução de 4 cm^{-1} .

Estes ensaios foram realizados no laboratório de Espectroscopia da Região do Infravermelho (CAPQ, UFLA).

2.2.5 Produção do bioconcreto

De acordo com estudos feitos anteriormente sobre bioconcretos, o uso do cimento Portland brasileiro de alta resistência inicial CPV- ARI, juntamente com os materiais pozolânicos, metacaulinita e cinza volante, como aglutinantes, gerou bons resultados (DA GLÓRIA, 2020; ANDREOLA, 2017). Pode ser averiguada a composição química e densidade dos materiais cimentícios na Tabela 1, de acordo com encontrado por (ANDREOLA, 2017). Já a Tabela 2, apresenta a dosagem por metro cúbico dos bioconcretos.

Tabela 1 - Composição química e densidade dos materiais cimentícios.

Elementos Químicos	Cimento (%)	Metacaulinita (%)	Cinza Volante (%)
CaO	69,97	-	1,95
SiO ₂	14,96	50,95	52,25
Al ₂ O ₃	4,70	42,22	33,81
Fe ₂ O ₃	3,51	1,98	4,91
K ₂ O	0,99	1,98	3,44
SO ₃	4,30	1,20	1,79
SrO	0,42	0,01	0,02
MnO	0,14	0,01	0,04
ZnO	0,01	0,01	0,04
Densidade(g/cm³)	3,17	2,81	2,16

Fonte: Andreola (2017).

Tabela 2 - Dosagem dos bioconcretos (kg/m³).

Bioconcreto	Casca de café	Cimento	Cinza Volante	Metacaulinita	A_{hidr}	A_{comp}	CaCl₂
BCC45-0.35	164.61	241.03	321.38	241.03	281.20	96.29	24.10

Fonte: Da autora (2021).

Para a produção dos compósitos, foi utilizada a relação água/ materiais cimentícios de 0,35 (ANDREOLA et al., 2019). Utilizando a fração volumétrica de 45% de casca de café, semelhante às relações de substituição de 40%, 45% e 50% (DA GLÓRIA, 2020). Sendo necessário fazer a compensação do volume de água absorvida pela biomassa para assegurar a consistência do bioconcreto (ANDREOLA et al., 2016; SILVEIRA et al., 2018; DA GLORIA, 2020; DA GLORIA, 2016). Assim, foi utilizado 180% de água de compensação em relação a massa do bioagregado, com base em estudos feitos anteriormente, melhorando consideravelmente a trabalhabilidade do bioconcreto. Foi usado ainda 3% de cloreto de cálcio para acelerar a hidratação do cimento.

Os procedimentos para o processo de produção dos bioconcretos foram baseados no estudo de Da Glória (2020), que consistem em primeiramente em um recipiente separado é feito a mistura da água e do cloreto de cálcio, em seguida na argamassadeira (20 litros) mistura-se o cimento, a metacaulinita e cinza volante por 1 minuto, logo depois é feito o lançamento da casca e mistura do conjunto por 1 min, sendo feita a adição progressiva de água durante 1 minuto. É necessário a pausa de 30 segundos para retirar os materiais que podem ficar grudados no fundo. A mistura deve ser feita por mais 1 minuto para total homogeneização do bioconcreto.

No fim da mistura, em moldes já lubrificadas com óleo mineral colocou-se os BCC em estado fresco divididos em três camadas. As camadas foram adensadas em mesa vibratória (68 Hz) por 10 segundos. Os corpos de prova foram protegidos para não perder umidade e mantidos no molde por 24 horas. Por fim, os corpos de prova foram levados para câmara seca a 21 ± 2 °C e umidade relativa de 60%, até atingirem 28 dias de idade.

Foi utilizada a cura seca, de acordo com os resultados de Silva (2019) que mostrou que os bioconcretos apresentam maior resistência mecânica quando submetidos a cura seca em comparação a cura úmida.

Os bioconcretos foram produzidos nos laboratórios do Núcleo de Ensino e Pesquisa em Materiais e Tecnologias de Baixo Impacto Ambiental na Construção Sustentável (NUMATS/COPPE, UFRJ).

2.2.6 Caracterização físico-mecânica dos bioconcretos

A consistência dos bioconcretos é avaliada no estado fresco, que consiste em uma avaliação para validar o método de dosagem, o experimento é feito em uma *flow table test*. O índice de consistência foi obtido através da média dos diâmetros dos espalhamentos, de acordo com o desenvolvido por (DA GLÓRIA, 2015; ANDREOLA, 2017).

A obtenção da densidade aparente dos bioconcretos foi feita por pesagem depois de 28 dias de cura seca, através da relação massa/volume, como o estudo feito por (DA GLÓRIA, 2020).

Os ensaios de compressão uniaxial seguiram os padrões propostos pela NBR 5739 (ABNT, 2018). Foram feitos ensaios para as idades de 7 e 28 dias. Para a realização dos ensaios foi utilizada a máquina de modelo Shimadzu-1000 kN a uma velocidade de deslocamento de 0,3 mm / min. Os deslocamentos verticais foram aferidos por meio da leitura média de dois transformadores lineares variáveis LVDTs. E o módulo de elasticidade foi determinado utilizando a equação da reta no intervalo linear da curva de tensão *versus* compressão até 30% da tensão última e pelo método previsto na norma NBR 8522 (ABNT, 2021).

