

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
CENTRO DE CIÊNCIAS DO AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIAS DO AMBIENTE E
SUSTENTABILIDADE NA AMAZÔNIA**

GESSICA ZILA BATISTA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO
PRODUZIDOS COM FIBRAS VEGETAIS CULTIVADAS NO BRASIL – SISAL,
JUTA E MALVA**

Manaus

2022

GESSICA ZILA BATISTA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO
PRODUZIDOS COM FIBRAS VEGETAIS CULTIVADAS NO BRASIL – SISAL,
JUTA E MALVA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia, da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia.

Orientador: Dr. Neliton Marques da Silva

Coorientador: Dr. João de Almeida Melo Filho

Manaus

2022

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S237a Santos, Gessica Zila Batista dos
Avaliação do ciclo de vida de materiais de construção produzidos com fibras vegetais cultivadas no Brasil – sisal, juta e malva / Gessica Zila Batista dos Santos . 2022
109 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Neliton Marques da Silva
Coorientador: João de Almeida Melo Filho
Tese (Doutorado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Avaliação do ciclo de vida. 2. Sustentabilidade. 3. Fibras vegetais. 4. Materiais de construção. 5. Economia circular. I. Silva, Neliton Marques da. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

GESSICA ZILA BATISTA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO
PRODUZIDOS COM FIBRAS VEGETAIS CULTIVADAS NO BRASIL – SISAL,
JUTA E MALVA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia, da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia.

Orientador: Dr. Neliton Marques da Silva

Coorientador: Dr. João de Almeida Melo Filho

Aprovada em 25 de abril de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Neliton Marques da Silva – Presidente (Universidade Federal do Amazonas)

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos (Universidade Federal do Amazonas)

Profa. Dra. Andrea Viviana Waichman (Universidade Federal do Amazonas)

Prof. Dr. Genilson Pereira Santana (Universidade Federal do Amazonas)

Prof. Dr. Lucas Rosse Caldas (Universidade Federal do Rio de Janeiro)

Prof. Dr. Rafael Lima Medeiros (Universidade Paulista)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu Deus pela vida e todas as conquistas imerecidas.

A minha família pelo respeito, consideração e colaboração para a realização deste trabalho.

À CAPES pela bolsa de pesquisa que me permitiu desenvolver este trabalho.

Ao meu orientador, professor Neliton, por contribuir para a concretização deste trabalho.

Ao meu coorientador, professor João, por acreditar no meu potencial e por tantos conselhos.

Ao professor Lucas Caldas, da UFRJ, por me ajudar a destravar este trabalho, bastante prejudicado pela pandemia de COVID-19.

Ao meu primeiro orientador, professor Antônio Carlos Witkoski e seu grupo de pesquisa NEIAM, que me acolheram e me ajudaram a desenvolver meu projeto de tese preliminar.

Ao sr. Sebastião Guerreiro da SEPROR, que passou contatos e informações imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Ao gerente Robson e à engenheira Flaviane, da Castanhal, pela gentileza, paciência e pelo fornecimento de dados sobre a produção do tecido de juta e malva.

À sra. Vera da COOPERJUTA, ao sr. Silas, atravessador de fibras de juta e malva, e ao jovem juiticultor e malvicultor Davi, pelas valiosas informações prestadas.

Ao professor Guillaume Marchand, por me apresentar a ferramenta de ACV em sua disciplina Indicadores de Sustentabilidade (PPGCASA-UFAM), que me deu este insight, posteriormente transformado em minha tese.

Ao sr. Felipe, representante da *PRé Sustainability* no Brasil, por disponibilizar gratuitamente o software SimaPro, versão *Faculty*, que permitiu a modelagem dos dados de ACV.

Ao Tijolo (Sr. Carlos), voluntário na secretaria do PPGCASA, por tantas e tantas vezes que me ajudou a resolver as burocracias.

Às amigas que fiz nas turmas de doutorado e de mestrado do PPGCASA 2018, especialmente minha grande amiga Artemízia Rodrigues Sabino.

RESUMO

Para evidenciar os impactos ambientais gerados por produtos, desde a extração de matérias-primas até sua disposição final, existe uma ferramenta cientificamente aceita denominada Avaliação do Ciclo de Vida – ACV. Para além do desempenho técnico, o objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho ambiental de materiais compósitos produzidos com fibras vegetais cultivadas no Brasil – sisal, juta e malva. O estudo foi delimitado em 1 m² de compósito para viabilizar a modelagem de uma cadeia produtiva teórica e a utilização da ferramenta ACV. Usando os métodos ReCiPe 2016 Midpoint/Endpoint e EN 15804, o desempenho ambiental dos materiais foi estudado sob diferentes cenários. Primeiramente, como alternativa a compósitos produzidos com matriz de cimento Portland, foi desenvolvido um compósito com matriz geopolimérica à base de resíduo e reforço com fibras de sisal. A durabilidade desse produto foi avaliada por meio de ciclos de molhagem e secagem, pois, geralmente, quanto maior a vida útil de um material, mais significativos serão os seus benefícios ambientais. Em seguida, o desempenho ambiental desse compósito geopolimérico foi comparado ao de um compósito com matriz de cimento Portland, sendo ambos os materiais reforçados com fibras de sisal. Pelos métodos ReCiPe 2016 Midpoint/ Endpoint e EN 15804, os resultados foram convergentes: o compósito com matriz cimentícia possui menores impactos ambientais. No compósito com matriz cimentícia, os responsáveis pela maior parte da carga ambiental foram a produção do cimento e o processo de transporte. No compósito geopolimérico, os resultados evidenciaram que o ativador alcalino à base de hidróxido de potássio é majoritariamente o componente mais impactante, seguido pelo processo de transporte. Considerando que transportar matérias-primas por longas distâncias eleva a carga ambiental dos produtos, inferiu-se que, do ponto de vista ambiental, seria mais vantajoso produzir o compósito com matriz cimentícia e substituir as fibras de sisal, cultivadas no Nordeste brasileiro, pelas fibras de juta e malva, cultivadas na Amazônia brasileira, onde este estudo foi realizado. Nesse contexto, por fim, as fibras de juta e malva foram avaliadas como reforço do compósito sob duas perspectivas: uma sem processamento e outra na forma de tecido. Desse modo, constatou-se que se as fibras fossem usadas sem processamento algum, sendo obtidas de uma cidade próxima à Manaus, a redução de impactos relacionados ao reforço do compósito seria acima de 95%. Assim, esta pesquisa contribui cientificamente ao apresentar potenciais alternativas à indústria da construção já avaliadas numa perspectiva ambiental.

Palavras-chave: ACV, sustentabilidade, sisal, juta, malva, materiais de construção, economia circular.

ABSTRACT

To demonstrate the environmental impacts generated by products, from the extraction of the raw materials to their final disposal, there is a scientifically accepted tool known as life cycle assessment (LCA). Besides the technical performance, the objective of this study was to evaluate the environmental performance of composite materials, in this case cementitious plates produced with vegetable fibers grown in Brazil, namely sisal, jute and malva. The study used 1 m² of composite plate to enable the modeling of a theoretical production chain and the use of the LCA tool. Using the ReCiPe 2016 Midpoint/Endpoint and EN 15804 methods, the environmental performance of cementitious plates has been studied under different scenarios. Firstly, as an alternative to composites produced with a Portland cement matrix, a composite with a geopolymeric matrix based on residue and reinforced with sisal fibers was developed. The durability of this composite was evaluated through wetting and drying cycles, because the longer the useful life of a material, the more significant its environmental benefits will be. Then, the environmental performance of the geopolymeric composite was compared to that of a composite with a Portland cement matrix, both materials being reinforced with sisal fibers. Using the ReCiPe 2016 Midpoint/Endpoint and EN 15804 methods, the results were convergent: the composite with cementitious matrix has a lower environmental impact. In the composite with the cementitious matrix, the cement production and the transportation process were responsible for most of the environmental load. In the geopolymeric composite, the results showed that the alkaline activator based on potassium hydroxide is the most impactful component, followed by the transport process. Considering that transporting raw materials over long distances increases the environmental burden of the products, it was inferred that, from the environmental point of view, it would be more advantageous to produce the composite with cementitious matrix replacing the sisal fibers, which are grown in the Brazilian Northeast, by the fibers of jute and malva, which are grown in the Brazilian Amazon, where this study was conducted. In this context, the fibers of jute and malva were evaluated as a reinforcement of the composite from two perspectives: one without processing and the other in the form of a fabric. Thus, it was found that if the fibers were used without any processing, being obtained from a city near Manaus, the reduction of impact related to the reinforcement of the composite would be over 95%. Thus, this research contributes scientifically by presenting potential alternatives to the construction industry that have already been evaluated from an environmental perspective.

Keywords: LCA, sustainability, sisal, jute, malva, building materials, circular economy.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	8
1.1 Objetivos	12
1.1.1 Objetivo Geral	12
1.1.2 Objetivos Específicos:.....	12
1.2 Estrutura da tese.....	12
CAPÍTULO 2. ARTIGO 1 - Compósito geopolimérico sustentável reforçado com fibras de sisal: durabilidade aos ciclos de molhagem e secagem	14
CAPÍTULO 3. ARTIGO 2 - Alternativas circulares na indústria da construção: Avaliação do desempenho ambiental de compósitos reforçados com fibras de sisal.....	29
CAPÍTULO 4. ARTIGO 3 - Avaliação do ciclo de vida de um compósito cimentício reforçado com fibras vegetais cultivadas na Amazônia brasileira	66
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES	105
REFERÊNCIAS	107

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

Telhas e caixas d'água, produtos amplamente utilizados na construção civil, são apenas dois exemplos de materiais compostos de amianto e cimento Portland. O amianto (ou asbesto) é uma fibra natural extraída de rochas, enquanto o cimento é produzido industrialmente à base de calcário e argila. O cimento, ao ser misturado com água, apresenta propriedades de aglomerante e após o endurecimento adquire características próximas às de rochas naturais. Apesar de ser utilizada pela humanidade desde a Antiguidade, a fibra de amianto é comprovadamente cancerígena, motivo pelo qual o seu uso foi proibido em diversos países [1, 2, 3].

Combinadas com cimento, as fibras de amianto eram bastante utilizadas pela indústria da construção. Porém, no dia 29 de novembro de 2017, a produção, a comercialização e o uso de amianto foram proibidos no Brasil [4]. Até então, o Brasil minerava e exportava amianto do tipo crisotila [5], sendo o terceiro maior produtor e consumidor mundial desse mineral [6]. Com a proibição do amianto, verifica-se uma abertura no mercado da construção civil para novos tipos de componentes construtivos. Além disso, com o aumento da população urbana global até 2050, prevê-se um conseqüente aumento na demanda por materiais de construção [7]. E para atender a essa demanda futura, compósitos reforçados com fibras vegetais surgem como uma opção salubre e ambientalmente adequada.

Callister Jr. [8] denomina compósito o material resultante da combinação multifásica de outros materiais, que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades. Os materiais compósitos são classificados em três divisões principais: os compósitos reforçados com partículas, os compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais. Existe uma variedade de compósitos na natureza. A madeira, por exemplo, consiste em fibras de celulose envolvidas por meio de um material mais rígido chamado de lignina [8]. Os egípcios, desde 4.000 a.C., já utilizavam materiais compósitos reforçados com fibras naturais, como o papiro, na fabricação de barcos, velas e cordas, enquanto na natureza, até os dias atuais, o pássaro joão-de-barro constrói seu ninho usando barro como matriz e palhas como reforço [9].

As fibras vegetais, como as do sisal (*Agave sisalana*), da juta (*Corchorus capsularis*) e da malva (*Urena lobata L.*), são recursos naturais renováveis, de baixo custo e não causam danos à saúde humana como as fibras de amianto, portanto, no que tange a materiais empregados como reforço, podem ser uma solução inovadora e eficaz para atender à construção civil e aos objetivos de desenvolvimento sustentável – ODS. Compósitos reforçados com fibras

vegetais possuem grande potencial de uso na fabricação de produtos com aplicação na indústria da construção [9]. Podem ser produzidos com matriz à base de cimento Portland ou geopolimérica. Enquanto o cimento Portland é amplamente comercializado há muitos anos, sendo facilmente encontrado em comércios de materiais de construção, geopolímeros são materiais relativamente novos. Diversas pesquisas já evidenciaram o potencial produtivo de compósitos de cimento Portland reforçados com fibras vegetais [10-13].

Os geopolímeros, por sua vez, são polímeros inorgânicos produzidos à base de aluminossilicatos e solução alcalina. A geopolimerização ocorre em ambientes altamente alcalinos e as fibras vegetais têm uma forte resistência a essas condições [14]. Geopolímeros podem ser utilizados tanto para substituir o cimento Portland, como aglomerante, quanto alguns tipos de cerâmicas. Mas apresentam duas grandes vantagens: diversos resíduos e subprodutos industriais podem ser utilizados em sua produção e sua cura pode ser à temperatura ambiente [15, 16]. Um resíduo que tem sido utilizado na produção de geopolímeros, com resultados satisfatórios, é o lodo gerado em estações de tratamento de água – ETAs, por ser composto majoritariamente de óxidos de silício e alumínio [15-24]. Há vários estudos sobre compósitos geopoliméricos reforçados com fibras vegetais [25-35], mas, até a conclusão deste trabalho, não foi encontrado na literatura científica nenhum compósito geopolimérico com matriz à base de lodo de ETA.

No Brasil, lodos de estação de tratamento de água não tem valor econômico e representam um grande problema para as empresas de saneamento, pois além do elevado investimento para adensar o lodo, ainda se tem o custo para transportá-lo até os aterros sanitários. E caso seja lançado em local inadequado, a empresa responsável pela prática poderá ser enquadrada na lei de crimes ambientais [36]. No caso de Manaus, utilizar esse resíduo significa também prevenir impactos ambientais pelo seu lançamento indiscriminado em corpos hídricos da região ou sua disposição no aterro controlado da cidade, cuja constante expansão avança rumo a áreas que poderiam ser destinadas à conservação da Floresta Amazônica.

Compósitos reforçados com fibras vegetais, com matriz à base de cimento Portland ou geopolimérica, podem ser considerados produtos sustentáveis. Seuring e Müller [37] definem produtos sustentáveis como todos os tipos de produtos que têm ou visam uma melhoria da qualidade ambiental e social. Embora tais materiais sejam inovadores, há alguns fatores obstando a sua produção em escala industrial. E para que essa tecnologia se torne uma realidade, migrando de centros de pesquisa para o mercado consumidor, é necessário avaliar sistemicamente a sustentabilidade econômica, ambiental e social de todo o seu ciclo de vida.

No desenvolvimento de novos produtos, tanto o reaproveitamento de resíduos como o

uso de materiais renováveis constituem importantes estratégias para uma produção mais circular. No entanto, não basta apenas idealizar um novo produto como ambientalmente sustentável, é necessário comprovar a hipótese por meio de metodologias cientificamente aceitas. Uma ferramenta internacionalmente difundida para quantificar os impactos ambientais associados à fabricação de materiais, desde a extração de matérias-primas até sua disposição final é Avaliação do Ciclo de Vida – ACV [38]. Usando esta ferramenta, Broeren et al. [39] verificaram que a fibra de sisal pode substituir potencialmente a fibra de vidro em compósitos de fibra natural, sendo que as emissões de gases de efeito estufa e o uso de energia não renovável associados à fibra de sisal são até 95% menores em comparação com a fibra de vidro [39].

Como ferramenta de apoio à tomada de decisão, a ACV pode subsidiar a identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental de produtos em diversos pontos do seu ciclo de vida [38]. A ACV enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final [38]. Um estudo de ACV é composto de quatro fases iterativas [38]: definição de objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impactos e interpretação. Dentre os principais softwares de ACV estão o SimaPro, o Gabi e o Humberto. Quanto aos métodos de avaliação de impacto do ciclo de vida – AICV, existem diversos: CML, Ecological Scarcity, EDIP, LUCAS, ReCiPe, TRACI, USETox, IMPACT World+ [40], EN 15804, dentre outros.

Nas últimas décadas, as fibras de juta e malva, cultivadas por ribeirinhos amazônicos e utilizadas amplamente como sacaria, perderam a competitividade no mercado para as fibras sintéticas, o que refletiu diretamente na economia de populações que cultivavam e comercializavam essas fibras. Mesmo com pouca demanda, o cultivo de juta e malva ainda representa uma fonte de renda para comunidades ribeirinhas que as cultivam no estado do Amazonas, Brasil. Enquanto isso, na região Nordeste do Brasil, as fibras de sisal têm uma cadeia produtiva bem estabelecida e recebem bastante incentivo governamental. Após a colheita, para fins de beneficiamento, as fibras de juta e malva são submetidas às etapas de afogamento, desfibramento, lavagem, secagem e enfardamento. No entanto, estudos demonstraram que as cadeias produtivas dessas fibras ainda se encontram em estado bastante rústico [41, 42]. E para que a cadeia produtiva de fibras vegetais cultivadas no Amazonas volte a receber investimentos consideráveis é necessário que exista demanda para esses produtos.

Enquanto o mercado de sacaria aderiu às fibras sintéticas, há setores industriais necessitando de novas alternativas de matérias-primas. Uma realidade desse tipo é enfrentada pela construção civil, a maior consumidora de recursos naturais do planeta. Ferro, alumínio e

amianto são minerais comumente empregados como reforço pela indústria da construção. Além de todos os impactos ambientais associados à mineração e beneficiamento desses minerais, sabe-se que ambos são recursos naturais não renováveis. Portanto, uma alternativa para amenizar os impactos ambientais causados pela construção civil reside na introdução de fibras vegetais em sua cadeia produtiva. Recursos naturais renováveis, podem ser empregadas como reforço em compósitos cimentícios, substituindo matérias-primas não renováveis, como os metais, ou sintéticas, como os polímeros, e até mesmo as insalubres fibras de amianto.

Nesse contexto, verifica-se que as fibras vegetais podem ser uma solução inovadora e eficiente para atender à construção civil. Ao mesmo tempo, o cultivo de fibras como a juta e a malva exibe potencialidades socioeconômicas, uma vez que seus maiores produtores brasileiros, comunidades ribeirinhas da Amazônia, necessitam de novas alternativas de uso para essas fibras, que lhes representam uma fonte de renda e subsistência. Diante do apresentado, para além da caracterização técnica, o objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho ambiental de compósitos com matriz de cimento Portland e geopolimérica reforçados com fibras de sisal, juta e malva, evidenciando os benefícios desses materiais para a sociedade em geral, para a indústria da construção e para os produtores brasileiros de fibras vegetais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho ambiental de materiais compósitos produzidos com fibras vegetais cultivadas no Brasil – sisal juta e malva.

1.1.2 Objetivos Específicos:

- 1) Produzir um compósito geopolimérico com matriz à base de resíduo e reforçado com fibra de sisal;
- 2) Comparar o desempenho ambiental de dois compósitos produzidos com diferentes matrizes e reforçados com fibra de sisal;
- 3) Avaliar o desempenho ambiental de dois compósitos produzidos com matriz de cimento Portland e reforçados com fibras de juta e malva sem processamento e na forma de tecido.

1.2 Estrutura da tese

Capítulo 1

Este capítulo é referente à introdução geral da tese, onde se contextualiza os temas que serão abordados, apresenta a literatura científica pertinente, justifica a realização do trabalho e apresentação os seus objetivos.

Capítulo 2

Este capítulo é referente ao primeiro artigo da tese, no qual a possibilidade de uma destinação final vantajosa para lodos de ETAs gerados em Manaus foi estudada. Esse resíduo foi empregado como matéria-prima na produção de um compósito geopolimérico reforçado com fibras de sisal. Uma das possíveis aplicações para esse compósito é como elemento de cobertura. E se essa for a aplicação pretendida para um determinado material de construção, então a sua durabilidade aos efeitos de molhagem e secagem deve ser conhecida. Quanto maior a vida útil de um material, mais significativos serão os benefícios ambientais. Saber a durabilidade, ainda que estimada, de um produto a ser avaliado na perspectiva de ciclo de vida

é uma informação indispensável para estudos de ACV. Na economia circular, o prolongamento da vida útil de produtos é de grande importância, pois uma vez que isso ocorra recursos serão conservados e a geração de resíduos será amenizada.

Capítulo 3

Este capítulo é referente ao segundo artigo da tese intitulado “Alternativas circulares na indústria da construção: Avaliação do desempenho ambiental de compósitos reforçados com fibras de sisal”. No desenvolvimento de novos produtos, tanto o reaproveitamento de resíduos como o uso de materiais renováveis constituem importantes estratégias para uma produção mais circular. No entanto, não basta apenas idealizar um novo produto como ambientalmente sustentável, é necessário comprovar a hipótese por meio de metodologias cientificamente aceitas. Assim, os objetivos deste estudo foram avaliar e comparar, por meio de ACV, o desempenho ambiental de dois compósitos reforçados com fibras de sisal, sendo um produzido com matriz de cimento Portland e outro com matriz geopolimérica à base de um resíduo, o lodo de estação de tratamento de água.

Capítulo 4

Este capítulo é referente ao terceiro artigo da tese intitulado “Avaliação do ciclo de vida de um compósito cimentício reforçado com fibras vegetais cultivadas na Amazônia brasileira”. Apresenta uma ACV para as fibras de juta e malva cultivadas na região amazônica brasileira bem como para um compósito com aplicação na indústria da construção produzido com essas fibras. Além disso, a carga ambiental de uma tonelada de fibras de juta e malva cultivadas nessa região foi comparada com a de uma tonelada de fibras de sisal cultivadas no Nordeste do Brasil. As fibras de juta e malva foram avaliadas como reforço do compósito sob duas perspectivas: uma sem processamento e outra na forma de tecido.

Capítulo 5

Neste capítulo são apresentadas as conclusões, as limitações do trabalho e as recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2. ARTIGO 1 - Compósito geopolimérico sustentável reforçado com fibras de sisal: durabilidade aos ciclos de molhagem e secagem

Resumo

No Brasil, o lodo gerado em estações de tratamento de água (ETAs) não tem valor econômico e por ser composto por óxidos de silício e alumínio pode ser utilizado na produção de geopolímeros - aglomerantes alternativos. As fibras de sisal são recursos naturais renováveis e relativamente baratas. Com esses materiais, foi produzido um compósito geopolimérico, que foi avaliado quanto à sua durabilidade, resistência à flexão e microestrutura. A durabilidade foi avaliada por meio de envelhecimento acelerado (10 ciclos de molhagem e secagem). Enquanto o compósito de referência (0 ciclo) atingiu valores de resistência de cerca de 15 MPa no ensaio de flexão, o compósito envelhecido atingiu a resistência de 11 MPa, o que indicou boa durabilidade aos ciclos de molhagem e secagem. Amostras envelhecidas naturalmente ao longo de 3 anos foram avaliadas por Estereomicroscopia. Considerando que houve pouca degradação nas fibras do compósito, concluiu-se que este material pode ser utilizado na fabricação de telhas duráveis.

Palavras-chave: geopolímero à base de resíduos; lodo de tratamento de água; sisal; sustentabilidade ambiental.

Introdução

Combinadas com o cimento, as fibras de amianto são utilizadas pela indústria da construção civil na produção de telhas de fibrocimento. Esta aplicação representa um risco para a saúde pública, uma vez que o amianto provou ser cancerígeno, razão pela qual seu uso foi proibido em diversos países [1, 2]. As telhas de cimento e amianto eram baratas e duráveis, por isso foram amplamente adquiridas pela população brasileira de baixa renda. O Brasil minerava e exportava amianto do tipo crisotila [1] e em seu auge foi o terceiro maior produtor e consumidor deste mineral no mundo [2]. No entanto, mesmo diante dos malefícios causados à saúde humana, a construção civil brasileira ainda utiliza o amianto em diversas aplicações - situação que deverá mudar ao longo do tempo, uma vez que a produção, comercialização e uso desse mineral foi proibido no Brasil em 29 de novembro de 2017 [3].

Existem outras opções de telhas no mercado de construção brasileira, mas são mais caras ou de baixa qualidade. Neste contexto, surge a necessidade de um novo tipo de telhas, adequado para

preencher a lacuna deixada pelas telhas de cimento e amianto. Para atender a essa demanda futura, os compósitos reforçados com fibras vegetais surgem como uma opção saudável e ambientalmente adequada. As fibras vegetais, como as do sisal (*Agave sisalana*), são recursos naturais renováveis, de baixo custo e não causam danos à saúde humana como as fibras de amianto. Portanto, como material utilizado para reforço, podem ser uma solução inovadora e eficaz para atender às necessidades da indústria da construção e aos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS).

Vários estudos têm demonstrado o potencial de compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais [4-7]. Os compósitos produzidos com uma matriz à base de cimento Portland enfrentam um problema de durabilidade, uma vez que o hidróxido de cálcio presente no cimento ataca as fibras vegetais e, assim, as degrada [4-6]. Este problema foi superado com a adição de materiais pozolânicos na composição da matriz e com tratamentos específicos das fibras [4-7]. Por outro lado, os geopolímeros, polímeros inorgânicos produzidos com precursor de aluminossilicato e à base de solução alcalina, têm mostrado boa interação com fibras vegetais e na maioria dos casos não requerem tratamentos especiais das fibras ou adições pozolânicas.

A geopolimerização ocorre em ambientes altamente alcalinos e as fibras de lignocelulose apresentam forte resistência a essas condições [8]. Os geopolímeros podem ser usados como aglomerantes e substituir o tradicional cimento Portland em uma variedade de aplicações. Em geral, em estado fresco, os geopolímeros possuem propriedades aglomerantes e, quando endurecidos, comportam-se como cerâmicas [9]. Sabe-se que, na maioria dos casos, as cerâmicas são frágeis e, para serem utilizadas em determinadas aplicações, necessitam de reforço fibroso. Os geopolímeros não são diferentes. No entanto, quando comparados às cerâmicas tradicionais, os geopolímeros apresentam duas grandes vantagens: a possibilidade de cura à temperatura ambiente e que vários tipos comuns de resíduos e subprodutos industriais podem ser utilizados como matéria-prima em sua produção [9, 10]. Um resíduo que vem sendo utilizado na produção de geopolímeros, com resultados satisfatórios apresentados na literatura científica, é o lodo gerado em estações de tratamento de água (ETAs), uma vez que é composto principalmente por óxidos de silício e alumínio, sendo um bom substituto de aluminossilicatos naturais em reações de geopolimerização [9-18].

Na literatura, existem vários estudos sobre compósitos geopoliméricos reforçados com fibras vegetais [19-29]. No entanto, a interação de fibras vegetais com uma matriz geopolimérica à base de lodo de ETA ainda não foi investigada. No Brasil, o lodo de estação de tratamento de água não tem valor econômico e representa um grande problema para as empresas de

saneamento pois além do alto investimento para adensar o lodo, ainda há o custo de transportá-lo para aterros sanitários. Além disso, caso seja descartado em local impróprio, a empresa responsável pela prática poderá ser processada de acordo com as leis de crimes ambientais [30].

Alguns pesquisadores, usando ciclos de molhagem e secagem, avaliaram a durabilidade de um geopolímero produzido com uma combinação de lodo de ETA e cinzas volantes [17]. Em termos de resistência e durabilidade, verificou-se que seria mais vantajoso utilizar o lodo de ETA como matéria-prima geopolimérica do que combiná-lo com cimento Portland, por exemplo, pois o Alúmen presente no lodo de ETA retarda a hidratação do cimento [17].

Santos et al. [10] produziram geopolímeros com lodo de ETA como fonte de sílica e alumina. Os geopolímeros atingiram resistências à compressão uniaxiais superiores a 50 MPa em 28 dias. Os lodos foram calcinados a 750°C durante 6 horas e adicionou-se hidróxido de potássio como álcali de ativação. Dentre os materiais descritos, o de maior custo é o hidróxido de potássio. Para solucionar esse obstáculo de alto custo, uma opção é utilizar resíduos, como cinzas de casca de arroz, na composição da solução ativadora. No entanto, isso já foi investigado por outros pesquisadores [12] e não está no escopo deste trabalho.

Vale ressaltar também que o processo de calcinação do lodo pode encarecer o produto desenvolvido. No entanto, a temperatura de 750°C adotada na calcinação do lodo é muito inferior às temperaturas acima de 1200°C, empregadas na produção de cimento Portland, que é utilizado como matéria-prima de telhas de cimento e amianto. Vale ressaltar que o tempo de permanência do lodo no forno mufla pode ser reduzido de 6 para 4 horas sem perda significativa da qualidade do produto [9]. No mais, existem processos de calcinação sofisticados para os quais o tempo de permanência do material no forno mufla é da ordem de segundos. Portanto, o tempo de calcinação não é um problema.

As fibras vegetais, por sua vez, são relativamente baratas, renováveis e podem ser utilizadas como material de reforço em substituição às fibras sintéticas. De acordo com Broeren et al. [31], a fibra de sisal pode substituir potencialmente a fibra de vidro em compósitos de fibra natural. Em pesquisa realizada por Wongsu et al. [27], observou-se que a adição de fibra de sisal como material de reforço em argamassas geopoliméricas à base de cinzas volantes resultou em melhora significativa das resistências à tração e flexão do material, semelhante à fibra de vidro [27]. Porém, as emissões de gases de efeito estufa e o uso de energia não renovável associados à fibra de sisal são até 95% menores em comparação com a fibra de vidro [31].

E se os compósitos reforçados com fibras naturais forem usados para aplicações externas, o efeito dos ciclos de molhagem/secagem no desempenho de tais materiais deve ser conhecido [32]. Os trabalhos de Melo Filho et al. [6] e Mohr et al. [32] mostram que em compósitos de fibras naturais com matrizes de cimento Portland, 10 ciclos de molhagem/secagem são aceitáveis para evidenciar alterações nas propriedades mecânicas desses materiais. Para avaliar a degradação em compósitos geopoliméricos reforçados com tecidos de juta, Trindade et al. [33] submeteram suas amostras a 15 ciclos de molhagem/secagem e subsequentes testes de flexão. Os resultados obtidos indicaram que não houve alterações significativas nas propriedades mecânicas do compósito após os 15 ciclos de molhagem/secagem. Nkwaju et al. [34] verificaram que a resistência à compressão final de um compósito geopolimérico rico em ferro, reforçado com fibras de bagaço de cana-de-açúcar, não foi significativamente alterada mesmo após 20 ciclos de molhagem/secagem. Ambos os pesquisadores [33, 34] sugerem que os ciclos de molhagem/secagem melhoraram a ligação da matriz e da fibra e, conseqüentemente, a ductilidade dos compósitos.

Este artigo é parte de uma pesquisa sobre a viabilidade técnica e ambiental de compósitos cimentícios e geopoliméricos reforçados com fibras vegetais cultivadas no Brasil, com vistas à substituição de materiais de construção à base de amianto, os quais eram amplamente utilizados como elemento de cobertura nas habitações da população brasileira de baixa renda. Nesse contexto, buscou-se desenvolver um material de baixo custo, ambientalmente sustentável e durável. Assim, o objetivo do presente estudo foi avaliar os efeitos dos ciclos de molhagem e secagem nas propriedades mecânicas de um compósito geopolimérico à base de cinzas de lodo de ETA e reforçado com fibra de sisal.

Materiais e métodos

Materiais

Para produzir a matriz geopolimérica, foi utilizado como precursor um lodo de estação de tratamento de água localizada em Manaus, Brasil. Uma ampla caracterização desse resíduo pode ser encontrada em Santos et al. [11]. Os autores identificaram que, dependendo do período de coleta, as características do lodo são heterogêneas. Além disso, mesmo após calcinação, sob a mesma temperatura e mesmo tempo de residência em forno mufla (a 750°C por 6 horas), o lodo apresentou diferentes composições químicas (ver Tabela 1). Os dois lodos calcinados em questão foram utilizados na produção de duas argamassas geopoliméricas [10].

As argamassas tinham características diferentes, relacionadas com as características dos lodos utilizados como precursores. Ambos apresentaram alta resistência à compressão, porém, a maior resistência à compressão (~80 MPa, aos 28 dias, ver Figura 1) também foi a que apresentou eflorescência e baixa trabalhabilidade [10]. Assim, quando decidimos produzir um compósito utilizando esses mesmos precursores geopoliméricos, hipotetizamos que a melhor opção seria proceder com uma mistura de ambos. Por esse motivo, para produzir o compósito, foi utilizada uma mistura 1:1 de cada lodo como precursor, cuja composição química é apresentada na Tabela 1.

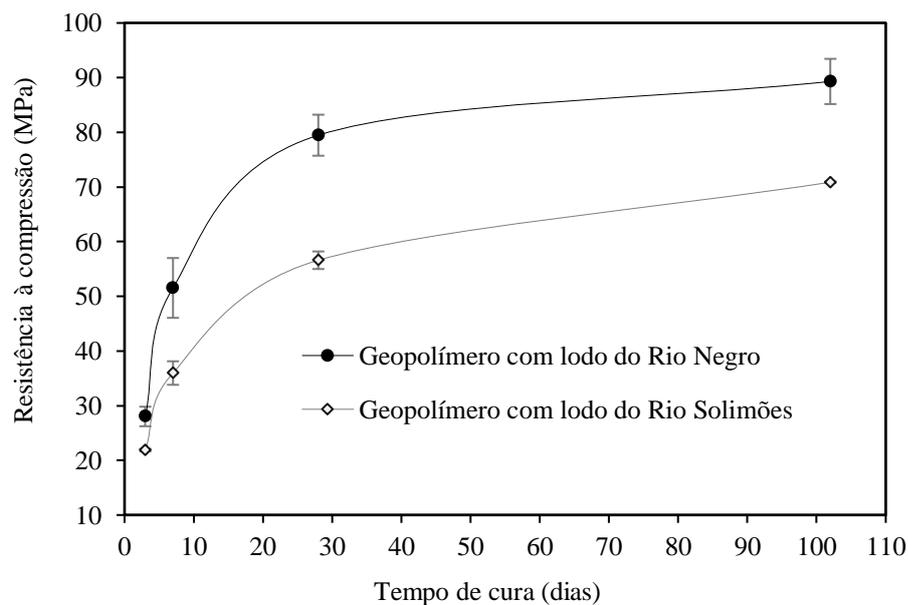


Figura 1: Aumento da compressão axial com a idade dos geopolímeros [10].

Tabela 1. Composição química dos precursores e solução alcalina (% em peso como óxidos).

Composição química (%)	Precursores			Solução alcalina	
	Lodo do Rio Negro	Lodo do Rio Solimões	Cimento Portland	Hidróxido de potássio	Microssflica industrial
SiO ₂	40,73	55,78	22,26	N.D.	87,37
Al ₂ O ₃	42,39	27,16	6,45	N.D.	0,60
Fe ₂ O ₃	10,94	9,54	3,18	N.D.	3,00
K ₂ O	2,18	3,32	0,92	99,62	2,71
TiO ₂	1,26	0,95	0,39	N.D.	N.D.
MgO	0,95	1,69	3,50	N.D.	2,63
CaO	0,56	0,65	59,44	N.D.	0,72
P ₂ O ₅	0,63	0,55	0,28	0,22	0,38
SO ₃	N.D.	N.D.	2,96	N.D.	1,17
Other	0,36	0,36	0,62	0,16	1,42
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	0,96	2,05	-	-	-

Nota: N.D. significa não detectado.

A Tabela 2 contém a formulação do compósito geopolimérico. Além do lodo, foi utilizado cimento Portland - CP III 40 RS (Mizu), composto por escória de alto forno, como fonte adicional de cálcio. As escórias têm sido usadas como materiais precursores pois aceleraram o tempo de pega e aumentam a resistência à compressão uniaxial dos geopolímeros [35, 36]. Como material agregado, foi adicionada areia extraída localmente nos arredores de Manaus, Brasil. A areia selecionada é um agregado à base de sílica de granulometria média, retida em peneira n°. 50, com abertura de 300 μm . Para proporcionar a dissolução dos componentes secos, preparou-se uma solução de silicato de potássio, composta por hidróxido de potássio - KOH (potassa cáustica, marca Marwin), sílica industrial (Microsilica Grade 920 ASTM, marca Elkem) e água da torneira.

Tabela 2. Percentual (em peso) de matéria-prima utilizada na síntese do compósito geopolimérico.

Precursor		Agregado	Ativador			Reforço	Solvente
Lodo	Cimento Portland	Areia	KOH	Água	SO ₂	Fibra de sisal	Água
34%	7%	13%	9%	15%	12%	2%	8%

Para o reforço foram utilizadas fibras longas de sisal (2% em relação à argamassa geopolimérica) de Valente, Bahia, Brasil. Essas fibras foram caracterizadas por Toledo Filho [37] como tendo densidade média, módulo de elasticidade e resistência à tração de 0,90 g/cm³, 19 GPa e 577 MPa, respectivamente. Segundo Melo Filho et al. [6], a composição química da fibra de sisal compreende aproximadamente 54-66% de celulose, 12-17% de hemicelulose, 7-14% de lignina, 1% de pectina e 1-7% de cinzas. A Figura 2 mostra imagens da folha de sisal, sua fibra e microestrutura [6].



Figura 2: A planta de sisal e sua fibra: (a) uma folha de sisal mostrando a distribuição da fibra de sisal, (b) a fibra após ser extraída e limpa e (c) a microestrutura da fibra de sisal que é formada por várias fibrocélulas, retiradas de Melo Filho et al. [6].

Métodos

A Figura 3 mostra como foi processado o lodo e a fibra de sisal e o processo de produção do compósito. Para serem utilizadas como reforço no compósito desenvolvido, as fibras de sisal foram submetidas ao processo descrito na Figura 3b. Nenhum tratamento químico foi aplicado às fibras de sisal. O processo de produção do compósito ocorreu da seguinte forma (ver Figura 3c e Figura 4): um dia antes da produção do compósito, foi produzido o ativador alcalino, utilizando os mesmos componentes e seguindo os mesmos procedimentos descritos em Santos et al. [10].

