

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS ARGAMASSAS/FIBRAS NATURAIS E DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS POR IMPRESSÃO 3D

GABRIELA MACHADO GUIMARÃES FERREIRA

Orientador: Prof. Dr. Sebastião Ribeiro

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVOS GERAIS

- a) Avaliar o comportamento mecânico de argamassas reforçadas com fibras de coco, buscando uma melhora das propriedades tecnológicas dos compósitos produzidos.
- b) Avaliar o comportamento à extrusão 3D dos melhores compósitos obtidos no item (a), na perspectiva de uma produção mais limpa.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Produzir compósitos argamassa/fibra variando composições dos constituintes;
- b) Moldar os compósitos em moldes específicos para medida das propriedades mecânicas;
- c) Testar o método da cunha para determinação da energia de fratura dos compósitos (essa técnica não é citada na literatura para esse fim, mas amplamente conhecida, com grande vantagem para concretos civis e refratários);
- d) Testar e implantar a tecnologia 3D para conformação de placas e outras formas dos compósitos visando produção limpa.

2 JUSTIFICATIVA

A indústria da construção civil contribui fortemente para degradação ambiental, porém também possui grande potencial para reutilização de resíduos sólidos, como no reaproveitamento para substituições parciais de matéria prima para confecção de concretos e argamassas. Por outro lado, o aumento da geração de resíduos sólidos sobrecarregou o gerenciamento de materiais como o coco, produto agrícola que pode gerar problemas ambientais quando o descarte do resíduo agroindustrial resultante é feito de forma inadequada.

Diversos estudos analisaram a aplicação das fibras naturais em materiais alternativos da construção civil, onde elas apresentam como vantagem além do custo reduzido, o peso leve, propriedades específicas de resistência aceitáveis, alta tenacidade e melhores propriedades térmicas dos materiais em que são aplicados.

O projeto será dividido em duas etapas, onde inicialmente, serão investigadas as propriedades mecânicas da argamassa reforçada com fibra de coco, afim de determinar o traço ideal para extrusão, Fase 1. Posteriormente, com base nos resultados obtidos na Fase 1, serão desenvolvidos produtos via impressão 3D. Dentre os ensaios tecnológicos o estudo busca a utilização do “Método da cunha” para análise da energia de fratura.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

O aumento dos resíduos sólidos gerados no mundo está diretamente ligado ao processo de urbanização e a relação de consumo da população, que além de demandar maior consumo de recursos naturais pode impactar no acúmulo desses resíduos e consequentemente sobrecarregar a gestão dos mesmos (SILVA *et al.* 2021).

Estudo de Kaza *et al.* (2018) mostra que a geração de resíduos sólidos urbanos em escala global no ano de 2016 chegou a 2,01 bilhões de toneladas, onde o gerenciamento de pelo menos 663,3 milhões traz uma grande insegurança em termos ambientais, além de prever o aumento de 69,15% na quantidade de resíduos gerados até 2050. Apesar de possuírem recursos de processamento de resíduos e infraestrutura adequada, os países desenvolvidos os utilizam de forma indevida, enquanto países subdesenvolvidos e em desenvolvimento sofrem a escassez destes mesmos recursos (DAS *et al.*, 2019).

Dentre os resíduos sólidos sem destinação adequada estão os resíduos agroindustriais, que se tornaram um problema ambiental. Porém quando reaproveitados de maneira correta, como com a reutilização das fibras naturais, possuem características que podem melhorar as propriedades mecânicas dos produtos em que são aplicados (FERREIRA *et al.*, 2021).

As fibras naturais têm como vantagem além do custo reduzido, leveza, propriedades específicas de resistência aceitáveis, alta tenacidade e melhores propriedades térmicas dos materiais em que são aplicados. Dentre esses materiais

são destacados os produtos de construção, automóveis, infraestrutura, artigos esportivos, transporte industrial e aplicações de consumo (WALTE, BHOLE & GHOLAVE, 2020).

O setor da construção possui grande potencial para reutilização de resíduos sólidos, como no reaproveitamento para substituições parciais de matéria-prima para confecção de concretos e argamassas (KRISHNA *et al.*, 2020).

3.2 FIBRA DE COCO

3.2.1 Descarte

Atualmente, em muitos países, os resíduos agrícolas estão se tornando um problema ambiental devido ao seu descarte inadequado (KOCHOVA *et al.*, 2020). O mesocarpo do coco verde é um resíduo agrícola frequentemente encontrado em países de clima tropical como o Brasil, sendo que, quando descartados ou queimados, podem criar problemas para o meio ambiente (LERTWATTANARUK & SUNTIJITTO, 2015).

Segundo a Base estatística da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO STATS, 2020), em 2017 foram produzidas 60.444.228 toneladas de coco no mundo, sendo que a produção no Brasil nesse mesmo ano foi de aproximadamente 2.210.139 toneladas. Percebe-se então a necessidade de redirecionar esse resíduo de maneira produtiva e diminuir o descarte inadequado dos resíduos sólidos provenientes da produção de coco (KUMAR & KESAVAN, 2020).

De acordo com Rosa *et al.* (2001), estima-se que cerca de 80% a 85% do peso bruto do coco verde se torna resíduo a ser descartado. O resíduo é destinado, em grande parte, para aterros sanitários, onde são descartados cerca de 8,6 milhões de toneladas de casca ao ano, o que causa diversos problemas ambientais e diminui a vida útil dos aterros (EMBRAPA, 2018).

3.2.2 Aproveitamento do coco

A compreensão das propriedades do resíduo de coco é importante para o desenvolvimento de compósitos reforçados com esse tipo de fibra. Dentre as características do resíduo de coco estão o baixo custo, alto conteúdo de lignina, baixa densidade, disponibilidade, alto alongamento na ruptura e baixo módulo de elasticidade (ADENIYI *et al.*, 2019).