Os ensaios mencionados anteriormente foram executados nos laboratórios do Núcleo de Ensino e Pesquisa em Materiais e Tecnologias de Baixo Impacto Ambiental na Construção Sustentável (NUMATS/COPPE, UFRJ).

2.2.7 Ensaio de Condutividade térmica

Para os ensaios de condutividade térmica foi utilizado o analisador de condutividade térmica TCi, fabricado pela empresa C-Therm Technologies, com capacidade de testes de 0 a 500 W/Mk em uma faixa de temperatura de -50°C a 200 °C. Para o bioconcreto dessa pesquisa foi utilizado o módulo de programa Low K, com configurações de análise para materiais como espumas, plásticos, cerâmicas e compósitos (K-Range de 0 a 10 W/mK). Esse equipamento utiliza um sensor de refletância de calor, unilateral, interfacial que aplica uma fonte de calor constante momentaneamente na amostra. Foram feitas 6 leituras para cada corpo de prova, foi retirada a primeira leitura e depois realizou a média entre os 5 valores restantes para obter o resultado final.

Este ensaio foi feito pelos laboratórios do Núcleo de Ensino e Pesquisa em Materiais e Tecnologias de Baixo Impacto Ambiental na Construção Sustentável (NUMATS/COPPE, UFRJ).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades físico-químicas da casca de café *Coffea arabica*

Na Figura 1, é possível observar em b) que a casca de café é composta por 2 elementos principais: a casca externa (exocarpo) e o pergaminho (endocarpo) a parte interna da casca. E em c) temos a curva granulométrica da matéria-prima utilizada.

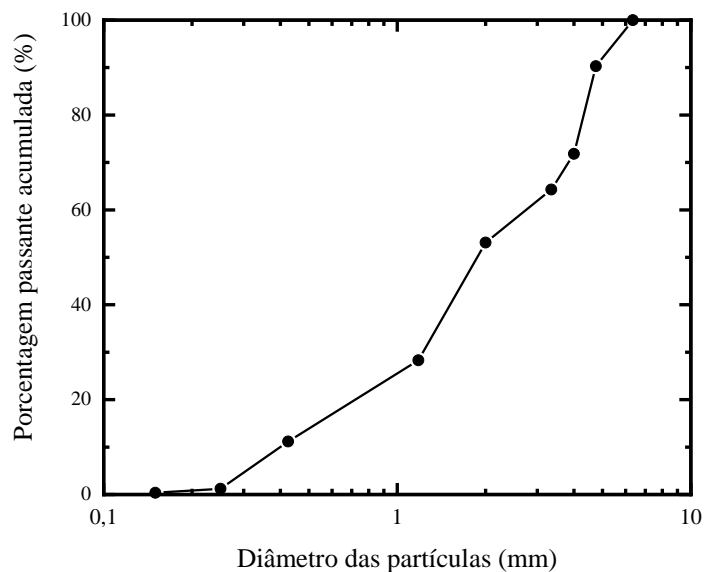
Figura 1 – Árvore de café *Coffea arabica* em a), fruto do café em b) e curva granulométrica da partícula em c).



a) Árvore de café com frutos maduros.



b) Grão do café maduro parcialmente descascado.



c) Curva granulométrica.

Fonte: Da autora (2021).

É possível observar através da curva granulométrica que as partículas apresentam: D_{90} igual a 4,75 mm, D_{50} igual a 1,8 mm e D_{10} igual a 0,40 mm.

A quantificação dos componentes químicos encontrados na casca de café natural, com 1, 2 e 3 lavagens, está disposta na Tabela 3.

Tabela 3 – Componentes químicos encontrados na casca de café *Coffea arabica* com diferentes lavagens.

Componentes (%)	Caracterização Química			
	Casca Natural	1 lavagem	2 lavagens	3 lavagens
Lignina	23,47	26,94	27,94	19,42
Holocelulose	12,23	41,86	52,61	66,58
Cinzas	17,30	8,70	6,70	2,45
Extrativos	47,00	22,50	12,75	11,55

Fonte: Da autora (2021).

A lignina possui propriedades hidrofóbicas, dando impermeabilidade ao material, o que a torna conhecida como um adesivo natural. Atua no reforço das microfibrilas de celulose o que diminui movimentos perpendiculares ao grão e contribui na resistência mecânica e biológica (SILVA et al., 2018; NEUTELINGS, 2011; SOARES et al., 2017). Portanto, teores de lignina maiores como os encontrados são interessantes para aplicação, por exemplo, na produção de painéis de madeira reconstituída.

Podemos observar que a holocelulose apresenta menor teor na casca de café natural em comparação com os teores depois da biomassa passar por lavagens. A holocelulose e consequentemente a hemicelulose são componentes que possuem sítios de ligação química com a água (FREIRE et al., 2011; SCATOLINO et al., 2017). Assim, teores menores de holocelulose e hemicelulose, demonstra que o material absorve menor quantidade de água. Em relação a quantidade de cinzas, a casca de café apresenta altos teores de cinza se compararmos com algumas madeiras na literatura, o que pode ser explicado por ser um material de densidade baixa, como encontrado em alguns tipos de madeira (KLOCK; ANDRADE, 2013).