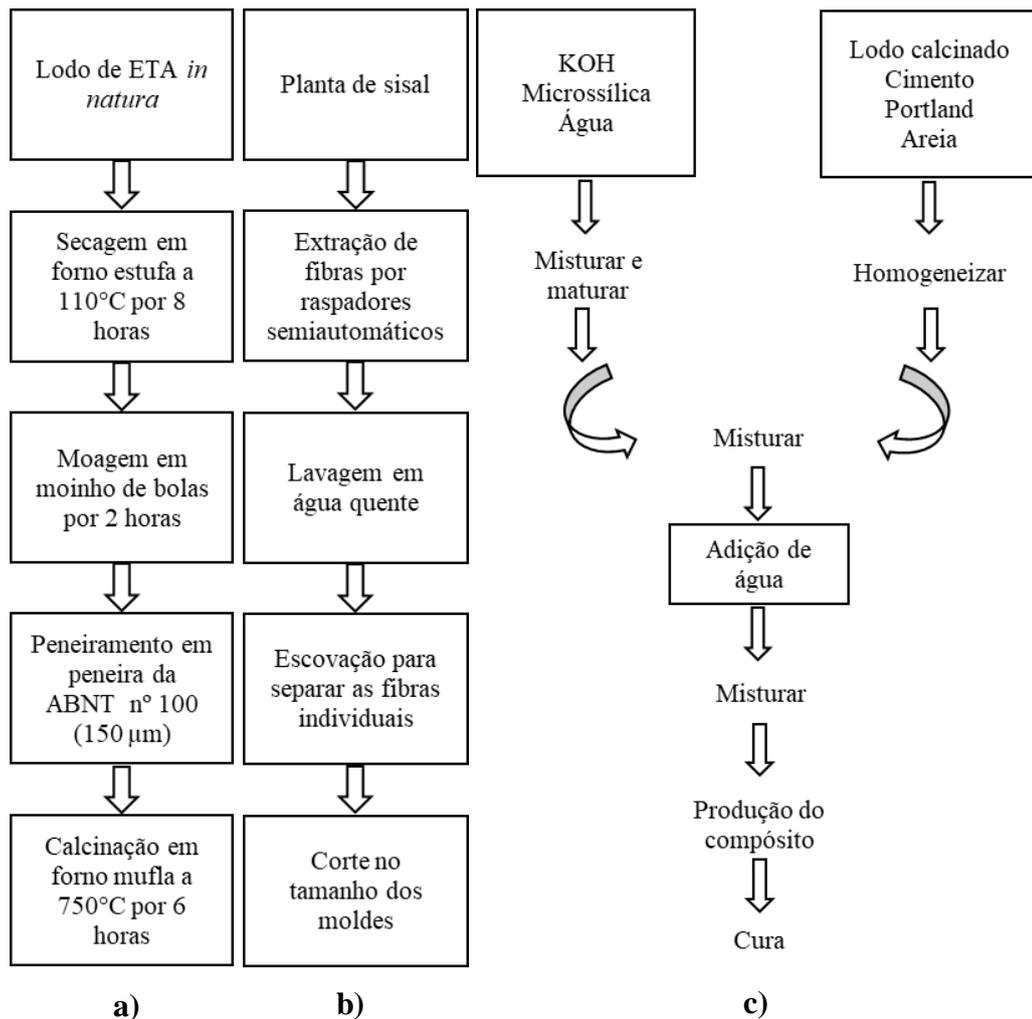


Figura 3: a) processamento do lodo; b) processamento das fibras de sisal e c) produção do compósito.

Em testes preliminares, verificou-se que a pouca fluidez e o rápido tempo de pega da argamassa geopolimérica produzida por Santos et al. [10] inviabilizavam a moldagem de um compósito, portanto foi feita uma adaptação: após despejar os componentes secos (precursor e agregado) em um misturador mecânico, adicionamos uma quantidade de água (solvente, descrita na

Tabela 2), e procedemos com a mistura preliminar por aproximadamente dois minutos e meio. Após este processo, foi adicionado o ativador e, em seguida, todos os componentes da argamassa geopolimérica foram misturados mecanicamente. Como resultado, obteve-se uma matriz fresca mais fluida, o que possibilitou a moldagem do compósito. Nos geopolímeros, a relação água/cimento também é inversamente proporcional à resistência mecânica e durabilidade do produto resultante [38]. Portanto, é de se esperar que esse aumento na quantidade de água na composição faça com que a matriz tenha baixa resistência à compressão, pois estudos preliminares mostraram que o aumento da quantidade de água na composição de uma argamassa geopolimérica, produzida como a deste estudo, causou uma queda de cerca de 70% em sua resistência à compressão [39].

Uma matriz com maior resistência mecânica poderia ser obtida se não fosse necessário aumentar a água, pois utilizando os mesmos componentes desta matriz foram produzidas duas argamassas geopoliméricas com alta resistência à compressão [10] (ver Figura 1). Trabalhos futuros podem resolver esse problema de excesso de água, por exemplo, adicionando superplastificante à matriz.

Uma porção da argamassa geopolimérica fresca foi imediatamente espalhada em um molde de acrílico utilizado para moldar o compósito. Em seguida, as fibras de sisal foram dispersas paralelamente na placa e posteriormente recobertas por outra camada da matriz fresca (ver Figura 4). O compósito foi curado à temperatura ambiente ($\sim 27^{\circ}\text{C}$ e $\sim 80\%$ de umidade relativa). Após 24h de cura, o compósito foi retirado do molde e posteriormente dividido em corpos de prova com dimensões de 50 x 195 mm (largura, comprimento). Como não houve compressão na superfície do compósito, as amostras apresentaram espessura variável, em torno de 6 ± 1 mm. Tais amostras foram armazenadas por cerca de 6 meses, antes do teste de durabilidade (ver Figura 5).



Figura 4: Procedimento de produção do compósito.

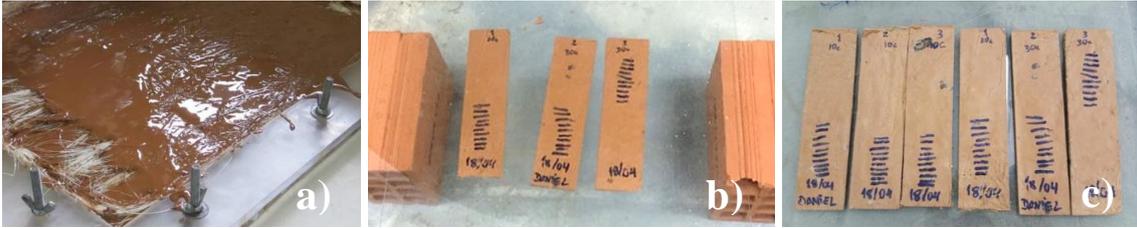


Figura 5: a) compósito em fase de moldagem; b) amostras do compósito submersas em água dentro de um tanque - ciclo de molhagem; c) amostras do compósito após secagem em estufa.

A durabilidade do compósito foi avaliada usando um processo de envelhecimento acelerado adaptado de [6]. Esse processo consistiu em submeter amostras do compósito a ciclos de molhagem e secagem para simular a vida útil do material frente às ações da natureza. As amostras compostas foram mantidas submersas em água a 22 ± 2 °C por 1 dia e depois secas em estufa a 40 ± 2 °C por 2 dias. Segundo Melo Filho et al. [6], após 10 ciclos já é possível observar uma forte degradação nas fibras da matriz do cimento Portland. Com base nessas informações, neste estudo, optou-se por submeter o compósito a 10 ciclos de molhagem e secagem. Após o processo de envelhecimento, 3 corpos de prova de referência (0 ciclo) e 3 corpos de prova envelhecidos (10 ciclos) foram submetidos a um teste de resistência à flexão de 3 pontos, realizado em uma prensa universal (Pavitest Contenco, modelo UMC 60), com velocidade de teste de 0,5 mm/min. As amostras testadas do compósito de referência (0 ciclo) foram mantidas em laboratório por cerca de 3 anos (~ 27 °C e $\sim 80\%$ de umidade relativa) e submetidas à análise por estereomicroscopia óptica (Leica, modelo EZ4).

Resultados e discussão

Propriedades mecânicas (resistência à flexão) e durabilidade

A Figura 6 mostra os resultados obtidos no ensaio de resistência à flexão do compósito. O teste de cada amostra durou em média 60 minutos. Pouca diferença foi observada no desempenho mecânico das amostras testadas, uma vez que tanto as amostras de referência (0 ciclo) quanto as amostras envelhecidas (10 ciclos) apresentaram ganho de energia. Enquanto as amostras de referência do compósito (0 ciclo) atingiram 15 MPa de resistência à flexão máxima, as amostras envelhecidas (10 ciclos) atingiram 11 MPa. Portanto, houve uma diminuição de 26,7% na resistência à flexão das amostras envelhecidas, o que indica a durabilidade satisfatória do compósito quando exposto aos ciclos de molhagem/secagem.

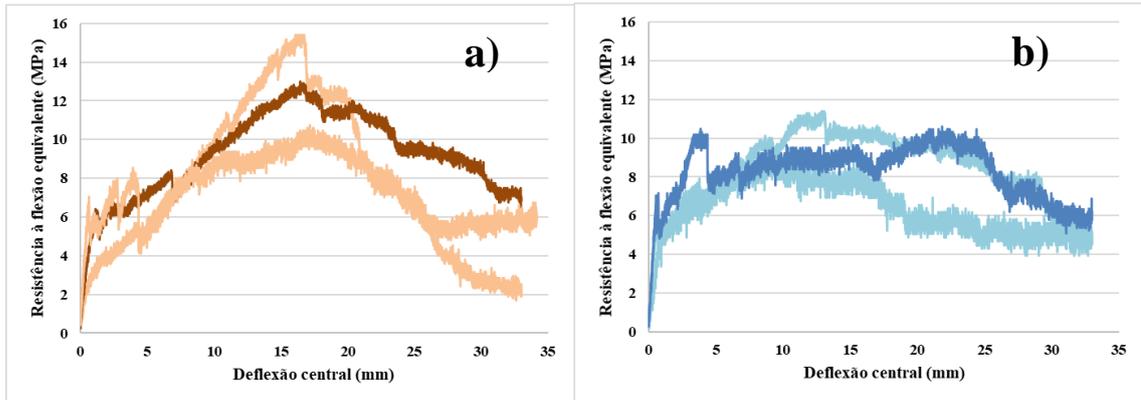


Figura 6: Efeito dos ciclos de molhagem e secagem no comportamento mecânico sob carga de flexão do compósito geopolimérico. a) 0 ciclo e b) 10 ciclos.

Um relato semelhante também foi encontrado em [33], que utilizou 15 ciclos de molhagem /secagem. No entanto, o compósito geopolimérico desses pesquisadores foi reforçado com 5 camadas de tecidos de fibras de juta, enquanto nosso compósito tinha apenas uma camada de fibras de sisal. Esse resultado é importante, pois pretendemos utilizar o compósito geopolimérico de fibras de sisal para aplicações externas, ou seja, como telha. Alguns pesquisadores [33, 34] sugerem que os ciclos de molhagem/secagem melhoraram a ligação da matriz e da fibra e, conseqüentemente, a ductilidade dos compósitos.

No início do ensaio de resistência à flexão, foi possível observar uma seção linear nas curvas, que se refere à fase elástica do material. Em seguida, ocorreu o primeiro pico, com uma pequena queda no valor da carga, que está relacionada à primeira fissura na matriz. Após a recuperação e redistribuição das tensões, houve um aumento gradual da tensão, e o aparecimento de múltiplas fissuras na face tensionada, atingindo um valor de cerca de duas vezes a tensão da primeira fissura.

Verificou-se também que, mesmo após a fissuração completa da matriz geopolimérica, com uma deflexão próxima a 30 mm, as fibras continuaram resistindo ao esforço e após a quebra de cada fio, as tensões foram redistribuídas. O teste foi concluído quando ocorreu a formação de uma fissura principal na amostra (ver Figura 7b). Um comportamento semelhante de quebra de amostras foi observado por outros pesquisadores que produziram compósitos geopoliméricos reforçados com fios de linho [25].

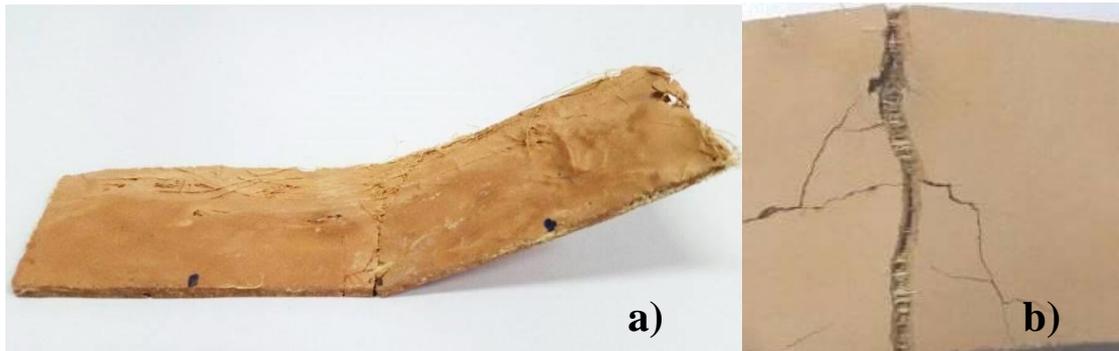


Figura 7: Amostras de compósito após o teste de resistência à flexão. a) amostra completa e b) detalhes das fissuras.

Considerando que o reforço fibroso dobrou a tensão capaz de ser suportada pelo compósito, que apresentou uma deflexão na tração máxima de 17 mm, e que ambas as amostras tinham mais de 150 dias, acredita-se que as fibras de sisal não sofreram deterioração, uma vez que seria impossível obter tais resultados se as fibras estivessem degradadas. Este resultado está de acordo com a literatura, pois as fibras vegetais têm apresentado resultados satisfatórios quando utilizadas como reforço para matrizes geopoliméricas [8, 21, 24-29, 33-34]. A geopolimerização ocorre em ambientes altamente alcalinos e as fibras de lignocelulose apresentam uma forte resistência a essas condições [8]. No entanto, os resultados aqui obtidos não podem ser comparados diretamente com estudos anteriores, pois não existe na literatura científica compósito geopolimérico à base de cinzas de lodo de ETA reforçado com fibra de sisal para esse tipo de comparação. Além disso, foi demonstrado por meio de análise térmica que a matriz geopolimérica à base de lodo de ETA é isenta de hidróxido de cálcio [10], o que previne os efeitos nocivos que esse componente causa nas fibras vegetais [4-6]. Vale ressaltar que o lodo utilizado neste trabalho como precursor da matriz é rico em alumina e o cimento de alto teor de alumina apresenta boa interação com as fibras vegetais [4]. Com base nesses dados, concluiu-se que a matriz geopolimérica à base de lodo de ETA teve uma boa interação com as fibras de sisal.

Morfologia

As imagens obtidas por estereomicroscopia confirmaram a integridade das fibras de sisal do compósito. A Figura 8 contém imagens de amostras do compósito testado (0 ciclo), após 3 anos armazenadas em laboratório. Verificou-se que, mesmo após o teste de resistência à flexão, as fibras permaneceram bem aderidas à matriz geopolimérica, com aspecto apenas levemente

afetado. Este resultado é bastante relevante uma vez que não foi aplicado nenhum tratamento químico às fibras.

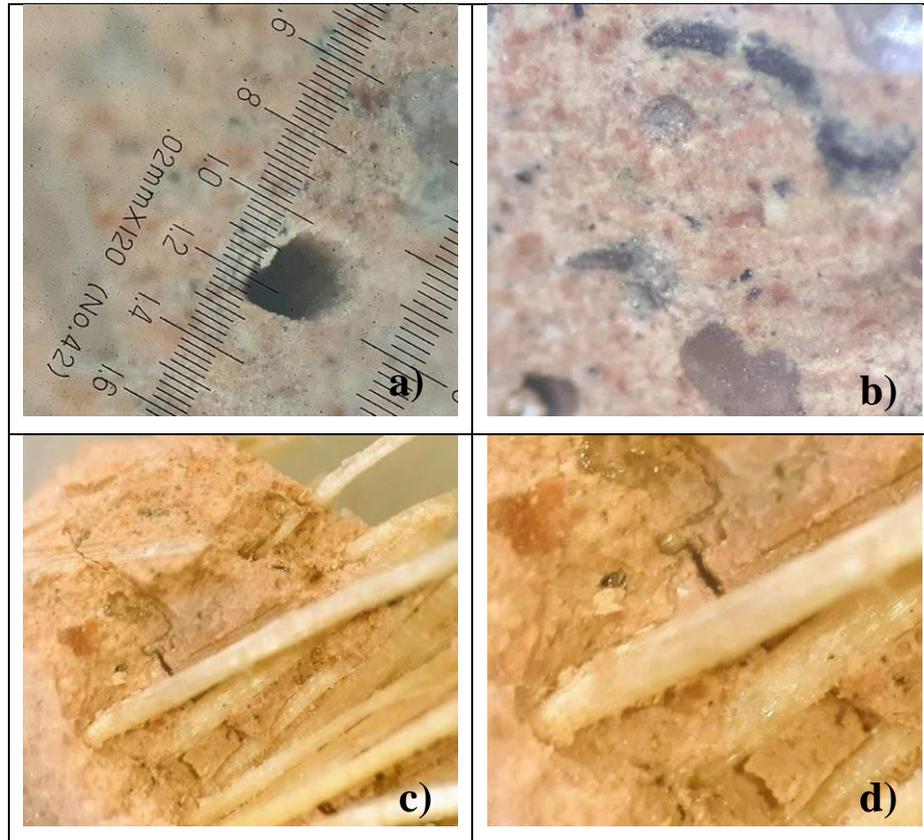


Figura 8: Imagens dos fragmentos do compósito obtidas por estéreo microscópio após 3 anos sob armazenamento em laboratório. a) escala; b) superfície do compósito polida; c) aspecto do compósito; d) fibra de sisal ampliada.

A literatura mostra que muitos pesquisadores têm estudado formas de garantir a integridade das fibras vegetais em compósitos com matriz à base de cimento Portland ou geopolimérica, bem como uma boa adesão da fibra à matriz [4-7, 24]. Neste estudo, além de utilizar uma matriz à base de resíduos sem valor econômico, não foram utilizados recursos para melhorar o desempenho da fibra de sisal como reforço. Outros pesquisadores também encontraram uma forte interação entre fibras vegetais (linho) e uma matriz geopolimérica [21]. Segundo esses mesmos pesquisadores, a matriz alcalina degrada as hemiceluloses, pectina e lignina da fibra, aumentando a área de contato entre a fibra e a matriz [21]. Considerando o nível de integridade das fibras dentro da matriz geopolimérica e que as amostras analisadas têm mais de 3 anos, os resultados obtidos sugerem que o compósito pode ser utilizado na produção de componentes construtivos, como telhas.

Conclusões

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que é possível desenvolver compósitos geopoliméricos utilizando lodo de ETA como precursor da matriz e fibras vegetais como reforço. Mesmo após ser submetido a um processo de envelhecimento acelerado, o compósito produzido atingiu 11 MPa de resistência à flexão, resultado que mostrou seu potencial para uso na construção civil. Em comparação com os materiais de construção convencionais, o produto desenvolvido neste trabalho possui três diferenciais positivos: utiliza como matéria-prima um resíduo geralmente descartado, agregando valor a ele e evitando que seja disposto em locais inadequados; utiliza um recurso natural renovável, ou seja, uma fibra vegetal como reforço; é um material que pode substituir, por exemplo, as telhas de cimento e amianto, que é cientificamente certificado como cancerígeno. Os resultados apresentados são promissores, mas carecem de mais estudos, pois produzir um material em laboratório é diferente de produzi-lo em escala comercial. Espera-se que o material apresentado neste trabalho se torne uma alternativa técnica e economicamente viável que substitua componentes construtivos à base de amianto, principalmente as telhas de fibrocimento utilizadas por populações de baixa renda, cooperando assim com a prevenção de impactos ambientais e a promoção da saúde coletiva.

Referências

- [1] T. Douglas, L. Van den Borre, Asbestos neglect: Why asbestos exposure deserves greater policy attention. *Health Policy* 123 (2019) 516–519. <https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2019.02.001>.
- [2] D. Spasiano, F. Pirozzi, Treatments of asbestos containing wastes, *J. Environ. Manage.* 204 (2017) 82-91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.038>.
- [3] Obtido de: <https://g1.globo.com/politica/noticia/stf-proibe-em-todo-o-pais-producao-comercializacao-e-uso-de-materiais-com-amianto.ghtml>. Acesso em: 22 maio 2020.
- [4] R. D. Toledo Filho, F. A. Silva, E.M.R. Fairbairn, J. A. Melo Filho, Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 2409–2420. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.10.012.
- [5] F.A. Silva, R.D. Toledo Filho, J.A. Melo Filho, E.M.R. Fairbairn, Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 777–785. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.030.
- [6] J.A. Melo Filho, F.A. Silva, R.D. Toledo Filho, Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems, *Cem. Concr. Compos.* 40 (2013) 30–39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.003>.
- [7] S.R. Ferreira, P.R.L. Lima, F.A. Silva, R.D. Toledo Filho, Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland, *Revista Matéria* 17 (2012) 1024 – 1034.
- [8] G. Silva, S. Kim, R. Aguilar, J. Nakamatsu, Natural fibers as reinforcement additives for geopolymers – A review of potential eco-friendly applications to the construction industry, *Sustain. Mater. Technol.* 23 (2020) e00132. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00132>.

- [9] G.Z.B. Santos, J.A. Melo Filho, L. Manzato, Proposta de uma cerâmica obtida por meio de geopolimerização de lodo de ETA calcinado, *Cerâmica* 64 (2018) 276-283. <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132018643702353>.
- [10] G.Z.B. Santos, J.A. Melo Filho, M. Pinheiro, L. Manzato, Synthesis of water treatment sludge ash-based geopolymers in an Amazonian context, *J. Environ. Manage.* 249 (2019) 109328. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109328>.
- [11] G.Z.B. Santos, J. A. Melo Filho, L. Manzato, Perspectivas de aplicações tecnológicas de lodo gerado no processo de tratamento de água dos rios Negro e Solimões. *Revista Matéria* 23 (2018) e-12167. DOI: 10.1590/S1517-707620180003.0501.
- [12] R.H. Geraldo, L.F.R. Fernandes, G. Camarini, Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production, *J. Clean. Prod.* 149 (2017) 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.076>.
- [13] C. Suksiripattanapong, S. Horpibulsuk, S. Boongrasan, A. Udomchai, A. Chinkulkijniwat, A. Arulrajah, Unit weight, strength and microstructure of a water treatment sludge-fly ash lightweight cellular geopolymer, *Constr. Build. Mater.* 94 (2015) 807-816. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.091>.
- [14] C. Suksiripattanapong, S. Horpibulsuk, P. Chanprasert, P. Sukmak, A. Arulrajah, Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge, *Constr. Build. Mater.* 82 (2015) 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.040>.
- [15] N. Waijarean, S. Asavapisit, K. Sombatsompop, Strength and microstructure of water treatment residue-based geopolymers containing heavy metals, *Constr. Build. Mater.* 50 (2014) 486-491. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.047>.
- [16] E. Nimwinya, W. Arjharn, S. Horpibulsuk, T. Phoo-ngernkham, A. Poowancum, A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash Geopolymer, *J. Clean. Prod.* 119 (2016) 128-134. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.060>.
- [17] S. Horpibulsuk, C. Suksiripattanapong, W. Samingthong, R. Rachan, A. Arulrajah, Durability against wetting-drying cycles of water treatment sludge-fly ash geopolymer and water treatment sludge-cement and silty clay-cement systems, *J. Mater. Civ. Eng. ASCE*, 04015078 (2015) 1-9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001351](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001351)
- [18] X. Guo, H. Shi, W. Dick, Use of heat-treated water treatment residuals in fly ash-based geopolymers, *J. Am. Ceram. Soc.* 93 (2010), 272–278. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03331.x>.
- [19] T. Alomayri, I.M. Low, Synthesis and characterization of mechanical properties in cotton fiber-reinforced geopolymer composites, *J. As. Ceram. Soc.* 1 (2013) 30–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jascr.2013.01.002>.
- [20] R.A. Sá Ribeiro, M.G. Sá Ribeiro, K. Sankar, W.M. Kriven, Geopolymer-bamboo composite – A novel sustainable construction material, *Constr. Build. Mater.* 123 (2016) 501–507. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.037>.
- [21] M. Alzeer, K. MacKenzie, Synthesis and mechanical properties of novel composites of inorganic polymers (geopolymers) with unidirectional natural flax fibres (phormium tenax), *Appl. Clay Sci.* 75–76 (2013) 148–152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2013.03.010>.
- [22] K. Korniejenko, E. Fraczek, E. Pytlak, M. Adamski, Mechanical properties of geopolymer composites reinforced with natural fibers, *Procedia Eng.* 151 (2016) 388 – 393. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.395.
- [23] A.C.C. Trindade, P.H.R. Borges, F.A. Silva, Mechanical behavior of strain-hardening geopolymer composites reinforced with natural and PVA fibers, *Mater. Today: Proc.* 8 (2019) 753–759.

- [24] B. Zhou, L. Wang, G. Ma, X. Zhao, X. Zhao, Preparation and properties of bio-geopolymer composites with waste cotton stalk materials, *J. Clean. Prod.* 245 (2020) 118842. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118842>.
- [25] G. Lazorenko, A. Kasprzhitskii, A. Kruglikov, V. Mischinenko, V. Yavna, Sustainable geopolymer composites reinforced with flax tows, *Ceram. Int.* 46 (2020) 12870–12875. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.01.184>.
- [26] K. Walbrück, F. Maeting, S. Witzleben, D. Stephan, Natural Fiber-Stabilized Geopolymer Foams - A Review, *Materials* 13 (2020), 3198. DOI:10.3390/ma13143198.
- [27] A. Wongsu, R. Kunthawatwong, S. Naenudon, V. Sata, P. Chindaprasirt, Natural fiber reinforced high calcium fly ash geopolymer mortar, *Constr. Build. Mater.* 241 (2020) 118143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118143>.
- [28] G. Silva, S. Kim, B. Bertolotti, J. Nakamatsu, R. Aguilar, Optimization of a reinforced geopolymer composite using natural fibers and construction wastes, *Constr. Build. Mater.* 258 (2020) 119697. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119697>.
- [29] L.C.S. Alves, R.A.R. Ferreira, L.B. Machado, L.A.C. Motta, Optimization of metakaolin-based geopolymer reinforced with sisal fibers using response surface methodology, *Ind. Crop. Prod.* 139 (2019) 111551. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111551>.
- [30] Brasil, Política Nacional de Resíduos Sólidos. Obtido de: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 22 maio 2020.
- [31] M.L.M. Broeren, S.N.C. Dellaert, B. Cok, M.K. Patel, E. Worrell, L. Shen, Life cycle assessment of sisal fibre - Exploring how local practices can influence environmental performance, *J. Clean. Prod.* 149 (2017) 818-827. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.073>.
- [32] B.J. Mohr, H. Nanko, K.E. Kurtis, Durability of kraft pulp fiber–cement composites to wet/dry cycling, *Cem. Concr. Compos.* 27 (2005) 435–448. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.07.006.
- [33] A.C.C. Trindade, F.A. Silva, H.A. Alcamand, P.H.R. Borges, On the durability behavior of natural fiber reinforced geopolymers. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 38 (3) (2018). <https://doi.org/10.1002/9781119474746.ch20>.
- [34] R.Y. Nkwaju, J.N.Y. Djobo, J.N.F. Nouping, P.W.M. Huisken, J.G.N. Deutou, L. Courard, Iron-rich laterite-bagasse fibers based geopolymer composite: Mechanical, durability and insulating properties, *Appl. Clay Sci.* 183 (2019) 105333. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105333>.
- [35] J. Davidovits, *Geopolymer Cement, a Review*. Geopolymer Institute (2013), Saint-Quentin, France.
- [36] J. Davidovits, J.L. Sawyer, Early high-strength mineral polymer. United States Patent 4,509,985 (1985) Google Patents.
- [37] R.D. Toledo Filho, Natural fiber reinforced mortar composites: experimental characterization, PhD thesis, DEC-PUC-Rio, Brazil (1997).
- [38] J.L. Provis, P. Duxson, J.S.J. Van Deventer, The role of particle technology in developing sustainable construction materials - Review article, *Adv. Powder Technol.* 21(2010) 2–7. DOI: 10.1016/j.apt.2009.10.006.
- [39] G.Z.B. Santos, Argamassa geopolimérica à base de lodo de estação de tratamento de água calcinado. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2016.

CAPÍTULO 3. ARTIGO 2 - Alternativas circulares na indústria da construção: Avaliação do desempenho ambiental de compósitos reforçados com fibras de sisal

Resumo

No desenvolvimento de novos produtos, tanto o reaproveitamento de resíduos como o uso de materiais renováveis constituem importantes estratégias para uma produção mais circular. No entanto, não basta apenas idealizar um novo produto como ambientalmente sustentável, é necessário comprovar a hipótese por meio de metodologias cientificamente aceitas, como a Avaliação do Ciclo de Vida – ACV. Assim, os objetivos deste estudo foram avaliar e comparar, por meio de ACV, o desempenho ambiental de dois compósitos reforçados com fibras de sisal, sendo um produzido com matriz de cimento Portland e outro com matriz geopolimérica à base de um resíduo, o lodo de estação de tratamento de água. Quando se compara o desempenho ambiental dos compósitos usando os métodos de avaliação de impacto ReCiPe 2016 Midpoint/Endpoint e EN 15804 os resultados são convergentes: o compósito com matriz cimentícia possui menores impactos ambientais. A análise de sensibilidade mostrou que os pontos críticos ambientais nos dois compósitos são: produção do hidróxido de potássio e transporte para o compósito geopolimérico, produção do cimento e transporte para o compósito de cimento Portland. Os resultados mostraram que o compósito geopolimérico tem melhor desempenho ambiental apenas na categoria escassez de recursos minerais do método ReCiPe 2016 Midpoint e, quando comparado ao compósito de cimento Portland com 2% de superplastificante, na categoria toxicidade humana, cancerígena, do método EN 15804. Considerando que o compósito geopolimérico apresentou o pior desempenho ambiental, se for necessário escolher entre os dois compósitos analisados, a melhor alternativa para ser produzida em escala comercial, nesse momento, é o compósito com matriz de cimento Portland. Esta pesquisa contribui cientificamente ao apresentar potenciais alternativas à indústria da construção já avaliadas numa perspectiva ambiental. Mostra a relevância de se avaliar ambientalmente novos produtos em fase de desenvolvimento, pois afirmar que um material tem melhor desempenho ambiental apenas por ser produzido a partir de um resíduo ou de uma matéria-prima renovável pode não ser um reflexo fiel dos fatos.

Palavras-chave: economia circular, avaliação do ciclo de vida, compósito, geopolímero, lodo de estação de tratamento de água, sisal, materiais de construção.

1 Introdução

A agenda de sustentabilidade a nível global tem a indústria da construção como um dos setores que mais merece destaque. O consumo global de materiais de construção, por exemplo, triplicou de 6,7 bilhões de toneladas, em 2000, para 17,5 bilhões de toneladas, em 2017 [1]. Além disso, estima-se que a produção de cimento seja responsável por 5% a 10% das emissões do CO₂ antropogênico gerado globalmente [2].

De acordo com Huntzinger & Eatmon [3], a fabricação de cimento Portland causa diversos impactos ambientais em escala local, regional e global. Ruído, mudanças na qualidade do ar e perturbação natural, devido à mineração de matérias-primas como calcário, minério de ferro e argila, são considerados impactos locais. Emissões de dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x), precursores da chuva ácida, são impactos regionais, enquanto as emissões de carbono originadas do processo de calcinação e combustão de combustíveis fósseis contribuem para a mudança climática global [3].

Visando mitigar os impactos ambientais causados pela indústria da construção, diversos estudos sobre componentes construtivos ambientalmente sustentáveis estão sendo conduzidos em todo o mundo. Esses estudos tentam estar alinhados com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável lançados pela Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente o objetivo de número 12, que trata de consumo e produção responsáveis. Em longo prazo, tais iniciativas poderão contribuir para uma economia mundial mais circular. Kirchherr et al. [4] definem economia circular como um sistema econômico que substitui o conceito de ‘fim de vida’ pela redução, reutilização alternativa, reciclagem e recuperação de materiais em processos de produção/ distribuição e consumo.

No desenvolvimento de novos produtos, tanto o reaproveitamento de resíduos como o uso de materiais renováveis constituem importantes estratégias para uma produção mais circular. No entanto, não basta apenas idealizar um novo produto como ambientalmente sustentável, é necessário comprovar a hipótese por meio de métodos cientificamente aceitos. Para tanto existe a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, mundialmente estabelecida e normatizada pela ISO [5, 6]. A ACV enfoca os aspectos e os impactos ambientais potenciais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final [5, 6].

Quando a ACV é aplicada a produtos em fase de desenvolvimento é denominada ex-ante. A ACV ex-ante é a realização de uma avaliação do ciclo de vida ambiental de uma nova tecnologia

antes de ser implementada comercialmente, a fim de orientar as decisões de P&D para tornar esta nova tecnologia ambientalmente competitiva em comparação como mix de tecnologia existente [7]. O uso da ACV de forma ex-ante deve permitir antecipar potenciais impactos ambientais evitáveis e prevenir, por exemplo, investimentos em tecnologias que acabarão por provar ter um maior impacto ambiental [7].

À luz da economia circular, uma das opções estudadas por vários pesquisadores atuantes na indústria da construção consiste em substituir parcialmente o cimento Portland em elementos construtivos por outros componentes considerados menos impactantes, geralmente materiais pozolânicos [8, 9, 10]. Outra opção amplamente estudada é a substituição do cimento Portland por aglomerantes alternativos – os geopolímeros [11, 12], os quais têm o diferencial de utilizar como matéria-prima uma gama de resíduos e subprodutos industriais.

No que tange aos materiais empregados como reforço em componentes construtivos, as fibras naturais também estão sendo amplamente estudadas por apresentarem características como biodegradabilidade, renovabilidade, baixa densidade, propriedades de resistência específica relativamente altas, facilidade de manuseio, não periculosidade, não abrasividade, baixo custo [13, 14, 15] bem como a capacidade de sequestrar CO₂. No Brasil, há mais de duas décadas, em pesquisas focadas no desenvolvimento de compósitos para atender à indústria da construção, fibras de sisal (*Agave Sisalana*) estão sendo estudadas como reforço de matrizes cimentícias [8, 9, 10, 16, 17].

Recentemente, com o advento dos geopolímeros, diversos compósitos geopoliméricos reforçados com fibras vegetais foram desenvolvidos e avaliados em escala laboratorial [18-29]. Geopolímeros produzidos à base de lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA) apresentaram resultados promissores [30-37]. Nessa vertente, Santos et al. [38] desenvolveram um compósito geopolimérico com matriz de lodo de ETA e reforçado com fibras de sisal.

No que concerne à ACV de elementos construtivos, no Brasil alguns estudos foram desenvolvidos. Por meio de ACV, sistemas diferentes de paredes externas não estruturais foram avaliados por Bueno et al. [39], os impactos do ciclo de vida de telhas de cerâmica e de concreto foram comparados por Souza et al. [40] e os impactos ambientais de três tipos de parede comumente construídos no Brasil foram investigados por Souza et al. [41]. Usando a metodologia de ACV, Monteiro et al. [42] mensuraram os impactos ambientais da produção do concreto brasileiro. Alguns novos componentes construtivos desenvolvidos no contexto brasileiro com matriz de cimento Portland também foram avaliados quanto ao desempenho ambiental do seu ciclo de vida [43, 44].

Porém, a maioria das pesquisas desenvolvidas no contexto brasileiro sobre componentes construtivos é direcionada à viabilidade técnica. Ainda falta um banco de dados mais robusto bem como um método de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) desenvolvidos de acordo com a realidade brasileira para amparar os estudos de ACV elaborados no contexto e para o cenário brasileiro [39, 45]. De acordo com Souza et al. [45], o uso de dados secundários pode comprometer a representação de conjuntos de dados, porque as realidades e contextos considerados podem ser diferentes. E os métodos de AICV desenvolvidos para outros países podem não representar totalmente as práticas brasileiras [39, 40].

Neste trabalho dois compósitos desenvolvidos no contexto brasileiro foram estudados por meio de ACV. O primeiro compósito foi desenvolvido por Melo Filho et al. [8] e trata-se de um componente construtivo com de matriz de cimento Portland e argila calcinada. Como reforço foram empregadas fibras de sisal. O segundo compósito foi desenvolvido por Santos et al. [38] com matriz geopolimérica produzida à base de lodo de estação de tratamento de água, tendo fibras de sisal como reforço.

Como uma metodologia para avaliar os impactos ambientais potenciais associados a um produto, a ACV pode auxiliar na avaliação dos impactos ambientais associados a todas as fases da vida dos materiais de construção [1]. Assim, os objetivos deste estudo são avaliar e comparar o desempenho ambiental de dois compósitos reforçados com fibras de sisal, sendo um produzido com matriz de cimento Portland e outro com matriz geopolimérica à base de lodo de ETA. Os resultados obtidos poderão ser usados para evidenciar qual dos materiais estudados tem o melhor desempenho ambiental e apoiar decisões justificadas sobre a adequação de ambos os compósitos às demandas da indústria da construção. O público-alvo inclui produtores de fibras de sisal, a indústria da construção, possíveis usuários e a comunidade acadêmica.

Como contribuição científica, este estudo faz uma comparação do desempenho ambiental de dois componentes construtivos em fase de desenvolvimento, ambos especulados como materiais sustentáveis. Há na literatura científica inúmeros trabalhos disponíveis relatando o desempenho técnico de compósitos reforçados com fibras vegetais, desenvolvidos para usos na indústria da construção. Porém, existe uma lacuna no que tange à avaliação do desempenho ambiental desse tipo de material. Sendo assim, este estudo poderá contribuir para o conhecimento científico nesta área.