A aplicação de resíduo de coco em materiais compósitos foi analisada em diversos estudos, como misturas betuminosas (KHASAWNEH e ALYASEEN, 2020), madeira laminada cruzada (SRIVARO *et al.*, 2020), placas isolantes para telhado verde (FABBRI, TRONCHIN e BARBIERI, 2021), preenchimento isolante de painéis sanduiche de fibrocimento (ALAVEZ-RAMIREZ *et al.*, 2012) e concreto armado (WANG e CHOUW, 2017). Segundo Kochova *et al.* (2020), a fibra de coco possui em sua estrutura características com condições térmicas e mecânicas adequadas, podendo proporcionar diversas aplicações na indústria da construção civil.

Para um melhor desenvolvimento de compósitos reforçados com fibras é necessária a compreensão da composição desses materiais, levando em consideração os aspectos químico e físico-mecânico. Segundo Adeniyi *et al.* (2019), quimicamente, as fibras de coco são compostas principalmente por lignina (30 a 46%), hemicelulose (0,15 a 15%) e celulose (32 a 50%). As propriedades físicas da fibra apresentam densidade variando entre 1,1-1,5 g / cm³, Módulo de Young entre 2 e 8 GPa, resistência à tração de 105 a 593 MPa, absorção de água entre 10 e 180% e alongamento na ruptura entre 15 e 51% (ADENIYI *et al.*, 2019).

3.2.3 Tratamento da fibra

A fibra de coco apresenta grande potencial de aplicação na construção civil, porém, em alguns sistemas construtivos que possuem matriz cimentícia, o uso de fibras naturais pode ser um problema, principalmente em relação a durabilidade destes compósitos devido ao pH na região dos poros da matriz (AZEVEDO *et al.*, 2020).

Como alternativa estudos analisam diversos tratamentos químicos aplicados em fibras naturais, dentre eles os tratamentos com matriz alcalina, silano, ácido acético, peróxido de benzoíla, permanganato de potássio, ácido esteárico, isocianato, revestimento de polímero e copolimerização de enxerto (SATHISH *et al.*, 2021).

Segundo Azevedo *et al.* (2021), o tratamento realizado através da imersão da fibra em solução alcalina é um processo de baixo custo que auxilia na melhora das propriedades mecânicas do compósito. De acordo com Prabhu *et al.* (2021), o tratamento alcalino usa principalmente o hidróxido de sódio (NaOH), e por possuir pH entre 6,5% a 8,5% após diluído em água, não afeta o meio ambiente quando descartado. O tratamento altera a natureza hidrofílica da fibra para hidrofóbica, além de ser responsável pelo aumento da resistência do composto de fibra natural devido

a modificação química. Entretanto, deve-se ter atenção a porcentagem de álcali com relação a condição ótima, para não haver dano a fibra (AZEVEDO *et al.*, 2020; PRABHU *et al.*, 2021).

3.3 ARGAMASSA

A argamassa é produto resultante da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes inorgânicos, agregado miúdo e água, que possui propriedades de aderência e endurecimento, podendo ainda conter aditivos (ABNT, 2005e). Dentre as funções da argamassa estão a proteção da estrutura (evitando degradação precoce), reduzir a necessidade de manutenção das construções (durabilidade), auxiliar no isolamento térmico e acústico dos ambientes, segurança ao fogo e melhores acabamentos (SABBATINI, 1986). Conforme observado por Martins *et al.* (2016), diversas pesquisas estão buscando avaliar a viabilidade da incorporação de resíduos não convencionais a argamassas, aliando a redução do impacto ambiental causado pelo descarte inadequado de resíduos a melhora nas propriedades mecânicas do material.

3.3.1 Composição das argamassas

Na composição da argamassa, os dos principais aglomerantes inorgânicos são o cimento, a cal, a cinza volante e a escória de alto-forno (MAKUSA, 2012). O cimento Portland, é um pó fino que em contato com a água produz uma reação de endurecimento, devido a suas propriedades aglutinantes, resultante da mistura de clínquer e de adições. Após endurecido o cimento adquire resistência mecânica e durabilidade, portanto não se decompõe novamente, mesmo que submetido à ação da água (ABCP, 2002). A utilização de cal na mistura auxilia na melhora das propriedades da argamassa, dentre elas, a melhora da trabalhabilidade do material, boa aderência e boa durabilidade (AZEVEDO *et al.*, 2020).

Segundo a NBR 7211 (2009), a argamassa deve ser preparada com o agregado miúdo (areia), podendo ser natural ou artificial, com diâmetro igual ou menor que 4,75mm. As areias podem ser definidas como: Grossa (2,00mm à 0,60mm), Média (0,60mm à 0,20mm) e fina (0,20mm à 0,06mm) segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995). A qualidade do agregado é importante para realizar a coesão entre os grãos de areia e cimento, garantindo, portanto, um bom comportamento da mistura (MARGALHA *et al.*, 2007).

A hidratação da argamassa, de acordo com Mattos (2001), auxilia no endurecimento e ganho de resistência através de uma combinação química, além da melhora da trabalhabilidade da mistura. O endurecimento do cimento é feito através da reação entre o cimento e água, onde a hidratação forma uma microestrutura que influencia no comportamento dos concretos. Os grãos de cimento expostos a água dissolvem, aumentando a concentração de íons na água, saturando a mistura e ocorrendo a precipitação, formando um novo produto, que ao ocupar o espaço da água deixa de ser líquido e passa a se incorporar aos sólidos, aumentando a resistência do material (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Outro fator importante é com relação as propriedades reológicas da pasta de cimento no estado fresco, devido a sua influência na microestrutura da pasta de cimento endurecida. Fenômenos físicos, como retração ou variações na pressão da água dos poros, podem afetar o comportamento no estado fresco e o aspecto estético do material endurecido (CRAIPEAU *et al.*, 2021).