A casca natural apresenta uma grande quantidade de extrativos se compararmos com outros materiais lignocelulósicos encontrados na literatura, por exemplo, algumas madeiras (KLOCK; ANDRADE, 2013; SOARES et al., 2017). Os extrativos são componentes que possuem características que podem aumentar a resistência a água do bioagregado, quando é encontrado valores maiores em materiais lignocelulósicos pode significar a perda de permeabilidade e de sua propriedade higroscópica (SCATOLINO et al., 2017; IWARIRI, 2005).

A casca natural apresentou 47% em extrativos, quando lavamos a casca 1 vez esse percentual caiu consideravelmente a 22,50%, o que representa uma diferença de 24,50% a menos de extrativos, na segunda lavagem obtivemos uma redução menor, de 9,75% e na terceira uma redução bem menor, de apenas 1,2 %. O alto teor de extrativos é uma característica que leva a necessidade de um tratamento inicial da casca como o proposto por (DA GLÓRIA, 2015; ANDREOLA, 2017; FERREIRA, 2016). Por fim, podemos observar nas 3 últimas colunas que o tratamento em água quente foi eficaz para a redução dos extrativos, o que permitiu verificar que 2 lavagens seria suficiente para tratar a matéria prima.

A Tabela 4, dispõem os valores encontrados de densidade básica, teor de umidade, absorção de água e massa específica aparente da casca de café em estado natural.

Tabela 4 – Caracterização física da casca de café *Coffea arabica*.

Densidade básica (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Absorção de água (%)	Densidade aparente (g/cm ³)
1,50	10,23	176,50	0,41

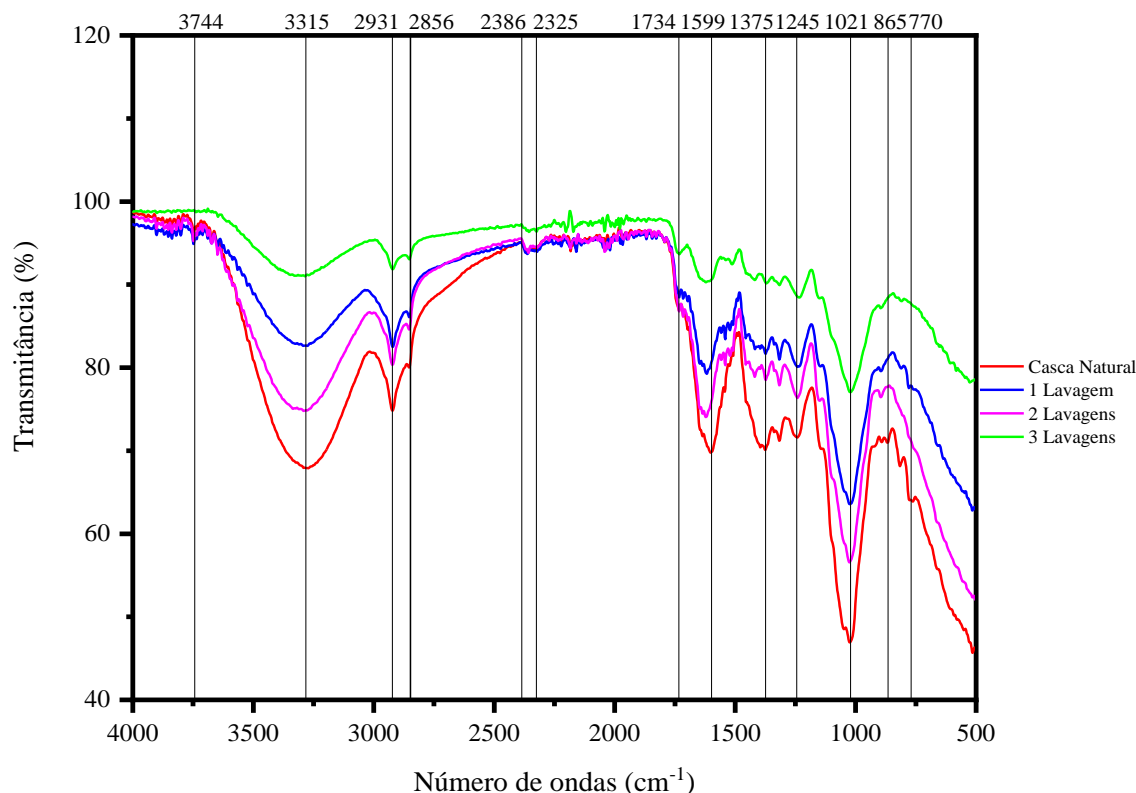
Fonte: Da autora (2021).

Como podemos observar foi encontrado os valores de 0,41 g/cm³ para a densidade aparente, 10,23 % para o teor de umidade e 176,50 % para a absorção de água do material. A densidade aparente encontrada apresenta semelhança a densidade aparente de algumas madeiras encontradas na literatura (DA GLÓRIA, 2020; SILVEIRA et al., 2018). A casca de café pode ser considerada um material de baixa densidade, os resultados encontrados são satisfatórios e representa a alta porosidade interna do material, como classificação proposta para materiais de baixa densidade por (BERALDO, 2011).

3.2 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) da casca de café

O FTIR é uma análise que pode ser feita para estudar possíveis modificações nas fibras do bioagregado de acordo com o tratamento empregado (HOYOS, 2013). O gráfico da Figura 2, apresenta os picos do FTIR da casca de café natural, e com 3 tipos de lavagens.

Figura 2 - Picos da análise de FTIR referente a casca de café com diferentes lavagens.



Fonte: Da autora (2021).