2 Materiais e métodos

Este estudo combinou dados experimentais secundários e um estudo de ACV. Sendo assim, esta seção foi dividida em (1) processo de produção e caracterização das fibras e dos compósitos e (2) ACV.

2.1 Produção e caracterização das fibras de sisal e dos compósitos

As fibras vegetais do Sisal são obtidas da *Agave Sisalana*, natural do México, porém o maior produtor mundial de sisal é o Brasil [46]. Medido ao longo de seu ciclo de vida, o sisal absorve mais dióxido de carbono do que produz [46]. Um estudo detalhado de ACV do sisal cultivado no Brasil foi conduzido por Broeren et al. [47] e foi empregado nesta pesquisa.

Foram escolhidos dois compósitos reforçados com fibras de sisal para avaliar seu desempenho ambiental por meio da ACV: um com matriz de cimento Portland [8] e outro com matriz geopolimérica [38]. O processo de produção desse tipo de compósito é basicamente composto de duas etapas: a primeira é a preparação da matriz. A segunda etapa é a dispersão de camadas da matriz e das fibras em moldes.

O processo de produção do compósito com matriz de cimento Portland encontra-se descrito em Melo Filho et al. [8] enquanto o processo referente à produção do compósito geopolimérico consta em Santos et al. [38]. Em comum, ambos os pesquisadores utilizaram como reforço fibras de sisal, provenientes de Valente, Bahia, Brasil, realizaram ciclos de molhagem e secagem para proporcionar o envelhecimento acelerado dos compósitos e procederam a cura de ambos em temperatura ambiente. Os resultados obtidos por Melo Filho et al. [8] e por Santos et al. [38] indicam a viabilidade técnica dos dois compósitos em escala laboratorial. Um resumo de tais resultados consta na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo das características dos compósitos cimentício e geopolimérico reforçados com fibras de sisal

Autor	Tipo de matriz	Quant. Ciclos	Resistência à flexão		Quant. Camadas	Volume de fibras
			Antes dos ciclos	Depois dos ciclos		
Melo Filho et al. [8]	Cimento Portland	10	26,86 MPa	21,64 MPa	5	6%
Santos et al. [38]	Geopolímero	10	15 MPa	11 MPa	1	2%

Na Tabela 1 é possível verificar que os compósitos não são equivalentes em sua composição, mas o são em sua função. Todos os componentes dos compósitos estão descritos no Inventário do Ciclo de Vida – ICV, Tabela 2, da seção 2.2.2.

Nenhum desses compósitos foi produzido em escala industrial, portanto, não existem no mercado. Assim, não faria sentido compará-los com um produto comercial. Mas ambos os autores realizaram ciclos de molhagem e secagem, um procedimento de envelhecimento acelerado conhecido na literatura científica [48, 49, 50], que visa principalmente atestar a viabilidade técnica dos compósitos para uso como elemento de cobertura. Para essa finalidade, em particular, ambos os compósitos podem ser considerados adequados no requisito resistência à flexão, pois posteriormente ao processo de envelhecimento acelerado, o desempenho mecânico de ambos estava de acordo com a norma brasileira pertinente [51]. Para telhas cerâmicas do tipo simples, por exemplo, essa norma estabelece como requisito que as cargas de ruptura à flexão não devem ser inferiores a 1000N (100Kgf), o equivalente a 9,8 MPa. Nesse contexto, pode-se considerar que os compósitos produzidos por Melo Filho et al. [8] e Santos et al. [38] têm potencial de aplicação comercial e podem ser comparados entre si. Porém, a fim de antever possíveis impactos ambientais, um estudo de ACV se faz necessário.

Na literatura científica geralmente se reconhece que a integração da ACV no início do processo de desenvolvimento pode direcionar as escolhas de projeto para a maximização do desempenho ambiental final de uma tecnologia [52].

2.2 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

São princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos brasileira a prevenção e a precaução [53]. Com base nesses princípios e fazendo o uso da metodologia de ACV pode-se prevenir que produtos com impactos ambientais severos sejam lançados no mercado. Por exemplo, no Brasil, telhas e reservatórios de água eram produzidos com fibras de amianto. Passadas algumas décadas, os impactos à saúde humana causados pela exposição ao amianto foram surgindo e essa fibra foi banida de diversos países. No entanto, estudos comprovam que mesmo depositados em aterros, os resíduos de amianto continuam causando impactos pois os aterros não são capazes de eliminar totalmente os riscos associados ao amianto [54].

Um estudo de ACV é composto de quatro fases iterativas [5, 6]: definição do objetivo e do escopo; análise do inventário do ciclo de vida; avaliação dos impactos do ciclo de vida e interpretação.

Como temos o interesse de saber a contribuição de carga ambiental de cada material, realizamos a modelagem da seguinte forma:

- ACV do compósito de fibras de sisal com matriz de cimento Portland;
- ACV do compósito de fibras de sisal com matriz geopolimérica de lodo de ETA;
- Comparação dos resultados.

2.2.1 Objetivo, escopo e unidade funcional

Os objetivos deste estudo são avaliar e comparar o desempenho ambiental de dois compósitos reforçados com fibras de sisal, sendo um produzido com matriz de cimento Portland e outro com matriz geopolimérica à base de lodo de ETA. Os resultados obtidos poderão ser usados para evidenciar qual dos materiais estudados tem o melhor desempenho ambiental e apoiar decisões justificadas sobre a adequação de ambos os compósitos às demandas da indústria da construção. Adicionalmente, possíveis problemas técnicos, ambientais e econômicos existentes nos compósitos poderão ser evidenciados antes de uma possível produção em escala industrial.

O público-alvo inclui produtores de fibras de sisal, a indústria da construção, possíveis usuários e a comunidade acadêmica. Quanto à cobertura temporal, a coleta de dados foi baseada nos anos de 2019 a 2021. Quanto à cobertura geográfica, o estudo foi desenvolvido considerando a cidade de Manaus como ponto de referência, localizada na região da Amazonia brasileira.

O escopo deste estudo abrange as etapas de aquisição de matérias-primas (A1), transporte (A2), processamento e fabricação dos compósitos (A3), conforme a organização da EN 15804:2019 [55], sendo comumente denominada de “berço ao portão”.

Considerando que a comparação dos resultados de diferentes estudos de ACV ou ICV só é possível se os pressupostos e o contexto de cada estudo forem equivalentes [5,6], declaramos que neste estudo não pretendemos fazer afirmações comparativas como preconizadas nas normas pertinentes, pois os compósitos estudados não estão disponíveis no mercado e não são equivalentes nem nos percentuais de fibras de sisal utilizadas como reforço. Os compósitos foram comparados entre si a fim de contribuir para o conhecimento científico nesta área.

A função de um material compósito depende de sua aplicação. Os materiais avaliados neste estudo podem ser utilizados como componentes construtivos tais como: placas planas e corrugadas, para usos em coberturas; painéis divisórios; revestimentos externos; construções residenciais; dentre outros. Sendo assim, a unidade funcional foi definida como “1 m² de compósito, adequado a diversos usos típicos de um componente construtivo similar”.

A unidade funcional é a base para uma comparação entre um produto estabelecido no mercado e a tecnologia alternativa que se propõe a substituí-lo. Mas devido às diferenças na composição e nas características, não foi possível comparar os compósitos aqui estudados com produtos disponíveis no mercado. Além do mais, não é fácil identificar todas as propriedades relevantes de tecnologias emergentes em escala industrial com base em informações de laboratório [52].

2.2.2 Inventário do ciclo de vida (ICV)

Os dados para o inventário do ciclo de vida dos compósitos foram, parcialmente, originados de trabalhos experimentais realizados pelos autores. Os demais dados foram retirados da literatura científica e dos bancos de dados que acompanham o software SimaPro (principalmente o Ecoinvent 3.7.1). Esses dados estão descritos na Tabela 2. Como o foco está somente no processo produtivo, assumimos que toda a estrutural industrial estava disponível e desconsideramos possíveis perdas de materiais e energia, bem como a geração de resíduos.

Tabela 2. Dados do inventário para a produção de 1 m² de compósitos geopolimérico e de cimento.

Produtos	Cenário 1	Cenário 2	Unid.
Compósito geopolimérico reforçado com fibras de sisal	1	1	m²
Materiais			
<i>Calcined sludge from water treatment plant with avoided product</i>	6,02919	6,02919	kg
<i>cement, blast furnace slag 35-70% {BR} market for cement, blast furnace slag 35-70% Cut-off, U</i>	1,1929	1,1929	kg
<i>Potassium hydroxide {RoW} production Cut-off, U</i>	1,57949	1,57949	kg
<i>Silica fume, densified {GLO} silica fume, densified, Recycled Content cut-off Cut-off, U</i>	2,10178	2,10178	kg
<i>sand {BR} sand quarry operation, extraction from river bed Cut-off, U</i>	2,20907	2,20907	kg
<i>tap water {BR} market for tap water Cut-off, U</i>	2,66667	2,66667	kg
<i>Sisal fiber</i>	0,39447	0,39447	kg
<i>tap water {BR} market for tap water Cut-off, U</i>	1,48954	1,48954	kg
<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cut-off, U</i>	16,7979	16,7979	tkm
Compósito de cimento Portland reforçado com fibras de sisal	1	1	m²
Materiais			
<i>cement, limestone 6-10% {BR} market for cement, limestone 6-10% Cut-off, U</i>	3,7455	3,7966	kg

<i>calcined clay {BR} calcined clay production Cut-off, U</i>	3,7455	3,7966	kg
<i>sand {BR} sand quarry operation, extraction from river bed Cut-off, U</i>	7,4911	7,5422	kg
<i>tap water {BR} market for tap water Cut-off, U</i>	3,1803	3,2314	kg
<i>Naphthalene sulfonic acid {RoW} production Cut-off, U</i>	0,3405	0,0851	kg
<i>Sisal fiber</i>	1,0833	1,1344	kg
<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cut-off, U</i>	7,0627	6,2214	tkm

Fibras de sisal	1	-	Ton.
Recursos			
<i>Water, river, BR</i>	0,03	-	m ³
<i>Energy, from biomass</i>	18	-	GJ
Materiais/combustíveis			
<i>land use change, perennial crop {BR-BA} land use change, perennial crop Cut-off, U</i>	0,06	-	ha
<i>Diesel, burned in agricultural machinery {GLO} market for diesel, burned in agricultural machinery Cut-off, U</i>	1440	-	MJ
<i>Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO3 Cut-off, U</i>	26	-	tkm
<i>transport, tractor and trailer, agricultural {RoW} market for transport, tractor and trailer, agricultural Cut-off, U</i>	2	-	tkm
Eletricidade			
<i>electricity, medium voltage {BR-Northern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U</i>	20	-	kWh
<i>electricity, medium voltage {BR-Northern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U</i>	8	-	kWh

Sisal

O ICV das fibras de sisal realizado por Broeren et al. [47] foi utilizado neste trabalho. Em algumas situações foi necessário adaptar os dados para lançar no software SimaPro e viabilizar assim a modelagem dos compósitos. Os dados de transporte para o “Resto do Mundo (RoW)” foram usados e não os dados europeus ou chineses. Por não haver no Ecoinvent 3.7.1 um caminhão de frete com capacidade para 3,5-16 toneladas, características descritas no ICV de Broeren et al. [47], um caminhão com características mais próximas foi utilizado: 7,5-16 toneladas métricas. A distância para calcular o transporte de 1 tonelada de sisal até o porto foi substituída pela distância entre as cidades de Valente e Manaus. A energia utilizada foi o grid do Nordeste brasileiro.

Compósito com matriz geopolimérica à base de lodo de ETA

O compósito geopolimérico desenvolvido por Santos et al. [38] é constituído de lodo de ETA calcinado (precursor), cimento à base escória (para melhorar a resistência mecânica – [12]), hidróxido de potássio e microssílica (componentes da solução alcalina), areia, água de torneira e fibras de sisal. Como não havia dados brasileiros para o hidróxido de potássio e para a

microsílica nos bancos de dados do SimaPro, foram utilizados os dados gerados para o “Resto do Mundo (RoW)” e “Globais (GLO)”, respectivamente.

Na produção de geopolímeros, argilas calcinadas são geralmente empregadas como material precursor [11]. Em um estudo anterior [56], foi constatado que o lodo de ETA ao ser calcinado pode ser utilizado em substituição à argila calcinada para determinadas aplicações, inclusive na produção de geopolímeros. Sendo assim, neste trabalho considerou-se que ao se utilizar 1 kg de lodo de ETA calcinado como precursor geopolimérico, evitar-se-ia o consumo de 1 kg de argila calcinada. Então lançamos como produto evitado no SimaPro a quantidade de argila calcinada proporcional à quantidade de lodo calcinado utilizada na produção do compósito.

Como não existia nos bancos de dados do SimaPro um *dataset* para lodo de ETA, foram inseridos dados primários, provenientes de trabalhos anteriores [34, 35, 56]. Para gerar um *dataset* para o lodo de ETA, utilizou-se o *dataset* de argila calcinada cadastrado no Ecoinvent (calcined clay {BR}| calcined clay production | Cut-off, U). Apenas quatro modificações foram realizadas. Uma referente à entrada de lodo não processado em substituição à argila. As outras três alterações são relacionadas às emissões água, de CO₂ e de metano durante o processo de calcinação.

As emissões de metano (0,000000013 kg) foram retiradas da literatura [57], enquanto as emissões de água e de CO₂ foram estimadas com base nos termogramas apresentados em Santos et al. [56], os quais traduzem as perdas de massa que ocorrem ao longo do processo de queima de lodos de ETA gerados sob a influência de dois rios amazônicos, os rios Negro e Solimões. Os lodos investigados por Santos et al. [56] são os mesmos utilizados como matéria-prima do compósito geopolimérico objeto do presente estudo.

De acordo com Souza et al. [57], as maiores emissões de CO₂ durante a queima de lodo de ETA ocorrem entre aproximadamente 200 e 600 °C, com pico máximo em torno de 450 °C, e estão relacionadas, fundamentalmente, à decomposição da matéria orgânica. Nos termogramas dos lodos de ETA estudados por Santos et al. [56], verifica-se que o lodo gerado sob a influência do Rio Negro, rio rico em matéria orgânica, apresentou uma perda de massa de mais de 50% após o processo de calcinação. Considerando que esta perda de massa pode estar majoritariamente relacionada à queima de matéria orgânica, assumiu-se que para cada 1 kg de lodo calcinado são emitidos 0,54 kg de CO₂, no caso do lodo do Rio Negro. Esse é o pior cenário possível, pois na produção do compósito geopolimérico objeto do presente estudo, o lodo calcinado utilizado como precursor consistiu em uma mistura 1:1 de lodos provenientes do tratamento de águas do Rios Negro e Solimões [38], sendo que o lodo do Rio Solimões não

apresentou percentuais significativos de matéria orgânica em sua composição, e sua perda de massa foi de aproximadamente 15% após a calcinação [56]. Por isso, optamos por utilizar a média provável de emissões de CO₂ ($0,54+0,15=0,69/2=0,345$). A emissão de água foi estimada em 0,00073 m³ para 1 kg de lodo calcinado, com base nos termogramas apresentados em Santos et al. [56].

Compósito com matriz de cimento Portland

O compósito desenvolvido por Melo Filho et al. [8] tem os seguintes componentes: cimento Portland com fíler, argila calcinada, areia, água de torneira, superplastificante e fibras de sisal. O cimento Portland, a argila calcinada, a areia e a água de torneira estavam disponíveis no Ecoinvent e com dados brasileiros. O superplastificante cadastrado para o “Resto do Mundo (RoW)” foi escolhido por não haver um produto similar para o contexto brasileiro.

Transporte

Os dados de transporte de minerais presentes na região do estudo foram calculados de acordo com informações disponíveis em Reis et al. [58], documento que relata a localização de diversas jazidas minerais no estado do Amazonas, BR. O endereço da Universidade Federal do Amazonas foi utilizado como ponto de referência, enquanto lócus experimental de produção dos compósitos.

Para tentar ser condizente com a realidade, com o auxílio do Google Maps, foram estimadas as distâncias que constam na Tabela 3. Toneladas dos materiais foram multiplicadas pelos quilômetros correspondentes e somadas. Desse modo foi obtida a unidade de medida em tkm. Para os demais componentes dos compósitos a opção “market” do Ecoinvent foi escolhida, pois nessa opção o transporte está incluso no material.

Tabela 3. Distâncias de transporte estimadas

Material	Distância (km)	Observação
Argila	60	Região metropolitana de Manaus
Areia	30	Região metropolitana de Manaus
Superplastificante	4265	De Duque de Caxias à Manaus
Hidróxido de potássio	3881	De São Paulo à Manaus
Microsilica	4150	De Joinville à Manaus
Sisal	4764	De Valente à Manaus
Lodo de ETA	15,2	Da ETA à Universidade (Manaus)

De acordo com Caldas e Sposto [59], o modal rodoviário é o mais utilizado no Brasil para o transporte de materiais de construção. Sendo assim, o modal rodoviário “EURO 3”, com

capacidade para 16-32 toneladas, presente no banco de dados Ecoinvent foi adotado, pois os caminhões brasileiros utilizados no transporte de materiais de construção normalmente possuem essas características [43].

2.2.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

No Brasil, a Rede de Pesquisa em Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (RAICV) foi criada em 2014 por pesquisadores com atuação na área de ACV [60]. Essa rede de pesquisadores elaborou um relatório de recomendações de modelos de AICV para o contexto brasileiro, para uso e para regionalização dos fatores de caracterização das categorias de impacto de acidificação, eutrofização, recursos bióticos e abióticos, método de contabilidade de recursos (RAM - Resource Accounting Methods), escassez hídrica e serviços ecossistêmicos [60]. No presente estudo, optou-se por um método à luz das recomendações da RAICV [60], mas que também estivesse disponível no software de ACV utilizado (SimaPro versão 9.2.0.2). O ReCiPe foi escolhido, por ser o mais citado entre os métodos e recomendado em 2 das 7 categorias de impacto estudadas pela RAICV.

O método ReCiPe 2016 traduz as emissões e extrações de recursos em um número limitado de pontuações de impacto ambiental por meio de fatores de caracterização de ponto médio e de ponto final [61]. Neste estudo, na modelagem dos compósitos foi usada uma combinação das versões ReCiPe 2016 Midpoint e Endpoint (ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.05 / World (2010) H e ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.05 / World (2010) H/H), ambas sob uma perspectiva hierárquica e com abrangência global.

No ReCiPe 2016 Midpoint são calculados 18 indicadores orientados para o problema: 1 - Aquecimento global; 2 - Depleção do ozônio estratosférico; 3 - Radiação ionizante; 4 - Formação de ozônio, Saúde humana; 5 - Formação de material particulado; 6 - Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres; 7 - Acidificação terrestre; 8 - Eutrofização de água doce; 9 - Eutrofização marinha; 10 - Ecotoxicidade terrestre; 11 - Ecotoxicidade de água doce; 12 - Ecotoxicidade marinha; 13 - Toxicidade humana cancerígena; 14 - Toxicidade humana não cancerígena; 15 - Uso do solo; 16 - Escassez de recursos minerais; 17 - Escassez de recursos fósseis e 18 - Consumo de água. Na versão do ReCiPe Endpoint são calculados 3 indicadores orientados para o dano: 1 – Saúde humana; 2 – Ecossistemas; 3 – Recursos. Os resultados obtidos por meio do método ReCiPe Endpoint foram usados somente para o cálculo de pontuação única do compósito, pois a conversão de pontos médios em pontos finais simplifica a interpretação, porém aumenta a incerteza dos resultados da AICV [61].

A literatura científica recomenda que a metodologia mais adequada para um estudo de ACV seria sempre a versão mais recente, desenvolvida no contexto mais semelhante possível ao cenário estudado [39]. Por ser o mais recente, na análise de sensibilidade foi utilizado o método EN 15804 (EN 15804 +A2 Method V1.01 / EF 3.0 normalization and weighting set).

Esse é um método de ponto médio, mas que permite o cálculo para pontuação única no SimaPro. Calcula 28 categorias de impacto descritas: 1 - Mudanças climáticas; 2 - Destruição do ozônio; 3 - Radiação ionizante; 4 - Formação fotoquímica de ozônio; 5 - Material particulado; 6 - Toxicidade humana, não cancerígena; 7 - Toxicidade humana, cancerígena; 8 - Acidificação; 9 - Eutrofização, água doce; 10 - Eutrofização marinha; 11 - Eutrofização terrestre; 12 - Ecotoxicidade, água doce; 13 - Uso do solo; 14 - Uso da água; 15 - Uso de recursos, fósseis; 16 - Uso de recursos, minerais e metais; 17 - Mudanças climáticas - Fósseis; 18 - Mudanças climáticas - Biogênicas; 19 - Mudanças climáticas - Uso do solo e mudança de uso do solo; 20 - Toxicidade humana, não cancerígena - orgânicos; 21 - Toxicidade humana, não cancerígena - inorgânicos; 22 - Toxicidade humana, não cancerígena - metais; 23 - Toxicidade humana, cancerígena - orgânicos; 24 - Toxicidade humana, cancerígena - inorgânicos; 25 - Toxicidade humana, cancerígena - metais; 26 - Ecotoxicidade, água doce - orgânicos; 27 - Ecotoxicidade, água doce - inorgânicos; 28 - Ecotoxicidade, água doce - metais.

2.2.4 Análise de sensibilidade

Seguindo as diretrizes da norma ABNT ISO 14044, visando ao entendimento das incertezas dos resultados, deve ser realizada uma análise de sensibilidade [6]. Sendo assim, neste trabalho uma análise de sensibilidade foi realizada alterando-se alguns parâmetros durante a modelagem dos compósitos e utilizando-se um segundo método de AICV.

Os resultados das modelagens preliminares evidenciaram quais componentes dos compósitos eram os mais impactantes. No compósito com matriz de cimento Portland, 50% do cimento foi substituído por argila calcinada, sendo este percentual de substituição o máximo possível. Mesmo com a substituição, o cimento permaneceu sendo o componente mais impactante do compósito em questão. Como o superplastificante também foi responsável por um significativo impacto ambiental, dois cenários de uso foram avaliados: 0,4 e 2%, em relação à massa total do compósito de cimento Portland (ver Tabela 2). No entanto, um compósito com apenas 0,4% de superplastificante não foi produzido e não se sabe se isso seria possível. Com essa redução, buscou-se evidenciar o impacto ambiental relacionado ao superplastificante.

No compósito com matriz geopolimérica não houve possibilidade de reduzir o produto mais impactante, o hidróxido potássio. Nos estudos anteriores essa possibilidade foi testada em laboratório, sem sucesso [62]. Para o compósito geopolimérico outra possibilidade foi estudada. Como relatado na seção 2.2.2, considerou-se na modelagem que ao se utilizar 1 kg de lodo de ETA calcinado como precursor geopolimérico, evitar-se-ia o consumo de 1 kg de argila calcinada. Portanto, dois cenários para o compósito geopolimérico foram avaliados: um com produto evitado e outro sem (ver Tabela 2).

Sendo assim, os seguintes cenários foram estudados:

- Cenário 1: compósito geopolimérico de fibra de sisal com produto evitado e compósito de cimento e sisal com 2% de superplastificante.
- Cenário 2: compósito geopolimérico de fibra de sisal sem produto evitado e compósito de cimento e sisal com 0,4% de superplastificante.

Constam na Tabela 2 os percentuais dos componentes de ambos os compósitos e para ambos os cenários.

Bueno et al. [39] realizaram uma análise de sensibilidade de resultados de ACV ao uso de cinco métodos diferentes de AICV. Relataram variações significativas nos resultados de algumas das categorias de impactos dos métodos de AICV estudados. Sendo assim, para um estudo de ACV ser considerado confiável, faz-se necessário se utilizar mais de um método de AICV. Como comentado na seção anterior, foi utilizado o método EN 15804 para avaliar a sensibilidade dos resultados quanto ao método de AICV aplicado – o ReCiPe 2016.

3 Resultados e discussão

Após a modelagem dos dados do ICV no software SimaPro, obteve-se a avaliação de impacto ambiental para cada compósito e por cenário. Os impactos ambientais foram delimitados em categorias e quantificados pelo software, conforme os métodos de AICV escolhidos (ReCiPe 2016 e EN 15804).

Primeiramente, para evidenciar os pontos críticos, foi analisada a contribuição de cada componente e processo unitário nos impactos ambientais relacionados aos compósitos. Em seguida, o desempenho ambiental dos compósitos foi comparado e, à luz da norma EN 15804 [55], selecionadas as categorias de impacto mais evidentes para serem interpretadas.

3.1 Resultados da AICV

3.1.1 AICV – método ReCiPe 2016 Midpoint e Endpoint

Nas Figuras 1 e 2 são representados a participação de cada componente e processo unitário nos impactos ambientais do compósito geopolimérico.

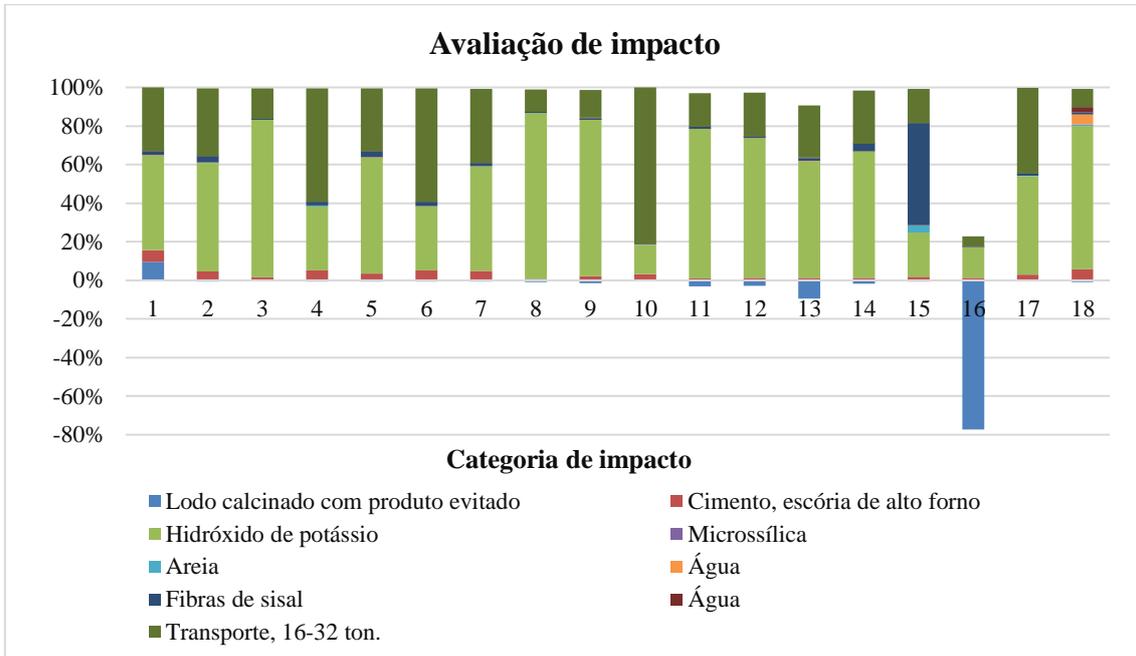


Figura 1: Caracterização dos impactos ambientais relacionados ao compósito geopolimérico com produto evitado, de acordo com o ReCiPe 2016 Midpoint. Categoria de impacto: 1 - Aquecimento global; 2 - Depleção do ozônio estratosférico; 3 - Radiação ionizante; 4 - Formação de ozônio, Saúde humana; 5 - Formação de material particulado; 6 - Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres; 7 - Acidificação terrestre; 8 - Eutrofização de água doce; 9 - Eutrofização marinha; 10 - Ecotoxicidade terrestre; 11 - Ecotoxicidade de água doce; 12 - Ecotoxicidade marinha; 13 - Toxicidade humana cancerígena; 14 - Toxicidade humana não cancerígena; 15 - Uso do solo; 16 - Escassez de recursos minerais; 17 - Escassez de recursos fósseis e 18 - Consumo de água.

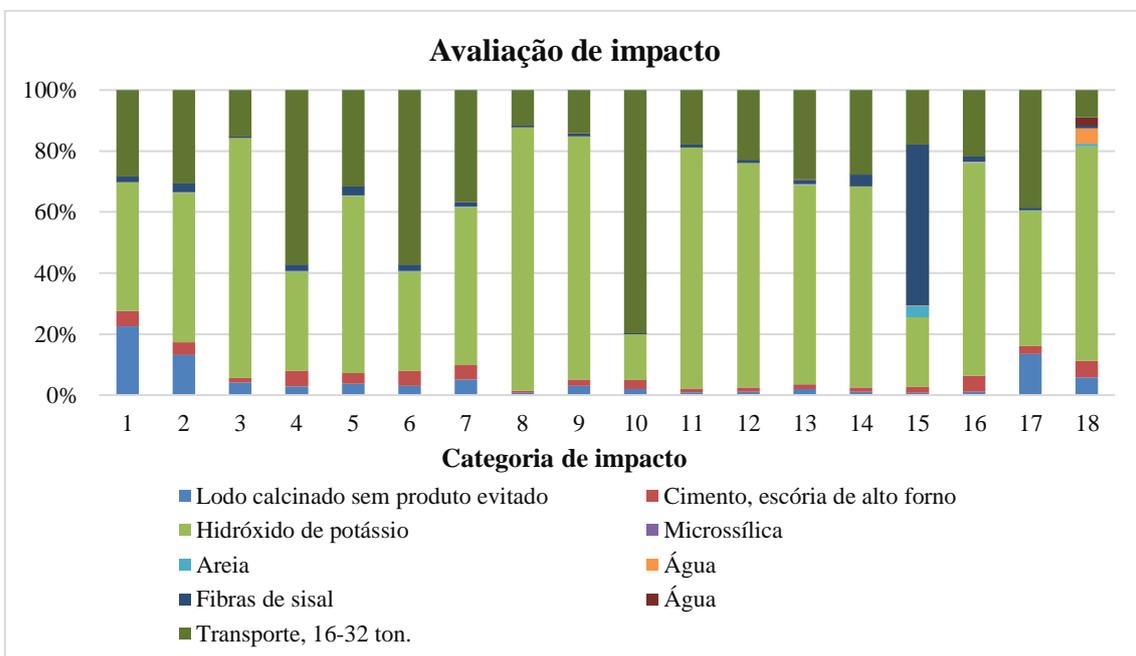


Figura 2: Caracterização dos impactos ambientais relacionados ao compósito geopolimérico sem produto evitado, de acordo com o ReCiPe 2016 Midpoint. Categoria de impacto: 1 - Aquecimento global; 2 - Depleção do ozônio estratosférico; 3 - Radiação ionizante; 4 - Formação de ozônio, Saúde humana; 5 - Formação de material particulado; 6 - Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres; 7 - Acidificação terrestre; 8 - Eutrofização de água doce; 9 - Eutrofização marinha; 10 - Ecotoxicidade terrestre; 11 - Ecotoxicidade de água doce; 12 - Ecotoxicidade marinha; 13 - Toxicidade humana cancerígena; 14 - Toxicidade humana não cancerígena; 15 - Uso do solo; 16 - Escassez de recursos minerais; 17 - Escassez de recursos fósseis e 18 - Consumo de água.

Após proceder a modelagem dos dados no software SimaPro, dentre várias alternativas, é possível visualizar os resultados em rede. Inclusive, nessa opção é possível rastrear os subprocessos mais ambientalmente impactantes na cadeia produtiva das matérias-primas. E no ReCiPe Endpoint os dados podem ser visualizados sob uma perspectiva de pontuação única. Desse modo, verificou-se que no compósito com matriz geopolimérica, no cenário com produto evitado (Figura 1), o componente que mais causa impacto ambiental, evidente em quase todas as categorias de impacto, é o hidróxido de potássio (56,8%), seguido pelo transporte (34,5%) e pelo lodo de ETA calcinado (2,43%). E para a carga ambiental atribuída ao hidróxido de potássio, o subprocesso que mais contribuiu foi a eletricidade (25,4%).

No compósito com matriz geopolimérica, no cenário sem produto evitado (Figura 2), de modo semelhante ao cenário anterior, o componente que mais causa impacto ambiental é o hidróxido de potássio (51,4%), seguido pelo processo de transporte (30,3%). Em relação ao cenário anterior, a carga ambiental atribuída ao lodo calcinado mais que quadruplicou (11,6%). Parte desse percentual é referente à produção do coque de petróleo, o qual constava no *dataset* da argila calcinada que foi usado na modelagem do lodo. Como comentado no tópico referente ao ICV, não havia um *dataset* para o lodo de ETA nos bancos de dados presentes no SimaPro, então foi utilizado o *dataset* de argila calcinada cadastrado no Ecoinvent para o cenário brasileiro.

Nesse *dataset*, dentre as fontes de energia usadas no processo de calcinação de argila está o coque de petróleo, uma fonte fóssil. Pelo fato de o petróleo ser um recurso fóssil não renovável, o resultado da avaliação de impacto referente ao cenário sem produto evitado (Figura 2) mostrou que o lodo foi responsável por mais de 15% do impacto ambiental na categoria 17, escassez de recurso fóssil, mesmo sendo um resíduo. Além disso, na categoria 1, aquecimento global, o lodo atingiu mais de 20%, o que também está relacionado ao processo de calcinação e combustíveis empregados. No mais, os impactos relativos ao KOH e aos demais componentes do compósito são mais evidentes nesse último cenário.

Considerando que no caso do geopolímero produzido à base de lodo calcinado ocorre uma mudança significativa de um cenário para o outro [6], sugere-se que na modelagem de

geopolímeros produzidos à base de resíduos seja, se possível, considerado que para cada kg de resíduo utilizado como precursor conserva-se o equivalente em recurso natural não renovável. No presente trabalho isso é fato, pois o precursor geopolimérico mais utilizado é o metacaulim (argila calcinada).

Uma vantagem ambiental de se usar o lodo de ETA como o precursor do compósito geopolimérico pode ser observada na categoria nº 16, escassez de recursos minerais. No cenário com produto evitado, o impacto ambiental atribuído ao lodo calcinado foi negativo, -0,082 kg Cu eq, enquanto no cenário sem produto evitado esse valor subiu para 0,00028 kg Cu eq, o que representa um aumento de mais de 100%. Portanto, com base na categoria escassez de recursos minerais e no cenário com produto evitado, o compósito geopolimérico pode ser considerado um material circular, que previne danos ambientais e contribui para conservação de recursos naturais.

Na composição do compósito geopolimérico há três resíduos sendo reciclados: o lodo de ETA, o cimento de escória e a microssílica. O compósito foi curado à temperatura ambiente e evitar a cura térmica de geopolímeros pode reduzir, em alguns casos, os impactos ambientais associados a esses produtos em até 50% [63]. Além disso, o compósito foi reforçado com uma fibra vegetal, mas os impactos relacionados ao emprego do KOH como ativador alcalino foram capazes de suprimir até o fato de o lodo calcinado evitar o uso de argila calcinada.

Cerca de 23% dos impactos referentes à categoria transporte estão diretamente relacionados ao KOH, que em si já é um produto ambientalmente impactante. Transportá-lo por longas distâncias somente agravou os impactos. De acordo com Baird e Cann [64], o funcionamento de veículos automotivos produz mais poluição do ar que qualquer outra atividade humana.

Conforme apresentado no ICV, durante a modelagem assumiu-se que o hidróxido de potássio foi transportado de São Paulo, BR, à Manaus, BR, o que representa uma distância de 3881 km. A microssílica e o sisal percorreram distâncias de mais de 4000 km. E todos esses materiais foram transportados via frete em caminhão, o modal rodoviário “EURO 3” do Ecoinvent, com capacidade para 16-32 toneladas.

A despeito das dificuldades de logística no espaço amazônico, uma solução quanto ao transporte do KOH, para o caso de produção industrial do compósito, seria adquirir esse mineral de fornecedores localizados nas proximidades da indústria produtora. Com a disponibilidade de reservas minerais de silvinita no Amazonas, futuramente essa alternativa poderá se viabilizar [65]. Mas todos os impactos associados ao KOH só poderão ser solucionados com a substituição

deste produto por outros ativadores alcalinos menos impactantes, tais como cinzas de cascas de arroz, o que já foi investigado por outros pesquisadores [30, 63].

Em um estudo preliminar sobre a síntese de geopolímero à base de lodo de ETA, foi testada uma solução alcalina composta de uma mistura de hidróxido de sódio e sílica extraída de cinzas de cascas de arroz [62]. Mas a amostra sintetizada dessa forma rompeu-se espontaneamente após a desmoldagem [62]. Nesse contexto, a fim de produzir um geopolímero mais resistente mecanicamente, optou-se por usar a microssílica industrial e o hidróxido de potássio como componentes da solução alcalina.

Passuello et al. [63] compararam o desempenho ambiental de pastas de cimento Portland com geopolímeros produzidos à base de resíduo de caulim como precursor e ativador alcalino derivado de cinzas de cascas de arroz. Quando a resistência à compressão de ambos os materiais não foi considerada, os geopolímeros só apresentaram menor impacto ambiental que a pasta de cimento Portland na categoria potencial de aquecimento global. Mesmo quando a resistência à compressão foi relacionada aos impactos, embora os geopolímeros fossem mecanicamente mais resistentes que a pasta de cimento Portland, apresentaram valores de impacto até 150% maiores em 4 de 9 categorias avaliadas [63]. Com base nesses dados, pode-se inferir que um geopolímero mesmo sendo produzido majoritariamente a partir de resíduos, seus impactos ambientais podem ser maiores que os de uma pasta de cimento Portland.

A seguir, nas Figuras 3 e 4, são representados a participação de cada componente e processo unitário nos impactos ambientais do compósito com matriz de cimento Portland.