Com o intuito de aperfeiçoar a trabalhabilidade da mistura estudos mostram o uso de superplastificante, o que melhora a reologia do material e facilita a extrusão em caso de argamassas para impressão 3D (CLARAMUNT *et al.*, 2011). Estudo de Xiao *et al.* (2021) obteve como dosagem ideal de superplastificante 0,10% em relação ao aglutinante.

3.4 ARGAMASSA EM IMPRESSÃO 3D

A indústria da construção civil vem buscando se modernizar ao longo dos anos, melhorando, através da aplicação de novas tecnologias, métodos e técnicas, e visando a eficiência e produtividade do setor. Dentre as novas tecnologias aplicadas está a utilização de impressoras 3D de concreto, cujo desenvolvimento visa proporcionar condições de trabalho mais seguras, econômicas, redução do desperdício da construção e arquitetura com formas livres (KHAN, 2020). Porém, para realização da impressão 3D os materiais cimentícios se diferem do concreto convencional em termos de reologia, capacidade de impressão e desempenho mecânico (LU *et al.*, 2019).

Em razão do tamanho do sistema de entrega ser restritivo, não há a utilização de agregado grosso a mistura, portanto, há a substituição do concreto pela argamassa. A argamassa permite um processo mais fluido, permitindo o

bombeamento e a extrusão do material para fora do bico de maneira adequada (LU *et al.*, 2019).

Segundo Xiao *et al.* (2020), as características da argamassa para impressão 3D devem ser: capacidade de extrusão (material fluido suficiente para ser extrudado), capacidade de construção (resistência ao cisalhamento suficiente para resistir à deformação devido ao seu próprio peso e ao peso das camadas impressas acima dela) e janela de imprimibilidade (período que a mistura mantém a fluidez). Na janela de imprimibilidade o material deve ser líquido com pouca aderência enquanto estiver dentro da bomba e do bocal, mas após a extrusão, ele deve sofrer uma transição para um desempenho similar a um sólido com força suficiente para resistir à deformação (RAHUL *et al.*, 2019).

Devido a variação da propriedade física de acordo com a direção da impressão de produtos 3D, a preparação das amostras deve ser feita considerando a orientação das camadas a serem impressas (XIAO *et al.*, 2020).

A possibilidade de controle da direção da impressão aliada ao uso de fibras como reforço na argamassa surge como forma de aumentar a resistência, tenacidade e integridade das estruturas impressas em 3D (WENG *et al.*, 2018). Ao alinhar as fibras é possível obter o controle da orientação das mesmas dentro da estrutura impressa, estruturando as amostras de maneira a realizar uma combinação de resistência e eficiência dos materiais (HAMBACH e VOLKMER, 2017).

3.5 ENERGIA DE FRATURA E MÉTODO DA CUNHA

A energia de fratura é uma propriedade de grande importância no estudo do comportamento mecânico dos materiais, onde é possível avaliar a integridade estrutural de seus componentes, particularmente no desenvolvimento e propagação de trincas (MOLITERNO, 2013).

Para determinação da energia de fratura é frequentemente utilizado o método da barra prismática entalhada, flexionada em três pontos, porém, não representa a microestrutura do material de maneira adequada quando comparado as dimensões do corpo de prova de materiais frágeis. Para realizar a caracterização de acordo com o material, passou-se a aplicar o Método da Cunha, onde é realizado uma caracterização mecânica de fratura mais rigorosa, com amostras em maiores dimensões, conforme às características de sua microestrutura (RIBEIRO, EXPOSITO E RODRIGUES, 2008).

Segundo Vargas, Canto e Hild (2021), o teste de energia de fratura, feito através do Método da Cunha, uma força vertical que é transmitida para os roletes gerando uma força horizontal, cerca de 5,71% menor que a força vertical, onde o ângulo da cunha influencia a força aplicada. Sendo assim, há um menor armazenamento de energia elástica na estrutura de ensaio, o que permite que ocorra uma propagação de trinca estável em materiais frágeis. Os ensaios de tração uniaxial não são adequados para materiais do tipo frágil, pois sua fragilidade pode levar à fratura nas garras além de falha repentina após o início de uma trinca (VARGAS, CANTO E HILD, 2021).

Materiais cerâmicos frequentemente possuem fratura do tipo frágil devido as ligações iônicas ou covalentes encontradas em sua estrutura, que proporciona pouco ou nenhum deslizamento de planos cristalinos. Portanto, a aplicação do teste da cunha em argamassas permite um resultado melhor de acordo com a propriedade do material (MOLITERNO, 2013).

Segundo Ribeiro (2015), na figura 1 pode-se perceber como a força aplicada trabalha sobre o corpo de prova, sendo reduzida devido ao efeito da Cunha, e como o ângulo influencia na força transmitida através da equação 1, onde F_m representa a força aplicada e F_h representa a força transmitida para a amostra:

$$F_H = \frac{F_m}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

Equação 1

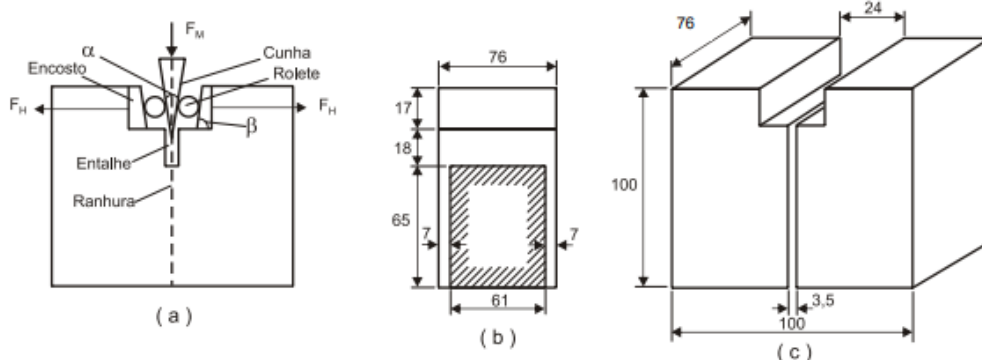


Figura 1: a) Disposição dos suportes, roletes e da cunha no corpo de prova; b) Seção transversal do corpo de prova mostrando o entalhe e os sucros laterais; c) Geometria com as dimensões da amostra em milímetros.