Podemos observar alguns picos principais na casca de café natural e depois das lavagens, como o pico de 3315 cm⁻¹ que representa as vibrações de hidrogênio de grupos -OH de álcoois, fenóis ou de ácidos carboxílicos, e de amidas; o pico de 2931 cm⁻¹ é referente ao alongamento da ligação -OH nos grupos metil e metileno e de vibrações -CH de grupos alifáticos; o pico de 1734 cm⁻¹ é dada como o alongamento C=O de aldeídos, cetonas, e ácidos carboxílicos da estrutura da lignina; os picos na região de 1599 cm⁻¹ possuem características de amidas secundárias, e apresentam vibrações C=C de estruturas aromáticas e de grupos C=O associados com anel aromático; o pico em 1375 cm⁻¹ é característica de absorção de algumas estruturas alifáticas, grupos OH fenólicos, grupos COO⁻, N-H das amidas, anel aromáticos e carbonatos; o pico de 1245 cm⁻¹ característica do alongamento de ligação C-O-C de grupos éter; e o pico de 1021 cm⁻¹ característico de grupos silicatos, éter e de éster aromático e alongamento C-O de polissacarídeos (SMIDT, 2005; HOYOS, 2013; JOURAIPHY et al., 2005; PARRAVICINI et al., 2006; DEEPA et al., 2015).

É possível observar na Tabela 5 que os picos de 2931 e 2856 cm⁻¹ da casca natural, foram encontrados em todos os espectros FTIR das diferentes amostras, foram diminuindo de acordo com cada lavagem, apresentando picos semelhantes para cada tratamento, sendo eles

característicos à presença de gordura e lipídios, compostos alifáticos e a grupos de metileno; os picos em 1600 cm^{-1} são típicos de madeiras, frutas, gramas e outras plantas; e o pico em 1599 cm^{-1} é referente a proteína (GRUBE et al., 2006). A lignina é caracterizada pelo espectro em torno de 1510 a 1460 cm^{-1} referente a estrutura do esqueleto aromático da lignina (FENGEL e WEGENER, 1989).

Tabela 5 – Picos FTIR da casca de café.

Picos	Grupos funcionais	Componentes
3744	O-H	Ácido, metanol, água,
3315	O-H	Ácido, metanol, água,
2931	H-C-H	Estiramento C-H, Grupos alquil e alifáticos
2856	C-H	Estiramento C-H
2386	N=C=O	Ligações N=C=O (isocianatos)
2325	N=C=O	Ligações N=C=O (isocianatos)
1734	C=O ; -C-O; COOH-R	Estiramento C=O, aldeído, cetona, ácido carboxílicos
1599	C=C; C=O	Vibrações do anel aromático, ligações C = C
1375	C-H , C-C	Deformação da ligação C-H, ácido gálico e elágico
1245	C-O; C-O-C; C-O	Grupos aril, alquil, éter, polissacarídeos, vibrações de ligações fenólicas C-O
1021	C=C; C-O; C-H	Ligações C = C, hidroquinona, glicose e pirogalol
865	C-H;C-O	Deformação da ligação C-H do anel aromático, fenol e ácido gálico
770	C-H; -C-O	Deformação da ligação C-H do anel aromático, flavonóides e resorcinol

De acordo com a literatura (Hoyos, 2013; Smidt, 2005; Parravicini et al., 2006; Tondi e Petutschnigg, 2014; Grube et al., 2006; Fengel e Wegener, 1989; D'Oca, 2021).

A casca de café possui alguns picos típicos e bem definidos, como pode se observar na Figura 3. A banda de 3315 cm^{-1} caracterizada pela ligação O-H representando a quantidade de água presente em cada amostra. Apresenta também os espectros entre 1599 e 770 cm^{-1} , específicos de ligações C=C, ligadas a vibrações de anéis aromáticos, e compostos flavonóides encontrados nos taninos e trechos =C-O-C=, de composição oxo-aromáticos, entre outros componentes dispostos na Tabela 5.

3.3 Consistência e espalhamento

Está disposto na Figura 3, os espalhamentos típicos obtidos dos corpos de prova do bioconcreto estudado. Podemos observar que as amostras não apresentaram exsudação. Da Glória (2020) propõem índices de consistência superior a 190 mm para a mistura apresentar boa trabalhabilidade. Foi obtido o índice de consistência médio de 180 mm inferior ao proposto

pela literatura. Entretanto, as amostras não apresentaram dificuldade para serem colocadas nos moldes e apresentou uma mistura homogênea e com trabalhabilidade.

Figura 3 – Espalhamento de três amostras do bioconcreto estudado.



a) Amostra 1 BCC45 b) Amostra 2 BCC45 c) Amostra 3 BCC45.

Fonte: Da autora (2021).

O resultado apresenta valor semelhante a outros da literatura que utilizam madeira ou casca de cereais com matriz de materiais cimentícios contendo cimento, metacaulinita e cinza volante. Da Glória (2020) encontrou para bioconcretos com 45% de serragem e relação água/materiais cimentícios 0,35, um espalhamento de 180 mm. SANTOS (2020) encontrou para bioconcretos com 45% de casca de arroz, e relação água/materiais cimentícios 0,69, o valor para espalhamento de 180 mm.