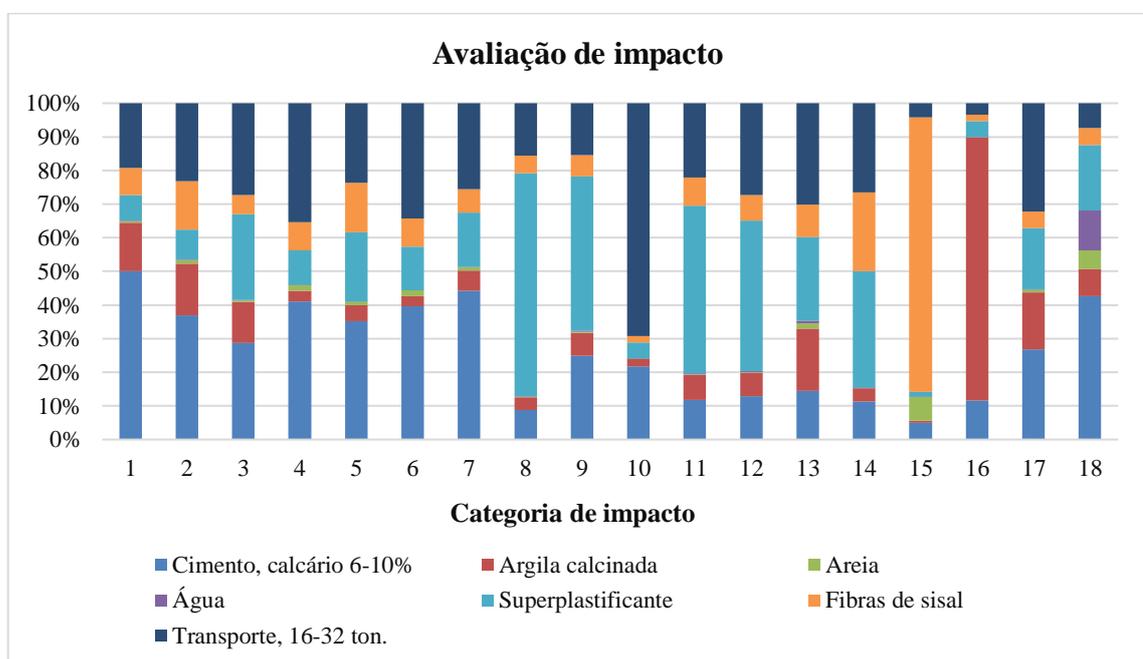


Figura 3: Caracterização dos impactos ambientais relacionados ao compósito com matriz de cimento Portland e 2% de superplastificante, de acordo com o ReCiPe 2016 Midpoint. Categoria de impacto: 1 - Aquecimento global; 2 - Depleção do ozônio estratosférico; 3 - Radiação ionizante; 4 - Formação de ozônio, Saúde humana; 5 - Formação de material particulado; 6 - Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres; 7 - Acidificação terrestre; 8 - Eutrofização de água doce; 9 - Eutrofização marinha; 10 - Ecotoxicidade terrestre; 11 - Ecotoxicidade de água doce; 12 - Ecotoxicidade marinha; 13 - Toxicidade humana cancerígena; 14 - Toxicidade humana não cancerígena; 15 - Uso do solo; 16 - Escassez de recursos minerais; 17 - Escassez de recursos fósseis e 18 - Consumo de água.

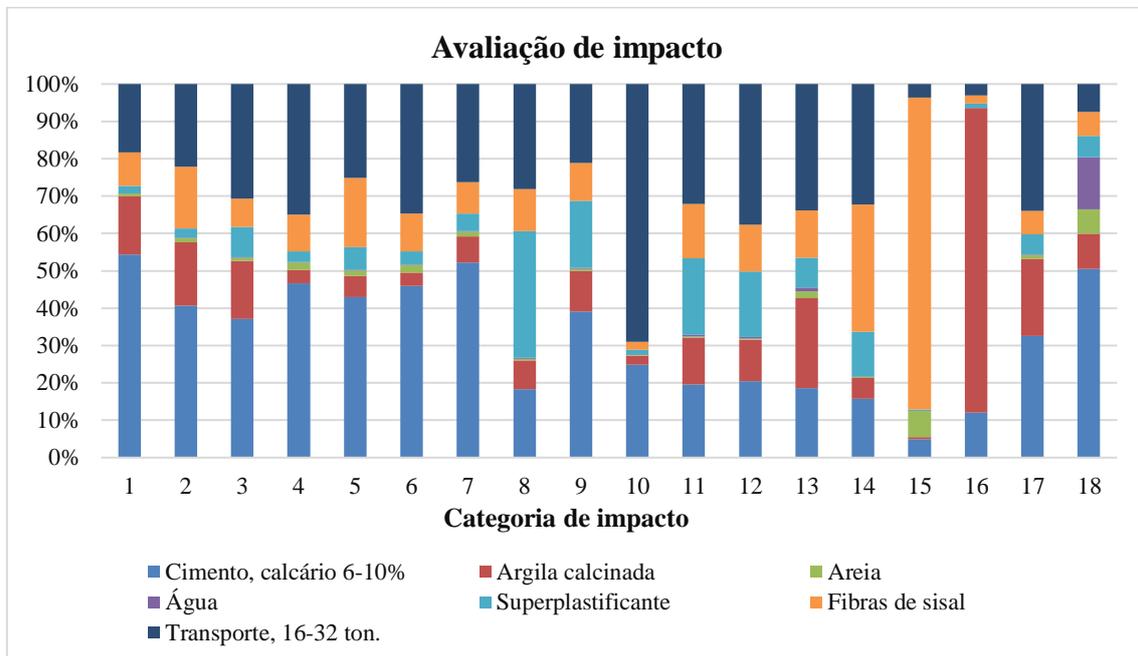


Figura 4: Caracterização dos impactos ambientais relacionados ao compósito com matriz de cimento Portland e 0,4% de superplastificante, de acordo com o ReCiPe 2016 Midpoint. Categoria de impacto: 1 - Aquecimento global; 2 - Depleção do ozônio estratosférico; 3 - Radiação ionizante; 4 - Formação de ozônio, Saúde humana; 5 - Formação de material particulado; 6 - Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres; 7 - Acidificação terrestre; 8 - Eutrofização de água doce; 9 - Eutrofização marinha; 10 - Ecotoxicidade terrestre; 11 - Ecotoxicidade de água doce; 12 - Ecotoxicidade marinha; 13 - Toxicidade humana cancerígena; 14 - Toxicidade humana não cancerígena; 15 - Uso do solo; 16 - Escassez de recursos minerais; 17 - Escassez de recursos fósseis e 18 - Consumo de água.

No compósito com matriz de cimento Portland produzida com 2% de superplastificante, cerca de 38,8% dos impactos ambientais estão relacionados ao cimento, 10,3% à argila calcinada, 15% ao superplastificante, 12,6% às fibras de sisal e 22,5% ao transporte. No compósito com matriz de cimento Portland produzida com 0,4% de superplastificante, 45% dos impactos ambientais estão relacionados ao cimento, 11,9% à argila calcinada, 15,1% às fibras de sisal e 22,7% ao transporte. Estes valores são obtidos quando os impactos ambientais são agrupados em uma única categoria (ReCiPe *Endpoint*). Nesse último cenário, o superplastificante não apresentou percentual de carga ambiental representativa frente aos demais componentes do compósito. Portanto, da perspectiva ambiental, reduzir o percentual de superplastificante ao mínimo possível é uma boa decisão.

Do percentual referente à carga ambiental do cimento Portland, a produção do clínquer é o processo majoritariamente mais impactante. Os percentuais atribuídos à argila calcinada e ao superplastificante se devem em sua totalidade aos seus respectivos processos de produção. Quanto ao sisal, sua parcela de impactos é referente à mudança no uso do solo. E quanto ao transporte, sua carga ambiental está relacionado ao modal rodoviário.

Os impactos ambientais causados pelo cimento Portland são amplamente conhecidos e divulgados no meio científico. A produção industrial de cimento abrange as seguintes etapas: extração de matéria-prima, secagem, peneiramento, trituração e moagem de matéria-prima, pré-homogeneização, moagem, pré-aquecimento e pré-calcinação de farinha crua, calcinação resultando na produção de clínquer, resfriamento e armazenamento, moagem final do clínquer, mistura com gesso e outros aditivos, armazenamento final e embalagem do cimento [2]. Mais de 80% do impacto ambiental geral da fabricação de cimento Portland se deve à produção do clínquer por meio de calcinação, etapa realizada em temperaturas acima de 1400 °C, na qual ocorre, além de elevado consumo de energia, a liberação de carbono [3].

E visando à redução de impactos ambientais, uma alternativa que tem se mostrado adequada é substituir parcialmente o cimento Portland por argilas calcinadas, uma vez que a calcinação da argila é realizada em temperaturas inferiores, no máximo 850° C [66, 67]. Além disso, a adição de materiais pozolânicos, como argilas calcinadas, melhora a durabilidade de compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais, pois ocorre uma interação da pozolana com o hidróxido de cálcio presente no cimento Portland, componente associado à degradação desse tipo de fibra [8, 9, 10]. E a durabilidade é um requisito indispensável quando se trata de materiais de construção, seja por questões técnicas, econômicas, ambientais ou ambas.

Com o uso de argila calcinada em substituição à 50% do cimento, impactos associados a esse componente foram significativamente minimizados, uma vez que a carga ambiental do cimento foi mais que 3 vezes superior à da argila calcinada no cenário com produto evitado e aproximadamente 4 vezes superior no outro cenário avaliado. No compósito com matriz de cimento Portland produzida com 0,4% de superplastificante, diferentemente do que era esperado, o componente com o terceiro maior percentual de impacto ambiental em quase todas as categorias avaliadas foi o sisal, um recurso natural renovável, fibra vegetal cuja emissão de carbono biogênico é considerada neutra para fins de contabilização de gases de efeito estufa [47].

Quando se compara todos os compósitos, verifica-se que no compósito geopolimérico o sisal não apresentou percentual de carga ambiental significativo. Acontece que apenas uma camada

de sisal foi usada na composição desse material, enquanto no compósito de cimento Portland foram aplicadas 5 camadas. Com isso, pode se esperar que no compósito de cimento Portland a maior quantidade de sisal acarrete a diminuição de impactos de outros insumos, mas sem aumentar significativamente os impactos totais. Rojas-Bringas et al. [68] constataram, de modo geral, que o aumento do conteúdo de fibras de castanha do Brasil na composição de biocompósitos se traduziu em encargos ambientais mais baixos para a maioria das categorias de impactos avaliadas.

3.1.2. AICV – Análise de sensibilidade – método EN 15804

Nas Figuras 5 e 6 são representados a participação de cada componente e processo unitário nos impactos ambientais do compósito geopolimérico.

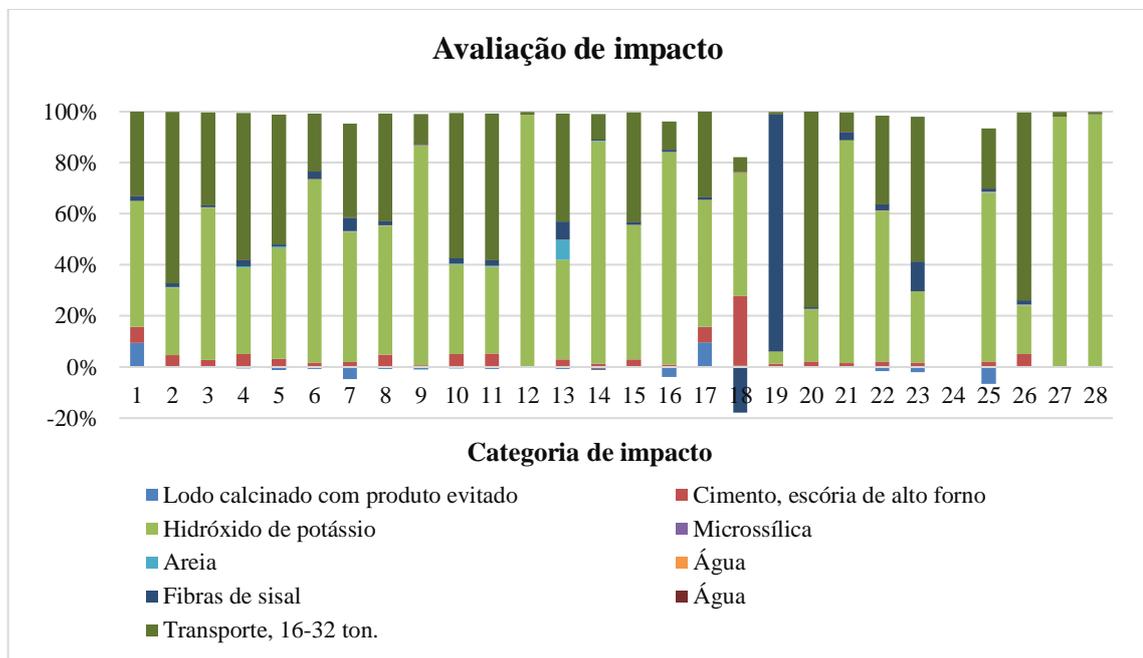


Figura 5: Caracterização dos impactos ambientais relacionados ao compósito geopolimérico com produto evitado, de acordo com o EN 15804. Categoria de impacto: 1 - Mudanças climáticas; 2 - Destruição do ozônio; 3 - Radiação ionizante; 4 - Formação fotoquímica de ozônio; 5 - Material particulado; 6 - Toxicidade humana, não cancerígena; 7 - Toxicidade humana, cancerígena; 8 - Acidificação; 9 - Eutrofização, água doce; 10 - Eutrofização marinha; 11 - Eutrofização terrestre; 12 - Ecotoxicidade, água doce; 13 - Uso do solo; 14 - Uso da água; 15 - Uso de recursos, fósseis; 16 - Uso de recursos, minerais e metais; 17 - Mudanças climáticas - Fósseis; 18 - Mudanças climáticas - Biogênicas; 19 - Mudanças climáticas - Uso do solo e mudança de uso do solo; 20 - Toxicidade humana, não cancerígena - orgânicos; 21 - Toxicidade humana, não cancerígena - inorgânicos; 22 - Toxicidade humana, não cancerígena - metais; 23 - Toxicidade humana, cancerígena - orgânicos; 24 - Toxicidade humana, cancerígena - inorgânicos; 25 - Toxicidade humana, cancerígena - metais; 26 - Ecotoxicidade, água doce - orgânicos; 27 - Ecotoxicidade, água doce - inorgânicos; 28 - Ecotoxicidade, água doce - metais.

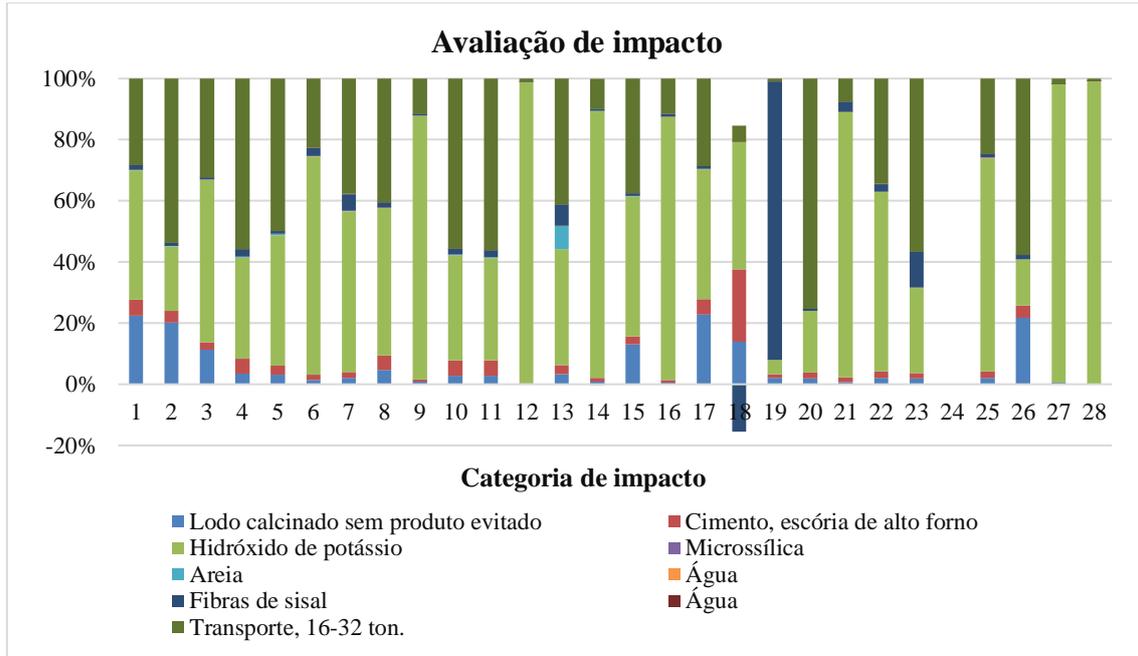


Figura 6: Caracterização dos impactos ambientais relacionados ao compósito geopolimérico sem produto evitado, de acordo com o EN 15804. Categoria de impacto: 1 - Mudanças climáticas; 2 - Destruição do ozônio; 3 - Radiação ionizante; 4 - Formação fotoquímica de ozônio; 5 - Material particulado; 6 - Toxicidade humana, não cancerígena; 7 - Toxicidade humana, cancerígena; 8 - Acidificação; 9 - Eutrofização, água doce; 10 - Eutrofização marinha; 11 - Eutrofização terrestre; 12 - Ecotoxicidade, água doce; 13 - Uso do solo; 14 - Uso da água; 15 - Uso de recursos, fósseis; 16 - Uso de recursos, minerais e metais; 17 - Mudanças climáticas - Fósseis; 18 - Mudanças climáticas - Biogênicas; 19 - Mudanças climáticas - Uso do solo e mudança de uso do solo; 20 - Toxicidade humana, não cancerígena - orgânicos; 21 - Toxicidade humana, não cancerígena - inorgânicos; 22 - Toxicidade humana, não cancerígena - metais; 23 - Toxicidade humana, cancerígena - orgânicos; 24 - Toxicidade humana, cancerígena - inorgânicos; 25 - Toxicidade humana, cancerígena - metais; 26 - Ecotoxicidade, água doce - orgânicos; 27 - Ecotoxicidade, água doce - inorgânicos; 28 - Ecotoxicidade, água doce - metais.

De acordo com o método EN 15804, quando os impactos ambientais são agrupados em uma única categoria (*Endpoint*), no compósito geopolimérico, no cenário com produto evitado, o componente com a maior carga ambiental é hidróxido de potássio, chegando a 85,2% do total, seguido pelo transporte, com 12,7%. Ao todo, 71,4% dos impactos atribuídos ao hidróxido de potássio estão relacionados ao insumo cloreto de potássio e à mineração. Nesse mesmo cenário, os resultados obtidos por meio do método ReCiPe Endpoint 2016 foram bastante diferentes: a carga ambiental do hidróxido de potássio foi de 56,8% do total e o subprocesso que mais contribuiu para isso foi a eletricidade (25,4%).

No cenário sem produto evitado, o componente responsável pelo maior impacto ambiental na composição do compósito geopolimérico foi novamente o hidróxido de potássio (82,4%), seguido pelo transporte (11,9%). Em termos percentuais, esses resultados são complementares diferentes daqueles obtidos para o mesmo cenário por meio do método ReCiPe Endpoint 2016,

no qual ao hidróxido de potássio foram atribuídos 51,4% da carga ambiental total e ao processo de transporte 30,3%.

Porém, ambos os métodos são convergentes, pois sugerem que a carga ambiental do compósito geopolimérico para os dois cenários estudados está relacionada majoritariamente ao hidróxido de potássio, seguido pelo processo de transporte. Entretanto, no que se refere à distribuição em percentual dessa carga, há uma diferença demasiada entre os métodos. Além disso, os valores de impactos ambientais abaixo de zero, verificados no cenário com produto evitado, são bastante inferiores daqueles verificados por meio do método ReCiPe 2016 Midpoint.

A seguir, nas Figuras 7 e 8, são representados a participação de cada componente e processo unitário nos impactos ambientais do compósito com matriz de cimento Portland.

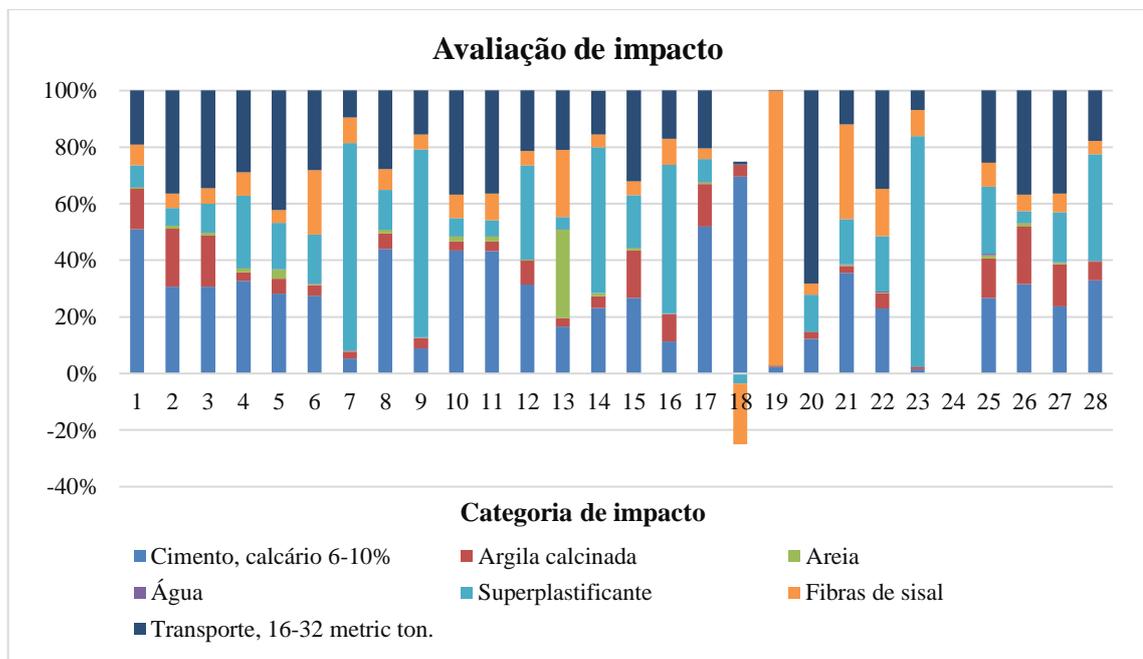


Figura 7: Caracterização dos impactos ambientais relacionados ao compósito com matriz de cimento Portland e 2% de superplastificante, de acordo com o EN 15804. Categoria de impacto: 1 - Mudanças climáticas; 2 - Destruição do ozônio; 3 - Radiação ionizante; 4 - Formação fotoquímica de ozônio; 5 - Material particulado; 6 - Toxicidade humana, não cancerígena; 7 - Toxicidade humana, cancerígena; 8 - Acidificação; 9 - Eutrofização, água doce; 10 - Eutrofização marinha; 11 - Eutrofização terrestre; 12 - Ecotoxicidade, água doce; 13 - Uso do solo; 14 - Uso da água; 15 - Uso de recursos, fósseis; 16 - Uso de recursos, minerais e metais; 17 - Mudanças climáticas - Fósseis; 18 - Mudanças climáticas - Biogênicas; 19 - Mudanças climáticas - Uso do solo e mudança de uso do solo; 20 - Toxicidade humana, não cancerígena - orgânicos; 21 - Toxicidade humana, não cancerígena - inorgânicos; 22 - Toxicidade humana, não cancerígena - metais; 23 - Toxicidade humana, cancerígena - orgânicos; 24 - Toxicidade humana, cancerígena - inorgânicos; 25 - Toxicidade humana, cancerígena - metais; 26 - Ecotoxicidade, água doce - orgânicos; 27 - Ecotoxicidade, água doce - inorgânicos; 28 - Ecotoxicidade, água doce - metais.

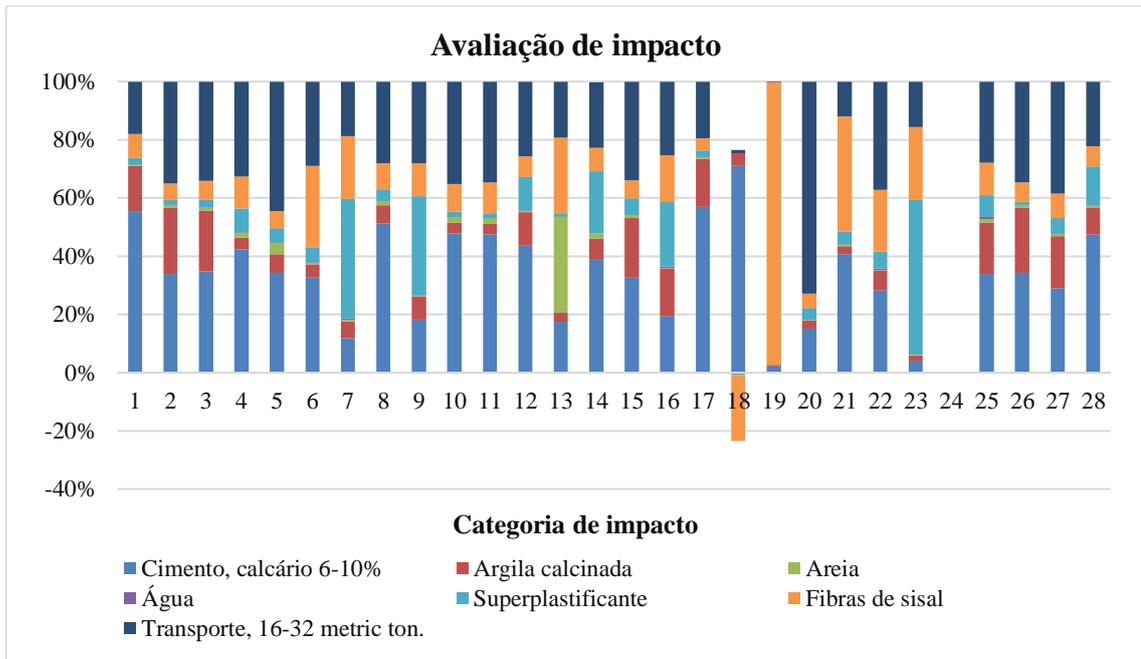


Figura 8: Caracterização dos impactos ambientais relacionados ao compósito com matriz de cimento Portland e 0,4% de superplastificante, de acordo com o EN 15804. Categoria de impacto: 1 - Mudanças climáticas; 2 - Destruição do ozônio; 3 - Radiação ionizante; 4 - Formação fotoquímica de ozônio; 5 - Material particulado; 6 - Toxicidade humana, não cancerígena; 7 - Toxicidade humana, cancerígena; 8 - Acidificação; 9 - Eutrofização, água doce; 10 - Eutrofização marinha; 11 - Eutrofização terrestre; 12 - Ecotoxicidade, água doce; 13 - Uso do solo; 14 - Uso da água; 15 - Uso de recursos, fósseis; 16 - Uso de recursos, minerais e metais; 17 - Mudanças climáticas - Fósseis; 18 - Mudanças climáticas - Biogênicas; 19 - Mudanças climáticas - Uso do solo e mudança de uso do solo; 20 - Toxicidade humana, não cancerígena - orgânicos; 21 - Toxicidade humana, não cancerígena - inorgânicos; 22 - Toxicidade humana, não cancerígena - metais; 23 - Toxicidade humana, cancerígena - orgânicos; 24 - Toxicidade humana, cancerígena - inorgânicos; 25 - Toxicidade humana, cancerígena - metais; 26 - Ecotoxicidade, água doce - orgânicos; 27 - Ecotoxicidade, água doce - inorgânicos; 28 - Ecotoxicidade, água doce - metais.

De acordo com o método EN 15804, quando os impactos ambientais são agrupados em uma única categoria (*Endpoint*), a carga ambiental no compósito com matriz de cimento Portland e 2% de superplastificante está dividida da seguinte maneira: 36,4% para o cimento, 10,2% para a argila calcinada, 19,2% para o superplastificante e 25,8% para o transporte. Os impactos ambientais atribuídos ao cimento Portland estão relacionados à produção de clínquer (30,6%) e os conferidos ao superplastificante à produção do creosoto, insumo preservativo de madeira (11,4%). O fato de o superplastificante estar associado ao insumo ‘preservativo de madeira’ sugere que o método EN 15804 está avaliando esse produto sob outra perspectiva de uso, uma vez que o naftaleno sulfonado, matéria-prima de superplastificantes, tem diversas aplicações. Na indústria da construção os superplastificantes são usados para melhorar a trabalhabilidade de produtos à base de cimento Portland e de geopolímeros [69].

Para o cenário de 0,4 % de superplastificante, os impactos ambientais atribuídos ao compósito se devem principalmente ao cimento (44,1%), à argila calcinada (12,4%), às fibras de sisal

(9,01%) e ao transporte (27,2%). Nesse cenário, verifica-se que o percentual de carga ambiental referente ao superplastificante foi significativamente minimizado. Por outro lado, o percentual de impacto referente à argila calcinada se tornou mais evidente. Como comentado anteriormente, a carga ambiental atribuída à argila calcinada está relacionada ao processo de calcinação. Desses 12,4% atribuídos à argila calcinada, 8,85% são referentes à produção do coque de petróleo, fonte de energia fóssil usada para aquecer o forno onde ocorre a calcinação. Mas, como vantagem, o processo de calcinação da argila é realizado em temperaturas inferiores às do cimento [66,67] e, por esse motivo, de modo geral, ela é menos impactante, da perspectiva ambiental.

Também como vantagem, as fibras de sisal mostram um crédito importante na categoria nº 18 (Mudanças Climáticas – Biogênico) do método EN 15804, que contabiliza o carbono biogênico (biológico) devido ao processo de fotossíntese realizado pelas plantas. Isso mostra que ambos os compósitos podem ser considerados potenciais estoques de CO₂ quando fibras vegetais são utilizadas como matérias-primas. Esse benefício é considerado apenas no método EN 15804 e sua contabilização serve para justificar a produção e uso de componentes construtivos reforçados com fibras vegetais.

Pelo método ReCiPe 2016, no compósito com matriz de cimento Portland produzida com 2% de superplastificante a carga ambiental foi principalmente distribuída entre o cimento, a argila calcinada, o superplastificante, as fibras de sisal e o transporte. No cenário com 0,4% de superplastificante, entre o cimento, a argila calcinada, as fibras de sisal e o transporte. Houve, portanto, uma certa semelhança nos resultados de ambos os métodos e a discrepância entre os percentuais é bem inferior à verificada no compósito geopolimérico.

3.2 Comparação do desempenho ambiental dos compósitos

No Brasil, como comentado anteriormente, existe uma rede de pesquisadores atuantes em ACV que elaborou um relatório de recomendações de modelos de AICV para o contexto brasileiro [60]. Porém, essas recomendações não são direcionadas especificamente a produtos de construção. Por outro lado, a norma EN 15804 faz esse tipo de recomendação [55]. E de acordo com essa norma, algumas categorias de impacto relevantes a serem consideradas na avaliação de produtos de construção são as seguintes: destruição da camada de ozônio, aquecimento global, acidificação, depleção abiótica (minerais e combustíveis fósseis), eutrofização e oxidação fotoquímica [55].

Além das categorias recomendadas pela norma EN 15804, ao realizar um estudo de ACV sobre o concreto brasileiro, Monteiro et al. [42] incluíram em sua pesquisa as categorias toxicidade humana e ecotoxicidade de água doce. Considerando que não havia um estudo semelhante ao nosso para compararmos os resultados obtidos, o trabalho de Monteiro et al. [42] foi escolhido por se tratar do material de construção mais usado no mundo e por ser um trabalho desenvolvido no contexto brasileiro. Vale destacar que a unidade funcional adotada por Monteiro et al. [42] foi 1 m³ de concreto, enquanto neste trabalho a unidade funcional é 1 m² de compósito. Portanto, trata-se de uma comparação meramente qualitativa.

Desse modo, as seguintes categorias de impacto foram escolhidas para serem analisadas e comparadas, quando possível: aquecimento global, destruição da camada de ozônio, acidificação, depleção abiótica (minerais e combustíveis fósseis), eutrofização, oxidação fotoquímica, toxicidade humana e ecotoxicidade de água doce. As pontuações obtidas por meio dos métodos ReCiPe 2016 Midpoint e EN 15804 constam na Tabela 4.

Tabela 4. Impactos ambientais quantificados relacionados aos compósitos

ReCiPe 2016 Midpoint					
Categoria de impacto	Unidade	CCPS - 0,4%	CCPS - 2%	CGRS com PE	CGRS sem PE
Aquecimento global	kg CO2 eq	5,8888408464	6,3189160392	8,7724683128	10,2387592231
Destruição do ozônio estratosférico	kg CFC11 eq	0,0000017066	0,0000018544	0,0000028889	0,0000033465
Acidificação terrestre	kg SO2 eq	0,0154697670	0,0180200728	0,0281174448	0,0298409398
Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	0,0640681730	0,0658159843	-0,0582635730	0,0246011418
Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	1,0781031634	1,2938242005	2,2145869971	2,5681571003
Eutrofização de água doce	kg P eq	0,0002957986	0,0006062149	0,0019088637	0,0019449918
Formação de ozônio, saúde humana	kg NOx eq	0,0210196520	0,0235966108	0,0334944639	0,0346795890
Formação de ozônio, ecos. terrestre	kg NOx eq	0,0215408755	0,0246903765	0,0339973551	0,0352293400
Toxicidade humana cancerígena	kg 1,4-DCB	0,1801965319	0,2291038015	0,4933058784	0,5619955742
Toxicidade humana não cancerígena	kg 1,4-DCB	2,3834710237	3,2990871386	7,2701769151	7,4823686889
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	0,0663925260	0,1095069516	0,3112431510	0,3244611747
EN 15804					
Categoria de impacto	Unidade	CCPS - 0,4%	CCPS - 2%	CGRS com PE	CGRS sem PE
Mudanças Climáticas	kg CO2 eq	5,9753401048	6,4061986487	8,8446788860	10,3220919314
Destruição do ozônio	kg CFC11 eq	0,0000006741	0,0000007338	0,0000009438	0,0000011855
Acidificação	mol H+ eq	0,0257716362	0,0295618117	0,0457059989	0,0482773800
Uso de recursos, minerais e metais	kg Sb eq	0,0000148609	0,0000250606	0,0000848123	0,0000886882

Uso de recursos, fósseis	MJ	47,16042	56,77618	100,01019	115,37689
Eutrofização, água doce	kg P eq	0,0002956631	0,0006060628	0,0019085478	0,0019446375
Formação fotoquímica de ozônio	kg NMVOC eq	0,0258739242	0,0330705831	0,0391003592	0,0407647983
Toxicidade humana, cancerígena	CTUh	0,0000000037	0,0000000082	0,0000000046	0,0000000049
Toxicidade humana, não cancerígena	CTUh	0,0000000534	0,0000000627	0,0000001817	0,0000001855
Ecotoxicidade, água doce	CTUe	52,99272	72,37343	3666,11063	3675,85605

CCPS - 0,4%: compósito de cimento Portland e sisal com 0,4% de superplastificante; CCPS - 2%: compósito de cimento Portland e sisal com 2% de superplastificante; CGRS com PE: compósito geopolimérico reforçado com sisal com produto evitado; CGRS sem PE: compósito geopolimérico reforçado com sisal sem produto evitado.

Somente as categorias aquecimento global/mudança climática, depleção de ozônio e eutrofização de água doce são medidas nas mesmas unidades nos métodos ReCiPe 2016 Midpoint e EN 15804. Portanto, somente essas categorias puderam ser comparadas.

Pelo método ReCiPe 2016 Midpoint, os valores de impacto ambiental dos compósitos nas categorias aquecimento global, depleção de ozônio e eutrofização de água doce são relativamente baixos quando comparados ao do concreto brasileiro estudado por Monteiro et al. [42], que apresentou os seguintes valores para essas mesmas categorias: 285,12 kg CO₂ eq, 8,79E-5 kg CFC11 eq e 0,01 kg P eq, respectivamente.

De acordo com McLellan et al. [70], em comparação ao cimento Portland os geopolímeros emitem menos gases de efeito estufa. E os gases de efeito estufa são responsáveis pelo impacto aquecimento global/mudança climática. Embora os geopolímeros geralmente apresentem menor impacto ambiental na categoria aquecimento global quando comparados a produtos à base de cimento Portland [63, 70], isso não ocorreu neste trabalho. Mas nessa categoria as pontuações foram bastante próximas para ambos os compósitos em todos os cenários avaliados.

O compósito geopolimérico somente apresentou melhor desempenho ambiental que o compósito de cimento Portland na categoria escassez de recursos minerais do método ReCiPe 2016 Midpoint. Quando comparado ao compósito de cimento Portland com 2% de superplastificante, o compósito geopolimérico, em ambos os cenários, também apresentou melhor desempenho ambiental em uma categoria do método EN 15804, a toxicidade humana, cancerígena.

Embora em ambos os métodos a carga ambiental do compósito geopolimérico seja superior à do compósito de cimento Portland, é provável que o potássio contido no compósito geopolimérico esteja sendo julgado como fertilizante [71] e não como um álcali ativador inerte

na composição de um material de construção. Pelo método EN 15804, os valores de impactos atribuídos ao compósito geopolimérico na categoria ecotoxicidade de água doce foram demasiadamente elevados.

De acordo com Canedo-Arguelles et al. [72], a mineração de potássio gera grandes quantidades de resíduos, compostos principalmente de NaCl. Montanhas desses resíduos são armazenadas em locais abertos, perto das minas, e ao serem dissolvidos pela chuva e pela umidade, grandes quantidades desses sais acabam em córregos e rios dos arredores das áreas de mineração de potássio [72]. Em geral, a mineração de potássio tem o potencial de alterar significativamente as comunidades biológicas dos rios córregos próximos às minas [72].