Fonte: Ribeiro (2015)

3.6 HISTÓRICO DE TRABALHOS

Informações de diferentes estudos referentes ao uso de resíduos na fabricação de argamassa foram sintetizadas da tabela 1 com o intuito de permitir uma análise comparativa de diversos fatores de sua produção.

Tabela 1: Síntese de estudos de argamassa com adição de resíduos

| Autor (ano) | Cimento | Aditivo | Traço | Resíduo | % de resíduo |
|--------------------------------|-----------|------------------------|--|-----------------------------------|--|
| Moreno, Ribeiro e Saron (2020) | CP III | - | 1: 2,75: 0,48 (cimento:areia:água) | Borracha de pneu | até 10% em peso. |
| Azevedo <i>et al.</i> (2021) | CP II-E32 | Cal hidratada tipo III | 1: 1: 6 (cimento:cal: areia) | Fibras do açaí | 1,5%, 3,0% e 5,0% sobre a massa de cimento. |
| Azevedo <i>et al.</i> (2020) | CP II-E32 | Cal hidratada tipo III | 1: 1: 6 (cimento:cal:areia) | Fibras de abacaxi | 0, 2,5, 5, 7,5 e 10% sobre a massa de cimento. |
| Claramunt <i>et al.</i> (2011) | Tipo I | Super plastificante | 1: 1: 0,4 (cimento:areia: água) | Polpa kraft ou linters de algodão | 30 g de fibras secas. |
| Liu <i>et al.</i> (2022) | - | Sílica ativa | 1: 2,1: 0,37: 0,05 (cimento:areia: água:sílica) | Cinza de lama de alumínio | 0, 10, 20 e 30% em peso do cimento. |

Fonte: Autora

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para atender a demanda sustentável da construção, junto com a necessidade de reaproveitamento de resíduos, estudos passaram a analisar a aplicação das fibras naturais em materiais de construção.

Os resíduos do coco verde, apesar de orgânicos, são prejudiciais a vida útil de aterros e lixões devido a sua difícil degradação e grande volume ocupado. Além disso, esses resíduos dispõem de amplo potencial não aproveitado, por possuírem alta disponibilidade, baixa densidade e boas características mecânicas quando transformados em fibras. Estudos demonstram que a fibra de coco tem potencial de aperfeiçoar as características de compósitos cimentícios. Portanto, é possível aliviar o passivo ambiental causado pelo rejeito de coco e consequentemente melhorar a eficácia mecânica de argamassas.

Argamassas modificadas com fibras naturais apresentam melhora em suas propriedades tecnológicas, desse modo, espera-se que, a adição de fibra de coco a mistura da argamassa apresente uma melhora nas propriedades de resistência à tração, compressão e durabilidade, além do aumento da tenacidade à fratura. Logo, a fibra deve funcionar como um reforço da argamassa. Deve deixar claro que

normalmente as argamassas trincam e com esse reforço espera-se mitigar esse conhecido problema.

O uso de fibras em materiais compósitos tende a melhorar a resistência a fratura, portanto, espera-se que ocorra uma melhora na tenacidade do material devido a adição de fibra de coco a mistura. Os ensaios de energia de fratura propostos na literatura são através da flexão de barras, porém, devido a fragilidade de materiais cerâmicos o teste da cunha se torna ideal para medir a propagação de trincas (tenacidade).

Entretanto, ainda são necessários estudos que buscam avaliar a influência da adição de fibra de coco a materiais de construção. Dessa forma, objetiva-se com o presente trabalho melhorar as propriedades mecânicas de argamassas produzidas com a incorporação de fibra de coco, além de oferecer uma alternativa adequada a destinação desse resíduo. A impressão 3D tem como objetivo, com o auxílio da tecnologia, estudar uma perspectiva construtiva mais limpa, com condições de trabalho mais seguras, econômicas e maior liberdade arquitetônica.

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a produção das argamassas será utilizado o Cimento Portland tipo II (CPII E 32), com adição de escória de alto forno, um cimento amplamente utilizado na indústria da construção e comercializado na região. Será adotada a cal hidratada do tipo III, composta por hidróxidos de cálcio e magnésio, com alto grau de finura, de acordo disponibilidade na região.

A areia fina proveniente de leito de rio deverá ser adquirida em uma loja de material de construção no município de Lorena/SP, lavada e ensacada. Posteriormente a areia deverá ser seca ao ar no Laboratório do DEMAR.

A fibra terá como origem a indústria de reaproveitamento de coco verde, onde o resíduo de coco tem a fibra extraída, lavada para retirada dos sais, seca e posteriormente embalada. O resíduo deverá ser retirado da embalagem, distribuído em uma superfície plana limpa e seco ao ar.

O aditivo utilizado será um superplastificante de pega acelerada, comprado com fornecedor local, que atuará através da adsorção superficial, da separação das partículas de aglomerante e auxiliando a melhoria do comportamento na fluidez, no lançamento e na compactação.

Para a mistura será utilizada água potável coletada na rede do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR) da Escola de Engenharia de Lorena (EEL), proveniente de poço próprio de abastecimento do DEMAR.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

A realização dos ensaios de caracterização dos agregados deve anteceder o preparo das argamassas, sendo de alta relevância, para melhor compreensão da natureza do material e permitindo uso adequado dos mesmos na aplicação em compósitos. Portanto, o estudo irá realizar uma análise de diferentes aspectos da areia e da fibra de coco, que serviram de base para produção das misturas.

