

UNIVERSIDADE PAULISTA – UNIP

RAFAEL ALJONA ORTEGA

**AVALIAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL DE BLOCO DE
CONCRETO NÃO ESTRUTURAL FABRICADO COM
ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE FIBRA DE VIDRO**

SÃO PAULO

2025

RAFAEL ALJONA ORTEGA

**AVALIAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL DE BLOCO DE
CONCRETO NÃO ESTRUTURAL FABRICADO COM ADIÇÃO DE
RESÍDUOS DE FIBRA DE VIDRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Feni Dalano Roosevelt Agostinho

Área de concentração: Sustentabilidade em Sistemas de Produção.

Linha de Pesquisa: Avanços em Produção Mais Limpa e Economia Circular

Projeto de Pesquisa: Planejamento e gestão em busca de cadeias de produção mais sustentáveis: processo, produto, consumo e descarte

SÃO PAULO

2025

Ortega, Rafael Aljona.

Avaliação econômica e ambiental de bloco de concreto não estrutural fabricado com adição de resíduos de fibra de vidro / Rafael Aljona Ortega. – 2025.

103 f. : il. color.

Dissertação de Mestrado Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista, São Paulo, 2025.

Área de concentração: Sustentabilidade em Sistemas de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Feni Dalano Roosevelt Agostinho.

1. Fibra de vidro. 2. Economia circular. 3. ACV. 4. Emergência.
I. Agostinho, Feni Dalano Roosevelt (orientador). II. Título.

RAFAEL ALJONA ORTEGA

**AVALIAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL DE BLOCO DE
CONCRETO NÃO ESTRUTURAL FABRICADO COM ADIÇÃO DE
RESÍDUOS DE FIBRA DE VIDRO**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de
Produção da Universidade Paulista –
UNIP, para obtenção do título de Mestre
em Engenharia de Produção.

Data de aprovação: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

_____/_____/____

Prof. Orientador Dr. Feni Dalano Roosevelt Agostinho - Universidade Paulista - UNIP

_____/_____/____

Prof.^a Dra. Cecília Maria Villas Boas de Almeida - Universidade Paulista – UNIP

_____/_____/____

Prof. Dr. Fernando Jorge Cutrim Demétrio - Universidade Estadual do Maranhão -

UEMA

DEDICATÓRIA

Aos meus amores, André, Felipe e minha querida esposa Vanessa dedico cada passo, cada renúncia e cada conquista desta jornada. Eles são o sentido maior da minha vida, minha inspiração diária, minha razão de não desistir. Que este trabalho seja não apenas uma realização pessoal, mas um legado que deixo para eles, como prova de que, com amor, fé, esforço e coragem, somos capazes de construir nossos próprios caminhos, por mais desafiadores que sejam.

Aos meus pais e avós, minha eterna gratidão. Estas pessoas me ensinaram o valor do trabalho honesto, da dignidade, da resiliência e da esperança.

Aos meus antepassados, que um dia deixaram sua terra natal, movidos pela esperança de oferecer uma vida melhor às suas famílias, meu mais profundo respeito e gratidão.

Carrego comigo o sangue, a força e a coragem de quem atravessou mares, enfrentou o desconhecido e semeou, com suor e sacrifício, as possibilidades que hoje me permitem estar aqui. Esta conquista é fruto não só dos meus esforços, mas de gerações inteiras que sonharam, lutaram e acreditaram no futuro.

A cada um de vocês, ofereço não apenas este trabalho, mas todo o meu amor, minha honra e meu compromisso de seguir honrando nossa história, nossa família e nossos sonhos de forma honesta e digna.

AGRADECIMENTO

Chegar até aqui não foi uma caminhada solitária, e é impossível não reconhecer, com profunda gratidão, aqueles que, de diferentes formas, contribuíram para a realização deste trabalho e para minha trajetória acadêmica e pessoal.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Professor Feni, pela orientação generosa, pela paciência, pelos conselhos, pelo rigor científico e, sobretudo, pela confiança no meu trabalho. Sua dedicação, sua escuta atenta e seu compromisso foram fundamentais para que este caminho fosse possível e para que este trabalho atingisse a maturidade necessária. Sua condução segura foi farol nos momentos de dúvida e incerteza.

Aos professores e pesquisadores do LAPROMA (Laboratório de Produção e Meio Ambiente da UNIP) meu sincero reconhecimento. Cada ensinamento, cada discussão, cada troca de conhecimento foram essenciais não só para este projeto, mas para a minha formação como pesquisador e cidadão. Vocês foram parte ativa deste processo, e levarei comigo cada aprendizado adquirido neste espaço tão rico em conhecimento e humanidade.

Aos colegas de jornada, que compartilharam comigo os desafios, as angústias, os prazos, as trocas de ideias, as alegrias de cada conquista e as piadas que não poderiam faltar. Saber que não caminhamos sozinhos, que há ombros e mãos estendidos ao nosso lado torna esta jornada mais leve e mais significativa.

A todos que, de alguma maneira, fizeram parte deste caminho, com uma palavra de incentivo, um gesto de apoio, uma troca de saberes ou até mesmo o simples acreditar, meu mais profundo e sincero agradecimento.

*Se você quer algo que nunca teve, precisa
estar disposto a fazer algo que nunca fez.*

Thomas Jefferson

RESUMO

O uso de fibra de vidro na indústria gera muitos resíduos e preocupações quanto à destinação. Por serem compósitos termofixos, sua reciclagem é mais complexa, pois não permite amolecimento e remoldagem por aquecimento. No Brasil, o setor de compósitos gera cerca de 18 mil toneladas de resíduos por ano, o que representa uma despesa de R\$ 120 milhões com descarte em aterros. Este trabalho propõe uma alternativa para reutilizar esses subprodutos como matéria-prima na fabricação de blocos de concreto não estrutural para a construção civil, fato que valida a proposta sob as perspectivas econômica e ambiental. O estudo foca uma região de São Paulo que concentra *clusters* de empresas com potencial para essa aplicação. Foram utilizados os métodos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e Síntese em Emergia para mensurar os impactos ambientais, além da análise econômica clássica para avaliar a viabilidade financeira dos blocos produzidos. Os resultados indicam que os blocos alternativos apresentam melhor desempenho ambiental em relação aos convencionais, com emissão de 51,97 kgCO₂-eq./ton_{bloco} (redução de 24%). A síntese em emergia apontou uma economia de 2,68E17 sej/ano e uma taxa ECBR de 0,10. Ela representa um retorno de 10% ao ano, além de uma economia de até R\$ 21.600,00 anuais em custos diretos. O estudo oferece subsídios para políticas públicas e para o planejamento de *clusters* produtivos mais sustentáveis, que se baseiam em simbiose industrial.

Palavras-Chave: Fibra de vidro; Economia Circular; ACV; Emergia

ABSTRACT

The use of fiberglass in industry generates a significant amount of waste and raises concerns about proper disposal. As thermoset composites, their recycling is more complex since they cannot be softened and remolded through heating. In Brazil, the composites sector generates approximately 18,000 tons of waste per year, resulting in a disposal cost of around BRL 120 million in landfills. This study proposes an alternative to reuse these by-products as raw material in the production of non-structural concrete blocks for the construction industry, validating the proposal from both economic and environmental perspectives. The study focuses on a region in São Paulo that concentrates clusters of companies with potential for this application. Life Cycle Assessment (LCA) and Emergy Synthesis methods were applied to measure environmental impacts, along with classical economic analysis to assess the financial feasibility of the produced blocks. The results indicate that the alternative blocks have better environmental performance compared to conventional ones, with emissions of 51.97 kgCO₂-eq./ton-block (a reduction of 24%). The emergy synthesis showed a savings of 2.68E17 sej/year and an ECBR rate of 0.10, representing a 10% annual return, in addition to direct cost savings of up to BRL 21,600.00 per year. The study provides support for public policies and for the planning of more sustainable industrial clusters based on industrial symbiosis.

Keywords: Fiberglass; Circular Economy; LCA; Emergy

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	11
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos Específicos	16
3 UTILIDADE DA DISSERTAÇÃO.....	17
4 REFERENCIAL TEÓRICO	18
4.1 Economia Circular: Conceitos e Definições.....	18
4.2 Simbiose Industrial: Conceitos e Definição	22
4.3 Normas brasileiras sobre fabricação de blocos de concreto não estrutural	24
5 REVISÃO DA LITERATURA.....	28
5.1 Aspectos técnicos do uso de fibras de vidro em artefatos de concreto	28
5.2 Ferramentas de avaliação econômica e ambiental	30
5.2.1 Avaliação econômica.....	30
5.2.2 Avaliação ambiental	34
6 MÉTODOS.....	42
6.1 Descrição dos sistemas estudados	42
6.1.1. Processo de fabricação tradicional de reservatório em fibra de vidro	42
6.1.2 Processo de fabricação tradicional de blocos de concreto não estrutural	45
6.1.3 Processo de fabricação alternativo de bloco de concreto não estrutural com a adição de resíduos de fibra de vidro	47
6.2 Produção dos corpos de prova.....	49
6.2.1 Cura.....	49
6.2.2 Resistência à compressão	50
6.3 Geolocalização do cluster	52
6.4. Avaliação Econômica	56
6.5 Avaliação Ambiental	57
6.5.1 Avaliação do ciclo de vida (ACV)	57

6.5.2. Síntese em energia (SE)	58
6.6 Forma de análise dos resultados	62
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
7.1 Avaliação econômica	66
7.1.1 Análise de Custos Diretos	66
7.2 Avaliação ambiental	69
7.2.1. Avaliação do ciclo de vida	69
7.2.2. Síntese em energia	71
7.3 Análise global	75
7.3.1 Normalização	75
7.3.2 Apresentação dos Dados no Gráfico Radar	77
8 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	81
9 CONCLUSÕES.....	83
REFERÊNCIAS.....	85
ADENDOS	93
APÊNDICE A: Resumo do reaproveitamento de resíduos de GFRP na literatura	93
APÊNDICE B: Coeficientes de categoria de impacto para os itens incorporados nas empresas de blocos de concreto não estrutural.....	98
APÊNDICE C: Coeficientes de categoria de impacto para os itens do aterro como emissões evitadas.....	99
APÊNDICE D: Memorial de cálculo de ACV para os itens do aterro e redução de transporte como emissões evitadas.....	100
APÊNDICE E: Memorial de cálculo para o inventário do cenário # 1 (Tabela 12) ..	101
APÊNDICE F: Memorial de cálculo para o inventário do cenário #2 (Tabela 13)...	103

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O avanço da urbanização ocorre nas fronteiras das cidades e sobre áreas rurais. Essa é uma característica padrão no Brasil (talvez no mundo), onde pequenas indústrias de construção civil “caminham” juntamente com esse avanço da urbanização. Em simultâneo, criam *Clusters* de produção que, no Brasil, são caracterizados pela concentração geográfica de empresas relacionadas ao setor em determinadas regiões. Essa proximidade física facilita a interação e a colaboração entre as empresas e cria um ambiente propício para o crescimento e a inovação no setor da construção civil.

Pequenas empresas que atuam no setor de materiais básicos, como blocos de concreto, caixas d’água e outros produtos essenciais para a construção civil, desempenham um papel significativo no avanço urbano. Essas empresas, além de inseridas no contexto do *cluster* produtivo, buscam constantemente ampliar sua base de clientes, aproveitando-se das oportunidades geradas pelo crescimento da infraestrutura nas regiões metropolitanas.

Um dos principais fatores que favorecem essas empresas é a proximidade com os consumidores finais, o que lhes permite um atendimento mais ágil e personalizado. Essa proximidade contribui ainda para a redução dos custos logísticos, especialmente no transporte de materiais, o que pode representar uma parcela significativa das despesas operacionais. Dessa forma, a inserção dessas pequenas empresas no *cluster* não apenas impulsiona seu crescimento; também fortalece a economia local, promove um modelo de produção com potencial de impulsionar avanços tecnológicos e melhorias na eficiência operacional que merecem ser mais bem estudados sob diferentes aspectos, incluindo-se os econômicos e os ambientais. O fato busca alternativas mais sustentáveis para os *clusters* locais, circula subprodutos e aumenta a eficiência.

Existem diversos materiais utilizados na construção civil. Nela, as caixas de água e blocos de concreto não estrutural merecem atenção, pois são os mais comumente encontrados. As caixas de água de grandes capacidades são fabricadas em fibra de vidro, um material composto por filamentos de vidro entrelaçados que é

utilizado em uma grande variedade de produtos. A sua popularidade se deve às suas características únicas, como resistência à corrosão, durabilidade, leveza e facilidade de moldagem. No entanto, a fabricação de produtos em fibra de vidro pode gerar uma quantidade significativa de resíduos, principalmente na forma de aparas e sobras de material, o que, segundo Bagheri *et al.* (2023), pode ser prejudicial ao meio ambiente e à saúde humana.

Conforme relata Conroy *et al.* (2006), termoplásticos podem ser reaproveitados por refundição e remoldagem. No entanto, a fibra de vidro impregnada de resina é um termofixo e não pode ser refundida; por isto, reaproveitar este material envolve a moagem. Este reaproveitamento pode contribuir significativamente para a economia circular, um modelo econômico que visa a minimizar o desperdício e a maximizar a utilização de recursos. Ele também promove a reutilização, a reparação e a reutilização de materiais (KIRCHHERR *et al.*, 2017). Reutilizar os resíduos de fibra de vidro está alinhado com esse conceito, pois permite que os materiais sejam reintroduzidos no processo produtivo e gerenciados sob o conceito de simbiose industrial, ao invés de serem descartados em aterros sanitários ou incinerados.

Desta forma, o resíduo de fibra de vidro poderia contribuir para a economia circular de diversas maneiras, como

- Redução do consumo de recursos naturais: a reutilização de resíduos de fibra de vidro evitaria a extração de recursos naturais virgens;
- Redução de resíduos: a reutilização de resíduos de fibra de vidro evitaria seu descarte em aterros sanitários ou mesmo sua incineração;
- Estímulo à inovação: a reutilização de resíduos de fibra de vidro poderia estimular a inovação de processos de reciclagem, voltados à maior eficiência e à sustentabilidade.

A reutilização de resíduos de fibra de vidro pode ser uma prática fundamental para a implementação eficaz da economia circular. De acordo com a ONU BRASIL (2022) e com a Agenda 2030 com seus 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), a reciclagem é fomentada como uma opção melhor do que o descarte. Ela está somente abaixo do reuso. A reciclagem dos resíduos de fibra de vidro se enquadra em diferentes ODS: Indústria, Inovação e Infraestrutura (ODS9), Consumo

e Produção Sustentáveis (ODS12), Ação contra a Mudança Global do Clima (ODS13), Vida na Água (ODS14) e Vida Terrestre (ODS15).

Para Conceição (2005), a reciclagem pode reduzir a quantidade de resíduos enviados para aterros sanitários e reduzir a extração de recursos naturais virgens, além de contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, a reciclagem de resíduos de fibra de vidro ainda é um desafio devido à complexidade do material e à falta de infraestrutura adequada. Segundo Conroy *et al.* (2006), a reciclagem de fibra de vidro apresenta alguns obstáculos técnicos, como a separação das fibras de vidro da resina polimérica e a necessidade de tecnologias específicas para processar o material reciclado.

Liu *et al.* (2017) forneceu uma visão geral abrangente do estado atual da reciclagem de compósitos, focando particularmente nos desafios e nas oportunidades associados à reciclagem de fibras de vidro. Os autores destacaram os obstáculos técnicos significativos que surgem durante o processo de reciclagem, particularmente a separação de fibras de vidro de resinas de polímero. Essa separação é crucial, pois a qualidade dos reciclados impacta diretamente suas aplicações potenciais.

González *et al.* (2017) se aprofundaram nas complexidades que cercam a reciclagem de fibras de vidro e enfatizaram os desafios técnicos que dificultam a recuperação efetiva do material. Uma preocupação primária destacada pelos autores é a separação das fibras de vidro das resinas poliméricas, o que representa obstáculos significativos no processo de reciclagem. Essa separação é crítica, porque a eficiência e a qualidade das fibras de vidro recicladas impactam diretamente o desempenho e a sustentabilidade dos materiais compostos. De forma geral, percebe-se que, embora a reciclagem da fibra de vidro represente uma estratégia promissora para a redução de impactos ambientais, os desafios técnicos associados à separação dos componentes e à falta de infraestrutura adequada ainda limitam sua viabilidade.

Matrenichev *et al.* (2020) apresentou um exame abrangente dos métodos de reciclagem aplicáveis a materiais compósitos, com foco especial em compósitos de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP). Os principais *insights* giram em torno de três abordagens primárias de reciclagem: métodos mecânicos, térmicos e químicos, cada um com seu próprio conjunto de vantagens e limitações.

Uma das formas mais eficazes de minimizar a geração de resíduos de fibra de vidro é reduzir a quantidade de material usado na fabricação de produtos. Isso pode ser feito por meio da otimização do processo de produção, o que reduz as perdas de material e melhora a eficiência de corte. Outra opção é a substituição da fibra de vidro por materiais alternativos, como o bambu, que é um material orgânico e biodegradável (NGUYEN, *et al.*, 2021). De qualquer forma, os resíduos de fibra de vidro podem ser reciclados e reutilizados em outros produtos.

Citando os principais estudos sobre reutilização da fibra de vidro conforme a literatura, Li *et al.* (2014) realizaram experimentos de separação da fibra de vidro da resina, oriundas de placas de circuito impresso trituradas, por meio de processos mecânicos e de ação eletrostática. Os resultados, porém, não foram satisfatórios por motivos técnicos de força centrífuga em partículas metálicas e não metálicas; todavia, deixa-se em aberto a ideia de aprimorar o experimento.

Conroy *et al.* (2006) trouxeram uma alternativa de incorporar os resíduos de fibra de vidro às chamadas madeiras-plásticas ou tampas de bueiros, com ensaios mecânicos satisfatórios que sugerem mais estudos sobre o tema. Asokan *et al.* (2010) realizaram experimentos de laboratório para melhorar as propriedades mecânicas do concreto preenchido com pó de resíduos de plástico reforçado com fibra de vidro (GRP) para ampliar o escopo da reciclagem de resíduos de GRP para diferentes aplicações em argamassas de concreto para o uso na construção civil. Os resultados mostraram que a resistência à compressão, a resistência à tração e a contração melhoraram significativamente.

Ribeiro *et al.* (2023) testaram os efeitos da adição de resíduo de fibra de vidro e de cinzas volantes em propriedades mecânicas (resistência à compressão e à tração) e físicas (densidade aparente e microestrutura) em argamassa de cimento e as principais conclusões foram de um modo geral positivas. Yakovlev *et al.* (2021) concluíram que a substituição parcial de agregados em concreto e argamassas por fibra de vidro reforçada com resina reciclada mecanicamente é outra aplicação potencial. Os autores chamam a atenção para o fato de que afirmar o uso de resíduos de fibra de vidro reforçada com resina em concreto é uma opção viável. Mais estudos, porém, devem ser feitos, com foco na durabilidade e noutras propriedades mecânicas. Yazdanbakhsh e Bank (2014) concluíram sobre a viabilidade técnica positiva em

utilizar resíduos de fibra de vidro na substituição parcial de cargas ou agregados em materiais cimentícios, particularmente na argamassa e no concreto de cimento Portland. Nele, a substituição parcial de agregados em concretos e argamassas é outra aplicação potencial de fibra de vidro reforçado com polímero, reciclado mecanicamente.

Assim, embora a literatura mostre avanços no tema, observou-se que a utilização específica dessas fibras recicladas justifica uma investigação mais aprofundada. Isso é particularmente relevante, quando se considera que os blocos de concreto não estrutural desempenham um papel crucial na infraestrutura da urbanização, quando serve como um material de construção fundamental na construção de diferentes tipos de obras civis. Deste modo, o potencial uso das fibras nos blocos de concreto não estrutural deve ser mais estudado sob os aspectos econômico e ambiental, ato que complementaria o estudo de Portela *et al.* (2020) que avaliaram e atestaram o bom desempenho dos aspectos técnicos.

Diante de todos os problemas ambientais relacionados aos resíduos de fibra de vidro, considerando-se ainda os estudos citados que avaliaram o seu uso potencial como matéria prima para outros produtos, este trabalho propõe uma alternativa de utilizar os resíduos de fibra de vidro com resina polimérica oriunda de empresas que fabricam caixas d'água. O uso do resíduo de fibra de vidro como matéria prima na fabricação de blocos não estruturais de alvenaria é avaliado. Para isto, considera aspectos econômicos e ambientais, complementa os aspectos técnicos já avaliados por Portela *et al.* (2020). O resultado deste trabalho pretende responder à questão de pesquisa que é: “com base na análise do ciclo de vida, na síntese em emergia e viabilidade econômica, a utilização de resíduos de fibra de vidro na fabricação de blocos de concreto não estrutural pode ser uma alternativa de melhor desempenho perante o descarte desses resíduos em aterro sanitário?”.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade ambiental e econômica do uso de resíduos de fibra de vidro na fabricação de blocos de concreto não estrutural.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar o teste de compressão dos blocos não estruturais, fabricados com resíduos de fibra de vidro.
- b) Avaliar comparativamente os sistemas tradicional e alternativo de produção de blocos de concreto não estrutural, utilizando-se indicadores ambientais dos métodos Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e Síntese em emergência.
- c) Avaliar comparativamente os sistemas tradicional e alternativo de produção de blocos de concreto não estrutural, servindo-se de indicadores de desempenho econômico.

3 UTILIDADE DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho estuda os aspectos técnicos, econômicos e ambientais da incorporação de resíduos de fibra de vidro na fabricação de blocos de concreto não estrutural. O conceito de simbiose industrial é considerado, e, para isto, avalia-se um *cluster* produtivo regional que envolve os municípios de Ribeirão Pires, Mauá e proximidades na região chamada grande ABC no estado de São Paulo.

A proximidade entre fábricas de blocos de concreto não estrutural e fábricas de caixas d'água em fibra de vidro é característica das fronteiras da expansão urbana e mostra um potencial sinérgico para otimização de recursos via reciclagem. Evita-se, assim, o descarte de resíduos de fibra de vidro em aterro sanitário, o que, além de aumentar a vida útil dos aterros e reduzir potenciais impactos ambientais, reduz a necessidade de extração de matérias primas virgens para fabricação de blocos de concreto não estrutural. Por outro lado, recursos são necessários para implementar e operar o sistema proposto de simbiose industrial, o que sustenta o desenvolvimento deste estudo. A pesquisa contribui para auxiliar em tomadas de decisão voltadas à sustentabilidade da construção civil nas fronteiras da expansão urbana.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Economia Circular: Conceitos e Definições

A economia circular tem surgido como uma abordagem promissora para enfrentar os desafios ambientais e econômicos da atualidade (*WORLD ECONOMIC FORUM*, 2019). Baseada em ciclos contínuos de reutilização, recuperação e regeneração de recursos, a economia circular propõe uma mudança fundamental na forma como produzimos, consumimos e descartamos materiais e produtos. Sendo assim, a economia circular se baseia em três princípios fundamentais: o princípio do ciclo fechado, o princípio da cascata e o princípio da regeneração.

A ideia da Economia Circular (EC) enfatiza “a necessidade de uma atividade econômica de consumo que elimine a geração de resíduos do sistema por princípio” e propõe a redução da dependência de fontes de energia não renováveis e recursos limitados. Kirchherr *et al.* (2017) concluíram, em uma investigação mais abrangente, que a EC pode alcançar um desenvolvimento sustentável por meio da redução, do reaproveitamento, da reciclagem e da recuperação de materiais, tanto nos processos de produção, quanto nos de consumo. A partir da EC, se iniciou a implementação de políticas em economias, como na Alemanha em 1996 e na China em 2010 (LIEDER & RASHID, 2016), e, em 2012, a Fundação Ellen MacArthur apoiou o assunto.

Para acelerar a transição da Europa para um modelo circular, a Comissão Europeia criou em 2015 um plano de ação com 54 medidas para cinco setores prioritários. No entanto, esse plano de ação não propõe a criação de indicadores, mas especifica as ações que os membros dos estados devem tomar para fechar o ciclo de vida dos produtos (GEERKEN *et al.*, 2019). Devido às oportunidades econômicas e aos benefícios socioambientais esperados com essa transição em várias escalas, o conceito de EC ganhou destaque global (REIKE *et al.*, 2018). Ao separar a atividade econômica do consumo de recursos finitos, diversas áreas buscaram promover a EC como um meio de desenvolvimento econômico sustentável.

No entanto, uma das tarefas de pesquisa mais importantes foi a identificação de áreas de desenvolvimento regional, que podem ser mais influenciadas pela transição para a EC, e a inclusão de benefícios potenciais que a EC trará ao desenvolvimento regional (AVDIUSHCHENKO e ZAJAC, 2019). Para obter uma

melhor compreensão dessa situação, uma quantidade significativa de pesquisas examina a relação entre EC e desenvolvimento econômico sustentável, e várias áreas se concentraram na promoção da circularidade. As ameaças econômicas e a qualidade ambiental passam a ser os principais objetivos da EC, mas os efeitos sociais são quase ignorados. Os modelos de negócios e os consumidores são frequentemente referidos como facilitadores da EC (KIRCHHERR *et al.*, 2017), mas ainda há uma lacuna no preenchimento devido à falta de uma dimensão social da deficiência para o desenvolvimento sustentável (SILVESTRE & TÎRCĂ, 2019).

O princípio do ciclo fechado busca eliminar resíduos e poluição desde o início do processo produtivo, pois prioriza o uso de recursos renováveis e a reciclagem de materiais (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015). Isso implica repensar os processos produtivos, substituir a lógica de "extrair-produzir-descartar" pela de "reduzir-reutilizar-reciclar". O princípio da cascata quer prolongar a vida útil dos produtos e materiais, incentivando a reutilização, a remanufatura e a reparação (EUROPEAN COMMISSION, 2020). Ao estender a vida útil dos produtos, reduz-se a demanda por novos recursos e minimiza-se a geração de resíduos. O princípio da regeneração enfatiza a importância de restaurar e de regenerar os sistemas naturais; por isto, adota práticas sustentáveis de agricultura, de reflorestamento e de gestão dos recursos hídricos (Stahel, 2016). A ideia é criar um círculo virtuoso no qual os recursos utilizados sejam restituídos aos ecossistemas de forma a manter sua capacidade de sustentação.