Diante disso, supomos que talvez o método EN 15804 pressuponha que o potássio usado como ativador alcalino geopolimérico, ao ser lixiviado pelas águas provenientes da chuva, por exemplo, siga em direção aos corpos de águas superficiais circundantes, impactando-os, o que realmente ocorre tanto na mineração quanto em atividades agrícolas, onde o potássio é aplicado no solo como fertilizante. No entanto, no caso do potássio presente na composição do compósito geopolimérico, um nível de deposição desse mineral em corpos hídricos certamente não ocorreria na mesma proporção que se verifica nas atividades de mineração e agricultura. Então sugerimos que no método EN 15804 os impactos ambientais das categorias relacionadas à ecotoxicidade de água doce foram superestimados na avaliação de impacto do compósito geopolimérico.

4 Discussão e considerações

Para os cenários estudados, a análise de sensibilidade apontou que a redução de superplastificante, no caso do compósito cimentício, e o produto evitado, no caso do compósito geopolimérico, são boas decisões da perspectiva ambiental. Porém, as implicações constatadas com base em dados de escala laboratorial podem ser diferentes quando estes componentes construtivos forem produzidos em escala comercial, caso isso ocorra.

Quanto à alteração do método de AICV, a análise de sensibilidade mostrou que os pontos críticos ambientais nos dois compósitos são os mesmos: hidróxido de potássio e transporte para o compósito geopolimérico, cimento e transporte para o compósito de cimento Portland. Porém, os percentuais de carga ambiental atribuídos por cada método variam significativamente, principalmente para o compósito geopolimérico.

Quando se compara as matrizes de cimento e geopolimérica, a utilização do lodo de ETA como matéria-prima local preveniria tanto gastos elevados quanto a emissão de gases poluentes, ambos decorrentes do transporte de insumos por longas distâncias. Considerando que dos cimentos utilizados na cidade de Manaus poucos são produzidos na região, no que tange ao transporte, o lodo seria mais vantajoso econômica e ambientalmente, uma vez que este resíduo se encontra dentro da área urbana da cidade, enquanto os componentes do cimento, no mínimo, são transportados da região metropolitana.

Ao utilizar lodo de ETA calcinado como precursor geopolimérico, além de conservar o recurso mineral argila, evita-se que o lodo seja lançado em rios, contaminando-os ou em aterros sanitários, ocupando áreas que poderiam ser utilizadas para outros fins. Esse impacto positivo foi evidenciado na categoria 16 - escassez de recursos minerais do método ReCiPe 2016 Midpoint. Por essa razão, quando se compara o compósito geopolimérico com produto evitado com os demais compósitos, verifica-se que este material é o ambientalmente mais vantajoso no que concerne à categoria escassez de recursos minerais.

A questão dos elevados impactos causados pelo transporte pode ser parcialmente solucionada com a instalação de fornecedores nas proximidades de uma possível planta de mistura desses compósitos. No entanto, se os fornecedores continuarem transportando suas matérias-primas por longas distâncias, haverá somente uma transferência de impactos do produtor ao fornecedor. O que realmente pode solucionar a questão é a utilização de matéria-prima local, mas isso nem sempre é possível, pois há materiais que são exclusivos de uma determinada região, tais como certos minerais. Outros como o sisal, são plantas que não apresentariam um bom desenvolvimento fora da região onde são endêmicas.

Algumas fibras vegetais como curauá (*Ananas erectifolius*), juta (*Corchorus capsularis*), malva (*Urena lobata L.*), com elevado nível de adaptação às condições edáficas da região amazônica, poderiam ser testadas em substituição ao sisal. Mas o desejável seria instalar a indústria nas proximidades de onde há disponibilidade de matérias-primas consideradas críticas, equilibrando com a proximidade de fornecedores de outros componentes necessários à produção do compósito.

McLellan et al. [70] compararam os custos de ciclo de vida e os impactos de carbono de geopolímeros e materiais à base de cimento Portland. Ao utilizar matérias-primas locais na fabricação de concreto geopolimérico, verificaram um potencial de redução de 44 – 64% das emissões de gases de efeito estufa.

Monteiro et al. [42] verificaram que quando uma indústria faz a aquisição de insumos de fornecedores mais próximos, ocorre uma redução significativa de impactos ambientais relacionados ao transporte. Com a diminuição da distância percorrida pelos insumos até a indústria há menor consumo de combustíveis fósseis e menor emissão de gases decorrentes de sua combustão. Consequentemente, há uma redução de impacto em categorias como depleção abiótica (combustíveis fósseis) e aquecimento global [42].

Na cidade de Manaus, uma das poucas indústrias têxteis que beneficiava fibras vegetais cultivadas na região, a juta e a malva, encerrou suas atividades fabris por falta de matéria-prima, cuja produção foi desestimulada por um conjunto de fatores [73]. Em 2016, cerca de 80 % das fibras usadas no processo produtivo da referida indústria eram importados de Bangladesh [73]. Embora o Governo do estado do Amazonas, Brasil, esteja incentivando o cultivo de juta e doando sementes aos agricultores locais [74], a cadeia produtiva dessas fibras nesse Estado, além de agregar pouco valor, é associada a condições de trabalho insalubre [75].

Considerando o cenário atual de produção e beneficiamento das fibras locais, decidimos estudar a viabilidade ambiental das fibras de sisal como opção de reforço para os compósitos. Fato é que transportar as fibras de sisal do Nordeste para o Norte brasileiro é uma opção menos impactante ambientalmente do que importar fibras de outro continente. Porém, o cenário ideal do ponto de vista da sustentabilidade seria adquirir fibras locais, ou seja, cultivadas na região Norte brasileira, e assim minimizar os impactos associados ao transporte de insumos por longas distâncias.

De modo geral, o compósito geopolimérico teve um desempenho pior que o compósito de cimento Portland. E a premissa inicial para estudos de ACV ex-ante é que novas tecnologias são desenvolvidas para melhorar a situação do status quo através da implementação de uma nova tecnologia no mix de tecnologias existentes [7]. Considerando que o compósito geopolimérico apresentou o pior desempenho ambiental, se for necessário escolher entre os dois compósitos analisados, a melhor alternativa para ser produzida em escala comercial, nesse momento, é o compósito com matriz de cimento Portland.

Embora um novo produto seja desenvolvido seguindo todos os passos imagináveis para se alcançar o padrão de sustentabilidade, pode acontecer que ao realizar um estudo de ACV comparando-o com algum produto já estabelecido no mercado se constate que o novo produto tem desempenho ambiental pior.

Rodríguez et al. [76], ao compararem um material de base biológica a plásticos de base fóssil, relataram um desempenho pior do primeiro. E isso não desqualifica o novo produto, apenas antecipa seus possíveis impactos, os quais poderão ser mitigados ou evitados. Na pior das hipóteses, com a decisão de não produzir tal produto, gastos com investimento em uma tecnologia que não funcionaria seriam evitados, daí a importância da ACV ex-ante [7].

Uma das aplicações diretas de estudos de ACV é o desenvolvimento e aperfeiçoamento de produtos [5, 6]. Portanto, é válido ressaltar que os geopolímeros são materiais novos e podem ser melhorados ao longo do tempo, conforme aumentar a expertise de pesquisadores da área e a necessidade dos consumidores por novos materiais de construção. No mais, este estudo corrobora o que já havia sido constatado por outros pesquisadores: a substituição em larga escala do cimento por outros materiais não será possível na próxima década [77].

Na fase de fim de vida (ou no estágio pós consumo), um dos impactos positivos dos compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais é a biodegradabilidade dessas fibras, diferentemente das fibras sintéticas, que demoram para degradar, e das insalubres fibras de amianto, cuja disposição mesmo em aterros controlados não é segura [54]. No entanto, esta etapa não foi avaliada nesta pesquisa, mas pode ser objeto de estudo de pesquisas futuras.

5 Conclusões, limitações e recomendações

Quando se compara todos os compósitos usando os métodos ReCiPe 2016 Midpoint/Endpoint ou o EN 15804, os resultados são convergentes: o compósito com matriz cimentícia possui menores impactos ambientais. No compósito com matriz cimentícia, os responsáveis pela maior parte da carga ambiental foram o cimento e o processo de transporte. No compósito geopolimérico, os resultados evidenciaram que o ativador alcalino à base de hidróxido de potássio é majoritariamente o componente mais impactante, seguido pelo processo de transporte. Com base nos resultados da avaliação de impacto usando ambos os métodos, conclui-se que o compósito geopolimérico, quando comparado ao compósito de matriz de cimento Portland, tem melhor desempenho ambiental apenas na categoria escassez de recursos minerais do método ReCiPe 2016 Midpoint e, quando comparado ao compósito de cimento Portland com 2% de superplastificante, na categoria toxicidade humana, cancerígena, do método EN 15804. No entanto, em todas as demais categorias o compósito geopolimérico apresentou desempenho ambiental inferior ao do compósito com matriz de cimento Portland. Pode-se inferir, portanto, que se um compósito de geopolímero for produzido como o deste

estudo, mas utilizando-se a argila calcinada como precursor, este não poderia ser considerado ambientalmente melhor que um compósito com matriz de cimento Portland em nenhuma categoria de impacto. Verifica-se, portanto, que um componente construtivo reforçado com fibras vegetais, para ser considerado menos impactante ao ambiente, sua matriz necessita ser de base cimentícia e os seus componentes devem ser adquiridos de fornecedores localizados o mais próximo possível da planta de mistura, a fim de se evitar o transporte de materiais por longas distâncias e seus inerentes impactos. Como limitações, estudo apresentaria resultados mais robustos se os compósitos fossem equivalentes entre si ao menos no percentual de fibras de sisal utilizadas como reforço e se fosse possível compará-los com produtos comerciais. Quanto aos dados, conforme descrito no ICV, alguns não estão adaptados à realidade local. Recomenda-se para estudos futuros que os compósitos sejam produzidos de modo que permita comparações entre si e com produtos comerciais, viabilizando afirmações comparativas.

Referências

- [1] B. Huang, X. Gao, X. Xu, J. Song, Y. Geng, J. Sarkis, T. Fishman, H. Kua, J. Nakatani, A Life Cycle Thinking Framework to Mitigate the Environmental Impact of Building Materials, *One Earth*, 3 (5) (2020) 564-573. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.010>
- [2] O.E. Ige, O.A. Olanrewaju, K.J. Duffy, C. Obiora, A review of the effectiveness of Life Cycle Assessment for gauging environmental impacts from cement production, *J. Clean. Prod.* 324 (2021) 129213. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129213>
- [3] D.N. Huntzinger, T.D. Eatmon, A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies, *J. Clean. Prod.* 17 (2009) 668–675. doi:10.1016/j.jclepro.2008.04.007
- [4] J. Kirchherr, D. Reike, M. Hekkert, Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions, *Resour. Conserv. Recycl.* 127 (2017) 221–232. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR ISO 14040 – Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework, 2009.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR ISO 14044 – Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines, 2009.
- [7] C. van der Giesen, S. Cucurachi, J. Guinee, G.J. Kramer, A. Tukker, A critical view on the current application of LCA for new technologies and recommendations for improved practice, *J. Clean. Prod.* 259 (2020) 120904. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120904>
- [8] J.A. Melo Filho, F.A. Silva, R.D. Toledo Filho, Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems, *Cem. Concr. Compos.* 40 (2013) 30–39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.003>
- [9] F.A. Silva, R.D. Toledo Filho, J.A. Melo Filho, E.M.R. Fairbairn, Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 777–785. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.030>
- [10] R. D. Toledo Filho, F. A. Silva, E.M.R. Fairbairn, J. A. Melo Filho, Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 2409–2420. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.10.012>

- [11] J. Davidovits, Geopolymer Cement, a Review. Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France (2013).
- [12] J. Davidovits, J.L. Sawyer, Early high-strength mineral polymer. United States Patent 4,509,985 (1985) Google Patents.
- [13] M.M. Camargo, E.A. Taye, J.A. Roether, D.T. Redda, A.R. Boccaccini, A Review on Natural Fiber-Reinforced Geopolymer and Cement-Based Composites. *Materials*, 13 (20) (2020), 4603. <https://doi.org/10.3390/ma13204603>
- [14] D.B. Dittenber, H.V.S. GangaRao, Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure, *Compos. Appl. Sci. Manuf.*, 43 (2012) 1419–1429. doi:10.1016/j.compositesa.2011.11.019
- [15] L. Yan, B. Kasal, L. Huang, A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering, *Compos. B Eng.*, 92 (2016) 94-132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.002>
- [16] S.R. Ferreira, P.R.L. Lima, F.A. Silva, R.D. Toledo Filho, Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland, *Rev. Mater.*, 17 (2012) pp. 1024 – 1034.
- [17] R.D. Toledo Filho, Natural fiber reinforced mortar composites: experimental characterization, PhD thesis, DEC-PUC-Rio, Brazil (1997).
- [18] T. Alomayri, I.M. Low, Synthesis and characterization of mechanical properties in cotton fiber-reinforced geopolymer composites, *J. As. Ceram. Soc.* 1 (2013) 30–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jascer.2013.01.002>
- [19] L.C.S. Alves, R.A.R. Ferreira, L.B. Machado, L.A.C. Motta, Optimization of metakaolin-based geopolymer reinforced with sisal fibers using response surface methodology, *Ind. Crop. Prod.* 139 (2019) 111551. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111551>
- [20] M. Alzeer, K. MacKenzie, Synthesis and mechanical properties of novel composites of inorganic polymers (geopolymers) with unidirectional natural flax fibres (phormium tenax), *Appl. Clay Sci.* 75–76 (2013) 148–152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2013.03.010>
- [21] G. Lazorenko, A. Kasprzhitskii, A. Kruglikov, V. Mischinenko, V. Yavna, Sustainable geopolymer composites reinforced with flax tows, *Ceram. Int.* 46 (2020) 12870–12875. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.01.184>
- [22] K. Korniejenko, E. Fraczek, E. Pytlak, M. Adamski, Mechanical properties of geopolymer composites reinforced with natural fibers, *Procedia Eng.* 151 (2016) 388 – 393. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.395>
- [23] R.A. Sá Ribeiro, M.G. Sá Ribeiro, K. Sankar, W.M. Kriven, Geopolymer-bamboo composite – A novel sustainable construction material, *Constr. Build. Mater.* 123 (2016) 501–507. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.037>
- [24] G. Silva, S. Kim, R. Aguilar, J. Nakamatsu, Natural fibers as reinforcement additives for geopolymers – A review of potential eco-friendly applications to the construction industry, *Sustain. Mater. Technol.* 23 (2020) e00132. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00132>
- [25] G. Silva, S. Kim, B. Bertolotti, J. Nakamatsu, R. Aguilar, Optimization of a reinforced geopolymer composite using natural fibers and construction wastes, *Constr. Build. Mater.* 258 (2020) 119697. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119697>
- [26] A.C.C. Trindade, P.H.R. Borges, F.A. Silva, Mechanical behavior of strain-hardening geopolymer composites reinforced with natural and PVA fibers, *Mater. Today: Proc.*, 8 (2019) 753–759.
- [27] K. Walbrück, F. Maeting, S. Witzleben, D. Stephan, Natural Fiber-Stabilized Geopolymer Foams - A Review, *Materials* 13 (2020), 3198. doi:10.3390/ma13143198

- [28] A. Wongsu, R. Kunthawatwong, S. Naenudon, V. Sata, P. Chindaprasirt, Natural fiber reinforced high calcium fly ash geopolymer mortar, *Constr. Build. Mater.* 241 (2020) 118143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118143>
- [29] B. Zhou, L. Wang, G. Ma, X. Zhao, X. Zhao, Preparation and properties of bio-geopolymer composites with waste cotton stalk materials, *J. Clean. Prod.* 245 (2020) 118842. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118842>
- [30] R.H. Geraldo, L.F.R. Fernandes, G. Camarini, Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production, *J. Clean. Prod.* 149 (2017) 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.076>
- [31] X. Guo, H. Shi, W. Dick, Use of heat-treated water treatment residuals in fly ash-based geopolymers, *J. Am. Ceram. Soc.* 93 (2010), 272–278. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03331.x>
- [32] S. Horpibulsuk, C. Suksiripattanapong, W. Samingthong, R. Rachan, A. Arulrajah, Durability against wetting-drying cycles of water treatment sludge-fly ash geopolymer and water treatment sludge-cement and silty clay-cement systems, *J. Mater. Civ. Eng. ASCE*, 04015078 (2015) 1-9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001351](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001351)
- [33] E. Nimwinya, W. Arjharn, S. Horpibulsuk, T. Phoo-ngernkham, A. Poowancum, A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash Geopolymer, *J. Clean. Prod.* 119 (2016) 128-134. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.060>
- [34] G.Z.B. Santos, J.A. Melo Filho, L. Manzato, Proposta de uma cerâmica obtida por meio de geopolimerização de lodo de ETA calcinado, *Cerâmica* 64 (2018a) 276-283. <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132018643702353>
- [35] G.Z.B. Santos, J.A. Melo Filho, M. Pinheiro, L. Manzato, Synthesis of water treatment sludge ash-based geopolymers in an Amazonian context, *J. Environ. Manage.* 249 (2019) 109328. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109328>
- [36] C. Suksiripattanapong, S. Horpibulsuk, P. Chanprasert, P. Sukmak, A. Arulrajah, Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge, *Constr. Build. Mater.* 82 (2015) 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.040>
- [37] C. Suksiripattanapong, S. Horpibulsuk, S. Boongrasan, A. Udomchai, A. Chinkulkijniwat, A. Arulrajah, Unit weight, strength and microstructure of a water treatment sludge-fly ash lightweight cellular geopolymer, *Constr. Build. Mater.* 94 (2015) 807-816. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.091>
- [38] G.Z.B. Santos, D.P. Oliveira, J.A. Melo Filho, N. Marques da Silva, Sustainable geopolymer composite reinforced with sisal fiber: Durability to wetting and drying cycles, *J. Build. Eng.*, 43 (2021) 102568. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102568>
- [39] C. Bueno, M.Z. Hauschild, J.A. Rossignolo, A.R. Ometto, N.C. Mendes, Sensitivity analysis of the use of Life Cycle Impact Assessment methods: a case study on building materials, *J. Clean. Prod.* 112 (2016) 2208-2220. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.006>
- [40] D.M. Souza, M. Lafontaine, F. Charron-Doucet, X. Bengoa, B. Chappert, F. Duarte, L. Lima, Comparative Life Cycle Assessment of ceramic versus concrete roof tiles in the Brazilian context, *J. Clean. Prod.* 89 (2015) 165-173. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.029>
- [41] D.M. Souza, M. Lafontaine, F. Charron-Doucet, B. Chappert, K. Kicak, F. Duarte, L. Lima, Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls, *J. Clean. Prod.* 137 (2016) 70-82. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.069>
- [42] N.B.R. Monteiro, J.M. Moita Neto, E.A. Silva, Environmental assessment in concrete industries, *J. Clean. Prod.* 327 (2021) 129516. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129516>

- [43] L.R. Caldas, A.B. Saraiva, A.F.P. Lucena, M.Y. Da Gloria, A.S. Santos, R.D. Toledo Filho, Building materials in a circular economy: The case of wood waste as CO₂-sink in bio concrete, *Resour. Conserv. Recycl.* 166 (2021) 105346. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105346>
- [44] L.R. Caldas, M.Y.R. da Gloria, F. Pittau, V.M. Andreola, G. Habert, R.D. Toledo Filho, Environmental impact assessment of wood bio-concretes: Evaluation of the influence of different supplementary cementitious materials, *Constr. Build. Mater.* 268 (2021) 121146. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121146>
- [45] L.S.M. Souza, A.O. Nunes, G. Giusti, Y.M.B. Saavedra, T.O. Rodrigues, T.E.N. Braga, D.A.L. Silva, Evaluating and ranking secondary data sources to be used in the Brazilian LCA database – “SICV Brasil”, *Sustainable Production and Consumption* 26 (2021) 160–171. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.09.021>
- [46] FAO (2021). Obtido de: <https://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/sisal/en/>. Acesso em 27 out. 2021.
- [47] M.L.M. Broeren, S.N.C. Dellaert, B. Cok, M.K. Patel, E. Worrell, L. Shen, Life cycle assessment of sisal fibre - Exploring how local practices can influence environmental performance, *J. Clean. Prod.* 149 (2017) 818-827. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.073>
- [48] B.J. Mohr, H. Nanko, K.E. Kurtis, Durability of kraft pulp fiber–cement composites to wet/dry cycling, *Cem. Concr. Compos.* 27 (2005) 435–448. [10.1016/j.cemconcomp.2004.07.006](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.07.006)
- [49] R.Y. Nkwaju, J.N.Y. Djobo, J.N.F. Nouping, P.W.M. Huisken, J.G.N. Deutou, L. Courard, Iron-rich laterite-bagasse fibers based geopolymer composite: Mechanical, durability and insulating properties, *Appl. Clay Sci.* 183 (2019) 105333. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105333>
- [50] A.C.C. Trindade, F.A. Silva, H.A. Alcamand, P.H.R. Borges, On the durability behavior of natural fiber reinforced geopolymers. *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 38 (3) (2018). <https://doi.org/10.1002/9781119474746.ch20>
- [51] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 15310: Ceramic components - Ceramic roof tiles - Terminology, requirements and testing methods, 2009.
- [52] M. Buyle, A. Audenaert, P. Billen, K. Boonen, S. van Passel, The Future of Ex-Ante LCA? Lessons Learned and Practical Recommendations, *Sustainability* 11 (2019) 5456. [doi:10.3390/su11195456](https://doi.org/10.3390/su11195456)
- [53] Brasil, Lei n. 12.305/2010: Política Nacional de Resíduos Sólidos. Obtido de: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 27 out. 2021.
- [54] D. Spasiano, F. Pirozzi, Treatments of asbestos containing wastes, *J. Environ. Manage.* 204 (2017) 82-91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.038>
- [55] BS EN 15804, 2019. Sustainability of Construction Works – Environmental Product Declarations – Core Rules for the Product Category of Construction Products, 72. European Committee for Standardization.
- [56] G.Z.B. Santos, J. A. Melo Filho, L. Manzato, Perspectivas de aplicações tecnológicas de lodo gerado no processo de tratamento de água dos rios Negro e Solimões. *Rev. Mater.*, 23 (2018) pp. e-12167. [10.1590/S1517-707620180003.0501](https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0501)
- [57] V. P. Souza, R. Toledo, J. N. F. Holanda, H. Vargas, R. T. Faria Jr, Pollutant gas analysis evolved during firing of red ceramic incorporated with water treatment plant sludges, *Cerâmica* 54 (2008) 351-355.
- [58] N.J. Reis, M.E. Almeida, S.L. Riker, A.L. Ferreira, *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas*, Manaus: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2006. 125p.

- [59] L.R. Caldas, R.M. Sposto, CO₂ emissions related to building materials transportation in Brazil: comparative study on structural ceramic and concrete bricks, *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 91-108, out./dez. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000400187>
- [60] RAICV – Rede de Pesquisa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida, Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o contexto brasileiro/ RAICV; organização, Cássia Maria Lie Ugaya, José Adolfo de Almeida Neto e Maria Cléa Brito de Figueiredo. Brasília, DF: Ibict (2019) 165 p.
- [61] RIVM (2018). Retrieved from: <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>. Last accessed October 29, 2021.
- [62] G.Z.B. Santos, L. Manzato, J.A. Melo Filho, Utilização de cinzas de lodo de ETA na síntese de geopolímeros. In: Anais do SICASA e ANPPAS Amazônia. Anais. Manaus (AM) UFAM/ANPPAS, 2016. Retrieved from: <https://www.even3.com.br/anais/ivsicasa/32253-utilizacao-de-cinzas-de-lodo-de-eta-na-sintese-de-geopolimeros>. Last accessed December 31, 2021.
- [63] A. Passuello, E.D. Rodríguez, E. Hirt, M. Longhi, S.A. Bernal, J.L. Provis, A.P. Kirchheim, Evaluation of the potential improvement in the environmental footprint of geopolymers using waste-derived activators, *J. Clean. Prod.* 166 (2017) 680-689. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.007>
- [64] C. Baird & M. Cann, *Environmental Chemistry*, 4th Edition. W.H. Freeman and Company, New York (2008).
- [65] Em tempo (2021). Obtido de: <https://emtempo.com.br/politica-amazonas/325520/am-tem-potassio-para-abastecer-o-mundo-de-fertilizantes-diz-deputado?d=1>. Acesso em: 18 dez. 2021.
- [66] A.M. Rashad, Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition – A comprehensive overview, *Constr. Build. Mater.* 41 (2013) 303–318. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001>
- [67] B.B. Sabir, S. Wild, J. Bai, Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, *Cem. Concr. Compos.* 23 (6) (2001) 441–454. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5)
- [68] P.M. Rojas-Bringas, G.E. De-la-Torre, F.G. Torres, Influence of the source of starch and plasticizers on the environmental burden of starch-Brazil nut fiber biocomposite production: A life cycle assessment approach, *Sci. Total Environ.* 769 (2021) 144869. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144869>
- [69] H. Li, Z. Wang, Y. Zhang, G. Zhang, H. Zhu, Composite application of naphthalene and melamine-based superplasticizers in alkali activated fly ash (AAFA), *Constr. Build. Mater.* 297 (2021) 123651. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123651>
- [70] B.C. McLellan, R.P. Williams, J. Lay, A. van Riessen, G.D. Corder, Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement, *J. Clean. Prod.* 19 (2011) 1080-1090. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>
- [71] W. Chen, Y. Geng, J. Hong, D. Yang, X. Ma, Life cycle assessment of potash fertilizer production in China, *Resour. Conserv. Recycl.* 138 (2018) 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.028>
- [72] M. Canedo-Argüelles, S. Brucet, S. Carrasco, N. Flor-Arnau, M. Ordeix, S. Ponsá, E. Coring, Effects of potash mining on river ecosystems: An experimental study, *Environ. Pollut.* 224 (2017) 759-770. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.072>
- [73] Portal Amazônia (2016). Obtido de: <https://portalamazonia.com/noticias/economia/em-manaus-setor-textil-perde-forca-com-saida-da-brasjuta>. Acesso em 30 dez. 2021.
- [74] Governo do Amazonas (2021). Obtido de: <http://www.amazonas.am.gov.br/2021/09/idam-e-sepror-firmam-parceria-com-a-companhia->

textil-de-castanhal-para-2a-campanha-de-extensao-da-cultura-da-juta/. Acesso em 31 dez. 2021.

[75] A.S. Ferreira. Fios dourados dos trópicos: culturas, histórias, singularidades e possibilidades (juta e malva - Brasil e Índia). Tese de Doutorado em Ciências Sociais – Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2016.

[76] L.J. Rodríguez, S. Fabbri, C.E. Orrego, M. Owsianiak, Comparative life cycle assessment of coffee jar lids made from biocomposites containing poly (lactic acid) and banana fiber, *J. Environ. Manage.* 266 (2020) 110493. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110493>

[77] G. Habert, S.A. Miller, V.M. John, J. L. Provis, A. Favier, A. Horvath, K. L. Scrivener, Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nat Rev Earth Environ* 1 (2020) 559–573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>.

CAPÍTULO 4. ARTIGO 3 - Avaliação do ciclo de vida de um compósito cimentício reforçado com fibras vegetais cultivadas na Amazônia brasileira

Resumo

Este trabalho apresenta uma avaliação do ciclo de vida (ACV), do berço ao portão, para as fibras de juta e malva cultivadas na região amazônica brasileira bem como para um compósito com aplicação na indústria da construção produzido com essas fibras. Além disso, a carga ambiental de uma tonelada de fibras de juta e malva cultivadas nessa região foi comparada com a de uma tonelada de fibras de sisal cultivadas no nordeste do Brasil. As fibras de juta e malva foram avaliadas como reforço do compósito sob duas perspectivas: uma sem processamento e outra na forma de tecido. A viabilidade técnica do uso dessas fibras como reforço de materiais de construção foi atestada em vários estudos anteriores. Porém, havia uma lacuna na literatura científica quanto a sua viabilidade ambiental. Assim, este estudo foi desenvolvido a fim de preencher essa lacuna. Dados primários referentes à produção das fibras, desde o cultivo até a sua transformação em tecido, foram coletados via entrevista. Por meio dos métodos ReCiPe 2016 (Endpoint e Midpoint) e EN 15804 verificou-se que a maior parte da carga ambiental do compósito deve-se à produção das matérias-primas do cimento e do superplastificante. Como contribuição científica, este estudo apresenta dados primários referentes ao processamento industrial de fibras de juta e malva cultivadas por ribeirinhos da Amazônia brasileira, avalia o desempenho ambiental potencial dessas fibras e de um produto que poderá atender às demandas da sociedade por novos materiais de construção. Esse produto, um compósito reforçado com fibras vegetais, tem baixo impacto ambiental e sua produção comercial pode contribuir para uma bioeconomia pautada na geração de emprego verde nas comunidades locais produtoras de fibras.

Palavras-chave: ACV, juta, malva, materiais de construção, compósito cimentício reforçado com fibras vegetais.

1 Introdução

As atividades empresariais desenvolvidas nas terras da Amazônia são distantes daquilo que marca as práticas dominantes das elites que controlam o uso da terra nesse bioma [1]. O camponês amazônico, por exemplo, em função dos ciclos de enchente, cheia, vazante e seca dos rios da região, desenvolve uma multiplicidade de atividades, adequando-se a práticas de trabalho alternadas entre terras, florestas e águas [2]. Dentre as atividades de subsistência

realizadas pelo ribeirão amazônico está o cultivo de fibras vegetais, a exemplo da juta (*Corchorus capsularis*) e da malva (*Urena lobata L.*).

O cultivo de juta foi implantado na Amazônia brasileira, especificamente no estado do Amazonas, por colonos japoneses no ano de 1931, enquanto a cultura da malva foi iniciada a partir da década de 1970, período de declínio da cultura de juta [3]. No final da década de 1980, a cultura das duas fibras entrou em declínio no Amazonas, Brasil. Somente no final da década de 1990, devido à valorização de fibras vegetais no Mercado Comum Europeu, as fibras de juta e malva voltaram a ser cultivadas por camponeses-ribeirinhos no referido estado [3]. De acordo com o IDAM [4], o município de Manacapuru é o maior produtor de juta e malva do estado do Amazonas e a perspectiva da safra 2019/2020 do município foi de 1,5 mil toneladas de malva e 1,2 mil toneladas de juta. Quando vendido diretamente na indústria, o valor do quilo da malva é de R\$ 3,10 e da juta R\$ 3,15, enquanto na propriedade do produtor a malva é vendida a R\$ 2,80 e a juta a R\$ 2,90 [4].

Essas fibras eram utilizadas amplamente na confecção de sacaria para o armazenamento de grãos alimentícios, mas perderam a competitividade no mercado para as fibras sintéticas, o que refletiu diretamente na economia de comunidades rurais amazônicas que cultivavam e comercializavam essas fibras. Mas, enquanto o mercado de sacaria aderiu às fibras sintéticas, há setores industriais necessitando de matérias-primas alternativas. Uma realidade desse tipo é enfrentada pela indústria da construção, a maior consumidora de recursos naturais do planeta. Ao mesmo tempo, os ribeirinhos que habitam a Floresta Amazônica brasileira precisam de alternativas de uso para as fibras que cultivam e de apoio técnico e financeiro para a melhoria de suas condições de trabalho.

Com o aumento da população urbana global até 2050, prevê-se um consequente aumento na demanda por materiais de construção [5]. Contudo, a indústria da construção moderna está atrelada a elevados consumos de recursos naturais e a sérios impactos ambientais. Na China, por exemplo, o boom da construção durante os anos de 2000-2015 contribuiu significativamente para o rápido crescimento da poluição e esgotamento de recursos [6]. O concreto, o material feito pelo homem mais utilizado na indústria da construção, tem como um dos seus componentes o cimento, que é produzido, por ano, a uma taxa comparável à produção global de alimentos [5].

Para atender à crescente demanda por materiais de construção, uma gama de novos produtos está em fase de pesquisa e desenvolvimento, entre eles os compósitos cimentícios reforçados com as fibras vegetais cultivadas pelos ribeirinhos amazônicos [7-13]. Esses materiais surgem

como alternativa às demandas da indústria da construção por produtos mais sustentáveis e como opção de renda às comunidades produtoras dessas fibras. Tais materiais poderão ser empregados em diversos usos na indústria da construção, contribuindo para que este setor seja mais ambientalmente sustentável. Entre as grandes vantagens das fibras vegetais estão o baixo custo e o impacto social positivo [14], além de seu potencial de sequestrar CO₂, o principal gás de efeito estufa. Adicionalmente, o uso de fibras vegetais está alinhado à bioeconomia, que tem como um de seus principais objetivos o incentivo ao uso de biomateriais como forma de se alcançar um desenvolvimento econômico mais sustentável.

Para atestar se determinado produto é ambientalmente sustentável existe uma ferramenta de gestão ambiental aceita cientificamente e difundida mundialmente denominada avaliação do ciclo de vida – ACV, normatizada pela ISO 14040 [15]. A ACV enfoca os aspectos ambientais e os impactos ambientais potenciais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento pós-uso, reciclagem até a disposição final [15, 16]. Sendo assim, a ACV pode subsidiar a identificação de oportunidades para a melhoria do desempenho ambiental de produtos em diversos estágios do seu ciclo de vida [15, 16].

Quando é realizada antes da aplicação comercial da tecnologia é denominada ACV ex-ante [17]. Entre os desafios adicionais para a execução do exercício ex-ante tem-se a falta de informações relevantes para os sistemas de produtos em estudo, a falta de uma visão clara do futuro do cenário tecnológico no qual a tecnologia operará e a falta de acesso direto a dados representativos para processos em escala de laboratório [17]. Vários esforços têm sido feitos para abordar os benefícios dos compósitos de fibras naturais para várias aplicações, inclusive na indústria da construção [18]. A ACV está entre as técnicas utilizadas para avaliar o potencial impacto ambiental desses materiais [18].

Alguns estudos avaliaram o ciclo de vida de biocompósitos feitos com fibras de juta. Alves et al. [14], usando a ferramenta de ACV, demonstraram a possibilidade de substituição de fibras de vidro por fibras de juta, cultivadas na região amazônica brasileira, para produzir um capô frontal estrutural de um veículo. Korol et al. [19], no contexto da Polônia, aplicaram a ACV para quantificar a ecoeficiência de paletes de plástico produzidos a partir de biocompósitos. Uma das fibras usadas na composição de biocompósitos foi a juta. Quintana et al. [20], no contexto da Espanha, realizaram uma ACV comparativa entre placas de gesso tradicionais e diferentes placas compostas de fibras naturais e de resina epóxi de base biológica (Supersap), sendo ambas as placas produtos com aplicação no mercado da construção civil. Nesse mesmo

estudo [20], uma das fibras investigadas foi a juta, cultivada de forma bastante diferente da praticada pelos ribeirinhos da Amazônia, uma vez que o uso de fertilizantes e a irrigação são relatados.

Até onde se sabe, não existe nenhum estudo de ACV sobre o uso de fibras de juta e de malva cultivadas na região amazônica brasileira como reforço em materiais de construção. Embora vários estudos tenham atestado a viabilidade técnica do uso dessas fibras como reforço em componentes construtivos [7-13], até a conclusão deste trabalho, não foram encontrados na literatura científica estudos abordando a viabilidade ambiental desse tipo de material. Nesse sentido, este trabalho foi desenvolvido visando responder a seguinte questão: o uso de fibras de juta e malva cultivadas na Amazônia brasileira na fabricação de componentes construtivos é uma alternativa ambientalmente sustentável? Para nos ajudar a responder essa questão, escolhemos a ACV.

Na cidade de Manaus, metrópole localizada na Amazônia brasileira, muitos produtos precisam vencer longas distâncias para chegar ao mercado consumidor. Isso eleva o preço de componentes construtivos na região, além de causar sérios impactos ambientais associados ao transporte. Sendo assim, uma alternativa para amenizar essa situação seria desenvolver produtos locais para atender à demanda interna. Além disso, os produtores rurais da região precisam de alternativas de uso para suas fibras de juta e malva, que lhes representam uma fonte de renda e subsistência.

Assim, este artigo teve como objetivo avaliar o desempenho ambiental de um componente construtivo produzido com as fibras de juta e malva cultivadas na Amazônia brasileira. Como resultado, espera-se que a indústria da construção possa tomar decisões justificadas sobre a adequação do produto estudado às suas demandas e que a cadeia produtiva de fibras de juta e malva da região amazônica receba mais investimentos públicos e privados, elevando a produção e possibilitando impactos positivos aos sujeitos envolvidos. Como contribuição científica, este estudo apresenta dados primários referentes ao processamento industrial de fibras de juta e malva, avalia o desempenho ambiental potencial dessas fibras e de um produto que poderá atender às demandas da sociedade por novos materiais de construção.

1.1 Contexto do estudo

1.1.1 As fibras de juta e malva cultivadas na Amazônia brasileira

Na região Norte do Brasil, onde está localizada a Amazônia brasileira, as fibras de juta e malva são tratadas praticamente como sinônimos e usadas para as mesmas finalidades, inclusive, são por vezes combinadas para formar um único tecido. Após a colheita, realizada manualmente com terçados, para fins de beneficiamento, essas fibras são submetidas às etapas de afogamento, desfibramento, lavagem, secagem e enfardamento.

De uma forma geral, os estudos voltados à cadeia produtiva dessas fibras, que tiveram como lócus de pesquisa a região Norte do Brasil, mostram um processo produtivo pouco desenvolvido, que ao longo de aproximadamente um século manteve-se praticamente inalterado, estando ligado a condições de trabalho insalubres. Nas fases de desfibramento e lavagem, as fibras são extraídas artesanalmente das hastes da planta, dentro de corpos hídricos nos quais os trabalhadores passam horas seguidas com parte do corpo submerso em água [3, 21, 22, 23, 24].

Verifica-se, portanto, a necessidade de inovações tecnológicas capazes de contribuir para melhorias de toda a cadeia produtiva das fibras de juta e malva, principalmente no que concerne às condições de trabalho dos juticultores e malvicultores. Souza et al. [23], propuseram, como alternativa para tornar o beneficiamento de malva uma atividade mais salubre, a implantação de uma máquina descortçadora na fase de desfibramento.