4.1.1 Areia

A análise granulométrica da areia (agregado miúdo) deverá ser feita com base na NBR NM 248 (2003), utilizando uma série de peneiras com abertura de malha de 75 mm à 150 μ m. As características apresentadas através dos resultados da análise podem influenciar as propriedades das argamassas produzidas, dentre elas a trabalhabilidade, resistência mecânica e permeabilidade. Além disso, a granulometria da areia é importante por auxiliar a evitar a perda de água da mistura e consequentemente impedir o surgimento de trincas e rachaduras.

4.1.2 Fibra de coco

A caracterização da fibra será realizada em duas etapas, onde inicialmente deverá ser analisada a fibra de coco sem nenhum tratamento e posteriormente a fibra tratada com hidróxido de sódio. Inicialmente serão analisadas as características físicas da fibra, abrangendo densidade real, umidade, absorção, comprimento, diâmetro e módulo de elasticidade. Quanto a resistência mecânica à tração, deverá ser determinada por tração axial dos feixes fibrosos utilizando a Máquina Universal de Ensaio.

A análise das características morfológicas e químicas da fibra deverá ser realizada através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando o recobrimento com metal (ouro) para revestir e proteger a fibra, evitando danos a sua microestrutura e permitindo uma imagem bem definida. Com relação aos grupos funcionais e ligações presentes na amostra, será necessária a utilização de uma espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier, disponível no DEMAR.

4.2 TRATAMENTO DA FIBRA DE COCO

O tratamento será realizado através do uso de uma solução alcalina de hidróxido de sódio, que além de possuir fácil aplicação possui um baixo custo, melhora as propriedades mecânicas e a durabilidade da fibra. O tratamento consiste na utilização de uma solução de hidróxido de sódio a 6% diluído em água destilada, onde as fibras são submersas por 30 min em temperatura ambiente e depois neutralizadas com HCl até o pH da solução se aproximar de 7. Posteriormente as fibras deverão ser lavadas com água corrente e purificadas, o efluente será neutralizado e descartado na rede de esgoto e as fibras serão secas à temperatura ambiente.

3.5 PREPARO DA ARGAMASSA

A produção das argamassas deverá ser realizada conforme o recomendado pela NBR 13276 (ABNT, 2016). Serão preparados quatro traços diferentes, o Traço 01 com relação de 1: 1: 6 (cimento: cal hidratada: areia) em relação ao volume, Traço 02 com relação de 1: 1: 3 (cimento: cal hidratada: areia) em relação ao volume, Traço 03 (Traço 01 + aditivo) e Traço 04 (Traço 02 + aditivo). O fator água/aglomerante será mantido em 0,65, possuindo com objetivo garantir a trabalhabilidade da argamassa.

A mistura será feita através do uso de um misturador mecânico de movimento planetário, onde inicialmente será realizada a mistura do traço de referência (areia, cal hidratada, cimento e água), conforme a dosagem estabelecida. Posteriormente, ocorrerá a incorporação de fibra a mistura, em cada um dos diferentes traços, que não substituirá nenhum componente dos traços base, e sua proporção será de 0% (referência), 2,5%, 5% e 10% em relação ao volume de cimento.

3.5.1 Método de moldagem e cura

Na primeira etapa (Fase 1) serão moldados os corpos de prova nas dimensões 40 x 40 x 160 mm de acordo com a NBR 13279 (2005), utilizando moldes prismáticos metálicos. Os moldes deverão ser colocados na mesa de consistência, para o espalhamento ideal da argamassa. Em seguida, com o auxílio de uma régua metálica, a superfície é planificada e eliminado os excessos de argamassa nas bordas. Para os ensaios de energia de fratura, utilizando o método da cunha, serão moldadas amostras retangulares nas dimensões de 100 x 100 x 75 mm, onde a argamassa será despejada em um molde com dispositivos para gerar entalhe e ranhuras.

Os moldes devem ser colocados em local plano com temperatura controlada para cura ao ar. Após o tempo mínimo de 24 horas os corpos de prova deverão ser retirados do molde e levados para o tanque de cura. A cura será realizada por 28 dias em um tanque (reservatório) contendo água potável saturada com cal mantida em ambiente controlado, de acordo com o estabelecido pela NBR 9479 (ABNT, 2006).

Na fase 1 serão necessários para cada um dos traços (1,2,3 e 4) o quantitativo de 10 unidades de corpos de prova para cada fração de fibra estudada, totalizando 160 amostras nas dimensões 40 x 40 x 160 mm. Para os ensaios de energia de fratura, para cada traço, serão necessárias 5 unidades de corpos de prova por fração de fibra, totalizando 80 amostras.

Na segunda etapa (Fase 2) serão desenvolvidos os produtos de impressão 3D, utilizando a impressora 3D de materiais cerâmicos para produção dos corpos de prova paralelepípedicos nas dimensões 40 x 40 x 160 mm e cúbicos nas dimensões 40 x 40 x 40 mm. Parâmetros de impressão como medidas, velocidade e direção serão definidos através do sistema de controle da impressora.

Os prismas retangulares serão impressos em laboratório, inicialmente serão mantidos por 1 dia em ambiente úmido e posteriormente levadas para cura. A cura deverá ser realizada conforme a cura da Fase 1, de acordo com a NBR 9479 (ABNT, 2006), aos 28 dias de idade.

Devido a influência da orientação das camadas dos corpos produzidos em impressora 3D nas propriedades mecânicas dos mesmos, serão consideradas três orientações diferentes (X, Y e Z), conforme a figura 2.