3.4 Propriedades físico-mecânica dos bioconcretos

3.4.1 Densidade aparente

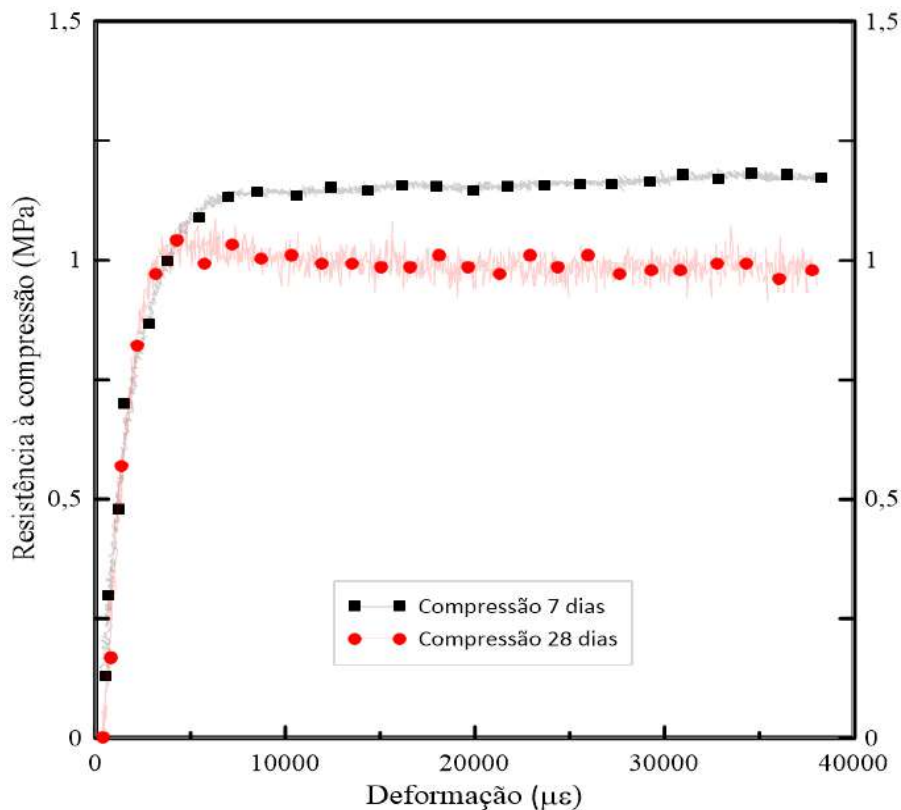
A densidade média obtida dos bioconcretos foi de $1,19 \text{ g/cm}^3$. De acordo com a Classificação Funcional da Rilem (1978), podemos classificar o bioconcreto com casca de café como concretos leves, sendo que é recomendado densidades menores do que $1,80 \text{ g/cm}^3$.

O valor de densidade encontrado é semelhante a outros valores encontrados na literatura, com madeira e matriz com materiais cimentícios, cimento, metacaulinita e cinza volante. Da Glória (2020) encontrou para bioconcretos com 45% de serragem e relação água/materiais cimentícios 0,35, uma densidade de $1,05 \text{ g/cm}^3$. Andreola (2017) encontrou para bioconcretos com 45% de partículas de bambu e relação água/materiais cimentícios 0,40, o valor de densidade de $1,19 \text{ g/cm}^3$.

3.4.2 Resistência à compressão uniaxial

Os bioconcretos de casca de café, foram desmoldados após 24 horas, o que demonstra que o tratamento do bioagregado e a adição de cloreto de cálcio são eficientes para prevenir o retardo ou inibir as reações de hidratação do cimento. Os bioconcretos foram submetidos a ensaios de compressão uniaxial após 7 e 28 dias de idade, como mostra as curvas típicas de tensão x deformação dos bioconcretos no gráfico da Figura 4. Os ensaios de compressão dos bioconcretos apresentam uma fase linear e depois entram em uma fase não linear até atingir a tensão de pico, logo após o pico, apresenta uma baixa diminuição de tensão com o aumento da deformação. A pouca variação de tensão após atingir a tensão de pico, sugere uma lenta propagação de fissura, possivelmente pela grande quantidade de casca de café.

Figura 4 – Curvas típicas de tensão vs deformação dos bioconcretos submetidos à compressão.



Fonte: Da autora (2021).

Na Tabela 6, está apresentado os máximos valores de tensão e deformação encontrados para os ensaios com 7 e 28 dias, e os módulo de elasticidade. Para os ensaios de compressão uniaxial com 7 e 28 dias, encontrou os valores de resistência a compressão de 1,23 MPa e 1,16 MPa, respectivamente. E seguindo os parâmetros normativos foi determinado para o módulo de elasticidade, os valores de 0,38 GPa e 0,36 GPa para 7 e 28 dias de idade, respectivamente.

Utilizando a equação da reta do intervalo linear da curva tensão *versus* deformação até 30% da tensão última, foi encontrado para 7 e 28 dias, os valores de módulo de elasticidade de 0,33 GPa e 0,62 GPa, respectivamente.

Os bioconcretos após 28 dias apresentaram uma queda de resistência a compressão de 5,69% em relação ao obtido com 7 dias, o que pode ser explicado pelo volume de biomassa empregada na mistura e ao seu alto teor de absorção de água, o que pode causar uma maior retração, ou seja, como a partícula absorveu maior teor de água por capilaridade na presença de um maior volume de casca no bioconcreto, conseqüentemente houve liberação da água livre na mesma proporção. Assim, o compósito pode ter sofrido perda de massa e aumento da porosidade causando maior índice vazios, dessa forma, influenciando na diminuição da resistência após os 28 dias de idade, como estudos feitos por (DA GLORIA, 2015; FERREIRA,2012).