Por questões de ordem humana e técnica, a usabilidade da máquina descortçadora de fibras ainda não é uma realidade do cotidiano de produtores ribeirinhos da Amazônia brasileira. No entanto, esse projeto demonstrou que é possível inovar e otimizar o atual processo de beneficiamento dessas fibras. Considerando que o advento de fibras sintéticas reduziu grandemente o comércio de fibras vegetais, é possível inferir que a falta de aplicação para as fibras de juta e malva contribuiu para a estagnação de sua cadeia produtiva.

Não está no escopo deste estudo propor inovações diretamente aplicáveis ao processo produtivo de fibras. Por outro lado, materiais de construção reforçados com fibras de juta e malva, ao utilizá-las como matéria-prima, apresentam-se como uma alternativa capaz de atrair novamente investimentos públicos e privados para a cadeia produtiva dessas fibras, proporcionando oportunidades de melhorias em seu processo produtivo e geração de renda às comunidades produtoras.

Oliveira [7] realizou uma investigação experimental das propriedades físicas, químicas e mecânicas das fibras de juta e malva a fim de verificar a viabilidade de uso dessas fibras como

reforço de componentes construtivos. De acordo com este pesquisador, as fibras possuem as seguintes características, representadas em valores médios (Tabela 1):

Tabela 1. Caracterização físico-mecânica das fibras de juta e malva.

Fibra	Espessura (mm)	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão última de tração (MPa)	Deformação de ruptura equivalente (%)	Massa específica (g/cm ³)
Juta	0,15	29,70	405,33	1,40	0,852
Malva	0,08	30,93	391,47	1,19	0,913

Adaptado de Oliveira [7].

Ainda de acordo com Oliveira [7], em média, os constituintes químicos das fibras de juta e malva são, respectivamente: celulose (66,33% e 69,36%), hemicelulose (24,83% e 21,28%), lignina (10,49% e 13,55%) e extrativos totais (5,71% e 7,55%). Esses valores referentes às características físicas, químicas e mecânicas das fibras estão próximos aos relatados na literatura científica [14, 25, 26, 27].

1.1.2 Produção e caracterização de componentes construtivos reforçados com fibras de juta e malva cultivadas na Amazônia brasileira

A viabilidade técnica de componentes construtivos reforçados com as fibras de juta e malva cultivadas na Amazônia brasileira foi atestada por diversos pesquisadores [7-13]. A durabilidade desse tipo de material a ciclos de molhagem e secagem também foi amplamente investigada [28, 29, 30, 31]. Na Tabela 2 constam as principais propriedades de dois compósitos selecionados, sendo um reforçado com as fibras sem processamento industrial e outro produzido com as fibras em forma de tecido.

Tabela 2. Resumo das características de dois compósitos reforçados com as fibras de juta e malva, com e sem processamento.

Fonte	Reforço	Tensão de tração direta (MPa)	Tensão de tração na flexão (MPa)	Quant. Camadas	Volume de fibras	Espessura da amostra
Oliveira [8]	Tecido (90% de malva e 10% de juta)	3,44	15,02	2	-	4 mm
Oliveira [7]	Fibras de juta	7,96	21,23	5	8%	12 mm
	Fibras de malva	10,34	27,27			

Oliveira [7] desenvolveu e caracterizou compósitos reforçados com fibras de juta e malva sem processamento. Os resultados mostraram que essas fibras apresentam potencial de

aplicação em compósitos de alta resistência mecânica. Apesar de os compósitos reforçados com fibras de malva exibirem resistência superior à dos compósitos reforçados com fibras de juta, os materiais produzidos com ambas as fibras, apresentaram propriedades mecânicas promissoras no desenvolvimento de peças semi-estruturais e estruturais.

Oliveira [8] produziu e caracterizou telhas cimentícias reforçadas com 2 camadas de tecido de fibras de juta e malva. Na composição da matriz cimentícia das telhas substituiu 50% de cimento Portland por resíduo cerâmico. A telha apresentou bons resultados nos ensaios de permeabilidade, flexão e resistência ao impacto, superiores, inclusive, aos da telha de referência. Parte do processo de produção de uma das telhas consta na Figura 1.



Figura 1: Parte do processo produtivo de uma telha reforçada com tecido de fibras de juta e malva. Fonte: Oliveira [8].

No início do ano de 2015, o professor e pesquisador da Universidade Federal do Amazonas, João Melo Filho, após mais de uma década de pesquisas, propôs ao mercado um novo conceito de telhas, produzidas com fibras cultivadas na Amazônia [32]. De acordo com o pesquisador, essas telhas apresentam ao menos três diferenciais em relação às telhas convencionais. Um deles é o ambiental, tendo em conta que a composição do produto apresenta apenas $\frac{1}{4}$ de cimento Portland, contribuindo para a redução dos impactos atrelados a este material.

Outro diferencial dessas telhas é o econômico, pois o uso de fibras regionais pode reduzir o custo do produto final. Também vale ressaltar o fator social inerente ao produto, visto que a sua produção acarretará o aumento da demanda por fibras regionais, o que beneficiará produtores locais, sendo uma oportunidade de geração de renda alinhada aos princípios da bioeconomia. Pela simplicidade de produção, é perfeitamente possível que estas telhas possam ser produzidas em comunidades rurais. Para Savastano Jr. [33], telhas onduladas de 260x500 mm podem ser produzidas em indústrias de pequeno porte, por meio de autoconstrução, não requerendo mão-de-obra qualificada.

Verifica-se, portanto, que o emprego de fibras de juta e malva na fabricação de compósitos cimentícios é uma alternativa capaz de atrair investimentos dos setores público e privado, proporcionar ganhos econômicos às comunidades rurais da região amazônica e, simultaneamente, atender à demanda da indústria da construção. Os materiais produzidos poderão ser utilizados não apenas como telhas, mas também como componentes construtivos em usos inerentes à construção civil. E para que essa tecnologia deixe de ser apenas um experimento de laboratório e torne-se uma realidade na indústria da construção, migrando da universidade para o mercado consumidor, é necessário avaliar sua sustentabilidade ambiental. Sendo assim, os materiais a serem avaliados apresentam as seguintes vantagens que justificam a realização deste estudo: empregam em seu processo produtivo matérias-primas regionais e renováveis, com potencial de estocar CO₂, e correspondem a uma tecnologia que se apresenta como alternativa de geração de renda para produtores locais de juta e malva frente ao mercado da construção civil, incentivando a bioeconomia no setor.

2 Materiais e métodos

2.1 Materiais

Para possibilitar a comparação dos resultados, neste trabalho foi adaptada a dosagem desenvolvida por Melo Filho et al. [28] para um compósito reforçado com fibras de sisal. Esse material tem os seguintes componentes: cimento com fíler, argila calcinada, areia, água, superplastificante e fibras de sisal. O processo de produção desse tipo de compósito é basicamente composto de duas etapas: a primeira é a preparação da matriz. A segunda etapa é a dispersão de camadas da matriz e das fibras em moldes. Detalhes estão disponíveis em Melo Filho et al. [28]. Por haver uma certa diferença de densidade em relação às fibras de sisal, uma pequena adaptação no teor dos componentes foi necessária. Todos os componentes do compósito estão descritos no Inventário do Ciclo de Vida – ICV, Tabela 3, da seção 2.2.2.

2.2 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Uma das aplicações da ACV é no desenvolvimento e aperfeiçoamento de produtos [15, 16]. A ACV pode ajudar a avaliar os impactos ambientais associados a todas as fases da vida dos materiais de construção [34]. Um estudo de ACV é composto de quatro fases iterativas [15, 16]: definição do objetivo e do escopo; análise do inventário do ciclo de vida; avaliação dos impactos do ciclo de vida e interpretação.

Neste trabalho, a ACV foi aplicada para avaliar os seguintes cenários:

- ACV do compósito produzido com o tecido de juta e malva fabricado em Castanhal, Pará;
- ACV do compósito produzido com o tecido de juta e malva fabricado em Manacapuru, Amazonas;
- ACV do compósito produzido com fibras de juta e malva sem processamento, cultivadas em Manacapuru, Amazonas;
- ACV comparativa das fibras e do compósito com a literatura científica (fibras de sisal).

2.2.1 Objetivo, escopo e unidade funcional

O objetivo deste estudo é avaliar o desempenho ambiental de um compósito cimentício reforçado com fibras de juta e malva sem processamento industrial e na forma de tecido. Os resultados obtidos poderão ser usados para evidenciar o desempenho ambiental desse material e sua adequação às demandas da indústria da construção. Adicionalmente, possíveis problemas técnicos, ambientais e econômicos existentes poderão ser evidenciados antes de uma possível produção em escala industrial.

O público-alvo inclui produtores de fibras de juta e malva, a indústria da construção, possíveis usuários e a comunidade acadêmica. Quanto à cobertura temporal, a coleta de dados foi baseada nos anos de 2019 a 2021. Quanto à cobertura geográfica, o estudo foi desenvolvido considerando a cidade de Manaus como ponto de referência, localizada na região da Amazônia brasileira.

O escopo deste estudo abrange as etapas de aquisição de matérias-primas (A1), transporte (A2), processamento e fabricação dos compósitos (A3), conforme a organização da EN 15804:2019 [35], sendo comumente denominada de “berço ao portão”. A unidade funcional foi definida como “1 m² de compósito, adequado a diversos usos típicos de um componente construtivo similar”.

2.2.2 Inventário do ciclo de vida (ICV) e parâmetros de modelagem de dados

Os dados para o inventário do ciclo de vida dos compósitos foram obtidos da seguinte forma: Quanto ao tecido de juta e malva, seis sujeitos atuantes na cadeia produtiva dessas fibras forneceram as informações necessárias, sendo um juticultor/malvicultor, um atravessador de

juta e malva, uma líder de uma cooperativa de produtores dessas fibras, um assessor do governo do estado do Amazonas atuante na área de fibras vegetais, um gestor e uma engenheira de qualidade, funcionários da Companhia Castanhal, uma indústria têxtil que produz tecidos de juta, localizada na cidade Castanhal, Pará, Brasil. Devido à pandemia de COVID-19, todas essas pessoas foram entrevistadas por vias remotas: telefonemas, e-mails, mensagens via WhatsApp e reuniões online. Algumas das informações prestadas por esses sujeitos requereram ajustes para se adequar aos critérios deste trabalho.

Os demais dados foram obtidos na literatura científica e bancos de dados, principalmente o Ecoinvent 3.7.1, que acompanham o software de ACV SimaPro (versão 9.2.0.2, Faculty), desenvolvido pela PRÉ [36]. Esses dados estão descritos na Tabela 3. Como o foco está somente no processo produtivo, assumimos que toda a estrutural industrial estava disponível e desconsideramos possíveis perdas de materiais e energia, bem como a geração de resíduos. A energia utilizada foi o grid do Norte brasileiro. A opção “market” do Ecoinvent foi selecionada tanto para lançar o transporte fluvial quanto o transporte rodoviário, pois nessa opção há inclusão de insumos consumidos nesses processos, tais como combustíveis e óleo lubrificante. Na Tabela 3, estão descritos os materiais, os recursos, o combustível e demais processos empregados na produção do compósito. Como as fibras de juta e malva são tidas praticamente como sinônimos no Norte do Brasil, o tecido, composto de uma mistura dessas fibras, foi denominado apenas tecido de juta.

Tabela 3. Dados de inventário para a produção de 1 m² do compósito.

Produto	Quant.	Unid.
Compósito cimentício reforçado com o tecido de juta - Castanhal	1	m2
Recursos/materiais/combustíveis		
<i>cement, limestone 6-10% {BR} market for cement, limestone 6-10% Cut-off, U</i>	3,7455	kg
<i>calcined clay {BR} calcined clay production Cut-off, U</i>	3,7455	kg
<i>sand {BR} sand quarry operation, extraction from river bed Cut-off, U</i>	7,4911	kg
<i>tap water {BR} market for tap water Cut-off, U</i>	3,1803	kg
<i>Naphthalene sulfonic acid {RoW} production Cut-off, U</i>	0,3405	kg
<i>Jute fabric - Castanhal</i>	2,286	m2
<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cut-off, U</i>	1,968	tkm
<i>transport, freight, sea, ferry {GLO} market for transport, freight, sea, ferry Cut-off, U</i>	1,2345	tkm
Compósito cimentício reforçado com o tecido de juta - Manacapuru	1	m2
Recursos/materiais/combustíveis		
<i>cement, limestone 6-10% {BR} market for cement, limestone 6-10% Cut-off, U</i>	3,7455	kg
<i>calcined clay {BR} calcined clay production Cut-off, U</i>	3,7455	kg
<i>sand {BR} sand quarry operation, extraction from river bed Cut-off, U</i>	7,4911	kg
<i>tap water {BR} market for tap water Cut-off, U</i>	3,1803	kg
<i>Naphthalene sulfonic acid {RoW} production Cut-off, U</i>	0,3405	kg

<i>Jute fabric - Manacapuru</i>	2,286	m2
<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cut-off, U</i>	1,913	tkm
<i>transport, freight, sea, ferry {GLO} market for transport, freight, sea, ferry Cut-off, U</i>	0,0645	tkm
Compósito cimentício reforçado com as fibras de juta - Manaus	1	m2
Recursos/materiais/combustíveis		
<i>cement, limestone 6-10% {BR} market for cement, limestone 6-10% Cut-off, U</i>	3,7455	kg
<i>calcined clay {BR} calcined clay production Cut-off, U</i>	3,7455	kg
<i>sand {BR} sand quarry operation, extraction from river bed Cut-off, U</i>	7,4911	kg
<i>tap water {BR} market for tap water Cut-off, U</i>	3,1803	kg
<i>Naphthalene sulfonic acid {RoW} production Cut-off, U</i>	0,3405	kg
<i>Jute fiber - Manacapuru</i>	0,00075	ton
<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cut-off, U</i>	1,913	tkm
<i>transport, freight, sea, ferry {GLO} market for transport, freight, sea, ferry Cut-off, U</i>	0,0645	
Tecido de juta	1	m2
Recursos/materiais/combustíveis		
<i>Jute fiber (Castanhal or Manacapuru)</i>	0,000350852	ton
<i>Diesel, combusted in industrial equipment/US</i>	0,0000504	l
<i>tap water {BR} market for tap water Cut-off, U</i>	0,7	kg
<i>electricity, medium voltage {BR-North-eastern grid} market for electricity, medium voltage Cut-off, U</i>	0,35	kWh
<i>Waste, organic</i>	0,022852	kg
Fibras de juta - Castanhal	1	ton
Recursos/materiais/combustíveis		
<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cut-off, U</i>	77	tkm
<i>transport, freight, sea, ferry {GLO} market for transport, freight, sea, ferry Cut-off, U</i>	1862,815	tkm
Fibras de juta - Manacapuru	1	ton
Recursos/materiais/combustíveis		
<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 Cut-off, U</i>	1,7	tkm
<i>transport, freight, sea, ferry {GLO} market for transport, freight, sea, ferry Cut-off, U</i>	130,815	tkm

De acordo com o juticultor/malvicultor entrevistado, o plantio de juta e malva é realizado em um solo de várzea, após a descida do nível do rio. Além da capina feita com o auxílio de inchadas e terçados, nenhuma mudança no solo, via equipamentos motorizados, é realizada antes do plantio. Sendo assim, além da força humana, nenhum combustível é utilizado. Nenhum fertilizante é empregado pois o solo por si só é fértil, uma vez que se trata de um ambiente de várzea, fertilizado naturalmente pelo rio. A água empregada no desfibramento manual das fibras é usada dentro do próprio corpo hídrico, onde o juticultor/malvicultor adentra para realizar esse processo após a colheita, que também é manual (Figura 2). Por se tratar de água corrente, o restabelecimento da qualidade dessa água ocorre por meio de processos de autodepuração no

corpo hídrico. Desfibradas e lavadas, as fibras são espalhadas em varais, localizados aos arredores da moradia. Ali ocorre a secagem das fibras pela ação dos ventos e do sol.



Figura 2: Processos realizados pelos juticultores/malvicultores. a) corte das plantas, b) desfibramento das hastes e c) secagem ao sol. Fonte: Revista Globo Rural [37]. Autor: Ernesto de Souza.

Com base nas informações do juticultor/malvicultor entrevistado, não havia materiais, recursos ou processos para serem acrescentados ao ICV da juta e da malva, dada a simplicidade do cultivo e da colheita dessas culturas. Após a secagem, as fibras são vendidas ao atravessador que as coleta na propriedade rural por via fluvial e as revende à cooperativa COOPERJUTA ou à filial da Companhia Castanhal, ambas localizadas na cidade de Manacapuru, AM, BR.

O atravessador de juta e malva entrevistado possui uma embarcação com capacidade para transportar até 11 toneladas de fibras, mas transporta, em média, 5 ou 7 toneladas a cada viagem. Essa embarcação é simples, de madeira, um tipo de transporte muito utilizado no interior da região amazônica brasileira para o transporte de passageiros e cargas (ver Figura 3). No entanto, não havia no banco de dados Ecoinvent uma embarcação nesses padrões, então o transporte via “ferry” foi escolhido como alternativa.



Figura 3: Barcos comumente usados na região amazônica brasileira para o transporte de passageiros e cargas.
Fonte: ANTAQ [38].

Além do transporte de fibras, o atravessador compra e revende sementes de juta e malva aos juticultores/malvicultores. Ele não soube informar com exatidão quantos quilômetros percorre com seu barco e quanto combustível é consumido por safra. Mas, relatou que sua embarcação consome 100 litros de óleo diesel a cada viagem e gasta cerca de R\$ 15.000,00 com combustível a cada safra. Com base nessas informações e no preço do litro de óleo diesel na região metropolitana de Manaus, foi feita uma estimativa de que para realizar viagens das comunidades ribeirinhas situadas aos arredores de Manacapuru até o porto dessa cidade, a embarcação do atravessador consome, por safra, em torno de 3185,4 litros de óleo diesel e realiza cerca de 31,854 viagens.

Além dessas informações, ele também relatou que por safra procede ao menos 3 trocas de óleo lubrificante e que esse procedimento deve ser feito a cada 100 horas percorridas pelo barco. Sendo assim, admitiu-se que, por safra, o barco do atravessador percorre uma quantidade x de quilômetros durante 300 horas. E se um barco desse tipo imprime uma velocidade média de aproximadamente 15 nós, de acordo com Moura [39] e ANTAQ [38], o equivalente a 27,78 km por hora, então é possível que sejam percorridos 8334 km por safra ($300 \times 27,78$). Dividindo-se o total de quilômetros percorridos (8334) pelo total de viagens por safra (31,854), obteve-se o valor de 261,631, que equivale a uma viagem de ida e volta feita pelo atravessador.

Ao dividir o valor de 261,631 por 2, chegou-se a 130,815, que corresponde aos quilômetros percorridos, em média, pelo barco do atravessador para trazer as fibras de juta e malva das comunidades produtoras ao porto de Manacapuru. A sede da Castanhal localizada em Manacapuru está distante 1,7 km do porto da cidade. Para simplificar o trâmite, no ICV admitiu-se que o atravessador vendeu as fibras diretamente à Castanhal e que o transporte das fibras do porto até lá foi realizado por caminhão. Caso a Castanhal realizasse a produção de tecido em

sua filial de Manacapuru, para chegar a polo de produção do compósito (UFAM), localizado em Manaus, o tecido teria que ser transportado via caminhão até o porto de Manacapuru novamente (1,7 km), de lá seguiria até o porto de Manaus via balsa (86 km) e, por fim, à UFAM, via caminhão (13,4 km). Com base nessa possibilidade, além do cenário real, com o transporte das fibras à fábrica da Castanhal, no Pará, dois cenários foram estudados, os quais serão detalhados em uma seção subsequente.

No cenário real, após os procedimentos de classificação e prensagem, feitos nas instalações da filial, as fibras são transportadas, via fluvial, à matriz da Companhia Castanhal localizada no estado do Pará, onde são processadas e transformadas em fios e telas para os mais diversos usos. Com base nos dados da ANTAQ [38], estimou-se que do porto de Manacapuru ao porto de Belém são percorridos 1732 km em via fluvial. Do porto de Belém à sede da Castanhal no Pará, são 73,6 km percorridos via caminhão. Para elaborar o ICV de uma tonelada de fibras que segue para a sede da Castanhal no Pará, o transporte via fluvial, realizado pelo atravessador, e o transporte via caminhão, do porto à Castanhal e depois o inverso, foram somados aos demais quilômetros do respectivo modal. Por fim, o transporte via fluvial totalizou 1862,815 km e o transporte via caminhão 77 km.

A líder da cooperativa COOPERJUTA foi quem indicou tanto o juticultor/malvicultor quanto o atravessador para fornecerem as informações descritas. E todas essas informações estão de acordo com a literatura pertinente [3, 14, 21, 22, 23, 24, 40]. Nessa cooperativa, as fibras são transformadas em fardos e comercializadas (ver Figura 4). Como não há processamento algum das fibras nessa fase, também não há dados para serem lançados no ICV. Portanto, desde o plantio das fibras até o portão da cooperativa o único dado que pode ser lançado no ICV é o transporte realizado pelo atravessador, via fluvial, e o transporte do porto de Manacapuru à cooperativa, via caminhão.



Figura 4: Aspecto das fibras após o enfardamento. Fonte: Agência Pará [41]. Autor: Igor Fonseca/ ASCOM SEDEME.

Fibras sem processamento

Em um dos cenários avaliados neste estudo, as fibras de juta e malva foram usadas sem nenhum processamento. Para que os resultados esperados pudessem ser comparados à literatura científica, o ICV foi realizado para uma tonelada de juta/malva. Desse modo poderiam ser comparados ao ICV de fibras de sisal realizado por outros pesquisadores [42]. Para tanto, fez-se as seguintes adaptações no ICV de Broeren et al. [42]: os dados de transporte para o “Resto do Mundo (RoW)” foram usados e não os dados europeus ou chineses. Por não haver no Ecoinvent 3.7.1 um caminhão de frete com capacidade para 3,5-16 toneladas, características descritas no referido ICV, um caminhão com características mais próximas foi utilizado: 7,5-16 toneladas métricas. A distância para calcular o transporte de 1 tonelada de sisal até o porto foi substituída pela distância entre as cidades de Valente e Manaus (4764 km). A energia utilizada foi o grid do Nordeste brasileiro.

No caso das fibras de juta e malva, considerou-se que 1 tonelada destas, sem processamento, foi transportada de Manacapuru – AM à Manaus – AM. Portanto, na modelagem desse cenário, além das distâncias associadas a 1 tonelada de fibras produzidas no cenário de Manacapuru, está incluso o transporte das fibras, em fardos, da filial da Castanhal de Manacapuru ao porto dessa cidade (1,7 km, via caminhão), de lá ao porto de Manaus (86 km, via balsa), e por fim ao polo de produção do compósito, a UFAM (13,4 km, via caminhão). Essas distâncias foram estimadas com o auxílio do Google Maps.

Tecido de juta e malva

Na cidade de Manaus, uma das duas indústrias têxteis que beneficiava as fibras de juta e de malva encerrou suas atividades fabris por falta de matéria-prima [43]. A única indústria de beneficiamento dessas fibras localizada na cidade, uma fabricante de tecido para sacaria de café, não aceitou participar deste estudo. Então entramos em contato com a Castanhal, que nos forneceu as informações sobre toda a cadeia produtiva de 1 m² de tecido produzido com as fibras de juta e malva.

A Castanhal é uma companhia têxtil fundada em 1966, sendo a maior fabricante de produtos à base de juta no Brasil, com fábrica na cidade de Castanhal, no Pará, e filiais em Manacapuru, no Amazonas, e em São Paulo, capital [44]. Em sua filial localizada na cidade de Manacapuru, a Castanhal adquire e armazena temporariamente as fibras produzidas na região e posteriormente as transporta para sua fábrica, localizada na cidade de Castanhal.

De modo geral, como relatado anteriormente, do cultivo das fibras até a produção do tecido existem diversas fases. O cultivo, a colheita, o desfibramento e a secagem, são procedimentos realizados nas comunidades produtoras. O transporte das fibras das comunidades à filial da Companhia Castanhal em Manacapuru, Amazonas, é realizado pelo atravessador. A classificação e a prensagem das fibras são feitas na referida filial. Posteriormente, as fibras são transportadas, via balsa, do porto de Manacapuru ao porto de Castanhal, no Pará. Já nas instalações da Companhia Castanhal, as fibras são recebidas e armazenadas para futura preparação, fiação, tecelagem e acabamento do tecido.

Porém, os dados fornecidos pela Castanhal requereram alguns ajustes para se adequarem ao ICV do compósito e do tecido. Neste estudo, a opção de utilizar o tecido como reforço foi selecionada pois dessa forma o processo de produção do compósito se torna padronizado e menos suscetível a erros. No que se refere ao processo produtivo do tecido de juta e malva, as informações obtidas junto à Castanhal foram as seguintes:

- O tecido é composto de aproximadamente 50% de fibras de juta e 50% de fibras de malva.
- Na produção de 1 m² de tecido consome-se 0,35 kWh de energia elétrica, 0,000043 kg de óleo diesel, 0,7 litros de água e gera-se 0,022852 kg/m² de resíduos.

Na modelagem, foi necessário converter a unidade de medida do óleo diesel em litro. Os dados fornecidos pela Castanhal não foram associados a nenhum tecido específico que essa indústria produz e comercializa. Então, com base em uma cartela de fios e telas disponibilizada em seu site [44], elaborada para fins comerciais, escolheu-se o modelo F9, de gramatura igual a 328 g/m². Considerando a gramatura do modelo escolhido e a quantidade de resíduos geradas, estimou-se que seria necessário um total de 350,852 gramas de fibras para produzir 1 m² de tecido. Por estar atrelado ao ICV das fibras, na modelagem do tecido esse valor em gramas foi transformado em tonelada.

Como a dosagem do compósito foi estabelecida por massa, em sua produção são usadas como reforço 750 gramas de fibras. Porém, 1 m² de tecido possui apenas 328 gramas. Portanto, para adequar o tecido, em gramas, proporcionalmente à dosagem do compósito, dividiu-se 750 por 328 e chegou-se a 2,286. No ICV, esse valor foi multiplicado por 1 m² de tecido, pois dessa forma se atenderia à massa de fibras necessária à produção de 1 m² de compósito.

Na seção 1.1.2 foi possível observar que enquanto alguns pesquisadores usaram as fibras dispersas como reforço nos compósitos, outros optaram pelos tecidos. Com base nesses estudos

e na dosagem de Melo Filho et al. [28], verificou-se que, quanto ao reforço fibroso, o compósito poderia ser desenvolvido de duas formas:

- Se o reforço for aplicado em forma de tecido, apenas 2 camadas podem ser usadas, devido à gramatura do tecido e à espessura do compósito selecionado – 4 mm [8].
- Se o reforço for realizado com as fibras sem processamento, até 5 camadas de fibras podem ser usadas, mas nesse caso a espessura do compósito é de 12 mm [7].

Matriz do compósito

Como comentado em seção anterior, uma formulação do compósito desenvolvido por Melo Filho et al. [28] foi adaptada e utilizada na produção do compósito objeto deste estudo. O material de Melo Filho et al. [28] tem os seguintes componentes: cimento Portland com fíler, argila calcinada, areia, água de torneira, superplastificante e fibras de sisal. Ao invés de fibras de sisal, neste trabalho, em cenários distintos, utilizou-se tanto o tecido quanto as fibras de juta e malva sem processamento. O cimento Portland, a argila calcinada, a areia e a água de torneira estavam disponíveis no Ecoinvent e com dados brasileiros. O superplastificante cadastrado para o “Resto do Mundo (RoW)” foi escolhido por não haver um produto similar para o contexto brasileiro.

Transporte

Os dados de transporte de argila e areia, minerais presentes na região do estudo, foram calculados de acordo com informações disponíveis em Reis et al. [45], documento que relata a localização de diversas jazidas minerais no estado do Amazonas, BR. O endereço da Universidade Federal do Amazonas (UFAM) foi utilizado como ponto de referência, enquanto lócus experimental de produção do compósito. Para viabilizar uma análise de sensibilidade, foi idealizado um cenário em que o tecido de juta e malva seria produzido em Manacapuru, visando comparar o seu desempenho ambiental com o do tecido produzido no cenário realista, ou seja, em Castanhal, estado do Pará.

Para tentar ser condizente com a realidade, com o auxílio do Google Maps, foram estimadas as distâncias que constam na Tabela 4. Toneladas dos materiais foram multiplicadas pelos quilômetros correspondentes e somadas. Desse modo foi obtida a unidade de medida em tkm. Para calcular os dados de transporte em tkm referentes ao tecido, multiplicou-se o valor corresponde à massa de fibras (0,00075 tonelada), presente na composição do compósito, pelos quilômetros. Para os demais componentes do compósito a opção “market” do Ecoinvent foi escolhida, pois nessa opção o transporte está incluso no material.

Tabela 4. Distâncias de transporte estimadas

Material	Distância (km)	Observação
Argila	60	Região metropolitana de Manaus (C)
Areia	30	Região metropolitana de Manaus (C)
Superplastificante	4265	De Duque de Caxias à Manaus (C)
Fibras de juta e malva	130,815	Das comunidades à Manacapuru (B)
Fibras de juta e malva	1,7	Do porto à Castanhal de Manacapuru (C)
Tecido de juta e malva (cenário 1)	75,1	De Castanhal à Belém (C)
Tecido de juta e malva (cenário 1)	1646	De Belém à Manaus (B)
Tecido de juta e malva (cenário 1)	13,4	Do porto de Manaus à UFAM (C)
Tecido de juta e malva (cenário 2)	86	De Manacapuru à Manaus (B)
Tecido de juta e malva (cenário 2)	13,4	Do porto de Manaus à UFAM (C)

Abreviaturas: B – balsa e C – caminhão.

Embora o modal rodoviário seja o mais utilizado no Brasil para o transporte de materiais de construção [46], no estado do Amazonas o transporte de cargas via fluvial é o mais comum. Produzidos com madeira local e equipados por motores movidos à diesel, os barcos regionais constituem-se como o principal meio de transporte entre as cidades do interior do Amazonas [39]. No entanto, uma embarcação com essas características não existe no banco de dados Ecoinvent. Como alternativa, havia o modal de transporte “ferry”, o qual foi selecionado. As distâncias percorridas via fluvial foram estimadas de acordo com um documento elaborado pela ANTAQ [38]. Para os casos de transporte via caminhão, o modal rodoviário “EURO 3”, com capacidade para 16-32 toneladas, presente no banco de dados Ecoinvent foi adotado, pois os caminhões brasileiros utilizados no transporte de materiais de construção normalmente possuem essas características [47].

2.2.3 Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

Para modelar e processar os dados, a fim de se conhecer a contribuição de cada material e processo para a carga ambiental do compósito, foi utilizado o software de ACV SimaPro [36]. Nesse software constam diversos métodos de AICV. Dentre os métodos de AICV disponíveis e atualizados, o método ReCiPe foi escolhido por ser o mais citado entre os métodos e recomendado em 2 das 7 categorias de impacto estudadas pela Rede (brasileira) de Pesquisa em Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida [48]. Este método traduz as emissões e extrações de recursos em um número limitado de pontuações de impacto ambiental por meio de fatores de caracterização de ponto médio e de ponto final [49].

Na modelagem do compósito foi usada uma combinação das versões ReCiPe 2016 Midpoint e Endpoint (ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.05 / World (2010) H e ReCiPe 2016 Endpoint (H) V1.05 / World (2010) H/H), ambas sob uma perspectiva hierárquica e com abrangência global. Na versão Midpoint são calculados 18 indicadores orientados para o problema: 1 - Aquecimento global; 2 - Depleção do ozônio estratosférico; 3 - Radiação ionizante; 4 - Formação de ozônio, Saúde humana; 5 - Formação de material particulado; 6 - Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres; 7 - Acidificação terrestre; 8 - Eutrofização de água doce; 9 - Eutrofização marinha; 10 - Ecotoxicidade terrestre; 11 - Ecotoxicidade de água doce; 12 - Ecotoxicidade marinha; 13 - Toxicidade humana cancerígena; 14 - Toxicidade humana não cancerígena; 15 - Uso do solo; 16 - Escassez de recursos minerais; 17 - Escassez de recursos fósseis e 18 - Consumo de água. Na versão Endpoint são calculados 3 indicadores orientados para o dano: 1 – Saúde humana; 2 – Ecossistemas; 3 – Recursos. Os resultados obtidos por meio do método ReCiPe Endpoint foram usados somente para o cálculo de pontuação única do compósito, pois a conversão de pontos médios em pontos finais simplifica a interpretação, porém aumenta a incerteza dos resultados da AICV [49].

Na análise de sensibilidade foi utilizado o método EN 15804 (EN 15804 +A2 Method V1.01 / EF 3.0 normalization and weighting set). Este é um método de AICV recente e foi elaborado para avaliar produtos e serviços de construção. É um método de ponto médio, mas que também permite o cálculo para pontuação única no SimaPro. Calcula 28 categorias de impacto (1 - Mudanças climáticas; 2 - Destruição do ozônio; 3 - Radiação ionizante; 4 - Formação fotoquímica de ozônio; 5 - Material particulado; 6 - Toxicidade humana, não cancerígena; 7 - Toxicidade humana, cancerígena; 8 - Acidificação; 9 - Eutrofização, água doce; 10 - Eutrofização marinha; 11 - Eutrofização terrestre; 12 - Ecotoxicidade, água doce; 13 - Uso do solo; 14 - Uso da água; 15 - Uso de recursos, fósseis; 16 - Uso de recursos, minerais e metais; 17 - Mudanças climáticas - Fósseis; 18 - Mudanças climáticas - Biogênicas; 19 - Mudanças climáticas - Uso do solo e mudança de uso do solo; 20 - Toxicidade humana, não cancerígena - orgânicos; 21 - Toxicidade humana, não cancerígena - inorgânicos; 22 - Toxicidade humana, não cancerígena - metais; 23 - Toxicidade humana, cancerígena - orgânicos; 24 - Toxicidade humana, cancerígena - inorgânicos; 25 - Toxicidade humana, cancerígena - metais; 26 - Ecotoxicidade, água doce - orgânicos; 27 - Ecotoxicidade, água doce - inorgânicos; 28 - Ecotoxicidade, água doce - metais).

2.2.4 Análise de sensibilidade

Neste trabalho uma análise de sensibilidade foi realizada visando ao entendimento das incertezas dos resultados, conforme recomendações da norma pertinente [16]. Para tanto, dois diferentes cenários de transporte foram avaliados durante a modelagem do compósito e, como comentado na seção anterior, um segundo método de AICV, o EN 15804, foi utilizado para embasar os resultados.

Em um estudo anterior [50] foi verificado que o modal de transporte rodoviário pode ser responsável por uma parcela significativa da carga ambiental de determinado produto. Transportar matérias-primas por longas distâncias via caminhão pode transformar um produto idealizado para ser sustentável em um grande causador de impacto ambiental. Assim, no planejamento de produção do compósito objeto deste estudo decidiu-se usar, quando viável, matérias-primas locais e um modal de transporte comum na região amazônica brasileira: o transporte fluvial. A substituição de componentes impactantes do compósito foi estudada anteriormente. Restou avaliar a influência do modal de transporte e do uso de matérias-primas locais no desempenho ambiental do compósito. Para preencher essa lacuna, neste trabalho os seguintes cenários foram estudados:

- Cenário 1: ACV do compósito produzido com o tecido de juta e malva fabricado em Castanhal;
- Cenário 2: ACV do compósito produzido com o tecido de juta e malva fabricado em Manacapuru.
- Cenário 3: ACV do compósito produzido com fibras de juta e malva sem processamento, provenientes de Manacapuru.

Constam na Tabela 3, apresentada anteriormente, os percentuais dos componentes do compósito para ambos os cenários.

3 Resultados

Após a modelagem dos dados do ICV no software SimaPro, obteve-se a AICV para uma série de cenários definida. A seguir, os resultados obtidos são retratados por meios dos métodos ReCiPe 2016 Midpoint/Endpoint e EN 15804. Primeiramente, os resultados são apresentados por contribuição por processo unitário, em seguida, os cenários de possíveis processos produtivos do compósito são avaliados quanto ao desempenho ambiental. Por categoria de impacto, a carga ambiental de uma tonelada de fibras de juta/malva foi comparada à de uma

tonelada de fibras de sisal. Também por categoria, os cenários de produção do compósito foram comparados. Para tanto, foram selecionadas algumas categorias de impacto para serem interpretadas, de acordo com a norma EN 15804 [35] e com a literatura científica.

3.1 AICV pelo método ReCiPe 2016 Midpoint e Endpoint

A seguir, nas Figuras 5, 6 e 7, são representadas as contribuições por processo em termos de impactos ambientais para três diferentes cenários de produção do compósito. Conforme relatado no ICV, as variáveis nesses três cenários foram o local de produção do tecido e o processamento das fibras. A fim de amenizar incertezas, usou-se uma combinação do método de AICV ReCiPe 2016 Midpoint e Endpoint.

Os resultados ilustrados na Figura 5 evidenciam que no cenário Castanhal o componente mais ambientalmente impactante no compósito é o cimento. Pelo ReCiPe 2016 Endpoint, ao cimento foram atribuídos 43,2% da carga ambiental do compósito, sendo o restante dividido entre a argila calcinada (11,4%), o superplastificante (16,7%), o tecido de juta (14,4%) e o transporte (13,7%). Do total relacionado ao cimento, 37,9% são devidos à produção do clínquer. Do percentual referente ao superplastificante, o segundo componente mais impactante, 7,33% se devem ao processamento de alcatrão de hulha (carvão mineral), de onde é extraído o naftaleno usado na produção do superplastificante [51]. Quanto ao transporte, 6,93% cabem ao modal rodoviário e 6,21% ao modal fluvial. Do total atribuído ao tecido de juta, 13,7% são referentes ao transporte fluvial.