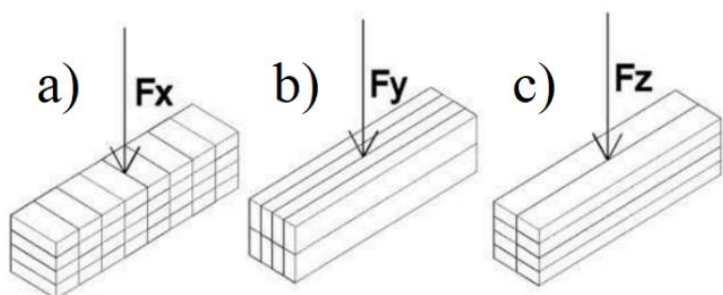


Figura 2: Orientação da confecção dos corpos de prova – a) Orientação X b) Orientação Y c) Orientação Z

Fonte: Adaptado Xiao *et al.* (2021)

O traço a ser utilizado na Fase 2 será definido conforme os resultados apresentados pela Fase 1 de estudo, sendo assim, o quantitativo de corpos de prova a serem utilizados estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Quantitativo de corpos de prova

| Traço | Orientação da confecção (Unidades) | | | | | |
|-----------|------------------------------------|----------|----------|------------|------------|------------|
| | Prisma X | Prisma Y | Prisma Z | Quadrado X | Quadrado Y | Quadrado Z |
| a definir | 10 Unid. | 6 Unid. | 3 Unid. | 6 Unid. | 6 Unid. | 6 Unid. |

Fonte: Autora

3.6 CARACTERIZAÇÃO

3.8.1 Ensaio de consistência

O ensaio será realizado de acordo com a NBR 13.276 (ABNT, 2016), afim de verificar a trabalhabilidade da argamassa através de análise do espalhamento em seu estado fresco. São utilizados para o ensaio uma mesa de fluidez para refratário, molde de ferro tronco-cônico, soquete metálico e régua metálica. O ensaio permite, portanto, o estabelecimento da proporção ideal entre água e material seco.

3.8.2 Determinação da densidade de massa no estado fresco

A densidade das amostras será calculada conforme o recomendado pela NBR 13.278 (ABNT, 2005a). O ensaio será feito com o uso de um cilindro metálico, onde a argamassa deve ser colocada, devidamente adensada e nivelada com régua metálica.

3.8.3 Determinação da densidade de massa no estado endurecido

A densidade aparente é encontrada conforme procedimento recomendado pela a NBR 13.280 (ABNT, 2005b). O ensaio consiste na medição das dimensões dos corpos de prova prismáticos após o processo de cura (28 dias) e posteriormente calculada a densidade de massa no estado endurecido de cada tratamento.

3.8.4 Absorção de água por capilaridade

O ensaio será realizado de acordo com a NBR 15259 (ABNT, 2005c), a fim de determinar, através de um processo de infiltração, a absorção de água do material. Após o processo de cura (28 dias), as amostras serão colocadas em estufa até obter constância de massa, posteriormente devem ser parcialmente imersos em água, e a massa será determinada aos 10 minutos e aos 90 minutos com o auxílio de uma balança de precisão.

3.8.4 Resistência à compressão axial

A determinação da compressão axial dos materiais será feita através do ensaio realizado conforme determinado pela NBR 13.279 (ABNT, 2005d). As amostras serão colocadas, aos 28 dias de idade, em uma máquina universal de ensaios eletromecânica onde será aplicada a carga continua até a ruptura do material. Posteriormente serão calculadas as médias de resistência individuais de cada mistura de argamassa.

3.9.2 Resistência à tração na flexão

O ensaio será realizado de acordo com a NBR 13.279 (ABNT, 2005d), onde as argamassas serão caracterizadas conforme a resistência a tração na flexão em três pontos, levando em consideração a capacidade de suportar cargas das mesmas. O procedimento consiste no corpo de prova prismático, após o período de cura de 28 dias, apoiado sobre dois pontos, em uma máquina universal de ensaios eletromecânica. O resultado final é obtido através da média das resistências individuais.

3.9.7 Energia de fratura

Para obtenção de um resultado que reflete o comportamento mecânico mais realista das argamassas é importante a realização do ensaio de energia de fratura. Através do ensaio utilizando o “método de cunha” é possível converter a força axial aplicada em forças de divisão intensificadas, o que leva a uma menor energia elástica armazenada na estrutura de teste, levando a propagação estável de trincas. O ensaio consiste na utilização de corpos de prova nas dimensões de 100 x 100 x 75 mm, onde a argamassa colocada em um molde com entalhe e ranhuras. As amostras são retiradas do molde após 24 horas e levadas para o tanque de cura por mais 27 dias. O ensaio será realizado em temperatura ambiente, onde as bases das amostras deverão ser niveladas, colocadas em um dispositivo contendo os suportes, os roletes e a cunha e posteriormente colocada na máquina de testes mecânicos.

3.7 ESTATISTICA

Para análise de dados será utilizado o teste de hipótese da análise de variância (ANOVA), procedimento usado com o intuito de comparar a distribuição das amostras dos testes de resistência a compressão e absorção. O método de Tukey ($p < 0,05$)

determinará se há diferença significativa entre as médias. A análise de regressão linear simples e hipótese de correlação estabelecerá, utilizando a análise de variância, se existe correlação entre a fração de fibra e os resultados dos ensaios.

5 ORIGINALIDADE

O presente estudo tem como ponto principal quanto a originalidade do projeto o fato de estar focado na avaliação da energia de fratura dos compósitos produzidos utilizando do método da cunha. Apesar de ser um tema amplamente conhecido na área de refratários, como para concretos e para argamassas, quando aplicado a área de materiais para construção civil é pouco estudado. Outro fator de originalidade no setor da construção é a utilização de impressão 3D para produção de componentes para construção civil, e nesse projeto pretende-se desenvolver protótipos de compósitos argamassa/fibra por essa tecnologia que já é amplamente conhecida para polímeros e metais.

6 RECURSOS NECESSÁRIOS

O Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAR) da Escola de Engenharia de Lorena (EEL) possui todos os equipamentos necessários em seus laboratórios. Os custos relativos dos materiais a serem utilizados são baixos e o orientador ficará responsável pelas futuras aquisições. Além disso, o orientador tem facilidade de desenvolver atividades em outras instituições como DCTA, IMPE e UFSCar, caso necessário.