Tabela 6 – Propriedades mecânicas dos bioconcretos.

Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)	Deformação ($\mu\epsilon$)	E_{norma} (GPa)	E_{equaçãoreta} (GPa)
7	1,23 ± 0,26	38617,05 ± 8874,91	0,38 ± 0,37	0,33 ± 0,63
28	1,16 ± 0,03	38122,93 ± 4727,49	0,36 ± 0,09	0,62 ± 0,93

Fonte: Da autora (2021).

Os resultados encontrados apresentam semelhanças com outros da literatura, que utilizaram madeira e casca de cereais. Da Glória (2020), encontrou em ensaios de 28 dias, para bioconcretos com matriz pozolânica de substituição de 50% de serragem e 0,45 de relação a/mc, os valores de 1,15 MPa para resistência a compressão e 1,92 MPa de resistência a compressão para 50% de serragem e 0,40 de relação a/mc. Em seu estudo foi possível observar que maiores substituições de biomassa e maiores relações água/materiais cimentícios, tendem a diminuir a resistência a compressão do bioconcreto e matrizes pozolânicas possuem maior sensibilidade quando há um aumento da água de hidratação do que bioconcretos produzidos com matriz de cimento. Santos (2020), fez bioconcretos com porcentagens de substituição de biomassa de 45%, 50% e 52% e relação a/c de 0,64, 0,69, 0,75 utilizando todas as relações para cada tipo de substituição, encontrando valores para resistência a compressão de 0,21 a 3,15 MPa e módulo de elasticidade de 0,25 a 1,88 GPa. Portanto, nesse estudo foi possível a observação que maiores valores de substituição de bioagregado e relação água/cimento, e menor consumo de cimento, há uma diminuição da resistência a compressão e modulo de elasticidade.

Na Figura 5, está disposto os corpos de prova após ensaio de compressão uniaxial, a qual apresenta semelhantes padrões na ruptura dos corpos de prova, sendo possível observar na terceira imagem que mesmo com grande quantidade de casca no compósito a distribuição da ruptura ocorreu de forma proporcional ao longo do corpo de prova.

Figura 5 – Bioconcretos após ensaio de compressão em a) imagem dos corpos de prova após ensaio de compressão, em b) imagem de apenas um corpo de prova e suas fissuras e c) corpo de prova rompido.



a) CP's BCC45.

b) CP BCC45.

c) CP rompido.

Fonte: Da autora (2021).

3.5 Condutividade térmica

A condutividade térmica média obtida dos bioconcretos foi de 0,32 W/mk. O resultado apresentado pelos bioconcretos de casca de café possui uma maior condutividade térmica do que algumas madeiras, e aos compósitos com casca de arroz e de matriz cimentícia leve de Pachla (2019), possui também semelhanças aos valores encontrados por Da Glória (2015) que utiliza serragem como bioagregado e é menos condutivo do que a pasta de cimento.

Da Glória (2015), obteve resultados de condutividade térmica para bioconcretos com teores de serragem de madeira de 45%, 50 e 60%, entre 0,06 – 0,53 W/mK. Segundo dados apresentados em seu trabalho a madeira possui condução térmica de 0,08 a 0,23 W/Mk e a pasta de cimento de 0,6 a 1,2 W/mK. Pachla (2019), encontrou para matriz cimentícia leve e compósito com casca de arroz com 35% de bioamassa, valores de condutividade térmica de 0,24 e 0,27 W/mK, respectivamente. Aguiar (2020), fez um estudo dos efeitos da adição de serragem de madeira na condutividade térmica dos bioconcretos com teores de 40%, 50% e 60% e obteve resultados de 0,47 – 0,29 W/mK, observando ainda que a condutividade térmica tende a diminuir de acordo com o aumento de biomassa, e diminuição de densidade. A condutividade térmica ou a porosidade da matriz, é influenciada por fatores como a idade do compósito, a quantidade de agregados empregada, parte de cimento, porção de finos, da relação

água/cimento, aditivo utilizado, umidade, modo de preparo da amostra, entre outros (KIM et al., 2003), como também pode considerar a porosidade adicional que a biomassa pode gerar no processo de mistura (AGUIAR, 2020).

4 CONCLUSÃO

A casca de café quanto a sua caracterização química, apresenta teores de lignina, holocelulose, cinzas e extrativos, semelhantes aos compostos químicos encontrados em madeiras, em seu estado natural possui um alto teor de extrativos e lignina quando se comparado por exemplo com algumas madeiras, já quando essa casca passa por um pré-tratamento há uma redução significativa na quantidade de extrativos e a lignina apresenta baixa variação. Um maior teor de lignina pode apresentar uma vantagem sendo que pode diminuir a permeabilidade do material, uma boa característica para aplicações em painéis de madeira aglomerada. A biomassa apresenta baixa densidade podendo ser comparada a madeiras de menores densidades.

A análise FTIR apresenta picos típicos que indica a presença de água nas partículas, bem como a existência de vibrações de anéis aromáticos, gorduras e lipídios, proteínas e picos característicos de madeiras, frutas e plantas.