A adoção da economia circular pode trazer consigo uma série de benefícios, tanto para a sociedade, quanto para o meio ambiente. Em termos econômicos, a economia circular pode gerar várias oportunidades de negócios e os chamados empregos 'verdes', fato que impulsiona o crescimento econômico de maneira mais sustentável. Estima-se que a transição para uma economia circular possa gerar um ganho mundial de até US\$ 4,5 trilhões até 2030, segundo relatório do Fórum Econômico Mundial (WORLD ECONOMIC FORUM, 2017).

A economia circular pode contribuir para a redução da dependência de recursos naturais finitos, como minerais e combustíveis fósseis, e para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Ao priorizar a reciclagem e a reutilização, a

economia circular diminui a necessidade de extrair novos materiais; ela evita a degradação ambiental associada à exploração desses recursos (WARD, 2018).

A economia circular, conforme Figura 1, possui aplicações em diversos setores econômicos e se ajusta às características de cada um deles. Um exemplo é o setor de manufatura, em que a implementação de modelos de negócios baseados na economia circular pode envolver a remanufatura de produtos, ou seja, o processo de restaurar e atualizar produtos usados para que eles possam ser reintroduzidos no mercado (*Ellen MacArthur Foundation, 2015*). Isso não apenas reduz o desperdício e a demanda por recursos virgens, mas também cria oportunidades para a criação de empregos especializados em remanufatura.

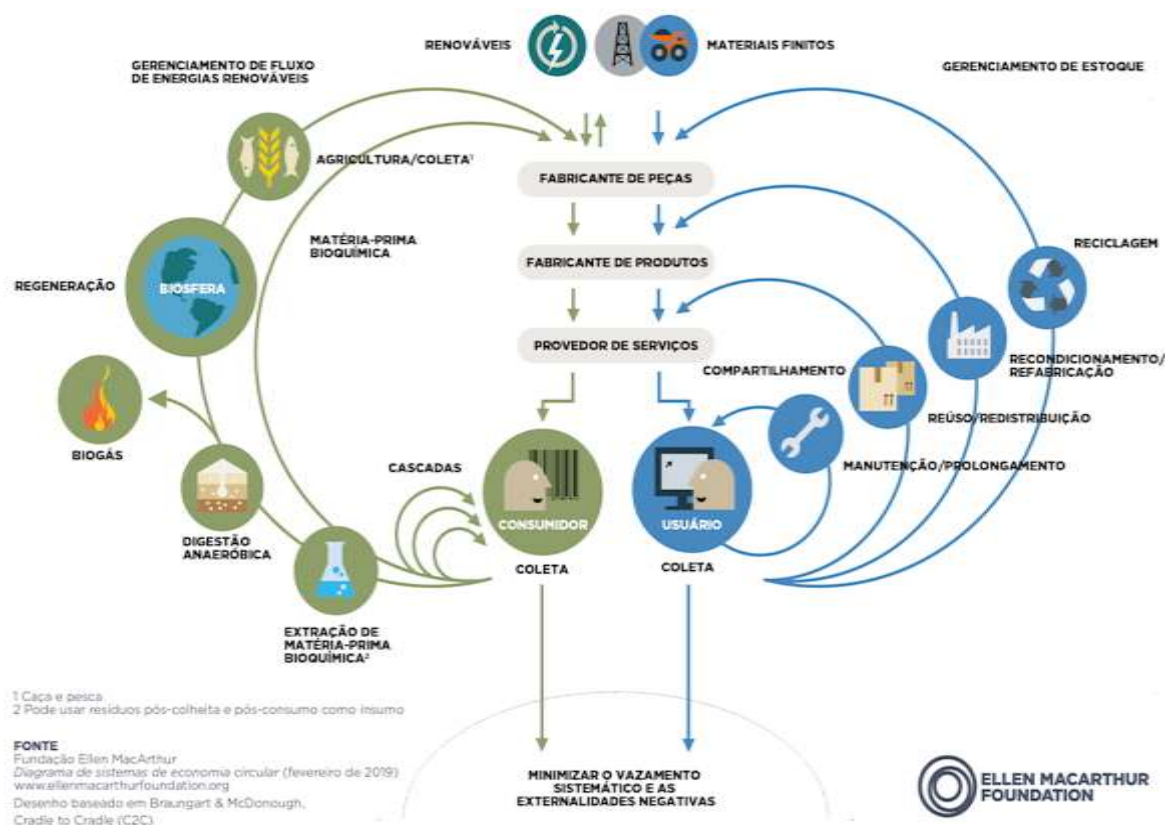


Figura 1: Modelo de economia circular por *Ellen MacArthur Foundation* (2015).

No setor de construção, a economia circular pode ser aplicada por meio da adoção de práticas de construção mais sustentáveis, como a utilização de materiais reciclados e a implementação de projetos de demolição seletiva. O que se visa é a

recuperação de materiais para reutilização em novas construções (*European Commission*, 2020). Essas práticas contribuem para a redução do consumo de recursos naturais e para a diminuição da quantidade de resíduos de construção e de demolição destinados a aterros.

Embora a economia circular apresente inúmeros benefícios, sua implementação enfrenta alguns desafios significativos. Um dos principais deles é a necessidade de mudanças nos modelos de negócios e nas práticas de produção existentes, o que exige alto grau de colaboração entre os diferentes atores envolvidos, desde empresas e governos até consumidores (SCHRÖDER *et al*, 2020).

Vale ressaltar que é necessário investir em infraestrutura e em tecnologias adequadas para facilitar a coleta, o processamento e a reciclagem de materiais e garantir a viabilidade econômica da economia circular. A conscientização e a educação dos consumidores é outro desafio. Para que a economia circular seja efetivamente implementada, é fundamental que os consumidores compreendam a importância de suas escolhas de consumo e estejam dispostos a adotar comportamentos mais sustentáveis, como a compra de produtos reutilizáveis e a separação adequada de resíduos (*World Economic Forum*, 2019).

De forma geral, entende-se que a economia circular surge como uma resposta promissora para os desafios econômicos e ambientais enfrentados pela sociedade atual. Seus princípios de ciclo fechado, cascata e regeneração propõem uma abordagem inovadora para a gestão de recursos. O que se quer é maximizar o valor dos produtos, dos materiais e dos recursos por meio de ciclos contínuos de reutilização, de recuperação e de regeneração. Quando bem estruturada e bem gerenciada, a implementação da economia circular traz consigo uma série de benefícios. Inclui oportunidades de negócios mais sustentáveis, redução da dependência de recursos naturais finitos, minimização da geração de resíduos e promoção de práticas industriais mais alinhadas com a preservação ambiental.

Várias investigações apresentaram métricas relacionadas à Economia Circular (EC), e algumas análises apontam que as ferramentas de acompanhamento do sucesso ou não da EC atualmente disponíveis são insuficientes para avaliar o avanço em direção à circularidade em âmbito regional, conforme apontado por Smol *et al*. (2017) e Avdiushchenko e Zajac. (2019). Por exemplo, em um estudo conduzido por

Elia *et al.* (2024), uma análise de um conjunto de indicadores desenvolvidos pela Agência Ambiental Europeia, revelou sua inadequação para monitorar todas as facetas da EC com eficácia.

Embora a Economia Circular (EC) tenha adquirido maior consistência conceitual ao longo do tempo, conforme destacado por Ghisellini *et al.* (2016) e Avdiushchenko *et al.* (2019), a literatura até o momento indica dados inconclusivos sobre a avaliação da circularidade em contextos regionais. Por outro lado, a análise de indicadores de EC em uma perspectiva macroeconômica pode servir como um instrumento valioso para identificar as regiões que necessitam intensificar seus esforços na transição para a economia circular, como apontado por Avdiushchenko *et al.* (2019). Segundo o ressaltado por Mayer *et al.* (2019), o estabelecimento de indicadores de monitoramento em âmbito macro possibilitaria a captura abrangente dos efeitos de todo o sistema, incluindo o fenômeno do "efeito rebote". Essa abordagem se mostraria de grande utilidade na formulação de políticas destinadas a reduzir as pressões e os impactos ambientais resultantes da exploração de recursos.

4.2 Simbiose Industrial: Conceitos e Definição

A simbiose industrial é uma abordagem inovadora que tem atraído atenção crescente nos últimos anos devido ao seu potencial para impulsionar o desenvolvimento econômico sustentável. Ela se baseia no conceito de cooperação entre diferentes empresas e setores; visa a otimizar o uso de recursos, a minimizar desperdícios e a reduzir impactos ambientais. Segundo Wang *et al.* (2013), a simbiose industrial é uma solução inteligente para os desafios que enfrentamos na busca por um mundo mais sustentável. A mesma simbiose é um conceito amplo, multifacetado que engloba uma série de práticas interorganizacionais. Ela pode envolver trocas de subprodutos, compartilhamento de recursos, reciclagem conjunta e outras formas de cooperação entre empresas, muitas vezes localizadas em proximidade geográfica. Assim como afirma Neves *et al.* (2020), a simbiose industrial promove a cooperação em vez da competição; por meio dela, as empresas trabalham em conjunto para alcançar objetivos econômicos e ambientais.

Empresas que adotam a simbiose industrial poderiam reduzir seus custos de produção por meio do compartilhamento de recursos, como água, energia, matéria-

prima e instalações. De acordo com Vitale *et al.* (2021), a eliminação de subprodutos em aterro pode resultar grandes perdas de recursos, em termos de terra, espaço e extração mineral natural, além de perder oportunidades de negócio oferecidas pela simbiose industrial, incentivada numa perspectiva de economia circular. Acima dos benefícios econômicos, a simbiose industrial contribui para a redução do impacto ambiental. Por meio da reciclagem e da reutilização de recursos, as empresas diminuem a quantidade de resíduos gerados e minimizam a exploração de recursos naturais. Como ilustrado por Nicolaou *et al.* (2021), a simbiose em destaque está alinhada com os princípios da economia verde e da sustentabilidade ambiental; ela ajuda a mitigar os efeitos das mudanças climáticas e a preservar os ecossistemas.

A simbiose industrial já apresentou muitos exemplos de sucesso em todo o mundo. Em Kalundborg, na Dinamarca, um complexo industrial abriga várias empresas que compartilham calor residual, água e subprodutos, o que criou uma rede de simbiose industrial que opera há décadas (TURKEN, 2020). A cidade de Kalundborg é um testemunho do potencial da simbiose industrial para promover o desenvolvimento econômico sustentável e a redução de impactos ambientais. No entanto, a implementação bem-sucedida desta simbiose nem sempre é simples. Existem desafios a ser superados, como questões legais, barreiras culturais, preocupações com a concorrência e a necessidade de estabelecer relações de confiança entre as empresas. Segundo Yu *et al.* (2021), do ponto de vista da reutilização e da reciclagem, a simbiose industrial tem sido considerada um mecanismo vital para concretizar a Economia Circular.

O seu processo é amplamente reconhecido como uma estratégia central e prática no conceito de economia circular. Ela facilita a transição do modelo linear para o circular ao promover o uso eficiente de recursos, a reutilização de resíduos e a cooperação entre empresas para criar ciclos fechados de materiais e energia. A simbiose industrial é vista como uma aplicação prática dos princípios da economia circular, ao permitir que resíduos e subprodutos de uma empresa sejam utilizados como insumos por outras, o que prolonga o ciclo de vida dos materiais e reduz a extração de recursos naturais (CASTELLET-VICIANO *et al.*, 2022).

A simbiose industrial (SI) foi oficialmente reconhecida como uma abordagem prática para promover a Economia Circular (EC) e está incorporada à legislação da União Europeia (EU) desde julho de 2018 (DOMENECH *et al.*, 2019). Neste estudo, os autores realizaram um mapeamento das iniciativas de SI existentes na Europa e na identificação de suas principais características. O mapeamento indicou focos de atividade de SI em toda a Europa, embora variem em natureza, em troca de recursos e em escala geográfica. O mapeamento revelou um número significativo de redes auto-organizadas no Norte da Europa, em países, como Suécia, Dinamarca ou Finlândia; também deu a conhecer atividade em outros *clusters* industriais tradicionais.

Diante de conceitos estudados sobre o tema, a simbiose industrial se encaixa plenamente na economia circular; é uma de suas principais ferramentas para transformar resíduos em recursos e promover cadeias produtivas mais sustentáveis. Sua adoção é fundamental para avançar rumo a uma economia mais circular e eficiente. Para a presente dissertação, será considerada a utilização de resíduos de uma empresa como matéria prima para outra empresa. Isso diminui a quantidade de resíduos que vão para o aterro sanitário, além de reduzir a necessidade de matérias-primas, e, segundo a literatura, isso é definido como a simbiose de que tratamos. Reforçando as ideias de Baldassarre *et al.* (2019), a simbiose industrial possui sua raiz na cooperação entre empresas tradicionalmente separadas para compartilhar recursos, como materiais, energia, água e subprodutos, de forma a gerar benefícios mútuos e a promover a sustentabilidade ambiental, econômica e social.

4.3 Normas brasileiras sobre fabricação de blocos de concreto não estrutural

A produção de blocos de concreto não estrutural no Brasil passou por um processo de evolução normativa ao longo das décadas, pois se quis assegurar a qualidade, a segurança e a padronização dos produtos utilizados na construção civil. Nesse contexto, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) desempenhou um papel fundamental na definição de diretrizes para a fabricação desses materiais.

Esse avanço normativo tornou-se ainda mais relevante diante da crescente busca por soluções mais sustentáveis na construção civil; ele inclui a incorporação de

resíduos industriais como alternativa para reduzir impactos ambientais e promover a economia circular. No caso da produção de blocos de concreto, o uso de resíduos de fibra de vidro pode ser uma possibilidade de substituir parcialmente agregados convencionais. Isto confere novas propriedades ao material e contribui para o reaproveitamento de resíduos que, de outra forma, teriam destinação inadequada.

A evolução normativa pode ser dividida em diversas etapas, e o fato reflete o amadurecimento da indústria e a incorporação de novas tecnologias:

Início da Padronização (Décadas de 1940-1960): nesse período, a produção de blocos de concreto não estrutural no Brasil carecia de regulamentação específica; a carência resultava variação na qualidade dos produtos utilizados em pequenas construções.

ABNT e Normas Técnicas (Década de 1970): a partir da década de 1970, a ABNT começou a normatizar produtos de construção. Em 1977, a NBR 6136:1977 estabeleceu as primeiras diretrizes técnicas para blocos vazados de concreto, incluindo requisitos de resistência e dimensões (ABNT, 1977).

Atualizações Normativas (Década de 1990): durante os anos 1990, a NBR 6136 foi revisada para incorporar novas especificações técnicas, fato que resultou na versão NBR 6136:1994 (ABNT, 1994).

PBQP-H e Normatização Estrutural (Início dos Anos 2000): a criação do Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H) impulsionou a normatização e a exigência de conformidade técnica na fabricação dos blocos de concreto não estrutural.

Evolução Contínua e Sustentabilidade (Década de 2010 em Diante): a indústria da construção civil passou a incorporar novas tecnologias e materiais alternativos, com a adição de resíduos industriais em produtos cimentícios. A norma NBR 6136:2016, em versão mais atualizada, reflete essas mudanças, pois estabelece critérios mais rigorosos para os blocos de concreto não estrutural (ABNT, 2016).

A pesquisa sobre essa aplicação se insere nesse contexto; analisa como a evolução normativa pode permitir a incorporação de novos insumos sem comprometer

a qualidade e a segurança final do produto. Conforme norma NBR 6136:2016, os requisitos para blocos de concreto Classe C, ou seja, sem função estrutural, devem atender aos seguintes critérios técnicos:

(a) Resistência Característica à Compressão Axial

A resistência característica à compressão axial, determinada aos 28 dias, deve ser de no mínimo 3,0 MPa.

(Nota: conforme norma técnica, a compressão axial deve ser aferida após 28 dias de cura.)

(b) Absorção de Água

Os limites de absorção variam, conforme o tipo de agregado utilizado na fabricação dos blocos:

- **Blocos com agregado normal:**

- Valor individual de absorção: deve ser no máximo 11,0%.
- Valor médio de absorção: deve ser no máximo 10,0%.

(Nota: agregado normal, conforme definição da ABNT NBR 9935.)

A ABNT NBR 9935:2011 define como agregado normal o uso de areia, de pedrisco, entre outros materiais como recursos tradicionais. Já agregados leves são aqueles oriundos de resíduos industriais que podem ser incorporados à argamassa e que possuem peso específico (densidade) menor que os agregados normais.

A norma não proíbe explicitamente o uso de resíduos de fibra de vidro como agregados em concreto ou argamassa. A norma citada tem como objetivo principal estabelecer definições e classificações para diferentes tipos de agregados, como naturais, artificiais e reciclados, sem detalhar materiais específicos que possam ou não ser utilizados.

- **Blocos com agregado leve:**

- Valor individual de absorção: deve ser no máximo 16,0%.

- Valor médio de absorção: deve ser no máximo 13,0%.

(Nota: *agregado leve conforme definição da ABNT NBR 9935.*)

(c) Retração

- A retração deve ser inferior ou igual a 0,065%.

(Nota: *este ensaio é considerado facultativo.*)

5 REVISÃO DA LITERATURA

Ao realizar a busca por produções científicas no Portal de Periódicos da CAPES (periodicos.capes.gov.br), observou-se uma predominância de estudos voltados à substituição do aço por vergalhões de fibra de vidro produzidos por pultrusão, bem como voltados à incorporação genérica de fibras de vidro em argamassas, sem ênfase em aplicações específicas.

Diante desse panorama, a revisão da literatura aqui desenvolvida se limita à apresentação e à análise dos artigos científicos que apresentaram maior consonância com os objetivos da presente dissertação, que priorizou abordagens que se alinhassem à proposta de aplicação da fibra de vidro na produção de blocos de concreto.

5.1 Aspectos técnicos do uso de fibras de vidro em artefatos de concreto

Ribeiro *et al.* (2023) estudaram a interação dos resíduos de fibra de vidro em argamassa de cimento *portland* com cinzas volantes derivadas da indústria siderúrgica. Constatou-se que as cinzas volantes aumentaram a resistência à compressão aos 60 dias, enquanto a resistência à tração foi afetada pela combinação das cinzas volantes com o comprimento das fibras. A densidade aparente diminuiu com a adição de ambos os materiais. A análise microestrutural revelou uma distribuição uniforme dos resíduos na matriz cimentícia. Não houve impacto no tocante à hidratação do cimento com a adição de cinzas volantes e fibras de vidro. O efeito isolado da adição de resíduos de fibra de vidro aumentou a resistência à tração em 20% com significância de 94%. Adicionalmente, as cinzas volantes foram usadas para avaliar o efeito da alcalinidade do cimento nas fibras de vidro.

Agelaridou-Twohig *et al.* (2014) realizaram uma análise térmica de chaminés de concreto armado com revestimento plástico de fibra de vidro em incêndios não controlados. Os resultados identificam casos específicos em que a chaminé de concreto reforçado sofre uma redução significativa em sua resistência após incêndio. Cálculos para várias configurações de chaminés reforçadas com fibras nos limites práticos mostram que elas não falhariam catastroficamente após um incêndio, mesmo

considerando o dobro da espessura do revestimento normalmente usado. Mesmo assim, o que é irrealisticamente alto nos padrões de projeto atuais, a resistência residual caiu para cerca de 70% do nominal.

Zhang *et al.* (2023) estudaram a resistência ao impacto de lajes de concreto armado com vergalhão de fibra de vidro sob temperaturas elevadas. Os resultados indicam que altas temperaturas reduzem a resistência ao impacto de lajes de concreto reforçado com fibra de vidro. Em comparação com lajes de concreto armado convencionais, as com reforço de fibra de vidro são mais afetadas pela alta temperatura em termos de deformação e força de impacto, mas sua capacidade de carga residual é menos prejudicada.

Rodier e Savastano (2018) analisaram a argamassa pura sem aplicação específica com 20% de fibra de vidro em pó e utilização de cimento Portland comum. A substituição parcial do cimento por 10% em peso de resíduos de fibra de vidro promoveu um aumento das propriedades físico-mecânicas das argamassas, além de apresentar excelentes propriedades mecânicas e térmicas.

Saafan (2006) mostrou que o reforço de vigas de concreto em cisalhamento com placas de fibra de vidro pode melhorar significativamente sua capacidade de suportar forças de cisalhamento, pode prolongar sua vida útil. Por meio de um projeto adequado, os compósitos com fibra de vidro desenvolveram ductilidade suficiente, apesar de sua natureza quebradiça, o que incentiva seu uso como um reforço de concreto eficaz. A relação custo-benefício do sistema o torna uma alternativa muito atrativa para trabalhos de reforço e reparo, já que os materiais estão disponíveis comercialmente a um preço conveniente.

Kotynia *et al.* (2017) testaram a aderência em vigas com doze amostras de concreto e revelaram que as barras de fibra de vidro mostraram um bom comportamento de aderência devido às nervuras em suas superfícies. Um aumento na resistência compressiva do concreto melhorou a aderência entre a barra e o concreto.

Gandia *et al.* (2019) usaram resíduos reciclados de polímero reforçado com fibra de vidro (GFRP) na produção de tijolo. Eles descobriram que a adição de 10%

de resíduos de GFRP produziu os melhores resultados, quando comparado ao tijolo sem aditivos, fato que expressa uma redução de 21% na condutividade térmica.

A literatura revisada sobre o tema destaca o potencial dos resíduos de fibra de vidro na construção civil, melhora propriedades mecânicas, térmicas e de durabilidade em compósitos cimentícios e estruturais (Apêndice A). As pesquisas indicam desafios em condições extremas, como altas temperaturas, que afetam a resistência residual, mas evidenciam melhorias na aderência e no desempenho estrutural. Isto consolida os resíduos de fibra de vidro como alternativa promissora para materiais de construção.

5.2 Ferramentas de avaliação econômica e ambiental

5.2.1 Avaliação econômica

Esta seção tem como objetivo explorar estudos que abordem as análises econômicas de materiais de construção, com foco em alternativas e visa a uma maior sustentabilidade. No entanto, durante a revisão, identificou-se uma escassez de estudos específicos sobre a análise econômica de materiais alternativos. Assim, foram incluídos trabalhos com abordagens gerais, mas que trazem conceitos e metodologias aplicáveis a este estudo.

A análise de viabilidade econômica é uma área de crescente relevância no contexto de tomada de decisões empresariais e investimentos. A literatura disponível oferece uma variedade de abordagens e metodologias que buscam integrar diferentes aspectos da viabilidade econômica em projetos e investimentos. Por exemplo, o trabalho de Möller (1990) destaca a importância de um modelo que integra o planejamento e a avaliação de projetos e enfatiza que a viabilidade financeira não deve ser o único critério considerado no processo de avaliação. O autor propõe uma série de etapas que vão desde a concepção da ideia do projeto até a implementação do plano mestre; sugere uma abordagem mais holística para a avaliação de viabilidade.

Avançando para 2009, Duah (2009) investiga como os investidores podem utilizar a análise de custo-benefício (CBA) em suas decisões de investimento. A pesquisa revela que, apesar das limitações na coleta de dados representativos, a CBA

se estabelece como uma ferramenta poderosa para auxiliar na avaliação da viabilidade econômica de investimentos, seguindo princípios econômicos que buscam maximizar a margem líquida. A análise detalhada dos passos envolvidos na CBA contribui para uma compreensão mais profunda da sua aplicação no contexto do capital de risco.

Buys e Hurbissoon, (2011) forneceram uma análise detalhada das implicações econômicas associadas a edifícios verdes em comparação com estruturas convencionais. Uma avaliação crítica do material revela vários *insights* importantes sobre as percepções e as realidades dos custos associados à construção verde. Os autores abordam uma crença prevalente de que edifícios verdes incorrem em custos iniciais mais altos do que edifícios tradicionais, pois o retorno ocorre a longo prazo. No entanto, eles argumentam que essa percepção é enganosa, pois edifícios verdes podem levar a economias significativas de longo prazo para desenvolvedores, empresas e usuários finais. Essa afirmação é fundamentada no reconhecimento de que, embora os benefícios tangíveis dos edifícios verdes, como custos operacionais reduzidos, possam não ser imediatamente aparentes, seu retorno ao longo da vida útil é substancialmente mais favorável do que o dos edifícios convencionais.

Ekundayo *et al.* (2011) enfatizam a necessidade de uma estrutura tripartite de sustentabilidade, que inclua dimensões econômicas, sociais e ambientais. Suas descobertas indicam que, apesar de os custos iniciais de construção poderem ser maiores para materiais sustentáveis, o custo de uso a longo prazo pode levar a economias significativas, o que desafia a visão convencional de que edifícios verdes são sempre mais caros.

Bun *et al.* (2022) apresenta uma investigação completa sobre a viabilidade econômica da utilização de materiais reciclados na produção de lajotas de concreto. Os autores enfatizam os benefícios duplos da incorporação de resíduos de concreto como substituto do cimento; eles abordam a relação custo-benefício. O estudo avalia metodicamente as propriedades mecânicas e térmicas do concreto produzido com porcentagens variáveis de agregado de concreto reciclado. As descobertas indicam que a substituição de cimento por resíduos de concreto não apenas melhora certas propriedades mecânicas; também leva a economias de custo significativas. Isso é

particularmente relevante no contexto do aumento dos custos de matéria-prima e da crescente necessidade de práticas de construção sustentáveis.

Um dos *insights* críticos de Bun *et al.* (2022) é a quantificação dos benefícios econômicos derivados do uso de materiais reciclados. Os autores fornecem uma análise detalhada dos custos de produção; demonstram que a incorporação de agregados de concreto reciclado pode reduzir as despesas associadas à aquisição de matéria-prima. Esta avaliação econômica é fundamental para as partes interessadas na indústria da construção, pois oferece um caso convincente para a adoção de materiais mais sustentáveis sem comprometer a qualidade. Além disso, o estudo destaca a importância das estruturas regulatórias e da aceitação do mercado na promoção do uso de materiais reciclados na produção de concreto. Os autores argumentam que, mesmo que as propriedades técnicas dos blocos de concreto não estrutural com conteúdo reciclado sejam promissoras, a aceitação mais ampla na indústria depende da superação das percepções existentes sobre a confiabilidade e o desempenho de tais materiais.