7 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

Tabela 3: Cronograma físico de atividades do projeto de pesquisa em trimestres.

[illegible]

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|--|--|--|--|---|---|---|---|---|---|---|--|---|---|---|---|
| Ensaaios dos corpos de prova (Fase 1) | | | | | | X | X | | | | | | | | | | |
| Resultados e discussões (Fase 1) | | | | | | | X | X | | | | | | | | | |
| Impressão 3D da argamassa (Fase 2) | | | | | | | | X | X | | | | | | | | |
| Cura dos corpos de prova 3D (Fase 2) | | | | | | | | X | X | | | | | | | | |
| Ensaaios mecânicos 3D (Fase 2) | | | | | | | | | X | X | | | | | | | |
| Sistematização e discussão dos resultados (Fase 1 e 2) | | | | | | | | | | X | X | X | | | | | |
| Elaboração de artigos para congressos e publicações em periódicos | | | | | | | | | | | | | | X | X | X | X |
| Elaboração e defesa da tese | | | | | | | | | | | | | | X | X | X | X |

8 REFERÊNCIAS

ADENIYI, A. G.; ONIFADE, D. V.; IGHALO, J. O.; ADEOYE, A. S. A review of coir fiber reinforced polymer composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 176, 2019.

ALAVEZ-RAMIREZ, R.; CHIÑAS-CASTILLO, F.; MORALES-DOMINGUEZ, V.J.; ORTIZ-GUZMAN, M. Thermal conductivity of coconut fibre filled ferrocement sandwich panels. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 425–431, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Guia básico de utilização do Cimento Portland**. 7ªed. São Paulo, 28p., 2002. ISBN 85-87024-23-X

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 1995). **NBR 6502**: Rochas e Solos – Terminologia, Confirmada: 2018. Rio de Janeiro, 9p., 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2003). **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 6p., 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2005a). **NBR 13.278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, Confirmada: 2018. Rio de Janeiro, 4p., 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2005b). **NBR 13.280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido, Confirmada: 2018. Rio de Janeiro, 2p., 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2005c). **NBR 15.259**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade, Confirmada: 2018. Rio de Janeiro, 3p., 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2005d). **NBR 13.279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, Confirmada: 2018. Rio de Janeiro, 9p., 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2005e). **NBR 13.281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos, Confirmada: 2018. Rio de Janeiro, 7p., 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2006). **NBR 9479:** Argamassa e concreto - Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova, Confirmada: 2019. Rio de Janeiro, 2p., 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2009). **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação, Confirmada: 2019. Rio de Janeiro, 9p., 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT, 2016). **NBR 13.276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência, Confirmada: 2020. Rio de Janeiro, 2p., 2016.

AZEVEDO, A.R.G.; MARVILA, M. T.; TAYEH, B. A.; CECCHIN, D.; PEREIRA, A. C.; MONTEIRO, S. N. Technological performance of açai natural fibre reinforced cement-based mortars. **Journal of Building Engineering**, p.101675, 2020.

AZEVEDO, A.R.G.; MARVILA, M. T.; ZANELATO, E. B.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G. C.; CECCHIN, D.; Development of mortar for laying and coating with pineapple fibers. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.24, n.3, p.187-193, 2020.

CRAIPEAU, T.; PERROT, A.; TOUSSAINT, F.; HUET, B.; LECOMPTE, T. Mortar pore pressure prediction during the first hours of cement hydration. **Cement and Concrete Composites**, v. 119, 103998p., 2021.

DAS, S.; LEE, S. H.; KUMAR, P.; KIM, K.; LEE, S. S.; BHATTACHARYA, S. S. Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability. **Journal of the Cleaner Production**, v. 228, p. 658-678, 2019.

EMBRAPA. **Produção e comercialização de coco no Brasil frente ao comércio internacional: panorama 2014.** Carlos Roberto Martins - Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2013. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/214995/1/Cap21-EvolucaoProducaoCoco.pdf> Acesso em: 05 nov. 2021.

FABBRI, K.; TRONCHIN, L.; BARBIER, F. Coconut fibre insulators: The hygrothermal behaviour in the case of green roofs. **Construction and Building Materials**, v. 266, 121026 p., 2021.

FERREIRA, G.M.G.; CECCHIN, D.; AZEVEDO, A.R.G. DE; VALADÃO, I.C.R.P.; COSTA, K.A.; SILVA, T.R.; FERREIRA, F.; AMARAL, P.I.S.; HUTHER, C.M.; SOUSA, F.A.; CASTRO, J.O.; FERRAZ, P.F.P.; TEIXEIRA, M.A. Bibliometric analysis on the use of natural fibers in construction materials. **Agronomy Research**, v. 19, p.1-12, 2021.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO STATS). **Production Quatity. Coconuts (2020).** Acessado em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> em 22/07/2020

HAMBACH, M.; VOLKMER, D. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. **Cement and Concrete Composites**, v.79, p. 62-70, 2017.

KASA, S., YAO, L., BHADA-TATA, WOERDEN, P. F. V. What a Waste 2.0 – A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. **World Bank Group**, 2018. ISBN 978-1-4648-1329-0

KHAN, M. A. Mix suitable for concrete 3D printing: A review. **Materials Today: Proceedings**, v.32, p. 831-837, 2020.

KHASAWNEH, M. A.; ALYASEEN, S. K. Analytic methods to evaluate bituminous mixtures enhanced with coir/coconut fiber for highway materials. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, p. 1752–1757, 2020.

KOCHOVA, K.; GAUVIN, F.; SCHOLLBACH, K.; BROUWERS, H. J. H. Using alternative waste coir fibres as a reinforcement in cement-fibre composites. **Construction and Building Materials**, v. 231, 2020.