O tratamento do bioagregado com uma lavagem em água quente e uma segunda lavagem em imersão alcalina, se mostrou mais eficiente que, duas lavagens em água quente. O que permite a redução de energia utilizada no aquecimento da água.

Em relação aos bioconcretos, a utilização do cimento CPV-ARI juntamente com a adição de cloreto de cálcio e o tratamento empregado ao resíduo, para garantir a hidratação do cimento e seu endurecimento, permitiu a desmoldagem dos corpos de prova com 24 horas. A combinação de cinza volante e metacaulinita, permitiu uma substituição de 70% da massa de cimento na mistura. Foram encontrados para 7 e 28 dias de idade, o valor de 1,19 g/cm³ para densidade e para resistência à compressão 1,23 MPa em 7 dias e 1,16 MPa em 28 dias.

Enfim, o objetivo deste trabalho em produzir bioconcretos leves teve um resultado positivo, os produtos finais apresentaram baixa densidade. Ademais, os bioconcretos obtiveram boas propriedades físicas, de trabalhabilidade e de condutividade térmica. Suas propriedades mecânicas apesar de apresentar baixa resistência, tiveram um bom comportamento de propagação de fissuras e pouca variação de tensão com o aumento da deformação após o maior pico de tensão.

Para trabalhos futuros, sugere-se a caracterização mecânica desse resíduo, para o melhor estudo em relação a aplicabilidade para situações que necessite de resistência mecânica. Bem como, a aplicação em outros tipos de compósitos, como painéis de madeira. E também, propor outros traços e comparar seus desempenhos.

Portanto, a casca de café possui boas propriedades como material lignocelulósico alternativo para aplicar em bioconcretos. E comprovou ser um material com potencial a ser utilizado na produção de novos produtos para a indústria da construção civil no Brasil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Unidade Experimental de Painéis de Madeira (UEPAM), ao laboratório de Espectroscopia da Região do Infravermelho (CAPQ), ao laboratório de Construção Civil (LCC), localizados na Universidade Federal de Lavras. E ao laboratório do Núcleo de Ensino e Pesquisa em Materiais e Tecnologias de Baixo Impacto Ambiental na Construção Sustentável (NUMATS), localizado na Universidade Federal do Rio de Janeiro. Agradecem também ao CAPES e CNPQ.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, A.L.D. **Estabilidade térmica e reação ao fogo do bio-concreto de madeira**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p.115. 2017.

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

ANDREOLA, V. M. **Caracterização física, mecânica e ambiental de bio-concretos de bambu**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 118. 2017.

ANDREOLA, V. M. et al. **Partial replacement of cement by combination of fly ash and metakaolin in bamboo bio-concretes**. 3rd International Conference on Bio-Based Building Materials, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9939**: Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio. Rio de Janeiro, p. 3. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, p. 8. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941**: Madeira – Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, p. 6. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14660**: Madeira – Amostragem e preparação para análise. Rio de Janeiro, p.7. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7989**: Pasta celulósica e madeira – Determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro, p. 6. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999**: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira – Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C. Rio de Janeiro, p. 4. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, p. 4. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, p. 9. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão.** Rio de Janeiro, p. 20. 2021.

BERALDO, A. L. **Compuestos De Biomasa Vegetal Y Cemento. Aprovechamiento De Residuos Agro-Industriales Como Fuente Sostenible De Materiales De Construcción.** 1ª edição, p. 301-326, 2011.

BORÉM, F. M. **Pós – Colheita do Café.** 1ª edição. Lavras: UFLA, 2008.

CALDAS, L. et al. **Dynamic life cycle carbono assessment of three bamboo bio-concretes in Brazil.** 3rd International Conference on Bio-Based Building Materials, 2019.

CAFÉ NO BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.** Disponível em: < <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/cafe/cafeicultura-brasileira>>. Acesso em: 28 out. 2021.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. **Materiais, componentes e a construção sustentável.** São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.cbcs.org.br/userfiles/comitestematicos/materiais/CT_materiais.pdf>. Acesso em: 28 out. 2021.

DA GLORIA, M. Y. R. et al. **A comprehensive approach for designing workable biobased cementitious composites.** Journal of Building Engineering, 2020.

DA GLÓRIA, M.Y.R. **Comportamento experimental e numérico de bioconcretos de madeira e de painéis sanduíches com faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 182. 2020.

DA GLORIA, M.Y.R. **Desenvolvimento e caracterização de painéis sanduíches de concreto com núcleo leve e faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal.** Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p.133. 2015.

DA GLORIA, M. Y. R.; TOLEDO FILHO, R. D. **Influence of the wood shavings/cement ratio on the termo-mechanical properties of lightweight wood shavings-cement based composites.** 6th Amazon & Pacific Green Material Congress and Sustainable Construction Materials Lat-Rilem Conference, 2016.

DEEPA, B. et al. **Utilization of various lignocellulosic biomass for the production of nanocellulose: a comparative study.** Cellulose, v. 22, p. 1075-1090, 2015.

D'OCA, C. R. M. **Ferramentas espectroscópicas na análise de compostos orgânicos: uma aproximação descomplicada.** 1ª edição. Curitiba: Intersaberes, 2021.

IWAKIRI, S. et al. **Produção de painéis aglomerados de alta densificação com uso de resina melamina-ureia-formaldeído.** Cerne, Lavras, v. 11, n. 4, p. 323-328, 2005.