Souza *et al.* (2018) mostraram que a fabricação de 480 mil tijolos ao ano com 80% de substituição do agregado miúdo por resíduos de olaria é um projeto economicamente viável num horizonte de aplicação de cinco anos. A partir destes resultados e de considerar outros cenários com aumento nos custos totais de 5% ou 8%, mantendo constante a receita, o fluxo de caixa apresenta valores positivos do Valor Presente Líquido (R\$ 28.716,52 e R\$ 4.330,81, respectivamente). As taxas internas de retorno (26,90% e 16,87%, respectivamente) são superiores à taxa mínima de atratividade de 15%. Para um horizonte de cinco anos e uma taxa de atratividade de 15%, a utilização desses resíduos apresentou viabilidade econômica com o aumento das receitas e a diminuição de custos, o que acrescenta competitividade à indústria de materiais de construção civil.

Han *et al.* (2022) compararam construção de alvenaria tradicional com impressão 3D. Como o preço do agregado natural é muito mais alto do que o agregado reciclado hoje em dia, o custo dos materiais de construção no mesmo tipo de concreto diminui à medida que a proporção de agregado reciclado aumenta. No geral, os edifícios de concreto impressos em 3D têm vantagens econômicas por volta de 13%

sobre a construção convencional de concreto moldado *in situ* em face de estruturas complexas que precisam de mais melhorias tecnológicas.

Savchuk (2023) introduziu a técnica de opções reais como uma ferramenta de gestão de risco estratégico; ele enfatiza como essa abordagem pode mitigar as limitações dos métodos tradicionais de avaliação financeira. A análise de opções reais oferece uma perspectiva inovadora para a avaliação de investimentos, e isto permite uma análise mais robusta das decisões estratégicas.

Caldarola *et al.* (2024) exploraram a complexidade econômica e a transição para a sustentabilidade; identificam a relação entre medidas de complexidade econômica e indicadores de sustentabilidade. Os autores propuseram meios para investigar a prontidão das estruturas para uma transição sustentável. Eles refletem a crescente intersecção entre análise econômica e sustentabilidade. Indicam ainda que a menor desigualdade de renda, em países de renda média, parece reduzir as barreiras ao desenvolvimento bem-sucedido de tecnologias verdes complexas.

Shaposhnikova (2024) argumenta que o aumento dos custos de matéria-prima pode gerar impactos socioeconômicos, como redução da acessibilidade à moradia, aumento das desigualdades e mudanças nos padrões demográficos. O estudo também relata que a influência nas políticas públicas, a promoção de incentivos à produção local de materiais e o desenvolvimento de tecnologias construtivas mais eficientes são recomendados para enfrentar os desafios impostos pela elevação dos custos de matéria-prima.

Embora tenham se encontrado poucos estudos diretamente voltados à análise econômica de materiais alternativos na construção civil, a literatura oferece bases teóricas e metodológicas relevantes que podem ser adaptadas a essa finalidade. Os trabalhos selecionados contribuem com perspectivas diversas, desde modelos integrados de planejamento e avaliação até análises específicas de custo-benefício e viabilidade de materiais reciclados, o que evidencia o potencial econômico de soluções sustentáveis. Além disso, abordagens inovadoras, como o uso de opções reais e os indicadores de complexidade econômica, ampliam o escopo tradicional da avaliação financeira. Elas oferecem ferramentas mais robustas para a tomada de decisão. Dessa forma, a análise econômica de materiais sustentáveis revela-se não

apenas possível, mas necessária, diante das exigências atuais de competitividade, de eficiência e de responsabilidade ambiental no setor da construção civil.

5.2.2 Avaliação ambiental

Como este trabalho considera os métodos de Avaliação do Ciclo de Vida e da Síntese em energia para quantificar o desempenho ambiental dos sistemas de produção comparados, esta seção se centra nestes dois métodos.

5.2.2.1 Avaliação do ciclo de vida

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que mede quantitativamente o impacto ambiental de um produto ao longo do seu ciclo de vida. Para isso, contabilizam-se os fluxos de matéria e energia que entram e saem dos processos pertencentes ao ciclo de vida do produto. Incluem-se na contabilização as etapas de extração de recursos naturais, de produção, de transporte, de uso e de descarte ou de reaproveitamento. Estes fluxos são convertidos em determinados indicadores de impacto ambiental (por exemplo: potencial de aquecimento global, expresso em quilogramas de dióxido de carbono equivalente). Sob a ótica ambiental, a ACV estabelece inventários, tão completos quanto o possível, dos fluxos associados a um sistema produtivo e permite a comparação de sistemas entre si, sob a forma de impactos ambientais (SOARES *et al.*, 2006).

A ACV é a ferramenta mais aceita para a tomada de decisões com base em um entendimento sistêmico e quantitativo dos potenciais impactos ambientais (OLIVEIRA *et al.*, 2016). Por meio dela, é possível identificar as atividades de um sistema que possuem maior impacto – por exemplo, as etapas de maior consumo de insumos e de geração de resíduos. Isso permite propor ações de melhorias no processo de forma assertiva. Segundo as normas ISO 14040 e ISO 14044, a metodologia de ACV consiste em quatro etapas analíticas distintas: definição do objetivo e escopo, análise do inventário, avaliação do impacto e interpretação dos resultados (ABNT, 2009a, 2009b). Trata-se, ainda, de um processo considerado multidisciplinar, pois sua realização requer conhecimento da área em que será aplicada e do levantamento dos impactos ambientais potenciais, de modo a definir adequadamente os objetivos do sistema analisado.

No contexto da construção civil, a ACV pode ser considerada uma ferramenta confiável para avaliação do desempenho ambiental das edificações. A metodologia pode ser aplicada às tomadas de decisão a fim de aumentar a sustentabilidade na indústria da construção (ORTIZ; CASTELLS e SONNEMANN, 2009). Uma vez que permite a comparação dos impactos ambientais de produtos equivalentes em sua função, a ACV consegue indicar qual opção apresenta potencialmente a melhor relação entre desempenho e impacto ambiental (HABERT *et al.*, 2012; GARCEZ *et al.*, 2018). A ACV permite que a empresa, cujo processo produtivo é estudado, conheça-se melhor, já que proporciona a identificação das etapas mais eficientes e as que podem ser aperfeiçoadas (OLIVEIRA *et al.*, 2016). A Avaliação do Ciclo de Vida é um método que depende do sistema estudado; é importante utilizá-lo com discernimento, além de bom conhecimento das suas vantagens e limitações.

A ACV tradicional realiza uma abordagem do “berço ao túmulo” e pretende avaliar todas as etapas da vida do produto para estimar seus impactos ambientais (CURRAN, 2006). Para que a metodologia seja aplicada de maneira integral, é necessário fazer o mapeamento de todos os fluxos associados ao desenvolvimento do produto. É necessário observá-los por tempo significativo, bem como estimar os impactos futuros resultantes das fases de uso e pós-uso, o que no setor de construção civil envolve muito tempo – entre 50 e 100 anos – e grande incerteza. A demasiada quantidade de medidas e informações necessárias para realizar uma ACV completa torna o método custoso, demorado e complexo (GRAEDEL, 1998).

É comum, então, que grande parte das medidas não seja feita pelo fabricante e seus fornecedores, mas que se baseie em dados previamente publicados ou disponíveis em bancos de dados e em literaturas internacionais. No entanto, o uso de dados secundários é problemático, pois em muitos casos não pode ser considerado representativo nos sistemas estudados. Uma possibilidade para que a ACV resulte em benefícios ambientais reais em larga escala seria a sua popularização, por meio do desenvolvimento de modelos simplificados, ancorados também em declarações ambientais (TAKANO *et al.*, 2015).

Vieira *et al.* (2016) destacaram a importância de considerar resíduos reciclados na fabricação de concretos. Evidenciaram a importância de incorporar resíduos reciclados como matéria-prima desde o início do ciclo de vida dos produtos de

construção civil. O estudo enfatiza que a ACV permite avaliar o impacto ambiental desde a extração da matéria-prima até as fases de produção, uso, descarte e reciclagem. A reutilização de resíduos na produção de novos concretos é vista como uma estratégia fundamental para evitar o descarte inadequado no meio ambiente e promover a circularidade dos materiais. O estudo ressalta a necessidade de mais pesquisas sobre ACV focadas no tratamento e na reutilização de resíduos de construção, visando-se à sua incorporação em novos ciclos produtivos. A abordagem proposta contribui para a gestão dos recursos e para a redução dos impactos ambientais associados à construção civil. Ela promove a transição para sistemas produtivos mais circulares e eficientes

Da Silva *et al.* (2021) estudaram o uso de resíduos plásticos, especialmente PET, em materiais de construção, como concreto, argamassas e pavimentação, utilizando a ACV como ferramenta para avaliar a sustentabilidade desses produtos e processos. O artigo ressalta que a ACV permite quantificar de forma mais precisa os impactos ambientais; torna alternativas baseadas em resíduos plásticos mais sustentáveis. O estudo conclui que a aplicação da ACV é fundamental para aprimorar a sustentabilidade de materiais alternativos na construção civil.

Marsh *et al.* (2023) discutiram sobre a importância da ACV na avaliação ambiental de edifícios; destacaram que a incerteza nos resultados muitas vezes é negligenciada. Isso é especialmente crítico em comparações de alternativas de construção, nas quais decisões podem ser tomadas com base em dados imprecisos. O estudo revisa abordagens, para lidar com incertezas na ACV aplicada à construção civil, e recomenda melhorias na transparência, na qualidade dos dados e na integração de análises de incerteza em softwares de ACV para edifícios.

Mowafy *et al.* (2023) propuseram um *framework* paramétrico baseado em BIM (Modelagem da Informação da Construção) integrado à ACV para quantificar e otimizar os impactos ambientais de edifícios, considerando diferentes cenários de reutilização de materiais. O *framework* avalia emissões incorporadas e operacionais, além de analisar o efeito de diferentes percentuais de materiais reutilizados no projeto. A metodologia inclui módulos de aquisição de dados, avaliação de emissões, otimização e suporte à decisão, fato que permite comparar abordagens convencionais e circulares.

Um estudo de caso em uma residência no Cairo indicou que a abordagem circular, com maior uso de materiais reutilizados, reduz significativamente o potencial de aquecimento global incorporado, mesmo que possa aumentar as emissões operacionais devido a características térmicas dos materiais. O *framework* oferece flexibilidade para projetistas avaliarem e escolherem materiais com base em critérios ambientais. Ele promove a adoção de práticas mais sustentáveis na construção civil.

Chen *et al.* (2022) apresentaram uma revisão sistemática sobre estratégias de economia circular na cadeia de suprimentos da construção civil, com ênfase no uso de ACV e materiais reutilizados. O estudo classifica as estratégias circulares em cinco fases: projeto (incluindo ACV e uso de materiais reutilizados), fabricação, construção, operação/manutenção e fim de vida. Ele destaca que métodos baseados em BIM e ACV são amplamente utilizados para avaliar e otimizar o uso de materiais reutilizados.

Indica, entretanto, que a otimização logística para permitir simbiose industrial ainda é pouco explorada. O estudo também identificou fatores internos (como BIM, IoT e análise preditiva) e externos (certificações, incentivos financeiros e engajamento social) que impulsionam a adoção de práticas circulares. Os autores concluem, dizendo que o *framework* proposto pode auxiliar pesquisadores e profissionais a compreender e a implementar fluxos circulares de recursos. Ele promove a redução de resíduos e de emissões no setor.

Kapica *et al.* (2024) analisaram a viabilidade da implementação do conceito de *zero waste* na construção civil, com foco especial na reutilização de materiais. O estudo destaca que a reutilização de materiais de construção é um tema discutido há mais de 50 anos, mas que sua adoção em larga escala depende da unificação dos sistemas de demolição, de armazenamento e de redistribuição. O trabalho propõe soluções sistêmicas para as três primeiras fases do ciclo de vida de um edifício (projeto, legislação e construção); sugere que políticas públicas e processos educacionais são essenciais para promover a reutilização. O estudo também enfatiza que a análise e a simulação de estoques de materiais em diferentes escalas são fundamentais para racionalizar o processo de reciclagem. A expectativa é a de que a adoção dessas práticas contribua para a descarbonização do setor, para o crescimento de sistemas sustentáveis e a redução dos impactos ambientais dos

edifícios. O estudo reforça a importância de políticas e educação para pôr a cultura da construção civil na direção do reaproveitamento de materiais.

A revisão da literatura no tema indica que a avaliação de Ciclo de Vida (ACV) se apresenta como uma ferramenta importante para a análise e a redução dos impactos ambientais de produtos e processos; oferece uma visão abrangente e quantitativa dos fluxos de matéria e energia ao longo de todo o ciclo de vida. No contexto da construção civil, sua aplicação pode levar a decisões de sistemas mais sustentáveis. Isto orienta a escolha de materiais e processos com menor impacto ambiental. Contudo, a complexidade e os custos envolvidos na coleta de dados podem limitar sua implementação, principalmente devido à dependência de informações secundárias e à incerteza sobre os impactos futuros.

5.2.2.2 Contabilidade ambiental em emergia


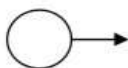
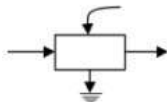
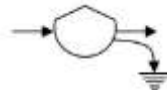
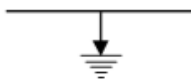
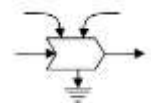
A contabilidade ambiental em emergia, ou sua forma sintética denominada “síntese em emergia”, é uma ferramenta poderosa no estudo dos sistemas ecológicos e em avaliações que buscam sistemas mais sustentáveis. Desenvolvido inicialmente pelo ecólogo americano Howard T. Odum, o conceito de emergia surgiu como uma forma de quantificar o valor de energia usada direta e indiretamente na produção de bens e serviços. A principal inovação dessa abordagem foi considerar a perspectiva do doador em um sistema, com todas as formas de energia que contribuem para sua formação, independentemente de sua origem (ODUM, 1996).

Emergia pode ser definida como a quantidade de energia disponível, direta ou indiretamente necessária para produzir um bem ou um serviço em um determinado sistema (BROWN, ULGIATI, 2010). Em outras palavras, é uma medida de energia "incorporada" que foi transformada e acumulada ao longo do tempo, expressa em termos de emergia solar equivalente (sej). A emergia, portanto, fornece uma medida unificada que permite comparar diferentes formas de energia e recursos em um sistema. Ela leva em consideração não apenas a energia objetivamente empregada, mas também os processos anteriores (memória) que contribuíram para sua geração.

A Tabela 2 apresenta a simbologia padronizada (ODUM, 1996) a ser utilizada na elaboração dos diagramas de energia – incluindo o diagrama da presente dissertação, apresentado na seção de resultados. Essa representação por meio de

símbolos é parte fundamental para a representação do fluxo dos processos com suas respectivas interações. O fato possibilita uma clara visão do sistema de produção e o uso de resíduo de fibra de vidro no qual se aplica a síntese em emergia.

Tabela 2– Simbologia utilizada na elaboração do diagrama de energia Fluxo de energia.

	Fluxo de energia: um fluxo cuja vazão é proporcional ao volume do estoque ou à intensidade da fonte que o produz.
	Fonte: um recurso externo que fornece energia de acordo com um programa controlado externamente (função força).
	Caixa: símbolo de uso múltiplo que pode ser usado para representar uma unidade de consumo e de produção em um sistema maior que representa, assim, um subsistema.
	Estoque: uma reserva energética no sistema, que guarda uma quantidade de energia de acordo com o balanço de entrada e de saída (variáveis de estado).
	Sumidouro de energia: dispersão de energia potencial empregada no sistema. A energia potencial é utilizada para produzir trabalho, e o custo dessa transformação é a degradação da energia, a qual abandona o sistema como energia de baixa intensidade. Todos os processos de interação e os armazenamentos dispensam energia.
	Interação: intersecção interativa de dois fluxos para produzir uma saída em proporção a uma função de ambos ou controle de ação de um fluxo sobre outro.

Fonte: Adaptado de Odum (1996).

A síntese em emergia vem sendo aplicada em sistemas relacionados à construção civil. Demétrio (2012) utilizou a relação emergia pelo PIB para determinar quais unidades da federação levam vantagem nas importações de materiais de construção. Constatou-se, por meio do Indicador de Sustentabilidade (ESI), que alterações no tipo de materiais utilizados em cada projeto, como a substituição de alvenaria de vedação por madeira, levam a um aumento de até 27 vezes no indicador de sustentabilidade de uma construção.

Zhao *et al.* (2020) fizeram uma comparação de sustentabilidade entre concretos ‘verdes’ e concreto tradicional, usando um diagrama ternário de energia. Os autores consideraram três formas de produção de concreto verde: produção de concreto com agregado reciclado, produção de concreto com cinzas volantes e produção de concreto com economia circular. Com a ajuda das linhas auxiliares do diagrama ternário de energia, as três formas de produção de concreto verde e a produção de concreto tradicional são analisadas. Diante dos resultados obtidos, observa-se que o modo de produção de concreto reciclado apresenta um ELR de 4,42; assim, é 81,7% inferior ao do concreto convencional (FAC), o que evidencia uma pressão ambiental significativamente menor.

Thomas e Praveen (2020) realizaram uma análise de energia como uma abordagem que poderia ser usada para regular o uso de recursos para implementar políticas de construção sustentáveis. A área estudada foi escolhida pelo desenvolvimento urbano, e os dados de construção dos últimos 25 anos foram analisados; usou-se a abordagem de energia para avaliar o desempenho ambiental dos edifícios. A relevância dos parâmetros de energia (princípios que poderiam ser usados para regular o uso de recursos para implementar políticas de construção sustentáveis) é bem ilustrada neste estudo. A pesquisa concluiu também que a energia é proposta como uma medida apropriada para tomar melhores decisões ambientais sobre o uso do material. Finalizou ainda que a necessidade de avaliação da renovabilidade em escala de tempo de materiais de construção tem sido destacada não apenas para regular seu uso, como ainda para incorporar novas abordagens de reciclagem/reutilização. A energia foi identificada como uma ferramenta apropriada para regular o consumo de recursos naturais e garantir a adoção de políticas de uso sustentável de materiais no setor de construção.

Zhang *et al.* (2020) fizeram uma análise em energia para avaliar a fabricação de tijolos de argila na China. As principais conclusões são as de que esta análise mostrou que os recursos não renováveis e a energia importada têm um impacto dominante na contribuição de energia (50,6%). Nos recursos não renováveis, a argila é o item mais importante: responde por 33,5% das entradas de energia local. Várias sugestões de políticas foram discutidas para melhorar a sustentabilidade do sistema

avaliado; elas incluem o ajuste da estrutura energética, a substituição de materiais recicláveis e a promoção de sistemas de economia de energia.

Durante o processo de revisão da literatura sobre uso da síntese em emergência aplicada na construção civil, observou-se que a maioria dos estudos envolvendo emergência concentra-se em sistemas nos quais há interação direta com organismos vivos e a presença significativa de recursos biológicos. Esses estudos frequentemente abordam temas, como a criação de peixes em diferentes ambientes e condições, estufas para cultivo de alimentos, manejo de pastagens, entre outros sistemas agrícolas e pecuários. Além disso, muitos trabalhos focam em contextos em que os materiais e operações mantêm uma proximidade com recursos naturais, e isto facilita a avaliação do impacto ambiental e da eficiência energética. Essa predominância pode ser atribuída ao fato de que esses sistemas possibilitam uma análise mais rica das trocas de energia e matéria entre os componentes bióticos e abióticos, aspectos centrais na aplicação da emergência como metodologia de avaliação. De qualquer forma, o método vem sendo aplicado, mesmo que em menores proporções, na área da construção civil, para discutir o desempenho ambiental e a sustentabilidade de diferentes sistemas produtivos e materiais alternativos.

6 MÉTODOS

6.1 Descrição dos sistemas estudados

De acordo com a teoria geral dos sistemas (TGS), um sistema produtivo é um conjunto de elementos interdependentes que trabalham em associação para atingir um objetivo comum. Esse tipo de sistema é composto por entradas, processos de transformação e saídas. Tendo isso em mente, este estudo considera diferentes abordagens que se complementam para dar respostas focadas em diferentes partes do sistema. Precisamente, três processos produtivos são estudados sob a perspectiva da análise de ciclo de vida (ACV), da síntese em emergia (SE) e de indicadores clássicos sobre viabilidade econômica. Os três processos produtivos avaliados são:

- 1) Processo de fabricação tradicional de reservatório em fibra de vidro;
- 2) Processo de fabricação tradicional de blocos de concreto não estrutural;
- 3) Processo de fabricação alternativo de bloco de concreto não estrutural, com a adição de resíduos de fibra de vidro.

Cada um destes três sistemas é apresentado separadamente nos itens a seguir e podem ser considerados representativos para qualquer região com expansão urbana.

6.1.1. Processo de fabricação tradicional de reservatório em fibra de vidro

A Figura 2 (A) apresenta o produto principal da saída do sistema de produção de reservatórios de água, o que, uma vez finalizado, segue para o mercado da construção civil. Já a Figura 2 (B) mostra os resíduos gerados no processo de fabricação dos reservatórios, o que, mesmo minimizado, representa em torno de 10% do volume processado em peso. Todas as informações deste sistema foram obtidas *in loco*, em visitas técnicas; logo, elas são dados primários.



Figura 2: (A) Reservatório de água fabricado com fibra de vidro. (B) Resíduos gerados na fabricação de reservatórios de fibra de vidro.

A Figura 3 representa de forma simplificada um processo de fabricação de reservatórios em fibra de vidro, enquanto a Tabela 3 apresenta o consumo médio de matérias primas e a quantidade gerada de resíduos de fibra de vidro. Como entradas, incluem-se matérias-primas como resina, fibra de vidro, catalisador, *gel coat*, entre outros materiais auxiliares, além de equipamentos, energia elétrica e mão de obra.

Em relação aos processos envolvidos, tudo se inicia com a preparação do molde do reservatório e a aplicação da camada de *gel coat*. A resina de fibra de vidro é misturada ao catalisador e forma uma massa líquida. Em seguida, a massa é aplicada no molde e submetida a um processo de cura, no qual a resina endurece, adquire forma sólida. Finalmente, as saídas desse processo incluem os reservatórios de fibra de vidro, prontos para transporte e uso, e resíduos industriais de fibra de vidro, com resinas oriundas da fabricação, destinadas a aterro sanitário.

Os resíduos somam 42,6 toneladas por ano, para uma produção de 635 toneladas/ano em reservatórios para o mercado. O item 'serviços', representado por uma fonte na Figure 2, é apresentado em detalhes na seção de resultados; ele representa a soma dos custos (valores de mercado) de todos os itens materiais e de energia utilizada na fabricação do reservatório de fibra de vidro, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Valores de consumo do processo de fabricação de reservatório em fibra de vidro e geração de resíduos.

Item	Quantidade/ano	Unidade
Entrada		
Fibra (<i>Roving</i>)	4,32E+05	kg
Resina	1,73E+05	kg
Catalizador	3,76E+02	kg
<i>Gel coat</i>	7,26E+04	kg
Eletricidade	4,66E+04	kW
Mão de obra	2,16E+05	R\$
Saída		
Resíduos de fibra de vidro	4,26E+04	kg
Produtos para o mercado	6,35E+05	kg

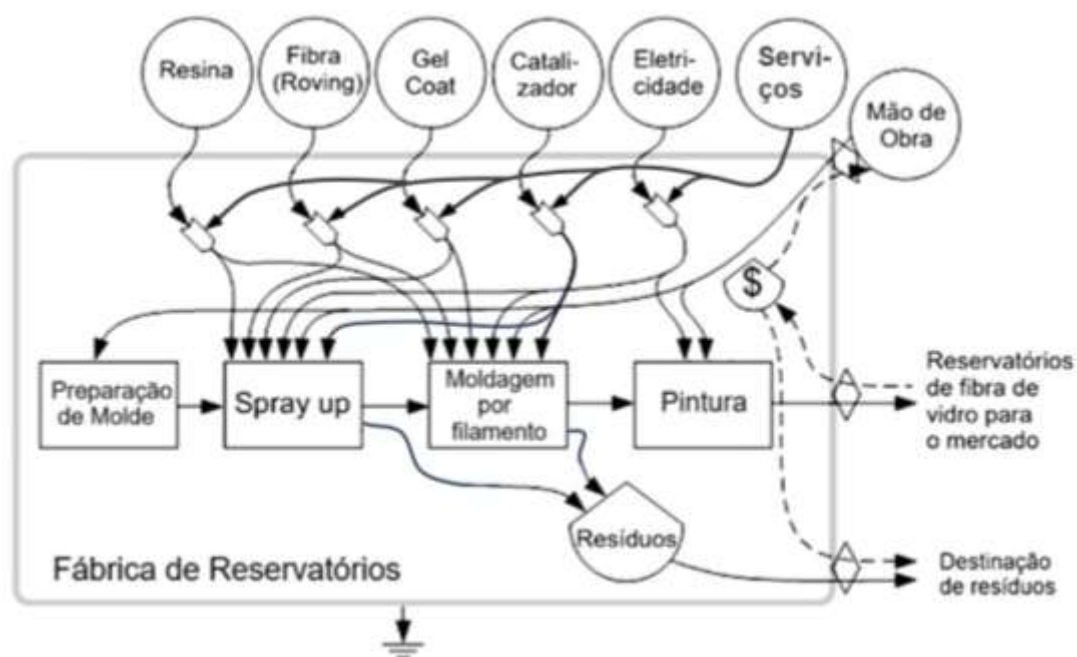


Figura 3. Processo produtivo do reservatório de fibra de vidro.