KRISHNA, R.S.; MISHRA, J.; MEHER, S.; DAS, S. K.; MUSTAKIM, S.M.; SINGHA, S. K. Industrial solid waste management through sustainable green technology: Case study insights from steel and mining industry in Keonjhar, India. **Construction and Building Materials**, v. 33, p. 5243-5249, 2020.

KUMAR, G.B.R.; KESAVAN, V. Study of structural properties evaluation on coconut fiber ash mixed concrete. **Materials Today: Proceedings**, v.22, 2019.

LERTWATTANARUK, P.; SUNTIJITTO, A. Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 664–669, 2015.

LU, B.; WENG, Y.; LI, M.; QIAN, Y.; LEONG, K. F.; TAN, M. J.; QIAN, S. A systematical review of 3D printable cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v.207, p. 477-490, 2019.

MAKUSA, G. P. **Soil stabilization methods and materials: in engineering practice**. State of the art review, 2012.

MARGALHA, M. G.; VEIGA, R. V.; BRITO, J. Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea. APFAC, **2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção**. Lisboa – Portugal, 2007. Acesso em 27 out. 2021. Disponível em: <http://conservarcal.inec.pt/pdfs/GORETI_Areia_APFAC.pdf>

MARTINS, A. F.; CALLEJAS, I. J. A.; DURANTE, L. C.; ROSSETI, K. DE A. C.; LOUZICH, K. M. D.; CARDOSO, A. A. Condutividade térmica de argamassas de revestimento: uma revisão sistemática. In: **XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. São Paulo. 2016.

MATTOS, L. R. S. **Identificação e caracterização das argamassas para revestimento externo utilizadas na cidade de Belém-PA**. Porto Alegre, 2001. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Ibracon, 2008. 674 p.

MOLITERNO, E.C.B.S. **Estudo do posicionamento do dispositivo de teste utilizada no ensaio de propagação estável da trinca pelo método de cunha e da influência do tamanho do agregado nos resultados de medida de energia de fratura utilizando o**

método de cunha e o da barra entalhada e flexionada. Lorena - SP, 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo.

PRABHU, L.; KRISHNARAJ, V.; SATHISH, S.; GOKULKUMAR, S.; KARTHI, N.; RAJESHKUMAR, L.; BALAJI, D.; VIGNESHKUMAR, N.; ELANGO, K. S. A review on natural fiber reinforced hybrid composites: chemical treatments, manufacturing methods and potential applications. **Materials Today: Proceedings**, v.45, p. 8080-8085, 2021.

RAHUL, A.V.; SANTHANAM, M.; MEENA, H.; GHANI, Z. 3D printable concrete: Mixture design and test methods. **Cement and Concrete Composites**, v.97, p. 13-23, 2019.

RIBEIRO, G. C. **Investigação da propagação estável de trinca pelo método da cunha em refratários: tijolo e concreto.** 2014. 147p. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2015.

ROSA, M.F; SANTOS, F.J.S.; MONTENEGRO, A.A.T.; ABREU, F.A.P.; CORREIA, D; ARAUJO, F.B.S.; NORÕES, E.R.V. Caracterização do pó da casca de coco verde usado como substrato agrícola. Fortaleza: **Embrapa Agroindústria Tropical**, 2001. 6 p. (Comunicado Técnico, 54).

SABBATINI, F. H. Argamassas de assentamento para paredes de alvenaria estrutural. **Boletim Técnico 02/86.** EPUSP. São Paulo, 1986.

SATHISH, S.; KARTHI, N.; PRABHU, L.; GOKULKUMAR, S.; BALAJI, D.; VIGNESHKUMAR, N.; AJEEM FARHAN, T.S.; AKILKUMAR, A.; DINESH, V.P. A review of natural fiber composites: Extraction methods, chemical treatments and applications. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 8017-8023, 2021.

SILVA, T. R. da; AZEVEDO, A. R. G.; CECCHIN, D.; MARVILA, M. T.; AMRAN, M.; FEDIUK, R.; VATIN, N.; KARELINA, M.; KLYUEV, S.; SZELA, M. Application of Plastic Wastes in Construction Materials: A Review Using the Concept of Life-Cycle Assessment in the Context of Recent Research for Future Perspectives. **Materials**, v. 14, p. 3549, 2021.

SRIVARO, S.; TOMAD, J.; SHI, J.; CAI, J. Characterization of coconut (Cocos nucifera) trunk's properties and evaluation of its suitability to be used as raw material for cross laminated timber production. **Construction and Building Materials**, v. 254, 119291 p. 2020.

WALTE, A. B.; BHOLE, K.; GHOLAVE, J. Mechanical Characterization of Coir Fiber Reinforced Composite. **Materials Today: Proceedings**, v. 24, p. 557-566, 2020.

WANG, W.; CHOUW, N. The behaviour of coconut fibre reinforced concrete (CFRC) under impact loading. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 452–461, 2017.

WENG, Y.; LI, M.; LIU, Z.; LAO, W.; LU, B.; ZHAN, D.; TAN, M. J. Printability and fire performance of a developed 3D printable fibre reinforced cementitious composites under elevated temperatures. **Virtual and Physical Prototyping**, v.14, p. 284-292, 2018.

XIAO, J.; ZOU, S.; DING, T.; DUAN, Z.; LIU, Q. Fiber-reinforced mortar with 100% recycled fine aggregates: A cleaner perspective on 3D printing. **Journal of Cleaner Production**, v. 319, n.15, 128720p., 2021.

XIAO, J.; ZOU, S.; YU, Y.; WANG, Y.; DING, T.; ZHU, Y.; YU, J.; LI, S.; DUAN, Z.; WU, Y.; LI, L. 3D recycled mortar printing: System development, process design, material properties and on-site printing. **Journal of Building Engineering**, v. 32, 13p., 2020.