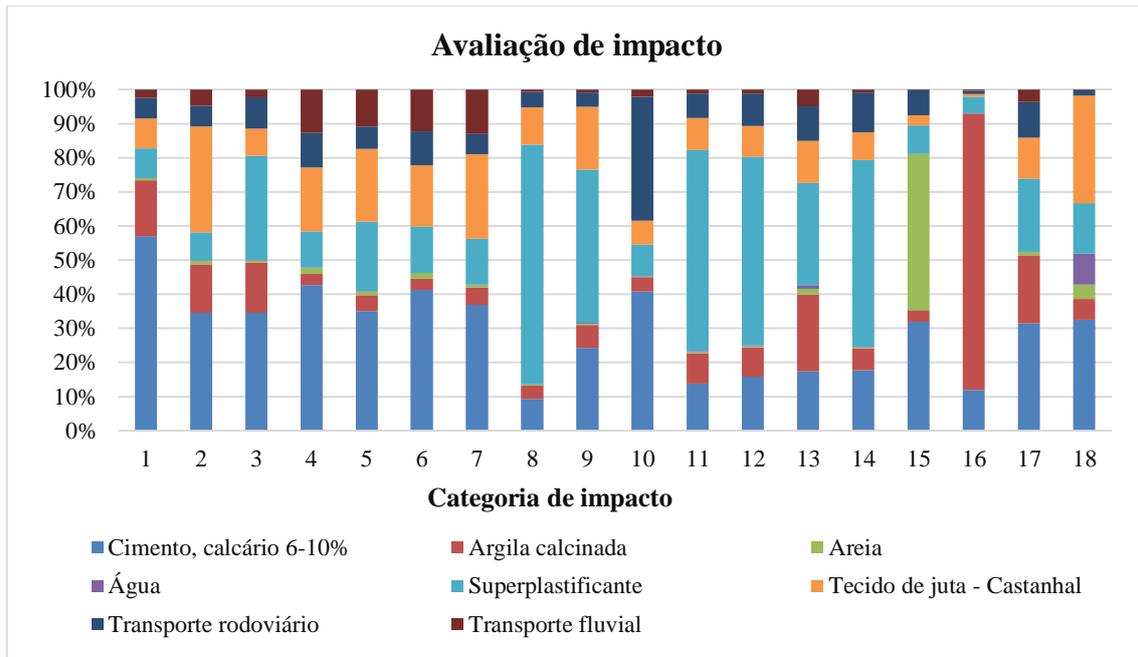


Figura 5: Caracterização dos impactos ambientais relacionados ao compósito reforçado com o tecido produzido em Castanhal. Resultados obtidos por meio do ReCiPe Midpoint 2016. Categorias de impacto: 1 - Aquecimento global; 2 - Depleção do ozônio estratosférico; 3 - Radiação ionizante; 4 - Formação de ozônio, Saúde humana; 5 - Formação de material particulado; 6 - Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres; 7 - Acidificação terrestre; 8 - Eutrofização de água doce; 9 - Eutrofização marinha; 10 - Ecotoxicidade terrestre; 11 - Ecotoxicidade de água doce; 12 - Ecotoxicidade marinha; 13 - Toxicidade humana cancerígena; 14 - Toxicidade humana não cancerígena; 15 - Uso do solo; 16 - Escassez de recursos minerais; 17 - Escassez de recursos fósseis e 18 - Consumo de água.

A Figura 6 mostra os resultados referentes ao cenário Manacapuru, no qual o cimento foi novamente o componente mais impactante. De acordo com o ReCiPe 2016 Endpoint, o cimento é responsável por 49,8% da carga ambiental total do compósito e o percentual restante ficou assim distribuído: 13,2% para a argila calcinada, 19,2% para o superplastificante, 8,3% para o tecido de juta, 7,76% para o transporte no modal rodoviário e 0,37% para o modal fluvial. Mais uma vez, o processo responsável majoritariamente pelo elevado impacto ambiental do cimento foi a produção de clínquer (43,7%). Do total associado ao superplastificante, 8,46% se devem ao processamento de sua matéria-prima, o alcatrão de hulha [51].

Praticamente todo o percentual de carga ambiental referente ao tecido de juta no cenário Manacapuru deve-se à eletricidade, diferentemente do que ocorreu no cenário Castanhal, em que quase o total da carga ambiental estava associada ao transporte fluvial. Porém, isso não quer dizer que o processo de produção do tecido consuma muita energia elétrica. Acontece que, com a diminuição da distância a ser percorrida via transporte fluvial de um cenário para o outro, houve a redução e redistribuição de impactos ambientais no cenário Manacapuru.

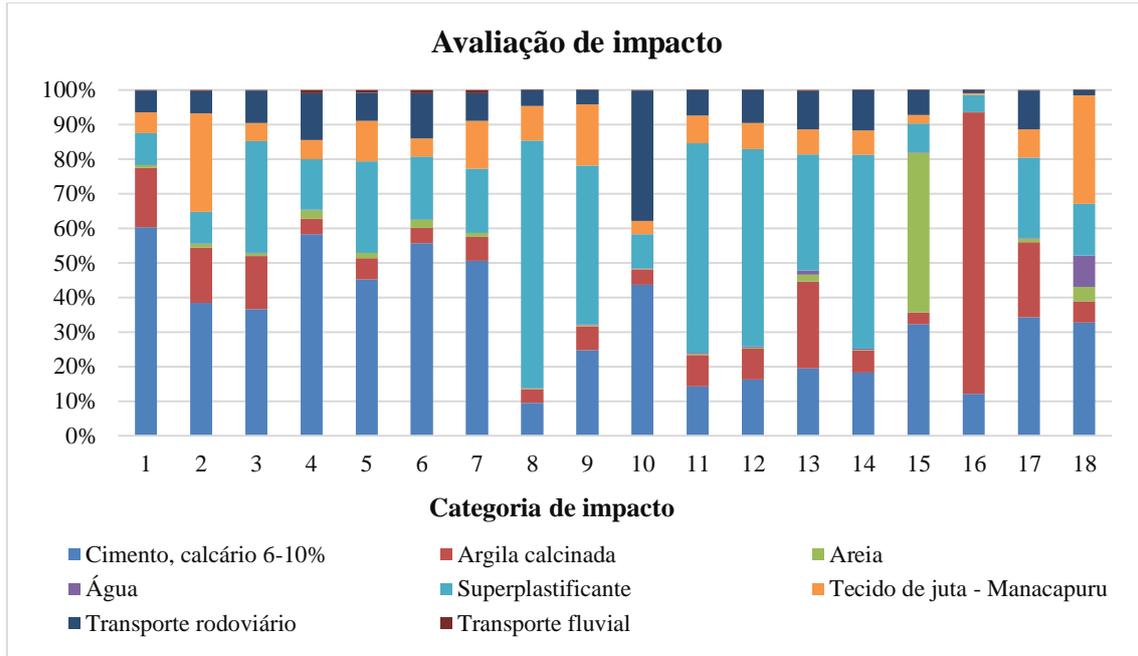


Figura 6: Caracterização dos impactos ambientais relacionados ao compósito reforçado com o tecido produzido em Manacapuru. Resultados obtidos por meio do ReCiPe Midpoint 2016. Categorias de impacto: 1 - Aquecimento global; 2 - Depleção do ozônio estratosférico; 3 - Radiação ionizante; 4 - Formação de ozônio, Saúde humana; 5 - Formação de material particulado; 6 - Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres; 7 - Acidificação terrestre; 8 - Eutrofização de água doce; 9 - Eutrofização marinha; 10 - Ecotoxicidade terrestre; 11 - Ecotoxicidade de água doce; 12 - Ecotoxicidade marinha; 13 - Toxicidade humana cancerígena; 14 - Toxicidade humana não cancerígena; 15 - Uso do solo; 16 - Escassez de recursos minerais; 17 - Escassez de recursos fósseis e 18 - Consumo de água.

Na Figura 7 constam os resultados da AICV para o cenário Manaus. Como esperado, o componente mais ambientalmente impactante é o cimento. Pelo ReCiPe 2016 Endpoint, 54% da carga ambiental do compósito foram atribuídos ao cimento, 14,3% à argila calcinada, 20,8% ao superplastificante e 8,4% ao transporte rodoviário. Do total conferido ao cimento, 47,4% se devem à produção do clínquer. Da parcela de carga cominada ao superplastificante, 9,16% são referentes ao processamento de alcatrão de hulha.

Nesse cenário as fibras foram consideradas sem processamento algum e apenas o transporte foi lançado no seu respectivo ICV. Além disso, a distância a ser vencida seria de Manacapuru à Manaus, o que representa somente 86 km. Por isso, em relação aos cenários anteriores, a carga ambiental atribuída às fibras, de apenas 0,62%, foi bastante inferior. Portanto, ao comparar os cenários avaliados, se o tecido de juta fosse produzido em Manacapuru e não em Castanhal, haveria uma diminuição da carga ambiental relacionada às fibras de 42,36%. Caso as fibras fossem usadas como reforço no compósito sem processamento algum, sendo apenas transportadas de Manacapuru à Manaus, a redução seria de 95,7%.

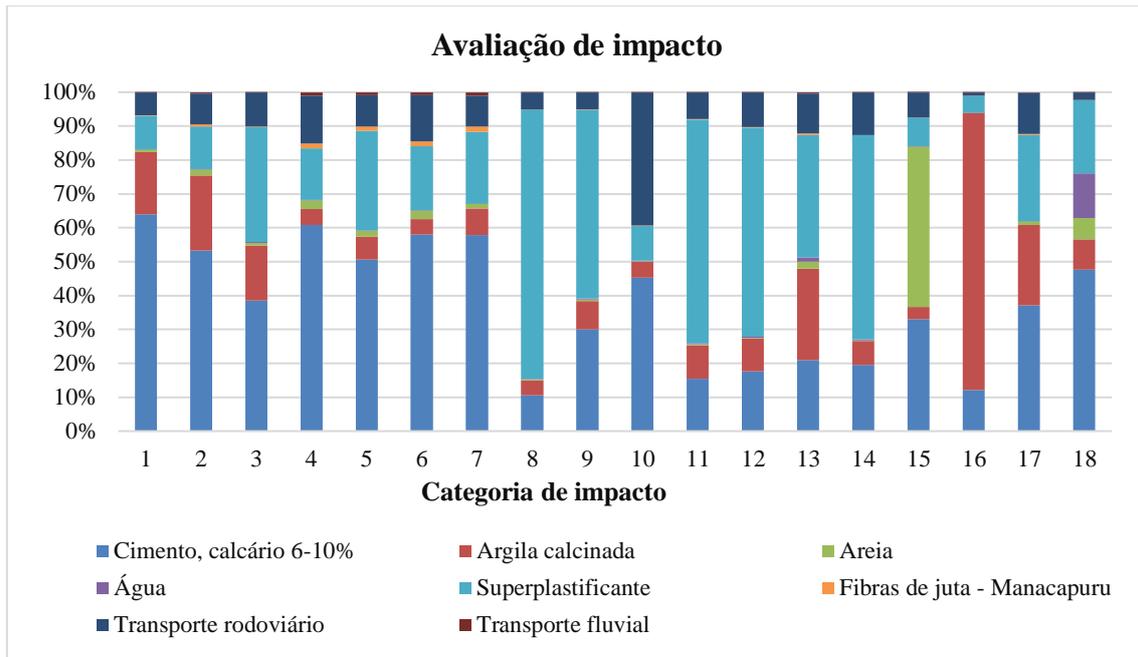


Figura 7: Caracterização dos impactos ambientais relacionados ao compósito reforçado com as fibras de juta e malva sem processamento, produzidas em Manacapuru. Resultados obtidos por meio do ReCiPe Midpoint 2016. Categorias de impacto: 1 - Aquecimento global; 2 - Depleção do ozônio estratosférico; 3 - Radiação ionizante; 4 - Formação de ozônio, Saúde humana; 5 - Formação de material particulado; 6 - Formação de ozônio, Ecossistemas terrestres; 7 - Acidificação terrestre; 8 - Eutrofização de água doce; 9 - Eutrofização marinha; 10 - Ecotoxicidade terrestre; 11 - Ecotoxicidade de água doce; 12 - Ecotoxicidade marinha; 13 - Toxicidade humana cancerígena; 14 - Toxicidade humana não cancerígena; 15 - Uso do solo; 16 - Escassez de recursos minerais; 17 - Escassez de recursos fósseis e 18 - Consumo de água.

3.2. Análise de sensibilidade - AICV pelo método EN 15804

Nas Figuras 8, 9 e 10 são mostrados os resultados da AICV para o compósito, à luz do método EN 15804. Nos três cenários investigados é possível verificar como cada componente/processo unitário contribui para impactos ambientais associados ao compósito. No SimaPro, o método EN 15804 possui uma função de pontuação única (Endpoint), portanto não precisa ser combinado a outro método. Nessa função é possível visualizar, de modo geral, a contribuição em percentual à carga ambiental geral do produto de um determinado recurso, material, combustível ou processo. Conforme relatado no ICV, as variáveis nos três cenários foram o local de produção do tecido e o processamento das fibras.

A Figura 8 ilustra os resultados da AICV para o cenário Castanhal. Pelo método EN 15804, em uma perspectiva de pontuação única, o componente mais impactante ambientalmente é o cimento, com 40,5% da carga ambiental do compósito, seguido pelo superplastificante, com 21,4%, pelo tecido de juta, com 12,5%, pela argila calcinada, com 11,4% e pelo transporte, com 7,95% para o modal rodoviário e 4,63% para o modal fluvial. Do total atribuído ao cimento, 34,1% são referentes à produção do clínquer. Quanto ao superplastificante, 9,78% estão

relacionados ao processamento de alcatrão de hulha, de onde se extrai o naftaleno, a matéria-prima do superplastificante. Da carga ambiental atrelada ao tecido de juta, 10,2% se devem ao transporte fluvial.

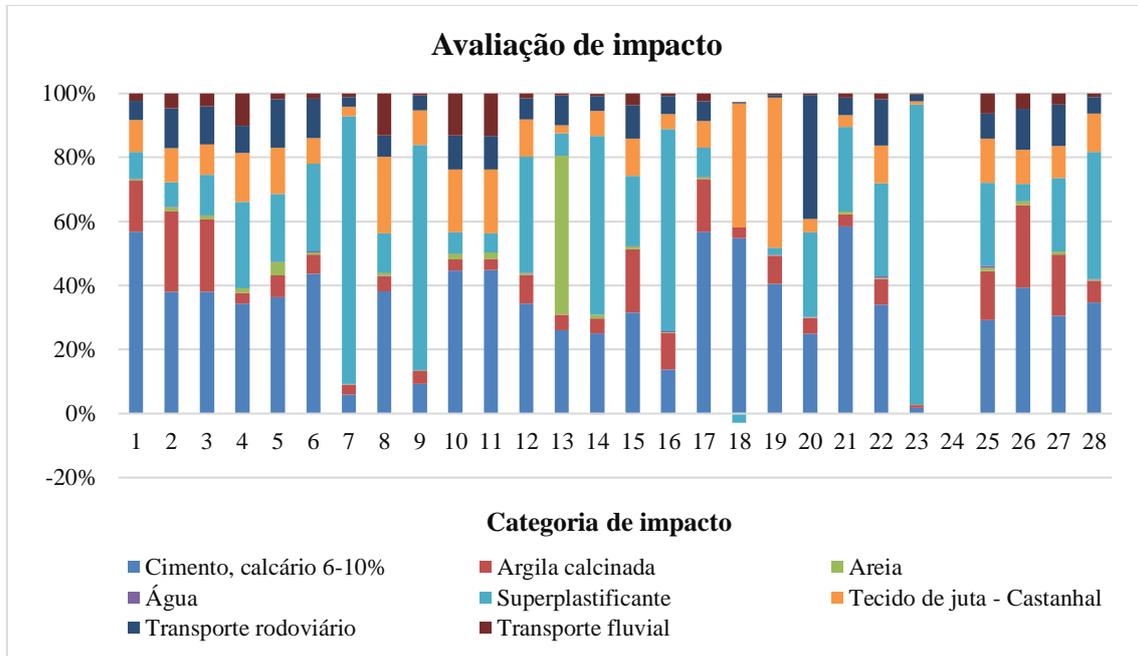


Figura 8: Caracterização dos impactos ambientais relacionados ao compósito reforçado com o tecido produzido em Castanhal. Resultados obtidos por meio do EN 15804. Categorias de impacto: 1 - Mudanças climáticas; 2 - Destruição do ozônio; 3 - Radiação ionizante; 4 - Formação fotoquímica de ozônio; 5 - Material particulado; 6 - Toxicidade humana, não cancerígena; 7 - Toxicidade humana, cancerígena; 8 - Acidificação; 9 - Eutrofização, água doce; 10 - Eutrofização marinha; 11 - Eutrofização terrestre; 12 - Ecotoxicidade, água doce; 13 - Uso do solo; 14 - Uso da água; 15 - Uso de recursos, fósseis; 16 - Uso de recursos, minerais e metais; 17 - Mudanças climáticas - Fóssil; 18 - Mudanças climáticas - Biogênico; 19 - Mudanças climáticas - Uso do solo e mudança de uso do solo; 20 - Toxicidade humana, não cancerígena - orgânicos; 21 - Toxicidade humana, não cancerígena - inorgânicos; 22 - Toxicidade humana, não cancerígena - metais; 23 - Toxicidade humana, cancerígena - orgânicos; 24 - Toxicidade humana, cancerígena - inorgânicos; 25 - Toxicidade humana, cancerígena - metais; 26 - Ecotoxicidade, água doce - orgânicos; 27 - Ecotoxicidade, água doce - inorgânicos; 28 - Ecotoxicidade, água doce - metais.

Na Figura 9 são representados os resultados da AICV referente ao cenário Manacapuru. Sob a perspectiva de pontuação única do EN 15804, o componente mais ambientalmente impactante é o cimento, com 45% da carga ambiental total, seguido pelo superplastificante, com 23,8%, pela argila calcinada, com 12,7%, pelo tecido de juta, com 7,86% e pelo transporte, com 8,59% no modal rodoviário e 0,27% no modal fluvial. Do total atribuído ao cimento, 38% são referentes à produção do clínquer. Quanto ao superplastificante, 10,9% estão associados ao processamento de alcatrão de hulha. O total da carga ambiental do tecido de juta está relacionado à eletricidade, uma vez que não há nenhum outro processo unitário ambientalmente impactante em seu processo produtivo.

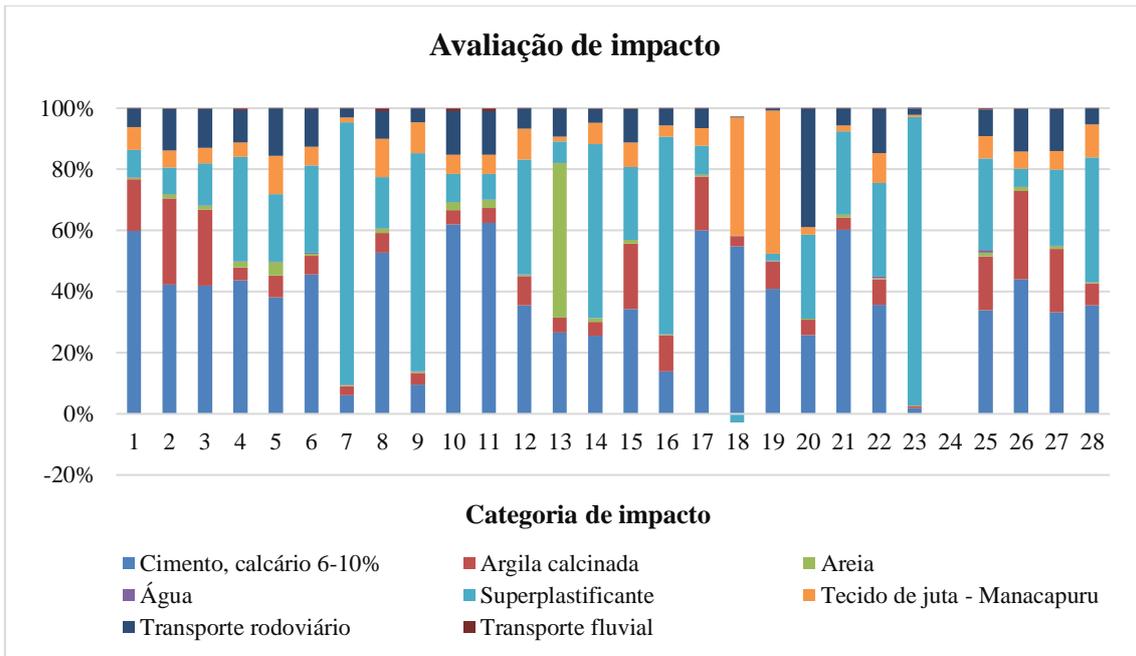


Figura 9: Caracterização dos impactos ambientais relacionados ao compósito reforçado com o tecido produzido em Manacapuru. Resultados obtidos por meio do EN 15804. Categorias de impacto: 1 - Mudanças climáticas; 2 - Destruição do ozônio; 3 - Radiação ionizante; 4 - Formação fotoquímica de ozônio; 5 - Material particulado; 6 - Toxicidade humana, não cancerígena; 7 - Toxicidade humana, cancerígena; 8 - Acidificação; 9 - Eutrofização, água doce; 10 - Eutrofização marinha; 11 - Eutrofização terrestre; 12 - Ecotoxicidade, água doce; 13 - Uso do solo; 14 - Uso da água; 15 - Uso de recursos, fósseis; 16 - Uso de recursos, minerais e metais; 17 - Mudanças climáticas - Fóssil; 18 - Mudanças climáticas - Biogênico; 19 - Mudanças climáticas - Uso do solo e mudança de uso do solo; 20 - Toxicidade humana, não cancerígena - orgânicos; 21 - Toxicidade humana, não cancerígena - inorgânicos; 22 - Toxicidade humana, não cancerígena - metais; 23 - Toxicidade humana, cancerígena - orgânicos; 24 - Toxicidade humana, cancerígena - inorgânicos; 25 - Toxicidade humana, cancerígena - metais; 26 - Ecotoxicidade, água doce - orgânicos; 27 - Ecotoxicidade, água doce - inorgânicos; 28 - Ecotoxicidade, água doce - metais.

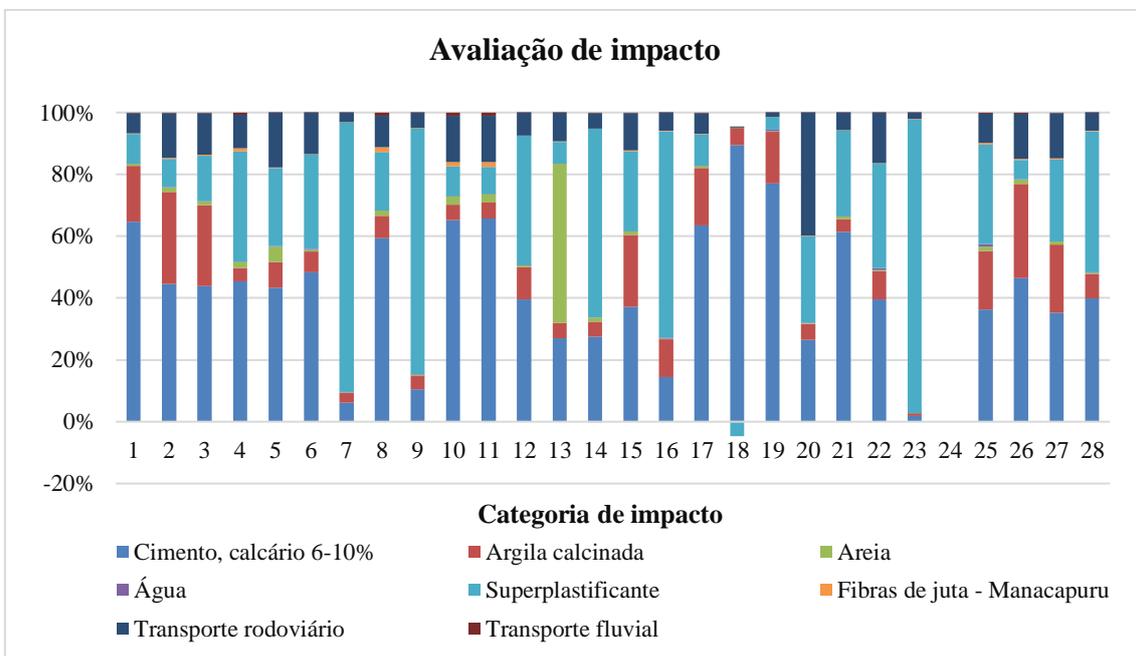


Figura 10: Caracterização dos impactos ambientais relacionados ao compósito reforçado com as fibras de juta e malva sem processamento, produzidas em Manacapuru. Resultados obtidos por meio do EN 15804. Categorias de

impacto: 1 - Mudanças climáticas; 2 - Destruição do ozônio; 3 - Radiação ionizante; 4 - Formação fotoquímica de ozônio; 5 - Material particulado; 6 - Toxicidade humana, não cancerígena; 7 - Toxicidade humana, cancerígena; 8 - Acidificação; 9 - Eutrofização, água doce; 10 - Eutrofização marinha; 11 - Eutrofização terrestre; 12 - Ecotoxicidade, água doce; 13 - Uso do solo; 14 - Uso da água; 15 - Uso de recursos, fósseis; 16 - Uso de recursos, minerais e metais; 17 - Mudanças climáticas - Fóssil; 18 - Mudanças climáticas - Biogênico; 19 - Mudanças climáticas - Uso do solo e mudança de uso do solo; 20 - Toxicidade humana, não cancerígena - orgânicos; 21 - Toxicidade humana, não cancerígena - inorgânicos; 22 - Toxicidade humana, não cancerígena - metais; 23 - Toxicidade humana, cancerígena - orgânicos; 24 - Toxicidade humana, cancerígena - inorgânicos; 25 - Toxicidade humana, cancerígena - metais; 26 - Ecotoxicidade, água doce - orgânicos; 27 - Ecotoxicidade, água doce - inorgânicos; 28 - Ecotoxicidade, água doce – metais.

A Figura 10 mostra os resultados da AICV para o cenário Manaus. Pela perspectiva de pontuação única do EN 15804, o componente mais ambientalmente impactante segue sendo o cimento, com 48,7% do total da carga ambiental. O percentual restante foi distribuído entre o superplastificante (25,7%), a argila calcinada (13,7%) e o transporte (9,28% para o modal rodoviário e 0,3% para o modal fluvial). A produção do clínquer foi responsável por 41% do total de impacto ambiental do cimento e o processamento de alcatrão de hulha por 11,7% da parcela de carga ambiental atribuída ao superplastificante. Nesse cenário, a concentração da carga ambiental do compósito no cimento e no superplastificante ocorre devido à diminuição da carga relacionada ao tecido/às fibras.

Os impactos relacionados às fibras são mínimos no cenário Manaus (Figura 10), apenas 0,45% do total conferido ao compósito. Nesse contexto, verifica-se que se o tecido fosse produzido em Manacapuru e não em Castanhal, os inerentes impactos relacionados ao reforço do compósito diminuiriam em cerca de 37,12%. E se as fibras fossem usadas sem processamento, sendo apenas transportadas de Manacapuru à Manaus, os impactos relacionados cairiam 96,41%.

3.3. Comparação do desempenho ambiental da fibra de juta e do compósito com a literatura científica

A comparação dos resultados de diferentes estudos de ACV ou ICV só é possível se os pressupostos e o contexto de cada estudo forem equivalentes [15, 16]. Sendo assim, para evidenciar o desempenho ambiental das fibras de juta e malva produzidas na Amazônia brasileira, uma tonelada dessas fibras foi comparada a uma tonelada de fibras de sisal, produzidas no nordeste brasileiro, cuja ACV foi realizada por Broeren et al. [42]. Da mesma forma, também foram comparados os três cenários de produção do compósito, por categoria de impacto.

As categorias de impacto a serem avaliadas nessa comparação foram definidas de acordo com a norma EN 15804+A2 [35], Monteiro et al. [52] e Santos et al. [50]. Constam na Tabela 5 as pontuações obtidas por meio dos métodos ReCiPe 2016 Midpoint e EN 15804 Midpoint para as categorias aquecimento global, destruição da camada de ozônio, acidificação, depleção abiótica (minerais e combustíveis fósseis), eutrofização, oxidação fotoquímica, toxicidade humana e ecotoxicidade de água doce.

Tabela 5. Comparação dos impactos ambientais quantificados relacionados às fibras.

ReCiPe 2016 Midpoint			
Categoria de impacto	Unidade	Fibra de juta	Fibra de sisal
Aquecimento global	kg CO ₂ eq	0,026568214	1,538894688
Destruição do ozônio estratosférico	kg CFC11 eq	1,7636E-08	6,20236E-07
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	0,00050282	0,005064885
Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	4,03116E-05	0,003558746
Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	0,007994852	0,418854336
Eutrofização de água doce	kg P eq	9,33312E-07	0,000122819
Formação de ozônio, saúde humana	kg NOx eq	0,000524766	0,008653606
Formação de ozônio, ecos. terrestre	kg NOx eq	0,000528593	0,008849753
Toxicidade humana cancerígena	kg 1,4-DCB	0,001795601	0,091228953
Toxicidade humana não cancerígena	kg 1,4-DCB	0,005078609	1,559495232
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	0,000239484	0,034212194
EN 15804			
Categoria de impacto	Unidade	Fibra de juta	Fibra de sisal
Mudanças Climáticas	kg CO ₂ eq	0,026635245	1,512574087
Destruição do ozônio	kg CFC11 eq	5,43321E-09	2,60793E-07
Acidificação	mol H ⁺ eq	0,000799081	0,008918563
Uso de recursos, minerais e metais	kg Sb eq	3,85486E-08	6,9957E-06
Uso de recursos, fósseis	MJ	0,347125001	18,31805145
Eutrofização, água doce	kg P eq	9,3276E-07	0,000122783
Formação fotoquímica de ozônio	kg NMVOC eq	0,000580166	0,01035508
Toxicidade humana, cancerígena	CTUh	1,64994E-11	1,40463E-09
Toxicidade humana, não cancerígena	CTUh	1,50346E-10	2,79555E-08
Ecotoxicidade, água doce	CTUe	0,216364134	17,46841191

Pelo ReCiPe 2016 Midpoint, em todas as categorias comparadas, as fibras de juta e malva são entre 90,07% e 100% menos impactantes ambientalmente que as fibras de sisal. Pelo método EN 15804 os resultados foram bastante próximos, pois em todas as categorias comparadas, ocorrem reduções que variam entre 91,04% e 99,46%. Os resultados obtidos em ambos os métodos são, portanto, convergentes. Essa comparação tornou evidente a influência do processo de transporte na carga ambiental do compósito.

A comparação dos impactos ambientais entre os cenários estudados, por categoria, é mostrada na Tabela 6. Aqui os impactos ambientais gerais estão acoplados por cenário de produção do

compósito. Por meio dessas comparações é possível evidenciar em quais das categorias o impacto ambiental é representativo e indica em qual cenário o produto em desenvolvimento teria um desempenho ambiental melhor.

Tabela 6. Comparação dos impactos ambientais relacionados ao compósito para cada cenário estudado.

ReCiPe 2016 Midpoint				
Categoria de impacto	Unidade	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Aquecimento global	kg CO ₂ eq	5,54670963	5,247417007	4,942824166
Destruição do ozônio estratosférico	kg CFC11 eq	1,98614E-06	1,78302E-06	1,28499E-06
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	0,021614989	0,015734071	0,013777351
Escassez de recursos minerais	kg Cu eq	0,063629568	0,063180115	0,062961444
Escassez de recursos fósseis	kg oil eq	1,099901956	1,010423773	0,931567139
Eutrofização de água doce	kg P eq	0,000572717	0,000562808	0,000506232
Formação de ozônio, saúde humana	kg NO _x eq	0,022710273	0,016614171	0,015918158
Formação de ozônio, ecos. terrestre	kg NO _x eq	0,023667832	0,017528102	0,016822576
Toxicidade humana cancerígena	kg 1,4-DCB	0,18999371	0,169611324	0,158029427
Toxicidade humana não cancerígena	kg 1,4-DCB	2,081511938	2,031817732	1,889927455
Ecotoxicidade de água doce	kg 1,4-DCB	0,092477887	0,089935186	0,08281599
EN 15804				
Categoria de impacto	Unidade	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Mudanças Climáticas	kg CO ₂ eq	5,758459843	5,458448356	5,060375752
Destruição do ozônio	kg CFC11 eq	5,94373E-07	5,3338E-07	5,05985E-07
Acidificação	mol H ⁺ eq	0,034071062	0,024735707	0,021978639
Uso de recursos, minerais e metais	kg Sb eq	2,08026E-05	2,03978E-05	1,96743E-05
Uso de recursos, fósseis	MJ	48,22202576	44,33808076	40,94325652
Eutrofização, água doce	kg P eq	0,000572469	0,000562566	0,00050611
Formação fotoquímica de ozônio	kg NMVOC eq	0,031445481	0,024709783	0,023798369
Toxicidade humana, cancerígena	CTUh	7,20914E-09	7,02355E-09	6,91941E-09
Toxicidade humana, não cancerígena	CTUh	3,94962E-08	3,79286E-08	3,57135E-08
Ecotoxicidade, água doce	CTUe	66,36801087	63,9957446	57,62450368

Abreviaturas: Cenário 1 - Castanhal; Cenário 2 - Manacapuru; Cenário 3 - Manaus.

Pelo método ReCiPe 2016 Midpoint, do cenário Castanhal para o cenário Manacapuru ocorreram reduções de impactos em todas as categorias avaliadas, variando entre 0,71% e 27,21%. As categorias com mais reduções foram: acidificação terrestre (27,21%), formação de ozônio, saúde humana (26,84%) e formação de ozônio, ecossistemas terrestres (25,94%). Ao comparar o cenário Castanhal com o cenário Manaus, verificou-se que aconteceram reduções de impacto de até 36,26%. As categorias com mais reduções foram: depleção de ozônio estratosférico (35,30%), acidificação terrestre (36,26%), formação de ozônio, saúde humana (29,91%) e formação de ozônio, ecossistemas terrestres (28,92%).

Pelo método EN 15804, do cenário Castanhal para o cenário Manacapuru as reduções de impacto ambiental variaram entre 1,73% e 27,40%. As categorias com as maiores reduções foram acidificação (27,40%) e formação de ozônio fotoquímico (21,42%). Do cenário

Castanhal para o Manaus as reduções variaram entre 4,02% e 35,49%. E as categorias com as maiores reduções foram acidificação (35,49%), formação de ozônio fotoquímico (24,32%), uso de recursos, fósseis (15,09%) e depleção de ozônio (14,87%).

Como era esperado, comparando os três cenários, verifica-se que os impactos ambientais reduzem significativamente à medida que as distâncias de transporte de materiais são diminuídas. E, obviamente, no cenário em que o compósito foi reforçado com tecido produzido em Castanhal a carga ambiental foi a maior em todas as categorias de impacto avaliadas.

Com base nas mesmas categorias descritas nas Tabela 6, ao comparar o cenário mais impactante, Castanhal, com um cenário em que o compósito foi produzido de forma similar, mas reforçado com fibras de sisal provenientes do estado da Bahia [50], pelo método ReCiPe 2016 Midpoint, chegou-se a reduções de impacto que variaram, em geral, entre 3,32% (escassez de recurso mineral) e 36,91% (toxicidade humana não cancerígena). Porém, houve um pequeno aumento na categoria depleção de ozônio estratosférico (7,11%) e um aumento significativo em acidificação terrestre (19,95%). Pelo método EN 15804, nas categorias avaliadas, as reduções de impacto variaram entre 4,91% (formação de ozônio fotoquímico) e 37,05% (toxicidade humana, não cancerígena). Um único aumento significativo foi verificado na categoria de acidificação (15,25%).

É muito provável que os aumentos evidenciados nas categorias citadas estejam relacionados ao modal de transporte fluvial. Sendo assim, infere-se que este modal de transporte, embora seja menos impactante ambientalmente que o rodoviário, de modo geral, pode ser significativamente impactante em categorias de acidificação.

Ressalta-se que nenhum dos produtos citados está disponível no mercado, portanto essa discussão não se trata de uma afirmação comparativa, conforme prevê a norma pertinente [15, 16]. Essa comparação foi apenas qualitativa.

4 Discussão e considerações (interpretação)

Os resultados da AICV alcançados por meio de ambos os métodos são consistentes. Tanto pelo método de AICV ReCiPe 2016 quanto pelo EN 15804, os resultados obtidos por processo unitário sugerem que a produção das matérias-primas do cimento e do superplastificante são os hotspots ambientais do compósito. Como a substituição em larga escala do cimento por outros materiais não será possível na próxima década [5], uma alternativa que tem se mostrado eficaz, no tocante à redução de impactos ambientais associados, é substituí-lo parcialmente por argilas

calcinadas, uma vez que a calcinação da argila é realizada em temperaturas inferiores, no máximo 850 ° C [53, 54].

As argilas, disponíveis em todo o mundo, quando calcinadas em torno de 600°C, podem ser consideradas um tipo de materiais cimentícios suplementares (SCMs) altamente reativos que, quando utilizadas em substituição ao clínquer, tem um grande potencial de redução em larga escala das emissões de CO₂ [5]. Logo, se fosse possível adicionar mais argila calcinada em substituição ao cimento no compósito, a tendência seria que este produto se tornasse menos impactante, mas a substituição de 50% é o máximo aceitável, pois a resistência do compósito tende a diminuir à medida que se aumenta a substituição.

Quanto ao superplastificante, a diminuição desse componente reduz significativamente a carga ambiental de compósitos [50]. Uma redução de 2% para 0,4% de superplastificante na composição do compósito representou uma diminuição de impactos entre 2,66% e 51,21%%, pelo método ReCiPe 2016 Midpoint, e entre 4,17% e 61,51%, pelo EN 15804 [50]. No entanto, nem sempre é possível reduzir a quantidade desse produto no traço de matrizes cimentícias. Para produzir a matriz do seu compósito, Oliveira [7] precisou de 2% de superplastificante enquanto Oliveira [8] consumiu 1,5%. Por outro lado, esse produto por ser substituído por outros novos disponíveis no mercado, os quais têm a mesma funcionalidade, mas suas composições são diferentes.