Destaca-se o fluxo do resíduo da Figura 3 como saída de coproduto do sistema como resíduo, e afirma-se que ele tem como destino o aterro sanitário de Mauá, em São Paulo. Em visita *in loco*, foram obtidas informações primárias de operação, entre

elas a de que se recebem resíduos sólidos das cidades de Mauá, Ribeirão Pires, Rio Grande da Serra, São Bernardo do Campo, Praia Grande e São Vicente, entre outras localidades.

Os resíduos urbanos, industriais e de movimentação de terra são alocados no mesmo local sem tratamento prévio. Já os resíduos hospitalares e classificados com infectantes passam por um processo de esterilização e, em seguida, segue o mesmo destino. Todos os resíduos, portanto, se misturam no depósito do aterro que ainda conta com uma usina de biogás que coleta e transforma aproximadamente 1/3 do gás gerado no aterro em energia elétrica. Esta eletricidade não é consumida diretamente pelo aterro; é distribuída em 100% de sua geração para a companhia de eletricidade que possui contrato comercial firmado. Para a geração de chorume, o aterro possui instalação que coleta e trata aproximadamente ~25,2 metros cúbicos por dia antes do despejo no rio. Por dia, este aterro sanitário recebe um volume de aproximadamente ~3.500 toneladas em resíduos.

6.1.2 Processo de fabricação tradicional de blocos de concreto não estrutural

A Figura 4 apresenta o bloco de concreto tradicional avaliado neste estudo. Especificamente, os blocos na figura se encontram em um pátio de uma fábrica de blocos, onde ficam por um período em secagem ao sol, em seu processo final de cura. Já a Figura 5 representa um processo padrão de fabricação de blocos de concreto não estrutural para a construção civil, enquanto a Tabela 4 apresenta o consumo médio de matérias primas para a produção de 1.980 toneladas de blocos de concreto não estrutural por ano.

Como entradas no sistema produtivo tem-se cimento, agregados (como pedrisco e pó de rocha), água, moldes, equipamentos de mistura e compactação, mão de obra e energia elétrica. O processo de transformação começa com a dosagem correta dos materiais, como o cimento, os agregados e a água, que são em seguida misturados. A mistura é então transportada e colocada nos moldes, que podem ter diferentes formatos e tamanhos, e é compactada para garantir a uniformidade e a resistência do bloco. Os blocos são deixados no pátio a céu aberto para curar e secar (Figura 4). As saídas desse processo são os blocos de concreto não estrutural prontos

para uso na construção. Eles são removidos dos moldes, estocados secagem e preparados para transporte e venda.

Tabela 4. Valores de consumo do processo produtivo de bloco de concreto tradicional.

Item	Quantidade/ano	Unidade
Entradas		
Pedrisco	9,14E+05	kg
Pó de pedra	9,14E+05	kg
Cimento Portland (CPIV)	1,52E+05	kg
Água (rede)	1,16E+03	kg
Energia Elétrica	1,21E+ 04	kWh
Mão de obra	1,06E+04	h
Saídas		
Blocos Produzidos	1,98E+6	Kg



Figura 4: Pátio da fábrica de blocos de concreto não estrutural.

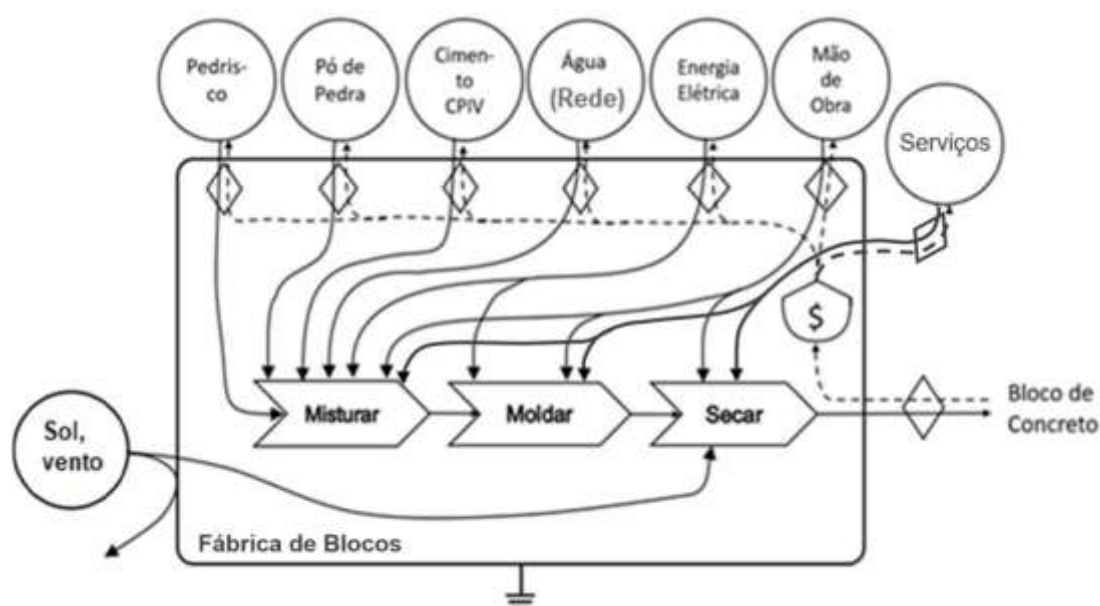


Figura 5. Processo produtivo de bloco de concreto tradicional.

6.1.3 Processo de fabricação alternativo de bloco de concreto não estrutural com a adição de resíduos de fibra de vidro

A Figura 6 apresenta o processo proposto de fabricação de blocos de concreto não estrutural para a construção civil, utilizando resíduos de fibra de vidro. Observa-se que os resíduos são desviados e entram agora como matéria prima para a fabricação de blocos de concreto. Inicialmente, os resíduos de fibra de vidro são destinados à operação de moagem de blocos não conformes e triturados juntos.

Como próxima etapa, tem-se a integração na operação de mistura de matérias-primas, início da operação de fabricação dos blocos de concreto não estrutural. A Tabela 5 apresenta o consumo médio de materiais e energia. Neste processo, mantêm-se os materiais de entrada, transformações e saídas da Figura 5; porém, agora estão adicionados os resíduos de fibra de vidro. Estes resíduos substituem a mesma quantidade em massa de pedrisco, em pó de pedra e em cimento Portland IV em 10%.

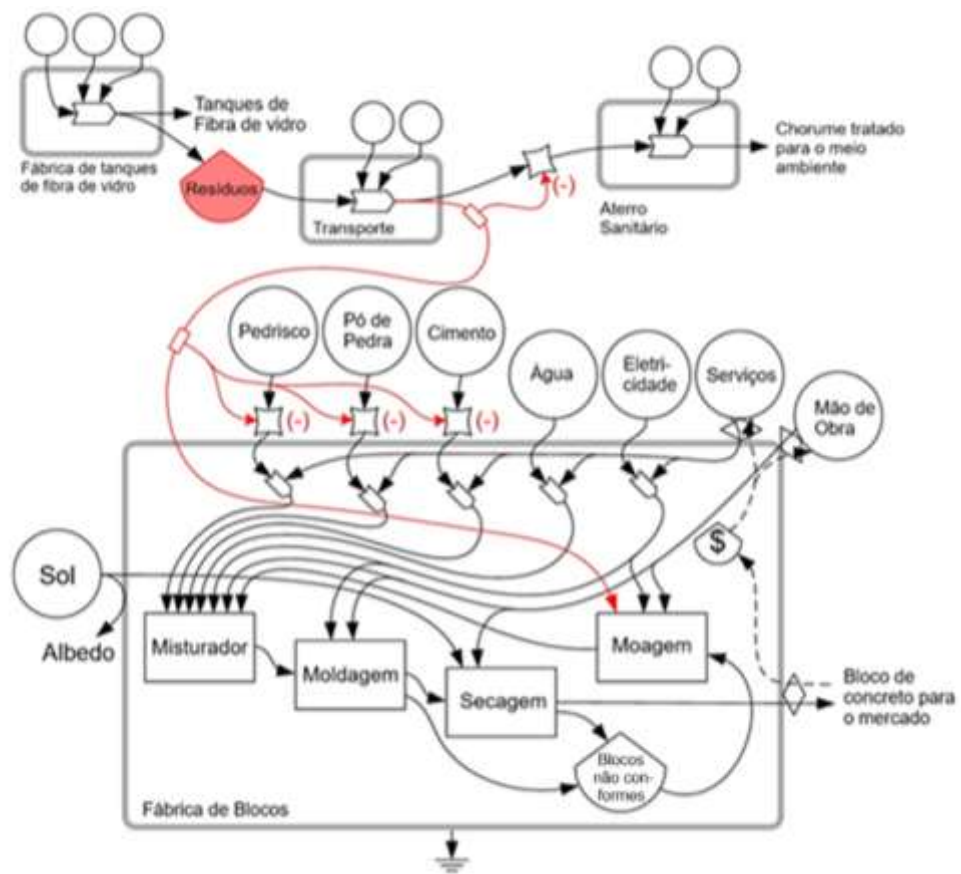


Figura 6. Processo produtivo proposto de fabricação de bloco de concreto não estrutural com resíduos de fibra de vidro.

Tabela 5. Valores de consumo do processo produtivo proposto de fabricação de bloco de concreto com resíduos de fibra de vidro.

Ítem	Quantidade (Unidade/ano)	Unidade
Entradas		
Pedrisco	8,23E+5	kg
Pó de rocha	8,23E+5	kg
Cimento Portland (CPIV)	1,37E+5	kg
Água	1,16E+2	kg
Eletricidade	1,21E+4	kW
Mão de Obra	3,70E+5	R\$
Resíduo de fibra de vidro	1,98E+5	kg
Saídas		
Blocos Produzidos	1,98E+6	kg

6.2 Produção dos corpos de prova

A fabricação dos blocos de concreto utilizados como corpos de prova ocorreu em uma empresa do setor cimentício localizada na Estrada do Sapopemba, no município de Ribeirão Pires. Após a moldagem, os blocos foram mantidos no pátio da empresa para o processo de cura. Foram produzidos blocos de concreto com quatro diferentes tratamentos, além do bloco de referência. Cada condição experimental foi replicada 18 vezes; totalizaram-se 90 corpos de prova, utilizados exclusivamente para o ensaio mecânico de compressão. Os corpos de prova foram categorizados da seguinte forma:

Tipo 1 (Referência) – Sem adição de resíduo polimérico reforçado com fibra de vidro (0%);

Tipo 2 – Adição de 2,5% do resíduo polimérico reforçado com fibra de vidro;

Tipo 3 – Adição de 5% do resíduo polimérico reforçado com fibra de vidro;

Tipo 4 – Adição de 7,5% do resíduo polimérico reforçado com fibra de vidro;

Tipo 5 – Adição de 10% do resíduo polimérico reforçado com fibra de vidro.

Foram utilizadas estas porcentagens devido a uma pesquisa realizada com bloco similares por Portela *et al* (2020), mas com blocos padrão de largura de 09cm (conhecido como 'bloco de 10'), com 2 elementos vazados.

6.2.1 Cura

Com o objetivo de minimizar a retração causada pela perda de água do concreto, optou-se, neste estudo, pela aplicação da cura úmida conforme ABNT NBR 6136:2022, que consistiu na manutenção dos blocos constantemente umedecidos por um período de 28 dias. Esse procedimento se mostrou fundamental para garantir uma hidratação adequada do cimento, especialmente durante a fase em que essa reação ocorre com maior intensidade. Essa abordagem está coerente com o que acontece na prática normal do dia a dia.

6.2.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão é o teste mecânico principal em um bloco, já que os esforços, depois de assentados, resulta uma força vertical de compressão. De acordo com a norma NBR 12118 (ABNT, 2013), antes da realização do ensaio de ruptura dos corpos de prova, as faces dos blocos foram submetidas a um capeamento com uma mistura de água e cimento, respeitando-se a proporção de 0,34. Esse procedimento visou a garantir a uniformidade da superfície de contato durante o teste. A espessura dessa camada de regularização não poderia ultrapassar 3 mm, pois variações além desse limite poderiam comprometer a precisão dos resultados do ensaio de resistência à compressão.

A mesma resistência à compressão é um dos atributos mais relevantes dos blocos de concreto, uma vez que ela determina a capacidade do bloco de suportar diferentes tipos de cargas. Essas cargas incluem tanto as provenientes do manuseio e do transporte dos blocos, quanto aquelas advindas do assentamento e do desempenho estrutural em edificações que utilizam blocos com essa finalidade. O não cumprimento dos requisitos mínimos estabelecidos pelas normas técnicas pode comprometer a estabilidade das alvenarias. O fato resulta manifestações patológicas, como rachaduras, que representam riscos à segurança das construções.

No presente estudo, optou-se por não realizar novamente os ensaios de condutividade térmica, microscopia estereoscópica, análise microestrutural e absorção de água, uma vez que tais propriedades já foram amplamente analisadas por Portela *et al.* (2020), utilizando materiais e metodologia compatíveis com os adotados nesta pesquisa. Os resultados obtidos por esses autores foram validados por critérios técnicos rigorosos e amplamente aceitos pela comunidade científica, o que demonstra a confiabilidade dos dados gerados.

Além disso, o interesse principal deste capítulo reside na validação da resistência à compressão dos blocos de concreto nas dimensões e nas formas diferentes dos autores mencionados, o que foi realizado no chamado “bloco de 10” e que poderia trazer diferentes resultados ao que foi realizado com “bloco de 15”. Considerando a similaridade entre os componentes utilizados e a finalidade do material, a repetição dos ensaios supracitados não se mostra necessária,

procedimento que evita redundâncias experimentais e otimiza os recursos disponíveis para a investigação. Portanto, a adoção dos dados previamente consolidados por Portela *et al.* (2020) é metodologicamente válida e contribui para a objetividade da pesquisa e permite concentrar esforços na variável de interesse principal: a resistência mecânica do bloco desenvolvido.

Os testes de compressão foram conduzidos no laboratório da Faculdade de Tecnologia de Mauá. Para cada tratamento e para a amostra de referência, foram testadas nove repetições, o que totalizou 45 blocos analisados. A Figura 7 apresenta uma ilustração do ensaio de resistência à compressão.



Figura 7: Teste de compressão.

Os ensaios de compressão foram realizados quando os blocos atingiram a idade de 28 dias. O teste de resistência à compressão seguiu as diretrizes da norma NBR 12118 (ABNT, 2013) e foi conduzido em uma máquina universal de ensaios, equipada com duas placas lisas – uma fixa e outra móvel. Durante o procedimento, os corpos de prova foram cuidadosamente posicionados entre essas placas e submetidos à compressão de forma controlada. A carga foi aplicada na direção do esforço a que os blocos devem resistir em sua utilização prática, ou seja, sempre em perpendicular ao seu comprimento e sobre a face projetada para o assentamento. A taxa de aplicação da carga foi determinada com base na área da seção transversal do corpo de prova (produto entre comprimento e largura) e ela resulta um carregamento progressivo de 1,5 kN/s.

Como apresentado no Gráfico 1, os blocos de concreto padrão tiveram maior resistência em relação às misturas feitas com substituição parcial de resíduo PRFV.

A porcentagem com substituição de 2,5% teve tensão de ruptura nominal de 3,92 Mpa; 5,0% tiveram tensão de ruptura nominal de 4,01 Mpa; 7,5% tiveram tensão de ruptura nominal de 3,93 Mpa; 10,0%, tensão de ruptura nominal de 4,09 MPa. Nota-se que houveram diferenças significativas comparadas ao padrão. O valor mínimo em norma é de 3,0 Mpa.

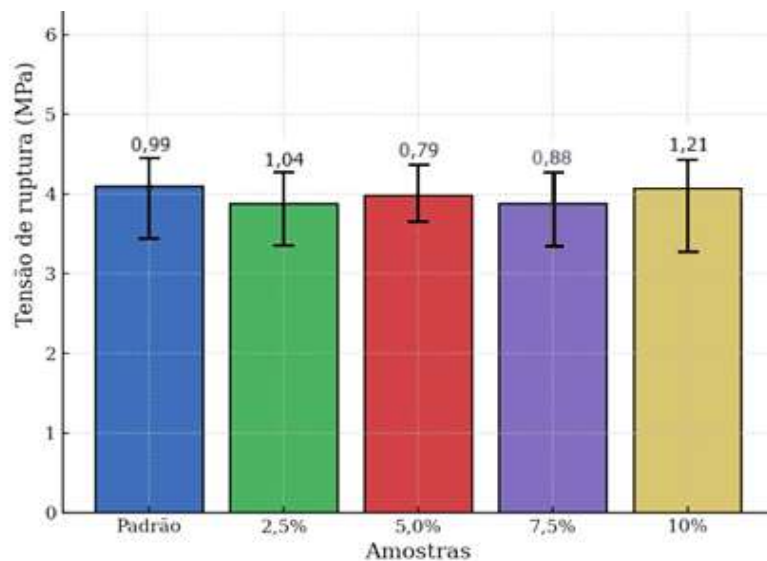


Gráfico 1: Resultados de teste de compressão dos blocos alternativos de concreto não estrutural feitos com adição de resíduos poliméricos de fibra de vidro em diferentes proporções (%) de mistura.

6.3 Geolocalização do cluster

Clusters industriais são aglomerações geográficas de empresas de um mesmo setor ou de setores relacionados, que compartilham recursos, conhecimentos e fornecedores. Segundo Porter (1998), essas concentrações geram vantagens competitivas, tais como o aumento da eficiência produtiva, a inovação tecnológica e o desenvolvimento de competências especializadas. A formação de *clusters* de fábricas de blocos e caixas de água de fibra de vidro pode ser atribuída a diversos fatores. Entre eles, destacam-se

- Proximidade de matérias-primas: a fibra de vidro é o principal componente desses produtos, e a proximidade de fornecedores desse material pode reduzir custos de transporte e aumentar a eficiência logística das empresas (Ngwaka *et al.*, 2023).

- Troca de conhecimento: a concentração de empresas do mesmo setor e de setores complementares facilita a troca de informações técnicas e melhores práticas de produção; estimula a inovação e o aprimoramento dos processos produtivos (Rattle *et al.*, 2023).
- Economias de escala: a presença de um grande número de empresas em uma mesma região pode resultar economias de escala na produção e na distribuição, o que reduz os custos unitários e aumenta a competitividade das empresas (Muhlbacher *et al.*, 2024).

O estudo desenvolvido nesta dissertação concentra-se na geolocalização de um *cluster* localizado na região do Grande ABC, uma área estratégica na Região Metropolitana de São Paulo. A Figura 8 representa a região composta pelos municípios de Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul, Diadema, Mauá, Ribeirão Pires e Rio Grande da Serra. Essa região destaca-se pelo forte avanço da sua urbanização (uma fronteira da urbanização), além da presença industrial e da sua proximidade com os principais centros logísticos e econômicos do estado. A localização oferece fácil acesso a matérias-primas e a insumos industriais; facilita ainda a distribuição de produtos acabados para outras regiões e para o exterior, devido à sua integração com rodovias e sua proximidade com o porto de Santos.

A escolha dessa área como foco do estudo deve-se à sua infraestrutura desenvolvida e à concentração de empresas do setor de construção civil, o que cria um ambiente favorável à inovação. A proximidade entre os agentes envolvidos no processo produtivo e o fácil acesso à tecnologia desempenham um papel importante no desenvolvimento de soluções como a substituição de materiais na produção de blocos de concreto não estrutural. De qualquer forma, as abordagens e as ferramentas consideradas neste estudo podem ser aplicadas em qualquer outra região que tenha as características de expansão urbana.



Figura 8. Região chamada grande ABC. Fonte: Adaptado de agenciaabc.com.br

Ao considerar as empresas fabricantes de reservatórios de fibra de vidro, empresas estas geradoras de resíduos que são destinados ao aterro sanitário, foi possível elencar 10 empresas com distâncias diferentes em suas rotas até o aterro na Figura 9 e na Tabela 6, com distância média precisada em 23,4 Km. Por indisponibilidade de dados específicos de outras empresas e por similaridade do porte e dos processos industriais, não foi considerado um estudo de centro de gravidade dos fluxos de resíduos. Adotou-se o valor de resíduos gerados pela empresa “A” na Tabela 6, em que se obtiveram dados primários *in loco* e se considerou o mesmo valor para as demais empresas do segmento presentes neste estudo.

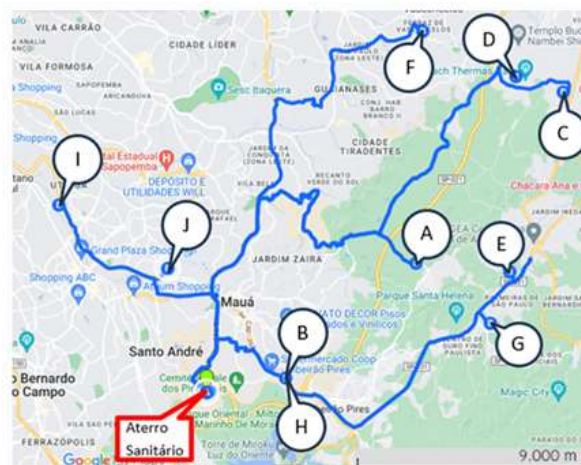


Figura 9. Cluster regional de empresas (A a J), fabricantes de reservatórios para a construção civil. Região do município de Mauá, Ribeirão Pires e proximidades.

Tabela 6: Distâncias entre as empresas geradoras de resíduo de fibra de vidro até o aterro sanitário da cidade de Mauá (SP).

Empresas Fibra de Vidro	Distância até o aterro (km)
A “Mk”	23,5
B “Brl”	11,5
C “AGA”	38,5
D “AV”	36,0
E “ELGI”	28,5
F “MFB”	28,5
G “Math”	27,0
H “NEL”	11,5
I “EG”	17,0
J “ST”	12,0
Média	23,4

Quanto ao município de Santo André, apesar de fazer parte da região metropolitana denominada “Grande ABC”, ficou de fora do estudo, pois o município possui aterro sanitário próprio. Sendo assim, os resíduos gerados nesta cidade não são destinados ao aterro sanitário na cidade de Mauá, que atende as demais cidades do *Cluster*.

Para o cenário em que se transporta o resíduo de fibra de vidro até uma fábrica de blocos (Figura 10), utilizou-se da técnica logística do vizinho mais próximo. O resultado mostra uma distância média de 9,85 km (Tabela 7).

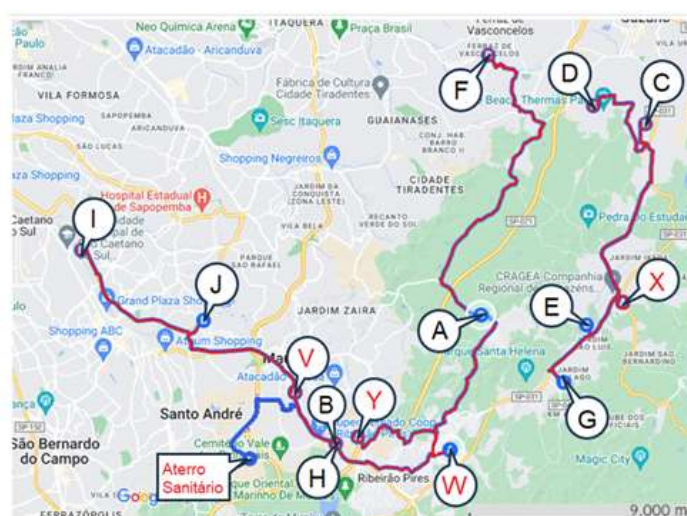


Figura 10. *Cluster* regional de empresas fabricantes de reservatórios para a construção civil e fabricantes de blocos. Região do município de Mauá, Ribeirão Pires e proximidades.

Tabela 7: Distâncias entre as empresas geradoras de resíduo de fibra de vidro e empresas fabricantes de blocos de concreto não estrutural.

Trajetos Empresas de Blocos de concreto não estrutural - Empresas de reservatórios em fibra de vidro	Distância da fábrica de reservatórios – Vizinho mais próximo (km)
V - B	3,0
W- A	9,0
X - C	10,5
X - D	14,0
X - E	3,0
X - G	6,5
Y - F	29,0
V - I	13,0
V - J	7,5
V - H	3,0
Média	9,85

Observa-se uma redução na quilometragem percorrida quando se destina a mesma quantidade de resíduo para a fabricação de blocos, em comparação ao envio para o aterro sanitário — 23,4 km, conforme apresentado na Tabela 7, o que representa uma diminuição de aproximadamente 58% no percurso.

Considerando a geração total de 426 toneladas de resíduos em 2025, esse volume não seria suficiente para suprir todas as fábricas de blocos, adotando-se uma taxa de incorporação de 10%. No entanto, ao adotar uma proporção de 5% de resíduos agregados, seria possível atender a demanda de todas as unidades produtoras do *cluster*.

6.4. Avaliação Econômica

A viabilidade econômica de um processo produtivo industrial é basilar para o sucesso de uma organização. Neste estudo, considera-se que as instalações fabris já estão em pleno funcionamento. Portanto, não haveria alterações quanto a maquinário, ou contratações de mão de obra. Mantêm-se, assim, os mesmos custos fixos já praticados por cada fábrica. As alterações pertinentes são somente as dos custos variáveis, referentes à matéria-prima empregada em comparação ao cenário#1 e ao cenário#2.

Segundo Dias *et al.* (2021), a análise criteriosa dos aspectos financeiros é essencial antes de implementar um novo processo ou promover melhorias em um já existente. Tal análise permite avaliar se os benefícios gerados serão capazes de superar os custos envolvidos.

A identificação e a quantificação dos custos são etapas cruciais na análise de viabilidade econômica. Conforme Azevêdo *et al.* (2020), é necessário considerar tanto os custos diretos, como matérias-primas, mão de obra e energia, quanto os custos indiretos, como manutenção de equipamentos e despesas administrativas. A compreensão clara dos custos envolvidos proporciona uma visão abrangente do investimento necessário e de seu impacto financeiro ao longo do tempo.

Segundo De Lima *et al.* (2018), a análise de cenários permite considerar variações nos custos, nas receitas e em outras variáveis; ela identifica potenciais riscos e desenvolve estratégias para os mitigar. A viabilidade econômica de um processo produtivo industrial é essencial para a tomada de decisões estratégicas e o sucesso organizacional. A análise criteriosa dos custos, das receitas e o uso de indicadores financeiros fornecem uma base sólida para avaliar a rentabilidade e para maximizar o retorno do investimento. A análise de sensibilidade contribui para a compreensão dos riscos envolvidos e para a adaptação às mudanças.