ISAIA, G.C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. In: JOHN, V.M. **Materiais de Construção e o Meio Ambiente**. 3ª edição. São Paulo, IBRACON, 2017. p. 114-154. Disponível em: <<http://ppgec.poli.usp.br/wp-content/uploads/sites/277/2017/05/VMJOHN-Materiais-e-o-meio-ambiente-2017-09-30-1.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2021.

JOURAIPHY, A. et al. **Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation during composting of sewage sludge and green plant waste**. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 56, p. 101-108, 2005.

KIM, K. et al. **An experimental study on thermal conductivity of concrete**. *Cement and concrete research*, v. 33, n. 3, p. 363-371, 2003.

LIMA, P.R.L. et. al. **Efeito do envelhecimento acelerado sobre as propriedades de microconcreto reforçado com fibras longas de sisal**. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v.19, n.1, p.7-20, jan./mar. 2019.

LIMA, A. J. M.; IWAKIRI, S. **Utilização de resíduos de madeira de *Pinus* ssp. Cinza volante e escória de alto-forno em compósitos cimento-madeira**. *Floresta*, Curitiba, v.12, n.3, p.639-650, jul./set. 2012.

FERREIRA, S. R. **Influência da hornificação na aderência fibra-matriz e no comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Departamento de Tecnologia, Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, p. 129. 2012.

FERREIRA, S. R. **Effect of surface treatments on the structure, mechanical, durability, and bond behavior of vegetable fibers for cementitious composites**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 217. 2016.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood—Chemistry, Ultrastructure, Reactions**. 2nd Edition, Walter de Gruyter, Berlin, 1989.

FERREIRA, S. R. et al. **Characterization of coffee husk (*Coffea Arabica*) and its use in lightweight bio-concrete production**. 5th Brazilian Conference on Composite Materials, 2020.

FREIRE, C.S. et al. **Propriedades físicas de painéis aglomerados comerciais confeccionados com bagaço de cana e madeira**. *Floresta e Ambiente*, [S.l.], v. 18, n. 2, p. 178-185, 2011.

GRUBE, M. et al. **Evaluation of sewage sludge-based compost by FT-IR spectroscopy**. *Geoderma*, v. 130, p. 324-333, 2006.

HOYOS, C. G. **El uso de fibras naturales de fique em sus distintos tamaños jerárquicos em la construcción**. Tesis (Doctorado en Ingeniería) – Instituto de Tecnología y Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Buenos Aires, p. 153. 2013.

KLOCK, U.; ANDRADE, A.S. **Química da madeira**. 4ª edição. Curitiba: UFPR, 2013.

NEUTELINGS, G. **Lignin variability in plant cell walls: contribution of new models**. Plant Sci. 181, p. 379-386, 2011.

PACHLA, E. et al. **Desempenho térmico-acústico-mecânico de um compósito de matriz cimentícia leve reforçado com casca de arroz**. Revista Matéria, v. 24, n. 2, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0669>>. Acesso em: 29 out. 2021.

PARRAVICINI, V. et al. **Evaluating the stabilisation degree of digested sewage sludge: investigations at four municipal wastewater treatment plants**. Water Science & Technology, v. 53, n. 8, p. 81-90, 2006.

RILEM, L. **“Functional classification of lightweight concrete”**. Springer journal collection, v.11, n. 64, pp. 281-283, 1978.

SANTOS, D. O. J. **Desenvolvimento de painéis sanduíches leves com faces em compósitos cimentícios reforçados com fibras curtas de sisal e núcleo em bioconcreto de casca de arroz**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 167. 2020.

SCATOLINO, M.V. et al. **Eucalyptus wood and coffee parchment for particleboard production: physical and mechanical properties**. Ciência e Agrotecnologia, [S.I.], v. 41, n. 2, p. 139-146, 2017.

SMIDT, E. et al. **Characterization of different decomposition stages of biowaste using FT-IR spectroscopy and pyrolysis-field ionization mass spectrometry**. Biodegradation, v. 16, p. 67-79, 2005.

SILVA, D. W. et al. **Addition of Different Proportions of Castor Husk and Pine Wood in Particleboards**. Waste And Biomass Valorization, [S.I.], v. 9, n. 1, p. 139-145, 2018.

SILVA, N. A. **Estudo da aderência bambu-bioconcreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p.129. 2019.

SILVEIRA, M. N. L., et al. **Use of cactus wood *Cereus jamacaru* as aggregate in lightweight bioconcrete production**. 4th Brazilian Conference on Composite Materials, 2018.

SOARES, S. S. et al. **Valorização do bagaço de cana-de-açúcar na produção de painéis aglomerados de baixa densidade**. Revista Ciência da Madeira - Rcm, [S.I.], v. 8, n. 2, p. 64-73, 2017.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **2020 Global Status Report for Buildings and Construction Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector**. Nairobi, 2020. Disponível em: <https://globalabc.org/sites/default/files/inlinefiles/2020%20Buildings%20GSR_FULL%20REPORT.pdf>. Acesso em: 28 out. 2021.

VEGRO, C.L.R.; CARVALHO, F. C. **Disponibilidade e utilização de resíduos gerados no processamento agroindustrial do café.** Informações Econômicas, São Paulo, v.24, n.1, p.9-16, 1994.

TONDI, G.; PETUTSCHNIGG, A. **Middle infrared (ATR FT-MIR) characterization of industrial tannin extracts.** Industrial Crops and Products, v. 65, p. 422-428, 2015.