Ao comparar os resultados obtidos para cada um dos cenários, foi possível constatar que o cenário Manaus é o melhor da perspectiva ambiental, enquanto o cenário Castanhal exibiu a maior carga ambiental. Como esperado, as fibras não processadas apresentaram baixo impacto ambiental em relação aos demais componentes do compósito. Quintana et al. [20] chegaram a um resultado semelhante ao realizar a ACV para compósitos produzidos com diferentes fibras naturais.

Da perspectiva técnica, empregar as fibras sem processamento industrial como reforço também é vantajoso. Como mostra a Tabela 2, os compósitos reforçados com as fibras longas têm melhor desempenho mecânico [7, 8]. Com relação aos esforços transferidos dentro do compósito, o estudo de Melo Filho [55] comprovou que as fibras sem processamento apresentam um melhor comportamento de transferência de tensões. Adicionalmente, pode se inferir que o compósito reforçado com tecido tenha menor durabilidade e vida útil e, sendo assim, precisaria de mais manutenções ou uma reposição completa, aumentando seus impactos ao longo do ciclo de vida.

Além disso, materiais de base biológica, como as fibras vegetais, podem atuar como sumidouros de carbono durante sua vida útil [56]. Os materiais cimentícios, por sua vez, quando expostos à atmosfera, podem capturar CO₂ por carbonatação, mas a quantidade absorvida representa apenas uma fração daquela liberada pela decomposição do calcário durante a produção do cimento [5]. Acredita-se que essa captura represente cerca de 25% do total anual de emissões de CO₂ da produção de cimento [5]. Sendo assim, infere-se que ao combinar um material de base biológica com uma matriz cimentícia, pode-se obter um produto para atuar como sumidouro de carbono.

Ben-Alon et al. [57] compararam o desempenho ambiental de 1 m² de paredes externas naturais, compostas de terra, argila, palha/fibras naturais, em relação a 1 m² de paredes convencionais, produzidas com madeira e alvenaria de concreto. Os resultados da comparação dos impactos ambientais incorporados entre todos os sistemas de parede avaliados mostraram que as paredes naturais reduzem a demanda de energia incorporada em 38 a 83%, o potencial de mudança climática em 60 a 82%, a acidificação do ar em 57 a 98% e a poluição por partículas em 27 a 99% em comparação com as paredes convencionais. Em um cenário combinando impactos incorporados e operacionais, a parede composta de argila e palha obteve o melhor desempenho em oposição as paredes convencionais, reduzindo a demanda de energia em até 73%, dependendo do clima, e, de modo geral, as paredes naturais reduziram, em oposição às paredes convencionais, os impactos das mudanças climáticas em 20 a 80%, a acidificação do ar em 30 a 80% e a poluição por partículas na saúde em 45 a 98%.

Estudos já haviam comprovado que o desempenho mecânico de compósitos reforçados com as fibras de juta e malva [8] é similar ao de um compósito produzido com as fibras de sisal [55]. Quanto ao desempenho ambiental, ao comparar uma tonelada de fibras de juta/malva versus uma tonelada de fibras de sisal, verificou-se o quão impactante um produto considerado sustentável ambientalmente, produzido com recursos naturais renováveis, pode se tornar caso seja transportado por longas distâncias. Analisando os dados do ICV do sisal, pode-se verificar que o transporte dessa fibra foi teoricamente realizado de Valente à Manaus, percorrendo aproximadamente 4764 km em caminhão. É por esse motivo que a carga ambiental atribuída ao sisal se mostrou tão elevada, pois está atrelada ao transporte rodoviário por longas distâncias. No entanto, pelas comparações com um compósito reforçado de sisal, verificou-se que embora o modal de transporte fluvial, de modo geral, seja menos impactante ambientalmente que o rodoviário, pode ser significativamente impactante em categorias de acidificação. Mas o sisal, apesar de não ser produzido no Amazonas, o é no Brasil e transportá-lo do Nordeste para o

Norte brasileiro certamente é menos impactante que importar fibras de outros continentes. Estudos relatam que para atender o setor industrial, o Amazonas importa juta de Bangladesh, e o principal motivo disso é a baixa produção local de fibras de malva e juta [40].

O uso de matérias-primas locais pode reduzir de 44 – 64% das emissões de gases de efeito estufa relacionadas ao transporte de materiais de construção [58]. Quando não se percorre longas distâncias, os impactos ambientais associados ao transporte não são significativos [20]. Como forma de mitigação aos impactos ambientais inerentes ao transporte por longas distâncias, deve-se buscar alternativas por modais menos impactantes, além de incentivar o uso de fibras cultivadas o mais próximo da planta de processamento industrial.

Segundo Huang et al. [6], com base em dados chineses, tanto pelo método ReCiPe 2016 Midpoint como pelo CML 2001, os materiais de construção contribuem consideravelmente para as seguintes categorias de impacto ambiental: toxicidade humana, esgotamento de fósseis e aquecimento global. Neste trabalho, pelo método ReCiPe 2016 Midpoint, também foram obtidos os maiores valores nessas mesmas categorias de impacto.

Diversos benefícios de ordem social, econômica e ambiental podem advir com a produção industrial desse compósito. Sua produção comercial poderá contribuir para a geração de emprego verde nas comunidades produtoras das fibras, alinhando-se aos princípios fundamentais de uma bioeconomia. Como vantagem competitiva frente a outros materiais de construção similares, o compósito foi produzido com o máximo possível de substituição da matéria-prima mais impactante da perspectiva ambiental – o cimento, e usando componentes locais e renováveis – as fibras vegetais. Com as informações ambientais geradas, espera-se que o público-alvo possa decidir se os atributos ambientais desse produto atendem às suas expectativas e optar por novos materiais de construção com baixo impacto ambiental.

Na Amazônia brasileira, como comentado anteriormente no ICV, o cultivo das fibras se dá em ambiente de várzea, sendo assim, não há emissões de CO₂ ocasionadas pela transformação do solo. Não há retirada de vegetação, demonstrando que essas populações conseguem utilizar os recursos ambientais sem depredá-los, contribuindo para a manutenção da floresta Amazônica em pé, outro princípio da bioeconomia. Seus modos de vida e trabalho são exemplos de práticas conservacionistas, uma vez que no cultivo de fibras de juta e malva não são empregados fertilizantes.

O plantio dessas fibras é realizado em um solo de várzea, naturalmente fértil. Com isso, os impactos ambientais associados ao uso de fertilizantes são nulos. As poucas práticas de

processamento das fibras realizadas pelos ribeirinhos amazônicos são manuais e raramente mecanizadas. Desse modo o consumo de energia elétrica e combustíveis é baixo. No entanto, os impactos ambientais que são mitigados devido à pouca mecanização do processo produtivo dessas fibras recaem sobre os trabalhadores.

Ainda há bastante espaço para melhorias em toda a cadeia produtiva das fibras de juta e malva cultivadas na Amazônia brasileira, uma vez que é pouco desenvolvida e está ligada a condições de trabalho insalubres, representando um entrave para a sustentabilidade do processo de produção dessas fibras. Apesar dos atributos técnicos e ambientais do compósito, não podemos deixar de relatar esse ônus social, que tem sido um impeditivo ao desenvolvimento de materiais de construção reforçados com as fibras de juta e malva. Melhorias em toda a cadeia produtiva dessas fibras poderiam contribuir para o crescimento da bioeconomia na região da Amazônia brasileira.

Portanto, como componentes do compósito, apesar de seu baixo impacto ambiental, as fibras podem ser consideradas hotspots sociais, ou seja: processos unitários que estão dentro de um setor e região que apresenta altos riscos de impacto negativo ou grandes oportunidades de impacto positivo [59]. Não está no escopo deste trabalho um estudo sobre o ônus social do compósito reforçado com as fibras de juta e malva cultivadas na Amazônia brasileira, mas isso poderá ser realizado em oportunidades futuras por meio da Avaliação do Ciclo de Vida Social – ACV Social, um processo sistemático que usa a melhor ciência disponível para coletar os melhores dados disponíveis e relatar os impactos sociais (positivos e negativos) nos ciclos de vida do produto, desde a extração até o descarte final [59].

Estudos recentes realizados por Huarachi et al. [60] analisaram o passado e projetaram o futuro da ACV Social. Estes pesquisadores constataram que para avaliações específicas de ACV Social, atualmente existe apenas um instrumento padronizado: as Fichas Metodológicas desenvolvidas pela UNEP/SETAC em 2013. Um dos principais objetivos de um ACV Social é fornecer suporte para decisões sobre os impactos sociais relacionados ao ciclo de vida de uma unidade funcional (por exemplo, um produto), seja para comparação de produtos ou para melhorar as cadeias produtivas [61]. A ACV Social é uma ferramenta adequada para aumentar o conhecimento, informar escolhas e promover a melhoria das condições sociais nos ciclos de vida do produto [59].

Conforme recomendação da norma ISO 14040 [15], enfatiza-se que os resultados de AICV obtidos neste estudo são baseados em abordagens relativas, que indicam efeitos ambientais potenciais e que não preveem impactos reais sobre os pontos finais de categoria, a extrapolação

de limites, margens de segurança ou riscos. Portanto, os resultados obtidos não são uma representação direta da realidade. E vale lembrar que, ao quantificar incertezas para situações futuras entra-se em outra dimensão de incerteza [17].

5 Conclusões, limitações e recomendações

Neste trabalho, por meio de ACV, avaliou-se o desempenho ambiental de fibras de juta e malva e de um material de construção, um compósito cimentício, produzido com essas fibras sem processamento industrial e na forma de tecido. A viabilidade técnica de compósitos cimentícios reforçados com tais fibras foi atestada em outras pesquisas. Foi realizada uma entrevista com diversos sujeitos envolvidos na cadeia produtiva de fibras de juta e malva cultivadas na região Norte do Brasil. Desse modo, obteve-se informações importantes e mais próximas da realidade, pontos bastante relevantes para um estudo de ACV. Tanto pelo método de AICV ReCiPe 2016 quanto pelo EN 15804, os resultados obtidos por processo unitário sugerem que, quanto à carga ambiental do compósito, a produção das matérias-primas do cimento e do superplastificante são os contribuintes dominantes em todos os cenários avaliados. Caso as fibras fossem usadas sem processamento algum, sendo apenas transportadas de uma cidade próxima à Manaus, a redução de impactos relacionados ao reforço do compósito seria acima de 95%. Os resultados ratificaram a importância de se utilizar matérias-primas locais. Este trabalho traz uma contribuição importante no campo da bioeconomia no contexto da Amazônia brasileira, pois evidencia o potencial ambiental de duas fibras vegetais, podendo estimular o desenvolvimento local e social da região. Diante desses resultados, espera-se que a indústria da construção possa tomar decisões justificadas sobre a adequação do produto estudado às suas demandas e que a cadeia produtiva de fibras de juta e malva da região amazônica receba mais investimentos públicos e privados, elevando a produção e possibilitando impactos positivos aos sujeitos envolvidos. Como limitação, verificou-se que o cultivo de juta e malva no Amazonas poderia ser um processo produtivo sustentável do ponto de vista ambiental, econômico e social, não fosse as condições de trabalhos insalubres. É provável que os baixos impactos ambientais do compósito se devam aos impactos sociais negativos inerentes às condições de trabalhos dos ribeirinhos amazônicos. A ACV Social poderá contribuir no sentido de melhorar o desempenho social das fibras. Outra limitação diz respeito ao tipo de compósito investigado, que não é equivalente em sua composição ou dosagem a nenhum material de construção disponível no mercado, portanto não foi possível fazer uma afirmação comparativa em relação a um produto comercial. Além disso, este trabalho seria cientificamente mais robusto se contemplasse a ACV

social e do custo do ciclo de vida, compondo um estudo de Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida. Assim, recomenda-se para trabalhos futuros, similares a este, que se apoiem na Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida, complementando os achados desta pesquisa.

Referências

- [1] R. Abramovay, Desenvolvimento sustentável: qual a estratégia para o Brasil? *Novos Estud. CEBRAP* (87) p. 7-113, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0101-33002010000200006>
- [2] C. Witkoski, Terras, florestas e águas de trabalho: os camponeses amazônicos e as formas de uso de seus recursos naturais. EDUA, Manaus, 2007.
- [3] M.J.M. Cruz. Territorialização camponesa na várzea da Amazônia. Tese de Doutorado em Geografia Humana – São Paulo: Universidade de São Paulo, 2007.
- [4] IDAM (2020). Sistema Sepror realiza reunião para fomentar a cadeia produtiva de fibras. Disponível em <http://www.idam.am.gov.br/sistema-sepror-realiza-reuniao-para-fomentar-a-cadeia-produtiva-de-fibras/>. Acesso em: 27 fev. 2021.
- [5] G. Habert, S.A. Miller, V.M. John, J. L. Provis, A. Favier, A. Horvath, K. L. Scrivener, Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nat Rev Earth Environ* 1 (2020) 559–573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- [6] B. Huang, F. Zhao, T. Fishman, W.-Q. Chen, N. Heeren, E.G. Hertwich, Building Material Use and Associated Environmental Impacts in China 2000–2015, *Environ. Sci. Technol.* 52 (2018) 14006–14014. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04104>
- [7] I.R.C. Oliveira, Propriedades mecânicas, físicas e químicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras longas de juta e de malva. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2013.
- [8] M.S. Oliveira, Desenvolvimento e caracterização de telhas cimentícias reforçadas com tecido de fibras vegetais da Amazônia. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2017.
- [09] F.F. Oikawa, Estudo da caracterização mecânica de flexão em compósitos cimentícios reforçados com fibras de malva. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2019.
- [10] D.G. Cavalcante, Estudo das características física, mecânica e química de compósitos cimentícios reforçados com tecido de juta e malva tratado e adição de materiais pozolânicos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2017.
- [11] E.F.M. Gomes, Desenvolvimento e caracterização mecânica de placas cimentícias reforçadas com tecido de juta e malva e substituição parcial do cimento por metacaulinita. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2019.
- [12] A.S. Aguiar, Estudos das propriedades físicas e mecânicas de placas cimentícias reforçadas com fibras longas de malva. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2016.
- [13] S.S.S. Costa, Caracterização mecânica à flexão em placas cimentícias reforçadas com tecidos de fibras de malva e juta. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais – Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2021.
- [14] C. Alves, P.M.C. Ferrão, A.J. Silva, L.G. Reis, M. Freitas, L.B. Rodrigues, D.E. Alves, Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites, *J. Clean. Prod.* 18 (2010) 313–327. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.10.022>

- [15] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR ISO 14040 – Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework, 2009.
- [16] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR ISO 14044 – Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines, 2009.
- [17] C. van der Giesen, S. Cucurachi, J. Guinee, G.J. Kramer, A. Tukker, A critical view on the current application of LCA for new technologies and recommendations for improved practice, *J. Clean. Prod.* 259 (2020) 120904. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120904>
- [18] R.K. Malviya, R.K. Singh, R. Purohit, R. Sinha, Natural fibre reinforced composite materials: Environmentally better life cycle assessment – A case study, *Materials Today: Proceedings*, Volume 26, Part 2, 2020, 3157-3160, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.651>
- [19] J. Korol, D. Burchart-Korol, M. Pichlak, Expansion of environmental impact assessment for eco-efficiency evaluation of biocomposites for industrial application, *J. Clean. Prod.* 113 (2016) 144-152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.101>
- [20] A. Quintana, J. Alba, R. del Rey, I. Guillén-Guillamón, Comparative Life Cycle Assessment of gypsum plasterboard and a new kind of bio-based epoxy composite containing different natural fibers, *J. Clean. Prod.* 185 (2018) 408-420. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.042>
- [21] A.S. Ferreira et al., Inovação tecnológica e relação de poder: pensando uma alternativa ecologicamente viável e socialmente sustentável para produção de juta e/ou malva no Estado do Amazonas. IV Encontro Nacional da Anppas, 4,5 e 6 de junho de 2008 – Brasília/DF.
- [22] A.S. Ferreira. Fios dourados dos trópicos: culturas, histórias, singularidades e possibilidades (juta e malva - Brasil e Índia). Tese de Doutorado em Ciências Sociais – Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2016.
- [23] H.H. Souza et al., Sustentabilidade e sociedade: máquina descortçadoras de fibra de malva (*Urena Lobata L.*), Tecnologia social a serviço dos caboclos ribeirinhos do Amazonas. II Encontro da Sociedade Brasileira de Sociologia da Região Norte. 13 a 15 de setembro de 2010 – Belém/ PA.
- [24] S.H. Silva, T.J.P. Fraxe, Processo produtivo da juta e malva na perspectiva do desenvolvimento sustentável. *Somanlu*, v. 12, p. 83–103, n. 1, jan./jun. 2012.
- [25] M.M. Camargo, E.A. Taye, J.A. Roether, D.T. Redda, A.R. Boccaccini, A Review on Natural Fiber-Reinforced Geopolymer and Cement-Based Composites. *Materials*, 13 (20) (2020), 4603. <https://doi.org/10.3390/ma13204603>
- [26] D.B. Dittenber, H.V.S. GangaRao, Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure, *Compos. Appl. Sci. Manuf.*, 43 (2012) 1419–1429. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019>
- [27] Yan, B. Kasal, L. Huang, A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering, *Compos. B Eng.*, 92 (2016) 94-132. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.002>
- [28] J.A. Melo Filho, F.A. Silva, R.D. Toledo Filho, Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems, *Cem. Concr. Compos.* 40 (2013) 30–39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.003>
- [29] B.J. Mohr, H. Nanko, K.E. Kurtis, Durability of kraft pulp fiber–cement composites to wet/dry cycling, *Cem. Concr. Compos.* 27 (2005) 435–448. [10.1016/j.cemconcomp.2004.07.006](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.07.006)
- [30] R.Y. Nkwaju, J.N.Y. Djobo, J.N.F. Nouping, P.W.M. Huisken, J.G.N. Deutou, L. Courard, Iron-rich laterite-bagasse fibers based geopolymer composite: Mechanical, durability and insulating properties, *Appl. Clay Sci.* 183 (2019) 105333. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105333>

- [31] A.C.C. Trindade, F.A. Silva, H.A. Alcamand, P.H.R. Borges, On the durability behavior of natural fiber reinforced geopolymers. *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, 38 (3) (2018). <https://doi.org/10.1002/9781119474746.ch20>
- [32] FAPEAM - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas. Disponível em: <http://www.fapeam.am.gov.br/empresa-produz-telhas-sustentaveis-com-vegetais-da-amazonia/>. Acesso em: 02 mar. 2021.
- [33] H. Savastano Jr. Sistemas de cobertura para construções de baixo custo: uso de fibras vegetais e de outros resíduos agroindustriais. *Coletânea Habitar – Utilização de Resíduos na Construção Habitacional*. Porto Alegre, v. 4, p. 94-123, 2003.
- [34] B. Huang, X. Gao, X. Xu, J. Song, Y. Geng, J. Sarkis, T. Fishman, H. Kua, J. Nakatani, A Life Cycle Thinking Framework to Mitigate the Environmental Impact of Building Materials, *One Earth*, 3 (5) (2020) 564-573. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.010>
- [35] BS EN 15804, 2019. Sustainability of Construction Works – Environmental Product Declarations – Core Rules for the Product Category of Construction Products, 72. European Committee for Standardization.
- [36] PRé Sustainability. Disponível em: <https://pre-sustainability.com/>. Acesso em: 03 mar. 2021.
- [37] Revista Globo Rural. Disponível em: <https://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,,EMI183007-18283,00-GENTE+DE+FIBRA.html>. Acesso em: 10 fev. 2022.
- [38] ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários, Caracterização da oferta e da demanda do transporte fluvial de passageiros da região amazônica, Brasília, 2013.
- [39] J.B. Moura, Mapeamento dos custos para tarifa de transporte no trecho Manaus-Barcelos: um estudo de caso. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Manaus: Universidade Federal do Amazonas, 2017.
- [40] A.C. Maciel, T.J.P. Fraxe, A.P. Castro, Agricultura familiar e o cultivo da malva na Amazônia, *Scientia Naturalis*, v. 1, n. 5, p. 92-107, 2019.
- [41] Agência Pará. Disponível em: <https://agenciapara.com.br/noticia/30283/>. Acesso em: 10 fev. 2022.
- [42] M.L.M. Broeren, S.N.C. Dellaert, B. Cok, M.K. Patel, E. Worrell, L. Shen, Life cycle assessment of sisal fibre - Exploring how local practices can influence environmental performance, *J. Clean. Prod.* 149 (2017) 818-827. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.073>.
- [43] Portal Amazônia (2016). Disponível em: <https://portalamazonia.com/noticias/economia/em-manaus-setor-textil-perde-forca-com-saida-da-brasjuta>. Acesso em: 30 dez. 2021.
- [44] Cartela digital Castanhal. Disponível em: <http://www.castanhal.com.br/upload/cartela-fios-telas.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2022.
- [45] N.J. Reis, M.E. Almeida, S.L. Riker, A.L. Ferreira, *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas*, Manaus: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2006. 125p.
- [46] L.R. Caldas, R.M. Spoto, CO2 emissions related to building materials transportation in Brazil: comparative study on structural ceramic and concrete bricks, *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 91-108, out./dez. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000400187>
- [47] L.R. Caldas, A.B. Saraiva, A.F.P. Lucena, M.Y. Da Gloria, A.S. Santos, R.D. Toledo Filho, Building materials in a circular economy: The case of wood waste as CO2-sink in bio concrete, *Resour. Conserv. Recycl.* 166 (2021) 105346. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105346>
- [48] RAICV – Rede de Pesquisa de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida, Recomendação de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o contexto brasileiro/ RAICV;

- organização, Cássia Maria Lie Ugaya, José Adolfo de Almeida Neto e Maria Cléa Brito de Figueiredo. Brasília, DF: Ibict (2019) 165 p.
- [49] RIVM (2018). Disponível em: <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>. Acesso em: 29 out. 2021.
- [50] G.Z.B. Santos, L.R. Caldas, J.A. Melo Filho, N.B.R Monteiro, S.I.M. Rafael, N.M. Silva, Circular alternatives in the construction industry: an environmental performance assessment of sisal fiber-reinforced composites, *J. Build. Eng.* 54 (2022), 104603. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104603>.
- [51] N.A. Romanova, V.S. Leont'ev, A.S. Khrekin, Production of Commercial Naphthalene by Coal-Tar Processing. *Coke Chem.* 61 (2018) 453–456. <https://doi.org/10.3103/S1068364X18110078>
- [52] N.B.R. Monteiro, J.M. Moita Neto, E.A. Silva, Environmental assessment in concrete industries, *J. Clean. Prod.* 327 (2021) 129516. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129516>
- [53] A.M. Rashad, Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition – A comprehensive overview, *Constr. Build. Mater.* 41 (2013) 303–318. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001>
- [54] B.B. Sabir, S. Wild, J. Bai, Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review, *Cem. Concr. Compos.* 23 (6) (2001) 441–454. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5)
- [55] J.A. Melo Filho, Desenvolvimento e caracterização de laminados cimentícios reforçados com fibras longas de sisal. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- [56] L. Chen, R.E.O. Pelton, T.M. Smith, Comparative life cycle assessment of fossil and bio-based polyethylene terephthalate (PET) bottles, *J. Clean. Prod.* 137 (2016) 667-676. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.094>
- [57] L. Ben-Alon, V. Loftness, K.A. Harries, E.C. Hameen, Life cycle assessment (LCA) of natural vs conventional building assemblies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 144 (2021) 110951. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110951>
- [58] B.C. McLellan, R.P. Williams, J. Lay, A. van Riessen, G.D. Corder, Costs and carbon emissions for geopolymers in comparison to ordinary portland cement, *J. Clean. Prod.* 19 (2011) 1080-1090. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>
- [59] C. Benoît, G.A. Norris, S. Valdivia, A. Citroth, A. Moberg, U. Bos, S. Prakash, C. Ugaya, T. Beck, The guidelines for social life cycle assessment of products: just in time! *Int. J. Life Cycle Assess.* (2010) 15:156–163. DOI 10.1007/s11367-009-0147-8.
- [60] D.A.R. Huarachi, C.M. Piekarski, F.N. Puglieri, A.C. de Francisco, Past and future of Social Life Cycle Assessment: Historical evolution and research trends, *J. Clean. Prod.* 264 (2020) 121506. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121506>
- [61] C. Zimdars, A. Haas, S. Pfister, Enhancing comprehensive measurement of social impacts in S-LCA by including environmental and economic aspects, *Int. J. Life Cycle Assess.* (2018) 23:133–146. DOI 10.1007/s11367-017-1305-z.

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

O desfecho desta tese é compreender as potencialidades e os entraves ambientais da cadeia produtiva (teórica) de materiais de construção produzidos com fibras de sisal, juta e malva. Primeiramente, como alternativa a compósitos produzidos com matriz de cimento Portland, foi desenvolvido um compósito com matriz geopolimérica à base de resíduo e reforço com fibras de sisal. A durabilidade desse compósito foi avaliada por meio de ciclos de molhagem e secagem, pois, geralmente, quanto maior a vida útil de um material, mais significativos serão os seus benefícios ambientais.

Em seguida, o desempenho ambiental do compósito geopolimérico foi comparado ao de um compósito com matriz de cimento Portland, sendo ambos os materiais reforçados com fibras de sisal. Pelos métodos ReCiPe 2016 Midpoint/Endpoint e EN 15804, os resultados foram convergentes: o compósito com matriz cimentícia possui menores impactos ambientais. No compósito com matriz cimentícia, os responsáveis pela maior parte da carga ambiental foram a produção do cimento e o processo de transporte. No compósito geopolimérico, os resultados evidenciaram que o ativador alcalino à base de hidróxido de potássio é majoritariamente o componente mais impactante, seguido pelo processo de transporte.

Considerando que transportar matérias-primas por longas distâncias eleva a carga ambiental dos produtos, inferiu-se que, do ponto de vista ambiental, seria mais vantajoso produzir o compósito com matriz cimentícia e substituir as fibras de sisal, cultivadas no Nordeste brasileiro, pelas fibras de juta e malva, cultivadas na Amazônia brasileira, onde este estudo foi realizado. Nesse contexto, por fim, as fibras de juta e malva foram avaliadas como reforço do compósito sob duas perspectivas: uma sem processamento e outra na forma de tecido.

Desse modo, constatou-se que se tais fibras fossem usadas sem processamento algum, sendo obtidas de uma cidade próxima à Manaus, a redução de impactos relacionados ao reforço do compósito seria acima de 95%. Portanto, se um polo de componentes construtivos produzidos com fibras vegetais fosse implantado em Manaus, o cenário ideal seria aquele em que as fibras fossem cultivadas e beneficiadas no estado do Amazonas para prevenir impactos ambientais e o encarecimento do produto devido a custos com transporte.

Como contribuição científica, este estudo apresenta potenciais alternativas à indústria da construção já avaliadas numa perspectiva ambiental. Mostra a relevância de se avaliar ambientalmente novos produtos em fase de desenvolvimento, pois afirmar que um material tem

melhor desempenho ambiental apenas por ser produzido a partir de um resíduo ou de uma matéria-prima renovável pode não ser um reflexo fiel dos fatos.

Também apresenta dados primários referentes ao processamento industrial de fibras de juta e malva cultivadas por ribeirinhos da Amazônia brasileira, avalia o desempenho ambiental potencial dessas fibras e de um produto que poderá atender às demandas da sociedade por novos materiais de construção. Esse produto, um compósito reforçado com fibras vegetais, tem baixo impacto ambiental e sua produção comercial pode contribuir para uma bioeconomia pautada na geração de emprego verde nas comunidades locais produtoras de fibras.

Como limitações, além daquelas já relatadas, ressalta-se que este trabalho foi desenvolvido durante a pandemia de COVID-19. Foi idealizado para ser um trabalho de avaliação de desempenho técnico, ambiental, econômico e social de compósitos cimentício e geopoliméricos reforçados com fibras vegetais cultivadas no Brasil. No entanto, dada as condições sanitárias na cidade de Manaus e a necessidade de isolamento social, os laboratórios da Universidade Federal do Amazonas foram fechados por mais de 2 anos e amostras dos compósitos não puderam ser avaliadas, uma vez que o tempo previsto para a conclusão deste trabalho foi se esgotando. Por isso, as maiores limitações deste trabalho estão relacionadas a falta de um padrão para os compósitos, que deveriam ser produzidos no mesmo período e avaliados tecnicamente sob as mesmas condições de laboratório.

Recomenda-se que em pesquisas futuras o custo do ciclo de vida e a avaliação social do ciclo de vida dos compósitos sejam realizados. Adicionalmente, sugere-se investigar a viabilidade técnica, ambiental, econômica e social dos compósitos reforçados com fibras vegetais para usos como embalagens de grande porte, com vistas à substituição de produtos de madeira.

REFERÊNCIAS

- [1] H. Castro, F. Giannasi, C. Novello, A luta pelo banimento do amianto nas Américas: uma questão de saúde pública. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 8, n. 4, p. 903-911, 2003.
- [2] R. Mendes, Asbesto (amianto) e doença: revisão do conhecimento científico e fundamentação para uma urgente mudança da atual política brasileira sobre a questão. *Cad. Saúde Pública*, Rio de Janeiro, v. 17, n. 1, p. 7-29, jan-fev, 2001.
- [3] V. Wünsch Filho, H. Neves, J.E. Moncau, Amianto no Brasil: conflitos científicos e econômicos. *Rev Ass Med Brasil*, v. 47, n. 3, p. 259-261, 2001.
- [4] Obtido de: <https://g1.globo.com/politica/noticia/stf-proibe-em-todo-o-pais-producao-comercializacao-e-uso-de-materiais-com-amianto.ghtml>. Acesso em: 02 mar. 2021.
- [5] T. Douglas, L. Van den Borre, Asbestos neglect: Why asbestos exposure deserves greater policy attention. *Health Policy* 123 (2019) 516–519. <https://doi.org/10.1016/j.healthpol.2019.02.001>.
- [6] D. Spasiano, F. Pirozzi, Treatments of asbestos containing wastes, *J. Environ. Manage.* 204 (2017) 82-91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.038>.
- [7] G. Habert, S.A. Miller, V.M. John, J. L. Provis, A. Favier, A. Horvath, K. L. Scrivener, Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nat Rev Earth Environ* 1 (2020) 559–573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- [8] W.D. Callister JR, Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada. Rio de Janeiro, LTC, 2013.
- [9] J.A. Melo Filho, Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [10] R. D. Toledo Filho, F. A. Silva, E.M.R. Fairbairn, J. A. Melo Filho, Durability of compression molded sisal fiber reinforced mortar laminates, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 2409–2420. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.10.012.
- [11] F.A. Silva, R.D. Toledo Filho, J.A. Melo Filho, E.M.R. Fairbairn, Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites, *Constr. Build. Mater.* 24 (2010) 777–785. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.030.
- [12] J.A. Melo Filho, F.A. Silva, R.D. Toledo Filho, Degradation kinetics and aging mechanisms on sisal fiber cement composite systems, *Cem. Concr. Compos.* 40 (2013) 30–39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.04.003>.
- [13] S.R. Ferreira, P.R.L. Lima, F.A. Silva, R.D. Toledo Filho, Influência de ciclos molhagem-secagem em fibras de sisal sobre a aderência com matrizes de cimento Portland, *Revista Matéria* 17 (2012) 1024 – 1034.
- [14] G. Silva, S. Kim, R. Aguilar, J. Nakamatsu, Natural fibers as reinforcement additives for geopolymers – A review of potential eco-friendly applications to the construction industry, *Sustain. Mater. Technol.* 23 (2020) e00132. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00132>.
- [15] G.Z.B. Santos, J.A. Melo Filho, L. Manzato, Proposta de uma cerâmica obtida por meio de geopolimerização de lodo de ETA calcinado, *Cerâmica* 64 (2018) 276-283. <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132018643702353>.
- [16] G.Z.B. Santos, J.A. Melo Filho, M. Pinheiro, L. Manzato, Synthesis of water treatment sludge ash-based geopolymers in an Amazonian context, *J. Environ. Manage.* 249 (2019) 109328. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109328>.
- [17] G.Z.B. Santos, J. A. Melo Filho, L. Manzato, Perspectivas de aplicações tecnológicas de lodo gerado no processo de tratamento de água dos rios Negro e Solimões. *Revista Matéria* 23 (2018) e-12167. DOI: 10.1590/S1517-707620180003.0501.

- [18] R.H. Geraldo, L.F.R. Fernandes, G. Camarini, Water treatment sludge and rice husk ash to sustainable geopolymer production, *J. Clean. Prod.* 149 (2017) 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.076>.
- [19] C. Suksiripattanapong, S. Horpibulsuk, S. Boongrasan, A. Udomchai, A. Chinkulkijniwat, A. Arulrajah, Unit weight, strength and microstructure of a water treatment sludge-fly ash lightweight cellular geopolymer, *Constr. Build. Mater.* 94 (2015) 807–816. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.091>.
- [20] C. Suksiripattanapong, S. Horpibulsuk, P. Chanprasert, P. Sukmak, A. Arulrajah, Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge, *Constr. Build. Mater.* 82 (2015) 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.040>.
- [21] N. Waijarean, S. Asavapisit, K. Sombatsompop, Strength and microstructure of water treatment residue-based geopolymers containing heavy metals, *Constr. Build. Mater.* 50 (2014) 486–491. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.047>.
- [22] E. Nimwinya, W. Arjharn, S. Horpibulsuk, T. Phoo-ngernkham, A. Poowancum, A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash Geopolymer, *J. Clean. Prod.* 119 (2016) 128–134. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.060>.
- [23] S. Horpibulsuk, C. Suksiripattanapong, W. Samingthong, R. Rachan, A. Arulrajah, Durability against wetting-drying cycles of water treatment sludge-fly ash geopolymer and water treatment sludge-cement and silty clay-cement systems, *J. Mater. Civ. Eng. ASCE*, 04015078 (2015) 1–9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001351](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001351)
- [24] X. Guo, H. Shi, W. Dick, Use of heat-treated water treatment residuals in fly ash-based geopolymers, *J. Am. Ceram. Soc.* 93 (2010), 272–278. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2009.03331.x>.
- [25] T. Alomayri, I.M. Low, Synthesis and characterization of mechanical properties in cotton fiber-reinforced geopolymer composites, *J. As. Ceram. Soc.* 1 (2013) 30–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jascer.2013.01.002>.
- [26] R.A. Sá Ribeiro, M.G. Sá Ribeiro, K. Sankar, W.M. Kriven, Geopolymer-bamboo composite – A novel sustainable construction material, *Constr. Build. Mater.* 123 (2016) 501–507. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.037>.
- [27] M. Alzeer, K. MacKenzie, Synthesis and mechanical properties of novel composites of inorganic polymers (geopolymers) with unidirectional natural flax fibres (phormium tenax), *Appl. Clay Sci.* 75–76 (2013) 148–152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2013.03.010>.
- [28] K. Korniejenko, E. Fraczek, E. Pytlak, M. Adamski, Mechanical properties of geopolymer composites reinforced with natural fibers, *Procedia Eng.* 151 (2016) 388 – 393. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.395.
- [29] A.C.C. Trindade, P.H.R. Borges, F.A. Silva, Mechanical behavior of strain-hardening geopolymer composites reinforced with natural and PVA fibers, *Mater. Today: Proc.* 8 (2019) 753–759.
- [30] B. Zhou, L. Wang, G. Ma, X. Zhao, X. Zhao, Preparation and properties of bio-geopolymer composites with waste cotton stalk materials, *J. Clean. Prod.* 245 (2020) 118842. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118842>.
- [31] G. Lazorenko, A. Kasprzhitskii, A. Kruglikov, V. Mischinenko, V. Yavna, Sustainable geopolymer composites reinforced with flax tows, *Ceram. Int.* 46 (2020) 12870–12875. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.01.184>.
- [32] K. Walbrück, F. Maeting, S. Witzleben, D. Stephan, Natural Fiber-Stabilized Geopolymer Foams - A Review, *Materials* 13 (2020), 3198. DOI:10.3390/ma13143198.
- [33] A. Wongsa, R. Kunthawatwong, S. Naenudon, V. Sata, P. Chindaprasirt, Natural fiber reinforced high calcium fly ash geopolymer mortar, *Constr. Build. Mater.* 241 (2020) 118143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118143>.

- [34] G. Silva, S. Kim, B. Bertolotti, J. Nakamatsu, R. Aguilar, Optimization of a reinforced geopolymer composite using natural fibers and construction wastes, *Constr. Build. Mater.* 258 (2020) 119697. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119697>.
- [35] L.C.S. Alves, R.A.R. Ferreira, L.B. Machado, L.A.C. Motta, Optimization of metakaolin-based geopolymer reinforced with sisal fibers using response surface methodology, *Ind. Crop. Prod.* 139 (2019) 111551. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111551>.
- [36] Brasil, Lei n. 12.305/2010: Política Nacional de Resíduos Sólidos. Obtido de: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm.
- [37] S. Seuring, M. Müller, From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management, *J. Clean. Prod.* 16 (2008) 1699–1710. DOI: 10.1016/j.jclepro.2008.04.020.
- [38] Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
- [39] M.L.M. Broeren, S.N.C. Dellaert, B. Cok, M.K. Patel, E. Worrell, L. Shen, Life cycle assessment of sisal fibre - Exploring how local practices can influence environmental performance, *J. Clean. Prod.* 149 (2017) 818-827. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.073>.
- [40] N.C. Mendes, C. Bueno, A.R. Ometto, Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos, *Production*, 26(1), 160-175, jan./mar. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.153213>
- [41] A.S. Ferreira. Fios dourados dos trópicos: culturas, histórias, singularidades e possibilidades (juta e malva - Brasil e Índia). Tese de Doutorado em Ciências Sociais – Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2016.
- [42] S.H. Silva, T.J.P. Fraxe, Processo produtivo da juta e malva na perspectiva do desenvolvimento sustentável. *Somanlu*, v. 12, p. 83–103, n. 1, jan./jun. 2012.