6.5 Avaliação Ambiental

6.5.1 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

Avaliação do ciclo de vida (ACV) é um método utilizado para avaliar o impacto ambiental da produção e o uso de bens e serviços. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2020) define a avaliação de ciclo de vida como “uma ferramenta para avaliar, de forma holística, um produto ou uma atividade durante todo seu ciclo de vida”. Segundo a Norma ISO 14040, de 2006, o ciclo nada mais é do que os impactos causados ao meio ambiente durante a história do produto, desde a fase de extração das matérias primas, passando pelas fases de produção, de distribuição, de consumo, incluindo a de destino final após o uso. Por exemplo, quando se avalia o impacto ambiental de um processo produtivo, que é um dos itens que compõem o

inventário deste estudo, deve-se considerar não somente a poluição de emissões ambientais. Também se consideram os possíveis danos causados ao meio ambiente, inerentes ao processo de fabricação do reservatório e a seu descarte como destino em aterros.

Neste estudo, serão considerados, como indicadores da ACV, o potencial de aquecimento global (GWP, em $\text{kgCO}_2\text{-eq./tonbloco}$), o consumo de combustível fóssil ($\text{kg}_{\text{oil-eq./tonbloco}}$) e a transformação natural da terra (NLTP, em $\text{m}^2/\text{tonbloco}$). Estes indicadores foram escolhidos devido à sua forte relação com os sistemas avaliados de produção de blocos de concreto não estrutural, utilizando-se fibras de vidro. O método de ACV aplicado é o Recipe Midpoint(H), com fatores de conversão disponíveis no Ecoinvent Database.

6.5.2. Síntese em energia (SE)

A metodologia da síntese em energia envolve a quantificação dos fluxos de energia que entram e saem de um sistema, bem como a análise da eficiência e da sustentabilidade desses fluxos. Conforme explicado por Brown *et al.* (2004), a análise em energia permite avaliar a contribuição de diferentes fontes de energia e recursos para a produção de bens e serviços. Permite identificar oportunidades de melhorias na eficiência e no uso sustentável dos recursos. Conforme argumentado por Odum (1996), a análise em energia permite avaliar os impactos diretos de determinadas atividades, os efeitos indiretos e os custos ocultos associados a essas atividades. De acordo com Brown (2015), a abordagem em energia possibilita uma análise comparativa mais objetiva e mais quantitativa; ela reduz a subjetividade e os vieses na avaliação de sistemas complexos.

Segundo Odum e Odum (2000), a análise em energia tem sido utilizada para avaliar o desempenho ambiental de sistemas de produção agrícola, a eficiência energética de processos industriais e a sustentabilidade de políticas de desenvolvimento urbano, entre outras avaliações. A utilização da síntese em energia como método de avaliação de sistemas complexos é justificada pela sua capacidade de fornecer uma visão integrada e abrangente dos fluxos de energia e dos recursos em um determinado sistema. A síntese em energia, aplicada neste estudo para avaliar o processo produtivo de fabricação de blocos de concreto não estrutural com

a utilização de resíduos de fibra de vidro, é uma metodologia que tem sido utilizada em vários outros sistemas. Por isso, a vemos na agricultura (AGOSTINHO *et al.*, 2008; BROWN; CAMPBELL, 2007; GIANETTI; BARELLA; ALMEIDA, 2006), nos centros urbanos (PULSELLI *et al.*, 2008), na construção civil (DE CARVALHO MOREIRA; KOWALTOWSKI, 2009), na bacia hidrográfica (AGOSTINHO; AMBROSIO; ORTEGA, 2010), para avaliar o desempenho do hidrogênio na comparação com outros combustíveis em ônibus urbanos (AGOSTINHO *et al.*, 2023), entre outros trabalhos.

No âmbito da contabilidade em emergia, torna-se fundamental a definição e a compreensão das Unidades de Valor Emergético (UEVs). As UEVs são coeficientes de transformação que permitem converter diferentes tipos de fluxos — materiais, energéticos ou monetários — em uma unidade comum, o *solar emergy joule* (seJ). Essa conversão permite viabilizar a comparação entre recursos de naturezas distintas, uma vez que cada UEV expressa a quantidade de energia solar previamente investida nos processos que tornam determinado recurso disponível. Assim, além de promover a conversão entre unidades físicas distintas, as UEVs incorporam a memória energética dos sistemas, refletindo todo o esforço ambiental acumulado ao longo das cadeias produtivas e dos processos ecológicos.

Na avaliação da síntese em emergia, os recursos necessários para seus respectivos processos em um determinado sistema classificam-se em três categorias: recursos da natureza que são renováveis (R), recursos da natureza que não são renováveis (N) e recursos provenientes da economia (F). Os recursos F são subdivididos em quatro categorias: materiais renováveis (MR), materiais não renováveis (MN), serviços renováveis (SR) e serviços não renováveis (SN). O sol e o vento são exemplos de recursos naturais renováveis (R), que estão sempre disponíveis na natureza. Existem situações em que um recurso renovável passa a ser não renovável, e essa condição ocorre quando a taxa de utilização supera sua reposição natural. A água de poços artesianos é um exemplo de recurso renovável que passa a ser não renovável pela inviabilidade de sua renovação (BRAGA, 2002). Os recursos não renováveis (N) são aqueles cujo consumo é mais rápido que a capacidade do meio ambiente de renovação, como, por exemplo, os combustíveis fósseis que, uma vez utilizados para cumprir suas funções, estão totalmente impossibilitados de se renovar. Os recursos (F) são aqueles provenientes da economia; estão associados aos bens de serviços ou aos recursos não renováveis,

provenientes de outras regiões fora dos limites do sistema estudado, e sua obtenção incorre em custos econômicos. A Figura 11 apresenta o diagrama de fluxos em energia, no qual estão refletidos todos os fluxos de recursos necessários para a obtenção de um produto ou de um serviço (ODUM, 1996).

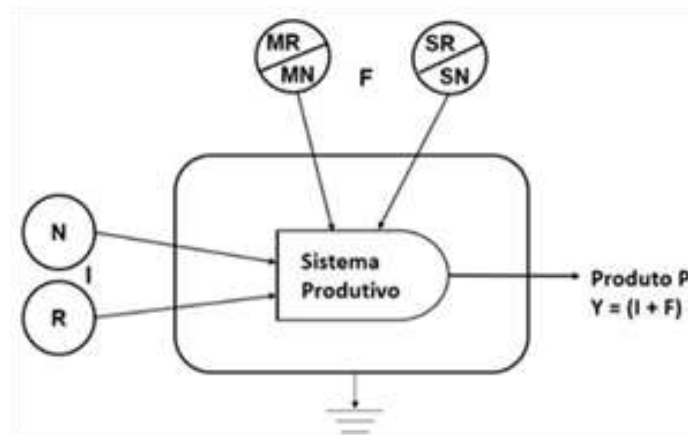


Figura 11– Diagrama simplificado que mostra os principais fluxos considerados na síntese em energia. Legendas: I, recursos da natureza; R, recursos renováveis; N, recursos não renováveis; F, recursos da economia; MR, materiais renováveis; MN, materiais não renováveis; SR, serviços renováveis; SN, serviços não renováveis

A seguir encontram-se os três indicadores de síntese em energia (SE) que serão utilizados neste estudo. Esses indicadores são empregados para avaliar os impactos globais do sistema a montante, isto é, serão consideradas as influências e os efeitos das operações e dos processos que antecedem o sistema de interesse, com base na lógica da análise de energia. Diferentemente dos indicadores tradicionais em energia, os utilizados neste estudo melhor refletem o desempenho dos sistemas e os objetivos deste estudo. Detalhes dos indicadores são

- **Benefício em energia (Y benefício):** este indicador é definido pela fórmula $Y_{\text{benefício}} = Y\#1 - Y\#2$, na qual Y#1 se representa o valor da energia do cenário ou condição de referência (neste caso do sistema alternativo de produção de blocos de concreto), enquanto Y#2 se refere ao valor em energia de uma condição comparativa (neste caso do sistema tradicional). Assim, Y benefício permite calcular a vantagem em energia de uma condição sobre outra, informando sobre a economia ou o ganho em energia em contextos distintos.

- *Emergy Cost-Benefit Ratio* (ECBR): representado pela expressão $ECBR = \text{Emergy Saved} / Y$, o ECBR reflete a proporção entre a emergia economizada em um cenário específico e o valor total de emergia para o mesmo cenário. Esse índice é particularmente útil para avaliar a viabilidade do investimento em emergia em termos de retorno, uma vez que valores mais altos indicam maior economia relativa. Especificamente, o *Emergy Saved* se refere à emergia economizada por não mais ter que usar o aterro sanitário e pela economia de matérias-primas na produção de blocos pela substituição parcial da massa cimentícia por resíduos de fibra de vidro. Já o *Y* se refere à emergia demandada pelo cenário de produção de blocos alternativos.
- Eficiência Global (η_{global}): definida pela razão $Y/Output$, a eficiência global é um indicador de desempenho que expressa a proporção entre a emergia de entrada e a saída do sistema. Trata-se do inverso da UEV. Esse índice busca capturar a eficiência sistêmica geral, evidenciar quanto do input é efetivamente transformado em output.

Em um estudo de síntese em emergia, a escolha dos indicadores a ser utilizados é fundamental para a avaliação adequada do sistema em análise. Os indicadores tradicionais, como %R (percentual de recursos renováveis), EYR (*Emergy Yield Ratio*), ELR (*Environmental Loading Ratio*) e ESI (*Emergy Sustainability Index*), são amplamente aplicados em estudos de emergia para mensurar a sustentabilidade e o desempenho ambiental de sistemas produtivos. No entanto, a decisão de não os utilizar em determinados contextos pode ser justificada pela especificidade dos sistemas avaliados e pelos objetivos do estudo. No caso deste estudo, em que se compara a produção de blocos de concreto não estrutural com e sem a utilização de resíduos de fibra de vidro, os indicadores tradicionais foram substituídos por outros, como o Ybenefício, o ECBR *Emergy Cost-Benefit Ratio* (CHEN *et al* 2011) e a η_{global} (eficiência global), devido a algumas razões específicas:

Natureza do sistema avaliado: os sistemas avaliados, tanto no cenário tradicional, quanto no alternativo (com simbiose industrial), são altamente dependentes de insumos provenientes da economia (recursos comprados) e distantes de fontes naturais de recursos renováveis e não renováveis. Dado que esses sistemas operam

em um contexto urbano-industrial, a relevância de indicadores como o %R, que mede a proporção de recursos renováveis, e o ESI, que relaciona a capacidade de suporte ambiental e a carga ambiental, se torna limitada. A ausência de uma clara divisão entre fontes renováveis e não renováveis de recursos naturais justifica a escolha de indicadores que melhor se ajustem à natureza dos fluxos de energia e a materiais dentro do sistema.

Objetivo do estudo: O foco central deste estudo foi a avaliação de ganhos ambientais e econômicos a partir da incorporação de resíduos de fibra de vidro na produção de blocos de concreto não estrutural no conceito de simbiose industrial. Nesse sentido, o Y benefício foi utilizado para medir a economia de energia gerada pela substituição de materiais tradicionais por resíduos, algo que os indicadores tradicionais não captam de forma direta. O ECBR foi aplicado para determinar a relação entre o energia investido e o energia economizado; oferece-se com isto uma análise mais direta de custo-benefício em termos de uso de recursos. A η global foi empregada para mensurar a eficiência geral do sistema, o que proporciona uma visão clara de qual cenário é mais eficiente em termos de uso total de energia por unidade de produção.

Limitações dos indicadores tradicionais: O cálculo dos indicadores tradicionais, como %R, EYR e ELR, exige uma clara distinção entre recursos renováveis e não renováveis, algo que não se aplica diretamente aos sistemas analisados, uma vez que estes dependem quase exclusivamente de recursos comprados (insumos econômicos, F). Além disso, a estrutura algébrica desses indicadores pode não ser apropriada para sistemas nos quais a renovabilidade não é o objetivo principal, ou a escala do sistema é industrial (pequena escala) e distante de ecossistemas naturais.

6.6 Forma de análise dos resultados

Uma análise bem conduzida permite que as conclusões sejam compreendidas de maneira clara e que as comparações com a literatura sejam feitas de forma precisa. De acordo com Perovano (2016), a estruturação adequada dos resultados é essencial para a clareza da comunicação. Yin (2001) aponta que, para que os resultados sejam considerados robustos, é importante que eles sejam analisados com base em métodos científicos reconhecidos, como a análise quantitativa e qualitativa. O fato

garante que as evidências sejam sólidas e aplicáveis em outras pesquisas. Por exemplo, quando múltiplos indicadores estão sendo comparados, como no caso de estudos de LCA e energia, o uso de gráficos que integrem esses resultados, como os diagramas de radar, facilita a visualização dos dados e oferece uma visão mais integrada e comparativa dos resultados (BROWN *et al.*, 2011).

Silverman (2013) argumenta que apresentar os dados de forma clara e organizada é importante para que outros pesquisadores possam avaliar criticamente as descobertas e reproduzir o estudo. Esse rigor analítico é essencial para garantir que o trabalho científico contribua de maneira significativa para o avanço do conhecimento na área. Song *et al.* (2013), em um estudo sobre avaliação da sustentabilidade do tratamento de resíduos eletrônicos, de acordo com a definição do índice de sustentabilidade energia-ACV, mostra que os resultados foram descritos com eixos de coordenadas A, B, C D e E. Neles, se integram os resultados obtidos em um único gráfico para auxiliar na interpretação dos dados. Pulselli *et al.* (2008), em sua análise de sustentabilidade de edifícios, também utilizaram gráficos de radar para comparar múltiplos indicadores. Eles justificam o uso dessa técnica pela facilidade de ela integrar múltiplos critérios em um único gráfico.

Neste presente estudo, todos os indicadores de LCA, de energia e de economia serão normalizados e, depois, apresentados em um gráfico em radar, todos com o mesmo peso de importância para verificar qual seria o melhor sistema de forma geral e, assim, suportar uma decisão: bloco de concreto tradicional ou bloco de concreto alternativo com fibra de vidro.

A utilização de gráficos de radar, para apresentar resultados ambientais e econômicos normalizados, tem se destacado como ferramenta visual e analítica na construção civil, o que permitiria a comparação clara entre diferentes alternativas de projetos e de práticas construtivas. Esses gráficos facilitam a visualização simultânea de múltiplos critérios, como desempenho energético, custos, emissões de carbono, consumo de recursos e impactos ambientais, conteúdo que promove decisões mais sustentáveis e equilibradas.

Diversos estudos aplicam gráficos de radar para comparar alternativas mais sustentáveis; integram indicadores sísmicos, energéticos, econômicos e ambientais, o que possibilita identificar soluções com melhor desempenho global ao longo do ciclo

de vida do edifício (GIRESINI *et al.*, 2024). Por exemplo, Onubi *et al.* (2020) utilizaram o gráfico de radar em projetos de infraestrutura, como estações de gás natural para transporte público, em combinação de resultados, e o fato permitiu visualizar claramente as soluções candidatas, considerando-se critérios econômicos, ambientais e de segurança.

Illankoon *et al.* (2017), no contexto de práticas de canteiro de obras verdes, enfatizam que a relação entre desempenho ambiental e econômico é complexa. Nem sempre a melhoria ambiental resulta ganhos econômicos diretos; exige, todavia, flexibilidade na adoção de práticas sustentáveis para equilibrar ambos os resultados.

Revisões sistemáticas da literatura apontam que, embora o pilar ambiental seja o mais abordado, há necessidade de maior integração com os aspectos econômicos e sociais nas avaliações; os gráficos de radar são úteis para visualizar essa distribuição e identificar áreas menos exploradas (LIMA *et al.*, 2021).

O desenvolvimento de índices simplificados, como o Índice Econômico Ambiental, permite a avaliação integrada de projetos estruturais. Facilita ainda a comparação entre alternativas de materiais e de sistemas construtivos, com resultados apresentados de forma clara em gráficos de radar (ROMO-OROZCO *et al.*, 2022).

Para tanto, adota-se a estratégia de fixar o desempenho do cenário tradicional como base (valor igual a 1) em cada indicador e, em seguida, calcular os fatores de melhoria do cenário alternativo como uma razão entre os valores medidos para cada indicador. É importante enfatizar que todos os indicadores foram padronizados para mostrar que, quanto maiores, melhor o desempenho. Desta forma, há

- Valores maiores que 1 indicam melhora (ou redução de impactos) no cenário alternativo, quando a direção da melhoria é a redução do custo, impacto ambiental ou demanda de energia;
- Valores iguais a 1 indicam ausência de diferença;
- Valores menores que 1 indicam piora no cenário alternativo em relação ao cenário de referência, ou seja, um aumento no custo, no impacto ambiental ou no consumo de energia. Isso significa que, quanto mais distante de 1 para

baixo for o valor, maior é a desvantagem do cenário alternativo em termos de desempenho relativo. A normalização, portanto, possibilita também melhor visualização, o que permite uma análise comparativa clara entre os diferentes indicadores.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são apresentados em Econômicos, Ambiental e Avaliação Global.

7.1 Avaliação econômica

A presente análise tenciona avaliar a viabilidade econômica da utilização de resíduos de fibra de vidro triturada como material substitutivo parcial de agregados na produção de blocos de concreto. Tal abordagem está alinhada às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) e da ABNT NBR 15116:2004, que incentivam o aproveitamento de resíduos sólidos em materiais não estruturais da construção civil. A avaliação baseia-se a partir de duas condições distintas de produção:

- Produção convencional cenário#1: sem uso de resíduos por batelada;
- Produção modificada cenário#2: com incorporação de 8,5 kg de resíduos de fibra de vidro por batelada de argamassa.

A batelada é um sub lote de cimento, agregados e água que são medidos e misturados de acordo com a especificação do traço da argamassa. Portanto, a batelada, por ser uma parte representativa e proporcional de rendimento dos materiais utilizados, fica mais prática em termos de produtividade em porções menores de produção.

Cada batelada tradicional possibilita a moldagem de 14 blocos de concreto. Com a adição do resíduo, o rendimento aumenta para 15 blocos, o que representa um ganho de 7,14% na produtividade.

7.1.1 Análise de Custos Diretos

Custo por Unidade Produzida

A Tabela 8 apresenta a comparação do custo por unidade produzida em cada cenário de proporção de mistura de resíduos de fibra de vidro.

Tabela 8 – Custo direto de matéria prima unitário de produção por unidade de bloco de concreto.

Condição	Custo da Batelada (R\$)	Total de Blocos (Unidade)	Custo por Bloco (R\$/bloco)	Redução de custo (R\$/bloco)
Sem resíduo	28,00	14,00	2,00	-
Com 2,5% de resíduo (R\$ 0,00/kg)	28,00	14,35	1,95	0,05
Com 5,0% de resíduo (R\$ 0,00/kg)	28,00	14,70	1,90	0,10
Com 7,5% de resíduo (R\$ 0,00/kg)	28,00	15,05	1,86	0,14
Com 10% de resíduo (R\$ 0,00/kg)	28,00	15,40	1,82	0,18

O cenário com resíduos de fibra de vidro, doados ao sistema a custo zero para o fabricante de blocos, proporciona, de acordo com medida de porcentagem de resíduos de fibra de vidro misturados, uma redução de R\$ 0,05 a R\$ 0,18 por bloco, o que equivaleria a uma economia de 2,5 a 9,0 % sobre o custo convencional. Entretanto, caso o resíduo de fibra de vidro venha a ser comercializado, de acordo com valores obtidos e informados na Tabela 8, o valor máximo seria o mesmo 0,18 R\$/kg de resíduo.

Neste estudo, considerando a viabilidade comercial entre as partes, em um cenário Ganha-Ganha, entende-se que, ainda que o sistema seja capaz de absorver um valor máximo de 0,18 R\$/kg de resíduos, o ideal seria fornecer os resíduos de fibra de vidro sem custos para ser mais atrativo para as fábricas de blocos de concreto que fazem parte do *cluster*. Isso seria praticável, uma vez que a fábrica de caixas de água não precisaria mais custear o transporte dos resíduos até o aterro sanitário, e a própria taxa cobrada pelo aterro sanitário estaria em torno de R\$735,00. Como este serviço é realizado bimestralmente, o valor que passa a ser considerado é o de R\$ 367,50 ao mês ou o de R\$ 4.410,00 ao ano.

Projeção de Ganhos em Escala

Para uma produção hipotética mensal de 10.000 blocos (valor médio de produção pelas empresas de bloco na região estudada), a economia gerada pode ser estimada conforme a Tabela 9.

Tabela 9 – Projeção de custos mensais de matéria prima, conforme condição de produção de 10.000 blocos por mês.

Condição	Custo da Batelada (R\$) ^a	Custo (10.000 blocos)	Redução de custo (10.000 blocos)
Sem resíduo	28,00	20.000	-
Com 2,5% de resíduo (R\$ 0,00/kg)	28,00	19.500	500,00
Com 5,0% de resíduo (R\$ 0,00/kg)	28,00	19.000	1.000,00
Com 7,5% de resíduo (R\$ 0,00/kg)	28,00	18.600	1.400,00
Com 10% de resíduo (R\$ 0,00/kg)	28,00	18.200	1.800,00

^a Valor obtido como dado primário *in loco*.

Verifica-se que o uso de resíduos gratuitos gera uma economia de R\$ 500,00 a R\$ 1.800,00 ao mês, o mesmo que de R\$ 6.000,00 a R\$ 21.600,00 ao ano, sem comprometer a produtividade do processo. A adoção de resíduos de fibra de vidro na fabricação de blocos de concreto apresenta uma alternativa economicamente vantajosa, especialmente quando os resíduos são disponibilizados gratuitamente.

A medida também contribui com os princípios de economia circular, de sustentabilidade industrial e de logística reversa. A norma ABNT NBR 15116:2004 corrobora essa possibilidade ao permitir a utilização de resíduos recicláveis, desde que não comprometam as características do produto final.

A análise econômica dos custos diretos de matéria prima apresenta que o reaproveitamento de resíduos de fibra de vidro é viável, tanto sob o ponto de vista de custos, quanto sob a promoção de alinhamento às práticas mais sustentáveis do processo produtivo, e isto fortalece o conceito de produção mais limpa e em consonância com as políticas públicas brasileiras de gestão de resíduos sólidos.

7.2 Avaliação ambiental

7.2.1. Avaliação do ciclo de vida

As categorias de impacto da ACV, para a produção de blocos de concreto não estrutural tradicionais e alternativos, podem ser observadas nas Tabelas 10 e 11 respectivamente. Além do pedrisco e do pó de pedra, o cimento tem um destaque, já que este material é o que mais contribui para todas as três categorias de impacto da ACV. Ele alcança 90,8% para mudanças climáticas (GWP); 79,9% para fósseis com esgotamento (FFP); 56,6% para a transformação natural da terra (NLTP).

Isto realça a importância da utilização de métodos, como a ACV, para quantificar os impactos ambientais, em vez de considerar exclusivamente a quantidade absoluta em unidades de massa de materiais ou gases emitidos diretamente. Faz-se importante destacar que a produção de blocos de concreto não estrutural não possui emissões diretas (nenhum processo de combustão interna ou fermentação), mas possui emissões indiretas contabilizadas pelo método ACV. Exclusivamente para a categoria NLTP, o cascalho e o pó de rocha aparecem com alguma importância no total: atingem 16,1% cada.

Tabela 10. Inventário da empresa de blocos de concreto não estrutural. Dados primários para a base do ano de 2022 obtidos *in loco*.

Item	Input or Output	Quantidade	Unidade /ano	LCI coefficients ^a		
				kgCO ₂ -eq. /Unidade	Kg _{oil} -eq. /Unidade	m ² /Unidade
Aço (maquinário)	Input	1,36E02	kg	2.1101	0.57523	0.00048187
Pedrisco	Input	9,14E05	kg	0.0049416	0.0014288	3.2396E-06
Pó de Pedra ^b	Input	9,14E05	kg	0.0049416	0.0014288	3.2396E-06
Água	Input	1,16E03	kg	0.00019934	5.4349E-05	1.2242E-07
Cimento	Input	1,52E05	kg	0.82814	0.089315	6.8232E-05
Elettricidade	Input	1,21E04	kWh	0.064956	0.0012364	0.00011074
Blocos de Concreto	Output	1,98E06	kg	n.a.	n.a.	n.a.

^a Apêndice B.; ^b Devido à falta de dados disponíveis, os coeficientes do LCI para pó de rocha foram assumidos como iguais aos do cascalho; n.a. = não aplicável, porque os blocos de concreto não estrutural são uma saída do sistema e não uma entrada.

Tabela 11. Categorias de impacto da avaliação do ciclo de vida para produção de blocos de concreto não estrutural tradicionais e alternativos (utilizando-se resíduos de fibra de vidro).

Item	GWP – Mudança no clima (100 anos)		FFP – Depleção fóssil		NLTP – Transformação natural da terra	
	kgCO ₂ -eq./ton _{bloco}	%	kg _{oil} -eq./ton _{bloco}	%	m ² /ton _{bloco}	%
Aço (maquinário)	0.14	0.21	0.04	0.48	3.31E-05	0.37
Pedrisco	2.05	2.99	0.59	7.22	1.35E-03	15.07
Pó de Pedra ^b	2.05	2.99	0.59	7.22	1.35E-03	15.07
Água	0.01	0.02	0.01	0.01	7.17E-08	0.01
Cimento	57.3	83.43	6.18	75.16	4.72E-03	52.81
Eletricidade	0.40	0.58	0.01	0.09	6.77E-04	7.52
Total do bloco de concreto tradicional ^a	68.68	-	8.22	-	8.94E-03	-
Total do bloco de concreto “alternativo” ^b	61.95	-	7.42	-	8.12E-03	-
Total do bloco de concretocom emissões evitadas ^c	51,87		-18,21		-2,70E-03	n.a.

^a Resultados dos dados apresentados no (Apêndice B); ^b Calculado pela substituição de 10% (9,10E+04 ton pedrisco/ton bloco), 10% (9,10E+04 ton pó de rocha/ton bloco) e 10% (1,50E+04 ton cimento/ton bloco) por resíduos de fibra de vidro, com base em Portela *et al.* (2020). ^c Calculado, considerando-se as emissões evitadas da alocação de resíduos de fibra de vidro para aterro e as operações de aterro e transporte evitado (Apêndice D).

A partir de um desempenho geral, a Tabela 11 mostra que os blocos de concreto não estrutural tradicionais obtiveram para GWP (~69 kgCO₂-eq./tonelada bloco), enquanto o bloco “alternativo” atingiu para GWP (~62kgCO₂-eq./tonelada bloco), valor este que representa uma redução de (~10%) em GWP. Em concomitância, houve o desempenho na categoria de FFP, (~8 kgoil-eq./ton bloco) para o bloco tradicional e (~7 kgoil-eq./ton bloco) para o bloco “alternativo”, o que representou também uma redução de (~10%). Já a categoria NLTP pode ser considerada semelhante (bloco de ~0,009 m²/ton) para o bloco tradicional e (~0,008 m²/ton) para o “bloco alternativo”, o que resulta numa redução de (~9%). Estes resultados indicam que a substituição de 10% de massa de cascalho, pó de pedra e cimento por resíduos de fibra de vidro tem uma vantagem proporcional para a produção de blocos de concreto não estrutural do ponto de vista da ACV.

Por outro lado, ao contabilizar as emissões evitadas na Tabela 11, em que o transporte de fibra de vidro e operação de aterro não são mais necessárias, os resultados indicam vantagens para os blocos de concreto não estrutural alternativos, pois eles alcançam 51,97 kgCO₂-eq./ton GWP (redução de 24%). Para as categorias de FFP e NLTP, os resultados ficaram negativos, e a situação se explica pelo fato de que os impactos são maiores no aterro perante a própria fabricação dos blocos: -18,21 kg eq.de óleo/tonelada bloco, e Transformação natural da terra NLTP, alcançando - 2,70E-03 m²/ton.

De forma geral, os resultados mostram que a substituição parcial de materiais tradicionais por resíduos de fibra de vidro na produção de blocos de concreto não estrutural apresenta benefícios ambientais pelo método de ACV. A redução de 24% no GWP reforça o potencial dessa abordagem para mitigar as emissões de carbono, enquanto as categorias FFP e NLTP, apesar de inicialmente apresentar menores ganhos, revelam reduções expressivas quando contabilizados os impactos negativos associados ao aterro. Isso evidencia que a integração de resíduos industriais na cadeia produtiva reduz o impacto ambiental dos produtos finais e contribui para o avanço de práticas voltadas à sustentabilidade no setor da construção civil. Isto consolida a economia circular por meio da simbiose industrial como uma alternativa viável e estratégica.

7.2.2. Síntese em emergia

A Tabela 12 mostra o cálculo de emergia do cenário tradicional #1. É importante enfatizar que os valores para o inventário foram alocados de acordo com a proporção em unidades de massa de resíduos de fibra de vidro descartados no aterro. Isso significa que os resíduos de fibra de vidro são parcialmente (taxa de 0,0000182; Apêndice E) responsáveis pela carga ambiental total causada pelo aterro. A Tabela 13 mostra o cálculo de emergia do cenário alternativo #2, que é mais curto, porque não há mais resíduos de fibra de vidro sendo desviados para o aterro, uma vez que são usados como matéria-prima para a produção de blocos de concreto não estrutural.

É interessante notar que ambas as Tabelas, 12 e 13, mostram comportamento semelhante para a assinatura de emergia. Em outras palavras, os itens que mais contribuem para a emergia total são cascalho, pó de rocha e cimento, atingindo-se

cerca de 93% da energia total. Pode-se notar que o processo de transporte (para o aterro e/ou para a empresa de blocos de concreto não estrutural) e os processos internos do aterro são insignificantes para a energia total para os cenários #1 e #2. A maior fração de energia se deve à planta de produção de blocos de concreto não estrutural.

Tabela 12. Cálculo de energia do cenário tradicional, cenário #1 (resíduos de fibra de vidro vão para aterro).

Observação	Entrada	Quantidade ^a	Unidade / ano	UEV sej /unidade	Energia sej /ano	Energia %
<i>Etapas de transporte de resíduos de fibra de vidro para aterro sanitário</i>						
1	Aço (caminhão)	3,33E+00	kg	2,01E+12	6,69E+12	0,0
2	Diesel	5,12E+01	Kg	5,99E+12	3,07E+14	0,0
3	Trabalho	3,60E+01	h	1,48E+13	5,33E+14	0,0
4	Serviços	2,09E+03	USD	8,41E+12	1,76E+16	0,6
<i>Aterro sanitário</i>						
5	Solo	1,04E+03	kg	1,27E+12	1,32E+15	0,0
6	Cascalho	1,16E+03	kg	1,27E+12	1,48E+15	0,1
7	Manta de PEAD	7,83E-01	kg	6,69E+12	5,24E+12	0,0
8	Aço (Máquinas)	1,35E-01	kg	2,01E+12	2,72E+11	0,0
9	Diesel	1,64E-01	kg	5,99E+12	9,82E+11	0,0
10	Antiespumante ^c	2,18E-01	L	-	-	-
11	NaOH 50%	1,87E+01	kg	3,32E+13	6,22E+14	0,0
12	Carvão	8,19E-01	kg	3,51E+12	2,87E+12	0,0
13	Percloroeto férrico	1,37E-01	kg	2,93E+13	4,00E+12	0,0
14	Calcário (CaOH ₂)	1,09E+00	kg	2,51E+13	2,74E+13	0,0
15	Eletricidade	7,29E-01	kWh	4,18E+11	3,05E+11	0,0
16	Concreto	4,37E+00	kg	1,83E+12	7,99E+12	0,0
17	Tubulação de biogás HDPE	2,88E-03	kg	6,69E+12	1,92E+10	0,0
18	Aço (geração de biogás)	4,55E-02	kg	2,01E+12	9,15E+10	0,0
19	Trabalho	7,69E+00	kg	1,54E+13	1,18E+14	0,0
20	Serviços	1,17E+01	kg	8,41E+12	9,85E+13	0,0
<i>Fábrica tradicional de blocos de concreto não estrutural</i>						
21	Aço (Máquinas)	1,36E+02	kg	2,01E+12	2,73E+14	0,0
22	Cascalho	9,14E+05	kg	1,27E+12	1,16E+18	40,0
23	Pó de rocha	9,14E+05	kg	1,27E+12	1,16E+18	40,0
24	Água	1,16E+03	kg	7,28E+08	8,44E+11	0,0
25	Cimento	1,52E+05	kg	2,50E+12	3,80E+17	13,1
26	Eletricidade	1,21E+04	kWh	4,18E+11	5,06E+15	0,2
27	Trabalho	1,06E+04	h	1,48E+13	1,56E+17	5,4
28	Serviços	1,90E+03	USD	8,41E+12	1,60E+16	0,6
Energia total					2,90E+18	100
Blocos de concreto não estrutural produzidos		1,98E+06	kg	1,47E+12		
Eletricidade gerada – biogás ^b		9,08E+02	kWh	3,19E+15		

Todos os UEVs de outros autores são convertidos para a *base line energy* de $1,20\text{E}+25$ sej /ano (Brown *et al.*, 2016).

^a Os detalhes do cálculo são apresentados no Apêndice E.

^b A quantidade de biogás foi alocada em 0,0000182 do total produzido, equivalente à quantidade anual de resíduos de fibra de vidro desviados para o aterro sanitário, considerando um valor energético médio de $2,31\text{kWh}/\text{Nm}^3$ de biogás.

^c O antiespumante não foi contabilizado devido à falta de UEV.

Tabela 13. Cálculo de energia do cenário #2 (resíduos de fibra de vidro são utilizados como matéria-prima para produção de blocos de concreto não estrutural).

Observação	Entrada	Quantidade ^a	Unidade / ano	UEV sej / unidade	Energia sej / ano	Energia %
<i>Etapa de transporte de resíduos de fibra de vidro para a fábrica de blocos</i>						
1	Aço (caminhão)	3,33E+00	kg	2,01E+12	6,69E+12	0,0
2	Diesel	2,06E+01	kg	5,99E+12	1,23E+14	0,0
3	Trabalho	2,40E+01	h	1,48E+12	3,55E+14	0,0
4	Serviços	2,09E+03	USD	8,41E+12	1,76E+16	0,7
<i>Bloco de concreto alternativo fábrica</i>						
5	Aço (Máquinas)	1,39E+03	kg	2,01E+12	2,79E+15	0,1
6	Cascalho	8,23E+05	kg	1,27E+12	1,05E+18	39,6
7	Pó de rocha	8,23E+05	kg	1,27E+12	1,05E+18	39,6
8	Água	1,16E+03	kg	7,28E+12	8,44E+11	0,3
9	Cimento	1,37E+05	kg	2,50E+12	3,43E+17	13,0
10	Elettricidade	1,21E+04	kWh	4,18E+11	5,06E+15	0,2
11	Trabalho	1,06E+04	h	1,48E+13	1,57E+17	5,9
12	Serviços	1,90E+03	USD	8,41E+12	1,60E+16	0,6
Energia total					2,64E+18	100
Blocos de concreto não estrutural produzidos		1,98E+06	kg	1,33E+12		

Todos os UEVs de outros autores foram convertidos para a *base line energy* de $1,20\text{E}+25$ sej /ano (Brown *et al.*, 2016). Os detalhes do cálculo são apresentados no Apêndice F.

Y Benefício

De acordo com a demanda total de energia para os cenários #1 e #2 ($2,90\text{E}18$ sej /ano e $2,64\text{E}18$ sej /ano, respectivamente) das Tabelas 12 e 13, a demanda total de energia resulta em $2,68\text{E}17$ sej /ano. Este benefício de energia destaca menor energia demandada pelo cenário #2 e reforça seu potencial como uma opção mais favorável sob a lente de energia. Isso significa que o uso de resíduos de fibra de vidro como matéria-prima para a produção de blocos de concreto não estrutural economiza energia. Esta economia, na sua vez, pode ser usada para outros propósitos mais nobres no desenvolvimento da sociedade, como investimento em educação, em

saúde, em políticas de produção de alimentos, entre outros necessários investimentos.

$$Y_{\text{benefício}} = (U_{\#1} - U_{\#2}) = (2.90E18 \text{ sej/ano } U_{\#1} - 2.64E18 \text{ sej/ano } U_{\#2}) \\ = 2.68E17 \text{ sej/ano}$$

Razão Custo-Benefício em Emergia

Considerando a emergia total demandada pelo cenário #2 (2,64E18 sej /ano), conforme o fornecido pela Tabela 13, na emergia economizada pela substituição do cenário #1 pelo #2 (2,68E17 sej /ano), um ECBR de 0,10 é obtido. Este valor significa que, para 1 sej/ano investido na implementação e na operacionalização do cenário #2, 0,1 sej é economizado anualmente. Esses 10% economizados anualmente (ou retornados sobre o investimento) podem ser considerados como um aspecto positivo, se comparado ao retorno monetário atual sobre opções tradicionais para investimentos que alcançam desempenho semelhante.

Este ECBR positivo foi obtido, porque uma fração da emergia em matérias-primas para produção de blocos de concreto não estrutural é reduzida devido ao uso de resíduos de fibra de vidro e porque a emergia demandada pelo aterro no tratamento de resíduos de fibra de vidro (embora seja comparativamente muito baixa, conforme mostrado pela Tabela 12) não é mais necessária. Portanto, o ECBR mostra que o cenário #2 é uma alternativa promissora em relação ao retorno em emergia.

$$\text{ECBR} = \frac{\text{Emergy Saved}_{\#2}}{U_{\#2}} = \frac{2.68E17 \text{ sej/yr}}{2.63E18 \text{ sej/yr}} = 0,10$$

Eficiência global

A eficiência global é um indicador de relevo quando entradas e saídas têm importância semelhante para uma decisão. De acordo com a demanda total de emergia para os cenários #1 e #2 (2,90E18 sej/ano e 2,64E18 sej/ano,

respectivamente), e suas saídas expressas em massa de blocos de concreto não estrutural produzidos (1,98E6 kg/ano para ambos os cenários), o cálculo mostra uma eficiência global de 1,46E12 sej/kg para o cenário #1 e 1,33E12 sej/kg para o cenário #2. Esses resultados indicam que o cenário #2 tem cerca de 9% mais eficiência do que o cenário #1. Em outras palavras, o cenário #2 demanda menor quantidade de recursos para produzir a mesma quantidade de blocos de concreto não estrutural.

$$\eta_{\text{global}\#1} = \frac{U\#1}{\text{Output}\#1} = \frac{2.90\text{E}18 \frac{\text{sej}}{\text{yr}}}{1.98\text{E}06 \frac{\text{kg}}{\text{yr}}} = 1.46\text{E}12 \text{ sej/kg}$$

$$\eta_{\text{global}\#2} = \frac{U\#2}{\text{Output}\#2} = \frac{2.63\text{E}18 \frac{\text{sej}}{\text{yr}}}{1.98\text{E}06 \frac{\text{kg}}{\text{yr}}} = 1.33\text{E}12 \text{ sej/kg}$$

Pela ótica da emergia, o cenário #2 é mais eficiente e econômico que o cenário #1. Sua demanda total de emergia é menor (2,63E18 sej/ano contra 2,90E18 sej/ano), o que reflete uso mais racional dos recursos. O benefício de emergia (2,68E17 sej/ano) confirma que a incorporação de resíduos de fibra de vidro na produção de blocos reduz a pressão sobre recursos que poderiam ser destinados a setores, como saúde e educação. O ECBR de 0,10 indica que, para cada unidade de emergia investida, 0,1 é economizada, fim que reforça sua viabilidade. Além disso, a maior eficiência global (1,33E12 sej/kg frente a 1,46E12 sej/kg) comprova o cenário #2 como a opção mais sustentável.

7.3 Análise global

A análise global considera ao mesmo tempo os sistemas avaliados, levando em conta os indicadores econômicos e ambientais. Para isso, a etapa de normalização é efetuada. Adota-se aqui o mesmo peso de importância para todos os indicadores que, são apresentados em um gráfico de radar.

7.3.1 Normalização

A normalização dos indicadores tem como finalidade transformar medições heterogêneas - originadas de análises de ciclo de vida (ACV), síntese em emergia e avaliação financeira - em uma unidade de medida comum. Dessa forma, é possível

comparar a performance de dois cenários (tradicional e alternativo) de maneira proporcional e integrada.

Foram considerados os seguintes indicadores

Análise de Ciclo de Vida (ACV) – Impactos Ambientais (dados da Tabela 4)

- **GWP (Global Warming Potential):**

- Cenário Tradicional: 68,68 kgCO₂-eq/ton bloco
- Cenário Alternativo: 51,87 kgCO₂-eq/ton bloco

Normalização: Fator = $68,68 / 51,87 \approx 1,32$

- **FFP (Fossil Fuel Depletion):**

- Cenário Tradicional: 8,22 kgoil-eq/ton bloco
- Cenário Alternativo: 7,42 kgoil-eq/ton bloco

Normalização: Fator = $8,22 / 7,42 \approx 1,11$

- **NLTP (Natural Land Transformation):**

- Cenário Tradicional: 8,94E-03 m²/ton bloco
- Cenário Alternativo: 8,12E-03 m²/ton bloco

Normalização: Fator = $8,94E-03 / 8,12E-03 \approx 1,10$

Indicadores de Energia (dados dos indicadores calculados)

- **Eficiência Global (Energia Consumida por kg de Bloco):**

- Cenário Tradicional #1: 1,46E12 sej/kg bloco
- Cenário Alternativo #2: 1,33E12 sej/kg bloco

Normalização: Como para este indicador uma redução é preferível, usamos a razão

Fator = $1,46E12 / 1,33E12 \approx 1,10$

- **ECBR (Economia de Energia - Retorno sobre Investimento em energia):**

Para efeitos comparativos, foi definido (conforme calculado anteriormente) para o cenário tradicional um valor base de 1 e, para o cenário alternativo, um ganho calculado de 10%, ou seja, 1,10.

A demanda total de energia não foi considerada, porque já está refletida no indicador Eficiência Global.

Avaliação Financeira

- **Custo Unitário de Produção:**

- Cenário Tradicional: R\$ 2,00 por bloco
- Cenário Alternativo: R\$ 1,86 por bloco

Normalização: Fator = $2,00 / 1,86 \approx 1,075$

Esse fator representa uma redução de custo de aproximadamente 7,5% no cenário alternativo.

- **Produtividade (Utilizando o cálculo por batelada):**

- Cenário Tradicional: 14 blocos
- Cenário Alternativo: 15 blocos (valor médio)

Normalização: Fator = $15 / 14 \approx 1,0714$

Um aumento de cerca de 7,14% em produtividade significa melhoria na eficiência operacional.

7.3.2 Apresentação dos Dados no Gráfico Radar

Para facilitar a visualização integrada dos resultados, os fatores normalizados foram representados em um gráfico radar (Gráfico 2). Este gráfico apresenta, em um mesmo plano, sete indicadores distribuídos em três grandes áreas:

- Ambiental (ACV): GWP, FFP e NLTP, que refletem os impactos ambientais mensurados por técnicas de análise do ciclo de vida;
- Ambiental (energia): Eficiência Global e ECBR, que fornecem uma visão do consumo de recursos em energia e da economia desses recursos;

- Financeira: Custo Unitário e Produtividade, os quais evidenciam os benefícios econômicos decorrentes da utilização dos resíduos de fibra de vidro.

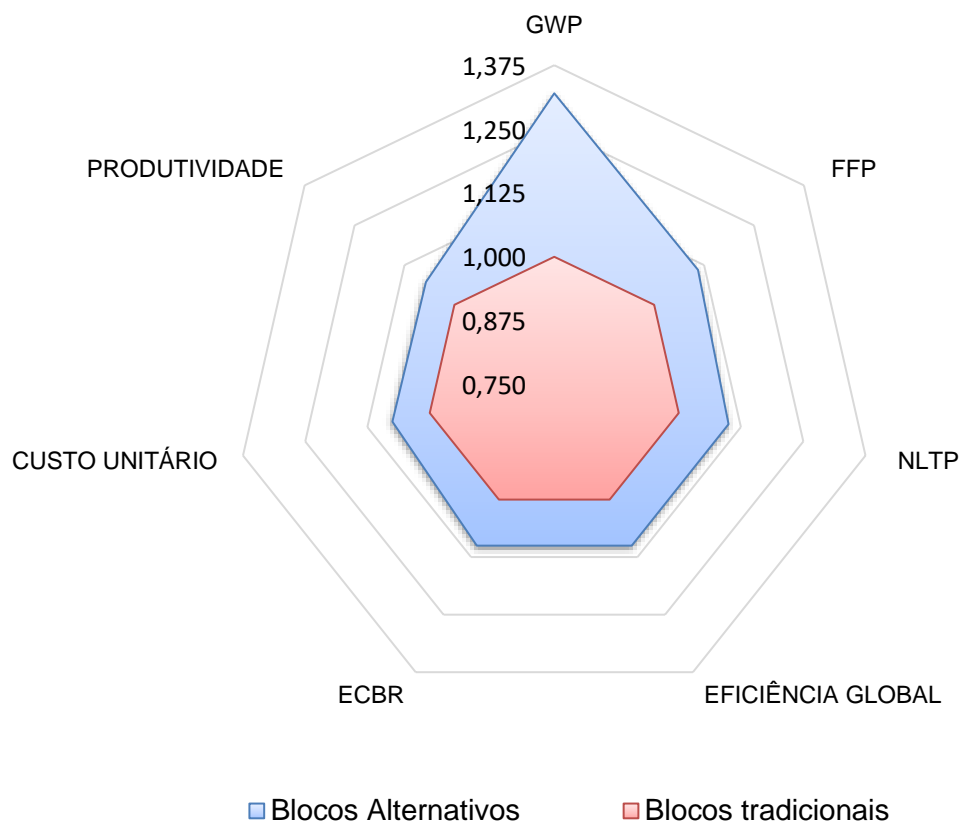


Gráfico 2: Comparação global, (Ambiental - ACV, energia) e financeira

A análise integrada dos indicadores no Gráfico 2 evidencia que o cenário #2, que incorpora resíduos de fibra de vidro no processo produtivo, apresenta ganhos em todas as dimensões consideradas quando comparado ao cenário tradicional:

- Ambiental (ACV): os indicadores GWP, FFP e NLTP mostram ganhos de até 32% na redução dos impactos ambientais (com destaque para o GWP, cuja razão atingiu cerca de 1,32). Essa melhoria é essencial, uma vez que reduz significativamente a pegada de carbono e o consumo de recursos não renováveis no ciclo de vida dos blocos.

- Energia: tanto a eficiência global quanto o ECBR indicam uma melhoria de aproximadamente 10%. Isso aponta para um aproveitamento mais racional dos recursos energéticos incorporados às matérias-primas e ao processo de produção e permite que menos recursos em energia sejam consumidos por unidade de produto.
- Financeira: a redução do custo unitário (1,07), aliada ao incremento na produtividade (também 1,07), gera uma economia operacional que pode ser observada na diminuição dos custos diretos e no aumento da capacidade produtiva. Tais ganhos são particularmente relevantes em cenários industriais, em que a competitividade e a gestão de custos são determinantes para o sucesso do empreendimento.

Esta avaliação detalhada evidencia que a integração dos resíduos de fibra de vidro no processo produtivo dos blocos de concreto não estrutural gera benefícios multidimensionais. A normalização dos indicadores permite uma visão clara dos ganhos ambientais, em energia e financeiros, fato que demonstra a viabilidade da adoção desse cenário alternativo. Assim, espera-se que os resultados impulsionem políticas e práticas de simbiose industrial e se contribua significativamente para a sustentabilidade industrial.

Uma discussão importante neste estudo e que vale destacar, como se trata da presença de um aterro sanitário em um *cluster* regional, é que isso pode interferir de maneira negativa na realização de simbiose industrial de resíduos. O aterro atua como uma solução simplificada para o descarte de resíduos, o que muitas vezes desencoraja esforços para identificar alternativas de reaproveitamento ou de reciclagem no próprio *cluster*. A disponibilidade imediata do aterro pode levar as empresas a priorizar o descarte tradicional, ao invés de investir tempo e recursos no desenvolvimento de parcerias que possibilitem a circulação de materiais entre indústrias.

Outro ponto é que o uso contínuo do aterro pode reforçar uma cultura de linearidade no manejo de resíduos e contradizer os princípios de economia circular que sustentam a simbiose industrial. Isso pode comprometer uma solução mais sustentável de uma forma geral do *cluster* e reduzir sua atratividade para

investimentos em práticas inovadoras. A dependência do aterro pode criar barreiras logísticas e financeiras, uma vez que a alocação de resíduos para simbiose geralmente exige infraestrutura, transporte e tratamento específicos que não são priorizados quando a solução do aterro está disponível. Esse cenário resulta uma visão pessimista para o *cluster*, dificulta a transformação dos resíduos em recursos produtivos e a maximização dos benefícios ambientais e econômicos que a simbiose industrial pode proporcionar. Neste aspecto, políticas públicas incentivadoras da economia circular ou mesmo rótulos ambientais possuem papel importante.

8 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Este estudo assume que a capacidade de produção de blocos de concreto não estrutural pode absorver todos os resíduos de fibra de vidro gerados no *cluster* analisado, mas os números são os seguintes:

- Resíduos Gerados = (10 fábricas geradoras de resíduos de fibra de vidro) x (3,550 ton/mês cada) = 35,5 ton/mês ou 426 ton/ano;
- Potencial de resíduos absorvidos = 198 ton/ano cada fábrica de bloco a 10% de resíduos de fibra de vidro. Portanto, 198 ton/ano x 4 fábricas no cluster = 792 ton/ano.

Este aspecto deve ser melhor avaliado antes de se implementarem tais práticas de simbiose industrial. O *cluster* estudado, apesar de ter o potencial de absorver 100% do resíduo gerado, poderia absorver um adicional de ~366 ton/ano de resíduos de fibra de vidro. Isso poderia ser alcançado, caso se incorporassem mais fábricas de tanques de fibras de vidro no *cluster*. Porém, a distância de transporte poderia ser um limitante que poderia inverter o bom desempenho ambiental e econômico obtidos. Sugere-se aqui um estudo de distância máxima de transporte para o resíduo da fibra de vidro até a fábrica de blocos de concreto. Que os indicadores de desempenho ambiental e econômico mostrem ao menos valores semelhantes aos valores do bloco tradicional.

Outro aspecto que merece atenção é o efeito pozolânico dos resíduos de fibra de vidro em possível reação com o cimento Portland. Recomenda-se melhor entender os efeitos a longo prazo da aplicação do cenário #2 com o bloco “alternativo”. O efeito pozolânico é uma reação química que ocorre entre materiais ricos em sílica e alumina, conhecidos como materiais pozolânicos, e o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento Portland.

Essa reação pode formar compostos adicionais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que são os principais responsáveis pela resistência mecânica e pela durabilidade do concreto. A presença do efeito pozolânico contribui para a redução da porosidade e da permeabilidade da matriz cimentícia. Ela aumenta a vida útil das estruturas e melhora seu desempenho frente a agentes agressivos, como sulfatos e

substâncias ácidas. Além disso, a reação consome o hidróxido de cálcio livre, torna o concreto menos suscetível a reações deletérias.

Finalmente, para tornar o estudo mais amplo e abrangente, poder-se-iam realizar estudos em blocos estruturais, do ponto de vista de comportamento mecânico com outros *designs* de blocos com espessura de paredes maiores.

9 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo avaliar, sob as perspectivas econômica e ambiental, a viabilidade de incorporação de resíduos de fibra de vidro provenientes da indústria de reservatórios em fibra de vidro na produção de blocos de concreto não estrutural, a partir da lógica da simbiose industrial. Os resultados obtidos apresentam que a substituição parcial de agregados convencionais por resíduos de fibra de vidro é tecnicamente viável e apresenta benefícios para a sustentabilidade dos sistemas produtivos analisados.

A partir da análise comparativa entre o sistema tradicional e o sistema alternativo proposto, observou-se que os blocos produzidos com adição de até 10% de resíduos de fibra de vidro mantêm desempenho mecânico satisfatório quanto à resistência à compressão, nos parâmetros estabelecidos pelas normas técnicas vigentes. Embora haja redução nas médias de resistência em comparação aos blocos convencionais, todos os corpos de prova atenderam aos critérios mínimos exigidos para blocos de uso não estrutural, o que evidencia a adequação técnica da proposta.

Do ponto de vista ambiental, os resultados da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) indicam que o sistema alternativo apresenta impactos reduzidos em categorias críticas, como potencial de aquecimento global (24% inferior), esgotamento de recursos fósseis (2,2 vezes menor) e transformação natural da terra (3 vezes menor), em comparação ao sistema convencional. Estes dados revelam que a reutilização de resíduos em substituição a insumos virgens contribui para a mitigação de impactos ambientais na cadeia da construção civil. Complementarmente, a análise por meio da Síntese em energia (SE) indicou que o sistema alternativo possui uma economia de energia de $2,68E+17$ sej/ano em relação ao sistema tradicional, com uma taxa ECBR de 0,10, o que indica, para cada unidade de energia investida, que há um retorno de 10% ao ano. Essa taxa corrobora a eficiência em energia e a racionalidade do investimento sob a ótica sistêmica de uso de recursos.

Sob a perspectiva econômica, a análise de custos diretos mostrou que o sistema alternativo se mostra competitivo ao reduzir o consumo de cimento e de agregados naturais, cujos custos vêm crescendo significativamente. A sinergia logística, oriunda da proximidade geográfica entre fornecedores de resíduos e

fabricantes de blocos, característica dos *clusters* estudados na região do Grande ABC paulista, contribui adicionalmente para a redução de custos operacionais e viabiliza o modelo de simbiose industrial.

Uma análise agregada considerando todos os indicadores evidencia que a proposta investigada do bloco de concreto alternativo representa uma alternativa viável técnica. A viabilidade é econômica e ambiental no aproveitamento de resíduos industriais na cadeia da construção civil e promove os princípios da economia circular e da produção mais limpa. A integração entre diferentes setores industriais, por meio da simbiose, revelou-se uma estratégia eficaz para a valorização de resíduos e a transição para modelos produtivos mais sustentáveis.

Este trabalho oferece suporte técnico e científico para a tomada de decisões e incentivos econômicos que fomentem a implementação de práticas de simbiose industrial em âmbito regional. Adicionalmente, as ideias e as abordagens aqui desenvolvidas podem ser úteis para futuras pesquisas que queiram aprofundar aspectos, como durabilidade dos blocos produzidos, desempenho térmico e análise multicritério de blocos alternativos, além de estudar outros produtos da construção civil.

REFERÊNCIAS

- ABNT. (2016). NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro, RJ.
- AGELARIDOU-TWOHIG, A., TAMANINI, F., ALI, H., ADJARI, A., & VAZIRI, A. (2014). Thermal analysis of reinforced concrete chimneys with fiberglass plastic liners in uncontrolled fires. *Engineering structures*, 75, 87-98.
- AGOSTINHO, F., SILVA, E. S., DA SILVA, C. C., ALMEIDA, C. M., GIANNETTI, B. F.. Environmental performance for hydrogen locally produced and used as an energy source in urban buses. **Journal of Cleaner Production**, v. 396, p. 136435, 2023.
- AGOSTINHO, F.; AMBRÓSIO, L. A.; ORTEGA, E. Assessment of a large watershed in Brazil using Energy Evaluation and Geographical Information System. **Ecological Modelling**, v. 221, n. 8, p. 1209-1220, 2010.
- AGOSTINHO, F.; DINIZ, G.; SICHE, R.; ORTEGA, E. The use of emergy assessment and the Geographical Information System in the diagnosis of small family farms in Brazil. **Ecological Modelling**, v. 210, n. 1-2, p. 37-57, 2008.
- ASOKAN, P.; OSMANI, M.; PRICE, A. D. F.; Assessing the recycling potential of glass fibre reinforced plastic waste in concrete and cement composites. **Journal of Cleaner Production**, v. 17, n. 9, p. 821-829, 2009.
- ASOKAN, Pappu; OSMANI, Mohamed; PRICE, Andrew DF. Improvement of the mechanical properties of glass fibre reinforced plastic waste powder filled concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 4, p. 448-460, 2010.
- AVDIUSHCHENKO, Anna; ZAJĄC, Paweł. Circular economy indicators as a supporting tool for European regional development policies. **Sustainability**, v. 11, n. 11, p. 3025, 2019.
- AZEVEDO, R., ROTELA, P., CHICCO, G., AQUILA, G., ROCHA, L., & PERUCHI, R; Identification and analysis of impact factors on the economic feasibility of wind energy investments. *International Journal of Energy Research*, 45, 3671 – 3697; 2020
- BAGHERI, S., JAFARI, N., R.; AZIMZADEH, M.; Sound absorption performance of tea waste reinforced polypropylene and nanoclay biocomposites. *Polym. Bull.* 80, 5203–5218 (2023).
- BALDASSARRE, B., SCHEPERS, M., BOCKEN, N., CUPPEN, E., KOREVAAR, G., & CALABRETTA, G. Industrial Symbiosis: towards a design process for eco-industrial clusters by integrating Circular Economy and Industrial Ecology perspectives. *Journal of cleaner production*, v. 216, p. 446-460, 2019.
- BATURKIN, D.; HISSEINE, O.A.; MASMOUDI, R.; TAGNIT-HAMOU, A.; MASSICOTTE, L.; Valorization of recycled FRP materials from wind turbine blades in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 174, p. 105807, 2021.
- BRAGA, O. O. **Prevenção ambiental: a nova responsabilidade social**. Monografia apresentada a Universidade de Santa Catarina, 2002.
- BRASIL. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2010.
- BROWN, M. T., CAMPBELL, D. E., DE VILBISS, C., ULGIATI, S.. The geobiosphere emergy baseline: A synthesis. **Ecological Modelling**, v. 339, p. 92-95, 2016.
- BROWN, Mark T. Emery and form: accounting principles for recycle pathways. **Journal of Environmental Accounting and Management**, v. 3, n. 3, p. 259-274, 2015.
- BROWN, Mark T.; CAMPBELL, Elliott. Evaluation of natural capital and environmental services of US national forests using emergy synthesis. **Gainesville, FL: Center for Environmental Policy**, 2007.
- BROWN, Mark T.; PROTANO, Gaetano; ULGIATI, Sergio. Assessing geobiosphere work of generating global reserves of coal, crude oil, and natural gas. **Ecological Modelling**, v. 222, n. 3, p. 879-887, 2011.

- BROWN, Mark T.; ULGIATI, Sergio. Updated evaluation of exergy and emergy driving the geobiosphere: A review and refinement of the emergy baseline. **Ecological Modelling**, v. 221, n. 20, p. 2501-2508, 2010.
- BROWN, Mark; ULGIATI, Sergio. Emergy analysis and environmental accounting. In: **Encyclopedia of energy**. Elsevier, 2004. p. 329-354.
- BUENFIL, A.; Emergy evaluation of water (Dissertation). University of Florida, Gainesville. 2001
- BUN, P., CYR, M., LANIESSE, P., BUN, KN, & IDIR, R.; Concrete made of 100% recycled materials- Feasibility study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 180, p. 106199, 2022.
- BURANAKARN, Vorasun. **Evaluation of recycling and reuse of building materials using the emergy analysis method**. University of Florida, 1998.
- BUYS, Fanie; HURBISSEON, Roneesh. Green buildings: A Mauritian built environment stakeholders' perspective. **Acta Structilia**, v. 18, n. 1, p. 81-101, 2011.
- CALDAROLA, B., MAZZILLI, D., NAPOLITANO, L., PATELLI, A., & SBARDELLA, A. Economic complexity and the sustainability transition: A review of data, methods, and literature. **Journal of Physics: Complexity**, 2024.
- CASTELLET-VICIANO, L.; HERNÁNDEZ-CHOVER, V.; BELLVER-DOMINGO, Á.; & HERNÁNDEZ-SANCHO, F.; Industrial symbiosis: A mechanism to guarantee the implementation of circular economy practices. **Sustainability**, v. 14, n. 23, p. 15872, 2022.
- CHEN, D., WEBBER, M., CHEN, J., LUO, Z.. Emergy evaluation perspectives of an irrigation improvement project proposal in China. **Ecological Economics**, v. 70, n. 11, p. 2154-2162, 2011.
- CHEN, Qian; FENG, Haibo; DE SOTO, Borja Garcia. Revamping construction supply chain processes with circular economy strategies: A systematic literature review. **Journal of cleaner production**, v. 335, p. 130240, 2022.
- CONCEIÇÃO, Márcio M. **Os empresários do lixo: um paradoxo da realidade**. 2.ed. Campinas, SP: Átomo, 2005.
- CONROY, Amanda, SUE Halliwell, TIM Reynolds. **"Composite Recycling in the Construction Industry."** Composites. Part A, Applied Science and Manufacturing 37.8 (2006): 1216-222.
- COPPOLA, L.; CADONI, E., FORNI, D., & BUOSO, A.; Mechanical characterization of cement composites reinforced with fiberglass, carbon nanotubes or glass reinforced plastic (GRP) at high strain rates. **Applied Mechanics and Materials**, v. 82, p. 190-195, 2011.
- CORINALDESI, Valeria. Influence of lightweight aggregates and GRP by-product powders on the properties of self-compacting concretes. **Advanced Materials Research**, v. 548, p. 215-220, 2012.
- CORREIA, João R.; ALMEIDA, Nuno M.; FIGUEIRA, João R. Recycling of FRP composites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 15, p. 1745-1753, 2011.
- CURRAN, Mary Ann. **Life-cycle assessment: principles and practice**. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency, 2006.
- DA SILVA, T. R., DE AZEVEDO, A. R. G., CECCHIN, D., MARVILA, M. T., AMRAN, M., FEDIUK, R., ... & Szelag, M.. Application of plastic wastes in construction materials: A review using the concept of life-cycle assessment in the context of recent research for future perspectives. **Materials**, v. 14, n. 13, p. 3549, 2021.
- DE CARVALHO MOREIRA, Daniel; KOWALTOWSKI, Doris Catherine Cornelie Knatz. Discussão sobre a importância do programa de necessidades no processo de projeto em arquitetura. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 2, p. 31-45, 2009.
- DE LIMA, Jose Donizetti; FERRO, Wilian Assmann; BORTOLUZZI, Sandro César; SOUTHER, Luiz Fernando Puttow; BATISTUS, Dayse Regina. Uma proposta de ampliação na análise custo-volume-lucro por meio das análises de sensibilidade e de cenários. **Exacta, [S. l.]**, v. 16, n. 2, p. 21-41, 2018.

- DEHGHAN, A.; PETERSON, K.; SHVARZMAN, A.; Adições de polímeros reforçados com fibra de vidro reciclada ao concreto de cimento Portland. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 238-250, 2017.
- DEMÉTRIO, Jorge Creso Cutrim. Avaliação ambiental da construção de edificações de interesse social no Brasil. **Doctorate Dissertation. Universidade Paulista-UNIP, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, São Paulo, Brasil**, 2012.
- DIAS, A. B., PACHECO, J. N., SILVESTRE, J. D., MARTINS, I. M., & DE BRITO, J. Environmental and economic life cycle assessment of recycled coarse aggregates: A Portuguese case study. **Materials**, v. 14, n. 18, p. 5452, 2021.
- DOMENECH, T.; BLEISCHWITZ, R.; DORANOVA, A., PANAYOTOPOULOS, D.; & ROMAN, L.; Mapping Industrial Symbiosis Development in Europe_ typologies of networks, characteristics, performance and contribution to the Circular Economy; *Resources, conservation and recycling*; 141, 76-98; 2019
- DUAH, J. A. A. **The use of cost-benefit analysis in venture capital investment decisions**. 2009. Dissertação de Mestrado. Universitetet i Agder; University of Agder.
- EKUNDAYO, Damilola et al. Achieving economic and environmental sustainability through optimum balance of costs. 2011.
- ELIA, Valerio; GNONI, Maria Grazia; TORNESE, Fabiana. Integrating circular economy and sustainability assessment on the micro-level: An umbrella review. **Sustainable Production and Consumption**, v. 50, p. 405-415, 2024.
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. (2015). **Towards the Circular Economy: Accelerating the Scale-up across Global Supply Chains**. Disponível em: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_9-Dec-2015.pdf
- EUROPEAN COMMISSION. (2020). **Circular Economy: EU Action Plan for the Circular Economy**. Disponível em: https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm
- FARINHA, C. B.; DE BRITO, J.; VEIGA, R.; Assessment of glass fibre reinforced polymer waste reuse as filler in mortars. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 1579-1594, 2019.
- GANDIA, R. M., GOMES, F. C., CORRÊA, A. A. R., RODRIGUES, M. C., & MENDES, R. F. Physical, mechanical and thermal behavior of adobe stabilized with glass fiber reinforced polymer waste. **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 168-182, 2019.
- GARCEZ, Mônica Regina; ROHDEN, Abrahão Bernardo; DE GODOY, Luis Gabriel Graupner. The role of concrete compressive strength on the service life and life cycle of a RC structure: Case study. **Journal of cleaner production**, v. 172, p. 27-38, 2018.
- GARCÍA, D.; VEGAS, I.; CACHO, I. Mechanical recycling of GFRP waste as short-fiber reinforcements in microconcrete. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 293-300, 2014.
- GEERKEN, T., SCHMIDT, J., BOONEN, K., CHRISTIS, M., & MERCIAI, S.; Assessment of the potential of a circular economy in open economies—Case of Belgium. *Journal of Cleaner Production*, 227, 683-699; 2019
- GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner production**, v. 114, p. 11-32, 2016.
- GIANNETTI, B. F.; BARRELLA, F. A.; ALMEIDA, C. M. V. B. A combined tool for environmental scientists and decision makers: ternary diagrams and emergy accounting. **Journal of cleaner production**, v. 14, n. 2, p. 201-210, 2006.
- GIRESENI, Linda; GRAZIOTTI, Francesco; GUERRINI, Gabriele. Ferramentas de decisão multicritério para seleção de retrofits integrados sustentáveis: aplicação à recuperação sísmica e energética de um edifício de alvenaria. **Journal of Building Engineering**, v. 95, p. 110017, 2024.
- GONZÁLEZ, C., VILATELA, J. J., MOLINA-ALDAREGUÍA, J. M., LOPES, C. S., & LLORCA, J. (2017). Structural composites for multifunctional applications: Current challenges and future trends. *Progress in Materials Science*, 89, 194-251.

- GRAEDEL, T. E. **Streamlined life-cycle Assessment**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998
- HABERT, G., ARRIBE, D., DEHOVE, T., ESPINASSE, L., & LE ROY, R. (2012). Reducing environmental impact by increasing the strength of concrete: quantification of the improvement to concrete bridges. *Journal of Cleaner Production*, 35, 250-262.
- HAN, X., YAN, J., LIU, M., HUO, L., & LI, J.; Experimental study on large-scale 3D printed concrete walls under axial compression. **Automation in Construction**, v. 133, p. 103993, 2022.
- HOFMEISTER, Michael. Recycling turbine blade composites: Concrete aggregate and reinforcement. Tech. Np: np, 2012.
- ILLANKOON, I.; TAM, V.; Le, K.; & Shen, L.;. Key credit criteria among international green building rating tools; *Journal of Cleaner Production*; 164, 209-220; 2017.
- ISO 14040 – International Organization for Standardization. Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework. Genève, Switzerland, 2006.
- KAPICA, Bogumiła; TARGOWSKI, Wojciech; KULOWSKI, Andrzej. Is the Concept of Zero Waste Possible to Implement in Construction?. **Buildings**, v. 14, n. 2, p. 428, 2024.
- KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, conservation and recycling**, v. 127, p. 221-232, 2017.
- KOTYNIA, Renata; SZCZECZ, Damian; KASZUBSKA, Monika. Bond behavior of GRFP bars to concrete in beam test. *Procedia Engineering*, v. 193, p. 401-408, 2017.
- LI, Jia; GAO, Bei; XU, Zhenming. New technology for separating resin powder and fiberglass powder from fiberglass–resin powder of waste printed circuit boards. **Environmental science & technology**, v. 48, n. 9, p. 5171-5178, 2014.
- IEDER, Michael; RASHID, Amir. Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. **Journal of cleaner production**, v. 115, p. 36-51, 2016.
- LIMA, L.; TRINDADE, E.; ALENCAR, L.; ALENCAR, M.; & SILVA, L.; Sustainability in the construction industry: A systematic review of the literature. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125730; 2021
- LIU, Ying; FARNSWORTH, Michael; TIWARI, Ashutosh. A review of optimisation techniques used in the composite recycling area: State-of-the-art and steps towards a research agenda. *Journal of Cleaner Production*, v. 140, p. 1775-1781, 2017.
- MARSH, Ellen; ALLEN, Stephen; HATTAM, Laura. Tackling uncertainty in life cycle assessments for the built environment: A review. *Building and Environment*, v. 231, p. 109941, 2023.
- MASTALI, M., DALVAND, A., SATTARIFARD A.R., ABDOLLAHNEJAD Z.; Effect of different lengths and dosages of recycled glass fibres on the fresh and hardened properties of SCC. **Magazine of Concrete Research**, v. 70, n. 22, p. 1175-1188, 2018.
- MASTALI, M.; DALVAND, A.; SATTARIFARD, A. R.; The impact resistance and mechanical properties of reinforced self-compacting concrete with recycled glass fibre reinforced polymers. **Journal of Cleaner Production**, v. 124, p. 312-324, 2016.
- MATRENICHEV, V., LESSA BELONE, MC, PALOLA, S., LAURIKAINEN, P., & SARLIN, E. (2020). Abordagem de redimensionamento para aumentar a viabilidade de compósitos reforçados com fibras recicladas. *Materiais*, 13 (24), 5773.
- MAYER, A., HAAS, W., WIEDENHOFER, D., KRAUSMANN, F., NUSS, P., & BLENGINI, G. A. (2019). Measuring progress towards a circular economy: a monitoring framework for economy-wide material loop closing in the EU28. *Journal of industrial ecology*, 23(1), 62-76.
- MÖLLER, Ian Robert. "An investigation into appraisal methods for industrial projects." Thesis., University of Cape Town ,Faculty of Engineering & the Built Environment ,Department of Construction Economics and Management, 1990
- MOWAFY, Nada; EL ZAYAT, Mohamed; MARZOUK, Mohamed. Parametric BIM-based life cycle assessment framework for optimal sustainable design. **Journal of Building Engineering**, v. 75, p. 106898, 2023.

- MUHLBACHER, Hans; EINARSDÓTTIR, Bryndís; CASTELLO, Alessio. Necessary engagement in stakeholder relationships for successful membership in industrial clusters. *Industrial Marketing Management*, v. 118, p. 1-11, 2024.
- NBR, ABNT. 12118: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria—métodos de ensaio. **Rio de Janeiro**, 2013.
- NBR, ABNT. 6136: Blocos Vazados de Concreto Simples para Alvenaria-Requisitos. **ABNT: Rio de Janeiro, Brazil**, 2016.
- NBR, ABNT. 6136: Blocos Vazados de Concreto Simples para Alvenaria-Requisitos. **ABNT: Rio de Janeiro, Brazil**, 1977.
- NBR, ABNT. 6136: Blocos Vazados de Concreto Simples para Alvenaria-Requisitos. **ABNT: Rio de Janeiro, Brazil**, 1994.
- NEAD. National Environmental Accounting Database V2.0. <http://www.emergynead.com/country/data> . Ultimo acesso em Outubro 2024.
- NEVES, A., GODINA, R., AZEVEDO, S. G., & MATIAS, J. C. A comprehensive review of industrial symbiosis. *Journal of cleaner production*, v. 247, p. 119113, 2020.
- NGUYEN, Thuc Boi Huyen; NGUYEN, Hoc Thang. Enhancement for Mechanical Properties of Green Composites Using Treated Yellow Bamboo. In: **Materials Science Forum**. Trans Tech Publications Ltd, 2021. p. 57-63.
- NGWAKA, U., KHALID, Y., LING-CHIN, J., COUNSELL, J., SIDDIQUI, F., PINEDO-CUENCA, R., & ROSKILLY, A. P. (2023). **Industrial cluster energy systems integration and management tool**. *Energy Conversion and Management*, 297, 117731.
- NIKOLAOU, Ioannis E.; JONES, Nikoleta; STEFANAKIS, Alexandros. Circular economy and sustainability: the past, the present and the future directions. **Circular Economy and Sustainability**, v. 1, p. 1-20, 2021.
- ODUM, H. T. *Environmental accounting: emergy and environmental decision making*. Wiley, 1996.
- ODUM, H. T.; ACCOUNTING, Environmental. *Emergy and environmental decision making*. **Environmental accounting**, 1996.
- ODUM, Howard T.; ODUM, Elisabeth C. **Modeling for all scales: an introduction to system simulation**. Elsevier, 2000.
- OLIVEIRA, Lidiane Santana; PACCA, Sérgio Almeida; JOHN, Vanderley Moacyr. Variability in the life cycle of concrete block CO2 emissions and cumulative emergy demand in the Brazilian Market. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 588-594, 2016.
- OLIVEIRA, P.S.; ANTUNES, M.L.P.; DA CRUZ, N.C.; RANGEL, E.C.; DE AZEVEDO, A.R.G.; DURRANT, S.F.; Use of waste collected from wind turbine blade production as an eco-friendly ingredient in mortars for civil construction. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 122948, 2020.
- ONU BRASIL. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Nações Unidas Brasil**. 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 20 maio. 2023.
- ONUBI, Hilary Omatule; YUSOF, Nor'Aini; HASSAN, Ahmad Sanusi. Understanding the mechanism through which adoption of green construction site practices impacts economic performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 254, p. 120170, 2020.
- ORTIZ, Oscar; CASTELLS, Francesc; SONNEMANN, Guido. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. **Construction and building materials**, v. 23, n. 1, p. 28-39, 2009.
- PAN, H., ZHANG, X., WU, J., ZHANG, Y., LIN, L., YANG, G., DENG, S., LI, L., YU, X., QI, H., PENG, H., 2016. Sustainability evaluation of a steel production system in China based on emergy. *Journal of cleaner production*, 112, 1498-1509
- PATEL, K.; GUPTA, R.; GARG, M.; WANG, B.; DAVE, U.; Desenvolvimento de Materiais FRC com Fibras de Vidro Recicladas Recuperadas de Resíduos Industriais de GFRP-Acrílico. **Advances in Materials Science and Engineering** , v. 2019, n. 1, p. 4149708, 2019.

- PBQP-H. Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat. Disponível em: www.pbqp-h.com.br
- PEROVANO, Dalton Gean. **Manual de metodologia da pesquisa científica**. Editora Intersaberes, 2016.
- PORTELA, J. D., GANDIA, R. M., ARAÚJO, B. L. O., PEREIRA, R. A., & GOMES, F. C. Physical, mechanical and thermal behavior of concrete block stabilized with glass fiber reinforced polymer waste. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, p. e2939119838-e2939119838, 2020.
- PORTER, M. E. Clusters and the New Economics of Competition. **Harvard Business Review**, 1998.
- PULSELLI, R. M., SIMONCINI, E., RIDOLFI, R., & BASTIANONI, S. Specific emergy of cement and concrete: An energy-based appraisal of building materials and their transport. **Ecological indicators**, v. 8, n. 5, p. 647-656, 2008.
- RATTLE, Imogen; TAYLOR, Peter G. Factors driving the decarbonisation of industrial clusters: A rapid evidence assessment of international experience. *Energy Research & Social Science*, v. 105, p. 103265, 2023.
- REIKE, Denise; VERMEULEN, Walter JV; WITJES, Sjors. The circular economy: new or refurbished as CE 3.0?—exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. **Resources, conservation and recycling**, v. 135, p. 246-264, 2018.
- RIBEIRO, M. C. S., MEIRA-CASTRO, A. C., SILVA, F. G., SANTOS, J., MEIXEDO, J. P., FIÚZA, A., ... & ALVIM, M. R.; Re-use assessment of thermoset composite wastes as aggregate and filler replacement for concrete-polymer composite materials: A case study regarding GFRP pultrusion wastes. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 104, p. 417-426, 2015.
- RIBEIRO, R. P.; NIEVES, L. J. J.; BERNARDIN, A. M.; Effect of fiberglass waste and fly ash addition on the mechanical performance of Portland cement paste. **Cleaner Materials**, v. 7, p. 100176, 2023.
- RODIER, Loïc; SAVASTANO JR, Holmer. **Use of glass powder residue for the elaboration of eco-efficient cementitious materials**. *Journal of Cleaner Production*, v. 184, p. 333-341, 2018.
- RODIN III, H.; NASSIRI, S.; ENGLUND, K.; FAKRON, O.; LI H.; Recycled glass fiber reinforced polymer composites incorporated in mortar for improved mechanical performance. **Construction and Building Materials**, v. 187, p. 738-751, 2018.
- ROMO-OROZCO, J. M.; CONTRERAS-JIMÉNEZ, J. C.; CORONA-ARMENTA, J. R.; & MORALES-MENDOZA, L. F.; A methodological approach to evaluate structural building projects through the Environmental Economic Index; *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(3), 901-918. 2022
- SAAFAN, M. A. A. Shear strengthening of reinforced concrete beams using GFRP wraps. **Acta Polytechnica**, v. 46, n. 1, 2006.
- SAVCHUK, Volodymyr. Real Options Technique as a Tool of Strategic Risk Management. **arXiv preprint arXiv:2303.09176**, 2023.
- SCHRÖDER, Patrick; LEMILLE, Alexandre; DESMOND, Peter. Making the circular economy work for human development. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 156, p. 104686, 2020.
- SHAPOSHNIKOVA, I. O. ANALYSIS OF THE IMPACT OF INCREASING COSTS OF CONSTRUCTION MATERIALS ON HOUSING AFFORDABILITY. **Building production**, n. 78, p. 110-116, 2024.
- SILVERMAN, David. What counts as qualitative research? Some cautionary comments. **Qualitative sociology review**, v. 9, n. 2, p. 48-55, 2013.
- SILVESTRE, Bruno S.; ȚÎRCĂ, Diana Mihaela. Innovations for sustainable development: Moving toward a sustainable future. **Journal of cleaner production**, v. 208, p. 325-332, 2019.
- SMOL, Marzena; KULCZYCKA, Joanna; AVDIUSHCHENKO, Anna. Circular economy indicators in relation to eco-innovation in European regions. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 19, p. 669-678, 2017.

- SOARES, Sebastião Roberto; SOUZA, DM de; PEREIRA, Sibeli Warmiling. A avaliação do ciclo de vida no contexto da construção civil. *Coletânea Habitare*, v. 7, p. 96-127, 2006.
- SONG, Qingbin; WANG, Zhishi; LI, Jinhui. Sustainability evaluation of e-waste treatment based on emergy analysis and the LCA method: a case study of a trial project in Macau. *Ecological indicators*, v. 30, p. 138-147, 2013.
- SOUZA, Micael Felipe de; SORIANO, Julio; PATINO, Marco Tulio Ospina. Resistência à compressão e viabilidade econômica de blocos de concreto não estrutural dosado com resíduos de tijolos cerâmicos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, p. e12203, 2018.
- STAHEL, W. R. The circular economy. *nature*, 531 (7595), 435–438. **World Business Council for Sustainable Development.(1999). Corporate Social Responsibility**, 2016.
- TAKANO, A., HAFNER, A., LINKOSALMI, L., OTT, S., HUGHES, M., & WINTER, S. Life cycle assessment of wood construction according to the normative standards. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 73, p. 299-312, 2015.
- THOMAS, Tilba; PRAVEEN, A. Emergy parameters for ensuring sustainable use of building materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p. 122382, 2020.
- TITTARELLI, F.; KAWASHIMA, S., TREGGER, N., MORICONI, G., & SHAH, S. P.; Effect of GRP by-product addition on plastic and hardened properties of cement mortars. In: **Proceedings of the Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Ancona, Italy**. 2010. p. 28-30.
- TITTARELLI, F.; SHAH, S.; P. Effect of low dosages of waste GRP dust on fresh and hardened properties of mortars: Part 1. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 1532-1538, 2013.
- TITTARELLI, Francesca; MORICONI, Giacomo. Uso de subprodutos industriais de PRFV em compósitos à base de cimento. *Cement and Concrete Composites* , v. 32, n. 3, p. 219-225, 2010.
- TURKEN, Nazli; GEDA, Avinash. Supply chain implications of industrial symbiosis: A review and avenues for future research. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 161, p. 104974, 2020.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. . Washington, D.C.: USEPA, 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov>. Acesso em: 2 dez. 2024.
- VIEIRA, Darli Rodrigues; CALMON, João Luiz; COELHO, Felipe Zanellato. Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review. *Construction and Building Materials*, v. 124, p. 656-666, 2016.
- VITALE, P., NAPOLITANO, R., COLELLA, F., MENNA, C., & ASPRONE, D. Cement-matrix composites using CFRP waste: A circular economy perspective using industrial symbiosis. *Materials*, v. 14, n. 6, p. 1484, 2021.
- WANG, Gang; FENG, Xiao; CHU, Khim Hoong. A novel approach for stability analysis of industrial symbiosis systems. *Journal of Cleaner Production*, v. 39, p. 9-16, 2013.
- WARD, A.; *Chatham House Expert Perspectives 2018: Risks and Opportunities in International Affairs*, Chatham House. United Kingdom.; 2018
- WORLD ECONOMIC FORUM. (2019). **Towards the Circular Economy: Accelerating the Scale-up across Global Supply Chains**. Disponível em: http://www3.weforum.org/docs/WEF_ENV_TowardsCircularEconomy_Report_2019.pdf
- WORLD ECONOMIC FORUM: Digital Transformation Initiative. Executive Summary. January 2017 <http://reports.weforum.org/digital-transformation/wp-content/blogs.dir/94/mp/files/pages/files/dti-executive-summary-website-version.pdf>
- YAKOVLEV, G., KHOZIN, V., ABDRAKHMANOVA, L., MAISURADZE, N., MEDVEDEV, V., GRECHKIN, P., ... & ZAKIROV, M. F.; Sustainable Ways and Methods of Recycling Epoxy Fiberglass Waste. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2021. p. 032024.
- YAZDANBAKHS, A.; BANK, L.C.; **A critical review of research on reuse of mechanically recycled FRP production and end-of-life waste for construction**. *Polymers*, v. 6, n. 6, p. 1810-1826, 2014.

- YAZDANBAKHS, A.; BANK, L.C.; RIEDER, K-A.; TIAN.; Y, CHEN C.; Concrete with discrete slender elements from mechanically recycled wind turbine blades. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 128, p. 11-21, 2018.
- YAZDANBAKHS, A.; BANK, L. C.; CHEN, C.; Use of recycled FRP reinforcing bar in concrete as coarse aggregate and its impact on the mechanical properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 278-284, 2016.
- YIN, R. K.; Estudo de caso: planejamento e métodos. Porto Alegre; Boookman; 2001
- YU, Y.; YAZAN, D. M.; BHOCHHIBHOYA, S.; VOLKER, L.; Towards Circular Economy through Industrial Symbiosis in the Dutch construction industry: A case of recycled concrete aggregates. **Journal of cleaner production**, v. 293, p. 126083, 2021.
- ZHANG, J.; S. SRINIVASAN, R.; PENG, C.; Ecological assessment of clay brick manufacturing in china using emergy analysis. **Buildings**, v. 10, n. 11, p. 190, 2020.
- ZHANG, R., ZHAO, X., JIN, L., & DU, X. Effect of elevated temperature on the low-velocity impact performances of GFRP reinforced concrete slabs. **Construction and Building Materials**, v. 395, p. 132285, 2023.
- ZHAO, Y.; YU, M.; XIANG, Y.; KONG, F.; LI, L.; A sustainability comparison between green concretes and traditional concrete using an emergy ternary diagram. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120421, 2020.

ADENDOS

APÊNDICE A: Resumo do reaproveitamento de resíduos de GFRP na literatura

Referência/ ano	Fonte do Composto	Composição do Composto	Tipo de fibra de vidro e resina	Peneirar/ Classificar	Tamanho e forma	Substituição Cimento	Substituição agregado
Asokan et al. 2009		Resíduos de GRP em pó com uma pequena quantidade de fibra de vidro (95% em peso de pó; cerca de 5% em peso de fibra)	poliéster termofixo resina; o vidro transição temperatura (Tg) de Pó residual de GRP estava em torno de 135,4 °C	Usando uma peneira de 2 mm e segregada em fibra e pó	Pó. Com um amplo tamanho de partícula variando de 0,02 a 600 µm		5 a 50% peso agregado fino
Asokan et al 2010		Fibra residual de GRP com um comprimento de cerca de 20 mm, uma mistura de pó moído de GRP, fibra longa e polietileno longo (95% em peso de pó e cerca de 5% em peso de fibra)	resina de poliéster termofixa	processado e o polietileno e a fibra longa foram separados do pó usando peneira de 2 mm.	Pó. variando de 0,02 a 600 µm (quase 90% das partículas de pó estavam abaixo de 63 µm)		5 a 50% peso agregado fino
Tittarelli e Moriconi 2010	estaleiro como subproduto industrial.		20% em volume de fibras de vidro e 80% em volume de material orgânico		Pedaços. Variou de 0,02 a 20 mm		10 a 20% volume. Agregado fino
Tittarelli et al. 2010	estaleiro como subproduto industrial.		20% em volume de fibras de vidro e 80% em volume de material orgânico				5 a 10% volume. agregado fino
Coppola et al. 2011	estaleiro como subproduto industrial gerado						10% volume. agregado fino

APÊNDICE A: (continuação)

Referência/ ano	Fonte do Composto	Composição do Composto	Tipo de fibra de vidro e resina	Peneirar/ Classificar	Tamanho e forma	Substituição Cimento	Substituição agregado
Correia et al. 2011	pelo corte de perfis pultrudados						5 a 20% volume. agregado fino
Corinaldesi 2012		cerca de 20% em volume de fibras de vidro e 80% em volume de material orgânico					
Hofmeister 2012					cubos de fibra de vidro Tiras de GFRP (foram cortadas paralelamente às fibras unidirecionais)		50 a 100% Volume. Agregado grosso
Tittarelli 2013	estaleiro um subproduto industrial foi adicionado	cerca de 20% em volume de fibras de vidro e 80% em volume de resina de poliéster			Irregular no tamanho e formato. Pó ligeiramente maior que 100 µm (pedaços variaram de 0,02 a 20 mm)		2,5 a 5% volume. Agregado fino
Tittarelli e Shah 2013	estaleiro um subproduto industrial foi adicionado						5 to 10 vol%. Agregado fino
Mastali et al. 2016	da folha GFRP				19 mm e 25 mm. Formato redondo e superfície lisa		0,25 a 1,25% adicionado ao total.

APÊNDICE A: (continuação)

Referência/ ano	Fonte do Composto	Composição do Composto	Tipo de fibra de vidro e resina	Peneirar/ Classificar	Tamanho e forma	Substituição Cimento	Substituição agregado
García et al. 2014	carenagem do trem	matéria orgânica 50,63%; Carga inorgânica (hidróxido de alumínio) 18,96%; Fibra de vidro 30,41%; Arranjo GF: tapete de fio picado			peneiramento do material moído através de uma malha de 5,6 mm		1 a 2% em peso. Agregado fino
Ribeiro et al. 2015	trituração das sobras resultantes dos processos de corte e montagem de perfis de pultrusão em GFRP durante obras de construção	um teor médio de material inorgânico de 71% correspondente a fibras de vidro, desses (55% fibras de vidro), 16% carbonato de cálcio e um teor médio de resina de 29%.	composto por uma resina de poliéster insaturada (Aropol® FS3992) carregada com carbonato de cálcio e reforçada com mecha de vidro E (4800 Tex), manta de filamento contínuo (25Tex) e véus de superfície		dois tamanhos de resíduos de GFRP moídos usando peneiras de fundo dentro da câmara de moagem com malhas de tamanhos diferentes		4 a 12% em peso da massa total Agregado fino
Yazdanbakhsh et al. 2016	da produção de vergalhões de polímero reforçados com fibra de vidro enrolados helicoidalmente e revestidos com areia.	cortado usando uma serra de diamante em pedaços cilíndricos curtos peneiramento: gradação de tamanho de acordo com o tamanho de classificação ASTM C33 de 56			19 mm e 25 mm. Formato redondo e superfície lisa		40 to 100% do volume. Agregado grosso.
Mastali et al. 2018	recuperado de sobras de folhas de PRFV inutilizáveis com espessura de 0,11 mm				comprimentos médios de 10, 20 e 30 mm pequenas fibras		0.5 a 2% do volume do mix

APÊNDICE A: (continuação)

Referência/ ano	Fonte do Composto	Composição do Composto	Tipo de fibra de vidro e resina	Peneirar/ Classificar	Tamanho e forma	Substituição Cimento	Substituição agregado
Dehghan et al. 2017	compósito para moldagem de chapas estruturais; molde de transferência de resina leve	20 a 40 vol% de conteúdo de vidro	Éster epóxi vinílico à base de bisfenol- A/Novolac/retardador de chama; Poliéster insaturado	sem-fim fechado alimenta uma série de peneiras com abertura perfurada de 9,5 e 4,75 mm	comprimento médio do aglomerado de fibras: 17,2 a 19,5 mm. fofo		5% em peso. Agregado grosso.
Yazdanbakhsh et al. 2016	da produção de vidro enrolado helicoidalmente e revestido com areia vergalhões de polímero reforçados com fibra			6 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento. Tamanhos de partícula de 6 a 19 mm			5 a 10% em volume. Agregado grosso.
Rodin III et al. 2018	painéis retangulares de pás de turbinas eólicas em fim de vida	57% fibra de vidro e 43% resina de poliéster		colocado em uma mesa vibratória de peneira para processar os diferentes grupos de tamanhos de GFRP	pó: vidro e pequenas fibras médio grande: fios semelhantes a fibras		3% do volume. Agregado Fino 1 a 5% do volume. Agregado fino
Patel et al. 2019	de resíduos acrílicos	proporção de resíduos de GFRPA (por volume): fibras de vidro 6–9%, resina 65–70% e PMMA ~25%; uma resina de poliéster insaturada		uma peneira de 600 µm foi usada para separar o pó fino das fibras de vidro	Pó: 13,6 µm; fibras: comprimento: menos de 15 mm		0.1 a 0.3% volume Agregado fino

APÊNDICE A: (continuação)

Referência/ ano	Fonte do Composto	Composição do Composto	Tipo de fibra de vidro e resina	Peneirar/ Classificar	Tamanho e forma	Substituição Cimento	Substituição agregado
Yazdanbakhsh et al. 2018	carcaça de uma pá de turbina eólica; pedaços quadrados. espessura de aproximadamente uma polegada			Tiras quadradas (6 x 6 mm) e comprimento de 100 mm. Ranhuras com profundidade de 2 mm.			5 a 10% volume. Agregado grosso
Farinha et al. 2019	Partículas utilizadas vieram do processo de corte de grades de piso	a resina poliéster (matéria orgânica) foi cerca de 29,84% e as fibras de vidro o restante (70,16%)		menor que 63 µm, com formato irregular, mas sem partículas ásperas			10 a 50% volume. Agregado fino
Oliveira et al. 2020	coletado de um fabricante de pás eólicas	23,8 ± 0,02% de material orgânico, sendo 76,2 ± 0,02% inorgânico	o polímero termofixo	diâmetro de 0,5 a 3 mm de resíduo em pó. granulometria semelhante a areia			7,5 a 37,5% em peso Agregado fino.
Baturkin et al. 2021	turbinas eólicas desmontadas no final do seu ciclo de vida	36% de conteúdo orgânico não reativo, nomeadamente 29% de resina e 7% de madeira. A parcela restante (64%) representa fibras de vidro		tamanho médio de partícula de 3 µm para o pó GRFP cubos de 20 mm Pó de GFRP		10 a 30% em peso 40% em peso	33 a 100% do volume 30 a 60% do peso Agregado fino

APÊNDICE B: Coeficientes de categoria de impacto para os itens incorporados nas empresas de blocos de concreto não estrutural.

Coeficientes LCI do banco de dados Ecoinvent, versão 3.8 (2021), alocação no ponto de substituição, método LCI de ponto médio da receita (Hierarquista). Mudança climática (100 anos), esgotamento fóssil e transformação natural da terra.

Item e Unidade	Descrição	Climate change	Fossil depletion	Natural land transformation
		kgCO ₂ -eq. /Unidade	Kg óleo-eq. /Unidade	m ² /Unidade
Aço (kg)	Trabalho com metais, média para fabricação de produtos de aço, RoW	2.1101	0,57523	0,0004819
Cascalho (kg)	Produção de cascalho, britado, BR	0,0049416	0,001429	3.24E-06
Pó de Rocha (kg)	^a	0,0049416	0,001429	3.24E-06
Água (kg)	Produção de água encanada, tratamento convencional, BR	0,0001993	5.43E-05	1.22E-07
Cimento (kg)	Produção de cimento, Portland, BR	0,82814	0,089315	6.82E-05
Eletricidade (kWh)	produção de eletricidade, hidrelétrica, reservatório, região tropical, rede BR-Sul	0,064956	0,001236	0,0001107

^a Assumido como igual a 'cascalho' devido à falta de dados.

APÊNDICE C: Coeficientes de categoria de impacto para os itens do aterro como emissões evitadas

Coeficientes LCI do banco de dados Ecoinvent, versão 3.8 (2021), alocação no ponto de substituição, método LCI mid-point (Hierarquista). Mudança climática (100 anos), esgotamento fóssil e transformação natural da terra.

Ítem e unidade	Descrição	LCI coefficients		
		kgCO ₂ -eq. /Unidade	Kg _{oil} -eq. /Unidade	m ² /Unidade
Solo (kg)	Comércio de terreno triturado, GLO	1,92E+04	4,93E+04	2,11E+01
Cascalho (kg)	produção de cascalho, britado, BR	4,94E-03	1,43E-03	3,24E-06
Manta de PEAD (kg)	produção de polietileno, alta densidade, granulado, RoW	2,24E+00	1,82E+00	1,19E-04
Aço (Máquinas) (kg)	Trabalho com metais, média para fabricação de produtos de aço, RoW	2.11E+00	5,75E-01	4,81E-04
Diesel (kg)	produção de diesel, operação de refinaria de petróleo, BR	3,44E-01	1,23E+00	7,51E-04
Antiespumante (L) ^a	-	-	-	-
NaOH 50% (kg)	eletrólise de cloro-álcali, célula de diafragma, RoW	1,43E+00	1,98E-01	2,19E-04
Carvão (kg)	produção de carvão ativado, granular a partir de carvão duro, RoW	8,28E+00	2,40E+00	6,30E-04
Percloroeto férrico (kg)	produção de cloreto de ferro(II), RoW	2,12E-01	5,95E-02	4,10E-05
Calcário (CaOH2) (kg)	produção de cal, hidráulica, RoW	8,99E-01	1,06E-01	6,91E-05
Eletricidade (kWh)	produção de eletricidade, hidrelétrica, reservatório, região tropical, rede BR-Sul	6,50E-02	1,24E-03	1,11E-04
Concreto (kg)	concrete, all types to generic market for concrete, normal strength, RoW	6,81E-02	1,24E-02	2,60E-05
Tubulação de biogás HDPE (kg)	produção de polietileno, alta densidade, granulado, RoW	2,24E+00	1,82E+00	1,19E-04
Aço (geração de biogás) (kg)	Trabalho com metais, média para fabricação de produtos de aço, RoW	2.11E+00	5,75E-01	4,81E-0

^a Não encontrado produto específico. Quantidade utilizada insignificante e possivelmente não interfere no resultado.

APÊNDICE D: Memorial de cálculo de ACV para os itens do aterro e redução de transporte como emissões evitadas

Ítem	Quantidade /ano	Unidade	kgCO ₂ -eq./ton _{block}	kgoil-eq./ton _{block}	m ² /ton _{block}
Solo	1,04E+03	kg	1,01E+01	2,59E+01	1,11E-02
Cascalho	1,16E+03	kg	2,89E-06	8,38E-07	1,90E-09
Manta de PEAD	7,83E-01	kg	8,86E-07	7,20E-07	4,71E-11
Aço (Máquinas)	1,35E-01	kg	1,44E-07	3,92E-08	3,28E-11
Diesel Máquinas ^a	1,64E-01	kg	2,85E-08	1,02E-07	6,22E-11
Diesel Transporte ^b	2,97E+01 ^c	kg	5,16E-06	1,85E-05	1,13E-08
Antiespumante ^d	2,18E-01	L	-	-	-
NaOH 50%	1,87E+01	kg	1,35E-05	1,87E-06	2,07E-09
Carvão	8,19E-01	kg	3,42E-06	9,93E-07	2,61E-10
Percloroeto férrico	1,37E-01	kg	1,47E-08	4,12E-09	2,84E-12
Calcário (CaOH ₂)	1,09E+00	kg	4,95E-07	5,84E-08	3,80E-11
Eletricidade	7,29E-01	kWh	2,39E-08	4,57E-10	4,09E-11
Concreto	4,37E+00	kg	1,50E-07	2,74E-08	5,74E-11
Tubulação de biogás HDPE	2,88E-03	kg	3,26E-09	2,65E-09	1,73E-13
Aço (geração de biogás)	4,55E-02	kg	4,85E-08	1,32E-08	1,11E-07
Total de emissões evitadas			1,01E+01	2,59E+01	1,11E-02

^a Diesel referente ao consumo das máquinas “tratores” nas atividades do aterro sanitário. ^b Diesel referente ao consumo do transporte rodoviário dos resíduos. ^c Quantidade de consumo de diesel equivalente ao evitado entre o aterro sanitário e a disposição do resíduo de fibra de vidro à fábrica de bloco no transporte rodoviário: (23,5km – 9,85km = 14,65km). ^d Não encontrado produto específico. Quantidade utilizada insignificante e possivelmente não interfere no resultado.

APÊNDICE E: Memorial de cálculo para o inventário do cenário # 1 (Tabela 12)

NOTA: Dados de 5 a 20 são alocados no fator de $1,82E-05$. Razão de 15,23 toneladas/ano de resíduos de fibra de vidro de 1 empresa participante do cluster, contra 840.000 toneladas/ano de resíduos gerais totais enviados para o aterro.

Nota 1. Tara de um caminhão de 8 toneladas, depreciação em 10 anos. $8.000 \text{ Kg} / 10 \text{ anos} = 800 \text{ Kg/ano}$. $800 \text{ Kg/ano} / 360 \text{ dias} = 2,22 \text{ Kg/dia} / 24 \text{ horas} \times 36 \text{ horas/ano} = 3,33 \text{ Kg/ano} = 3,33E+00 \text{ Kg/ano}$. $\text{UEV} = 2,01E12 \text{ sej/kg}$ (Pan et al., 2016)

Nota 2. Distância média de 23,5 Km e eficiência de combustível de 4,9 Km/ litro , equivalente a 5 litros por viagem, 12 viagens por ano. $5 \text{ litros} \times 12 \text{ viagens} = 60 \text{ litros de diesel/ano}$. 1 litro de diesel equivale a 0,853 Kg = $51,1814 \text{ Kg/ano} = 5,12E+01 \text{ Kg/ano}$. $\text{UEV} = 5,99E12 \text{ sej/kg}$ (Brown et al., 2011)

Nota 3. 3 horas (ida e volta) por mês $\times 12 \text{ meses} = 36 \text{ horas por ano} = 3,60E+01 \text{ Kg/ano}$. $\text{UEV Brasil} = 6,57E24 \text{ sej}$ (NEAD, 2015). $6,57E24 \text{ sej por ano} / 2,10E08 \text{ população} = 3,13E16 \text{ sej per capita por ano} / 2112 \text{ horas de trabalho por ano} = 1,48E13 \text{ sej/hora}$

Nota 4. Caminhão Volkswagen Constellation 32.360 6x4 com caçamba roll on/roll off = R\$ 919.000.000. Taxa de câmbio do dólar 5,50 = 167.090 USD. Depreciação em 10 anos = $16.709,00 \text{ USD/ano} / 360 \text{ dias em um ano} = 46,414 \text{ USD/dia} / 8 \text{ horas} = 5,80175 \text{ USD/hora} \times 3 \text{ horas} \times 12 \text{ meses} = 2,088 \text{ USD/ano} = 2,09E+03 \text{ USD/ano}$. $\text{UEV} = 8,41E+12 \text{ sej /USD}$ (Faria, 2017)

Nota 5. $5,73E07 \text{ kg/ ano (in situ)} \times 1,82E-05 = 1,04E03 \text{ Kg/ ano}$. $\text{UEV} = 1,27E12 \text{ sej /kg}$ (Odum , 1996)

Nota 6. $6,39E07 \text{ Kg/ano (in situ)} \times 1,82E-05 = 1,16E03 \text{ kg/ano}$. $\text{UEV} = 1,27E12 \text{ sej /kg}$ (Odum , 1996)

Nota 7. $4,30E04 \text{ Kg/ano (in situ)} \times 1,82E-05 = 7,83E-01 \text{ kg/ano}$. $\text{UEV} = 6,69E12 \text{ sej/kg}$ (Buranakarn, 1998)

Nota 8. Existem 4 tratores de esteira pesando 18.600 Kg cada e depreciados em 10 anos. $18.600 \times 4 \text{ unidades} / 10 \text{ anos} = 7.440 \text{ Kg/ano} \times 1,82E-05 = 1,35E-01 \text{ Kg/ano}$. $\text{UEV} = 2,01E12 \text{ sej /kg}$ (Pan et al., 2016)

Nota 9. Consumo de 11 litros de diesel por hora por trator. 8 horas por dia e 20 dias por mês e 12 meses por ano. $11 \times 4 \times 20 \times 12 = 10.560 \text{ litros por ano}$. Densidade de 1,1723 litros por Kg. $10.560 \text{ litros} / 1,1723 = 9,01E03 \text{ Kg de diesel por ano} \times 1,82E-05 = 1,64E-01 \text{ Kg/ano}$. $\text{UEV} = 5,99E12 \text{ sej /kg}$ (Brown et al., 2011)

Nota 10. 12.000 litros /ano (in situ) $\times 1,82E-05 = 2,18E-01$. O UEV específico não foi encontrado. A quantidade usada é insignificante e, portanto, foi desconsiderada neste estudo.

Nota 11. $1.030.000 \text{ kg/ano (in situ)} \times 1,82E-05 = 1,87E01 \text{ Kg/ano}$. $\text{UEV} = 4,21E12 \text{ sej /kg}$ (Giannetti et. al., 2015) / $1,52E+24$ (linha de base Brown e Ulgiati 2010) $\times 1,20E+ 25 = 3,32E+13 \text{ sej /kg}$ (este estudo)

Nota 12. $45.000 \text{ kg/ano (in situ)} \times 1,82E-05 = 8,19E-01 \text{ kg/ano}$. $\text{UEV } 1,37E-01 \text{ Sej/J}$ (Brown et al., 2011) $\times 28 \text{ MJ por Kg} = \text{UEV } 3,51E12 \text{ Sej/kg}$

Nota 13. $7.500 \text{ Kg/ano (in situ)} \times 1,82E-05 = 1,37E-01 \text{ Kg/ano}$. $\text{UEV} = 2,93E13 \text{ sej /kg}$ (Ingwersen , 2009)

Nota 14. $60.000 \text{ Kg/ano (in situ)} \times 1,82E-05 = 1,09E+00 \text{ Kg/ano}$. $\text{UEV} = 3,18E+12 \text{ sej /kg}$ (convertido de Joules para Kg) (Giannetti et. al., 2015) / $1,52E+24$ (linha de base Brown e Ulgiati 2010) $\times 1,20E+ 25 = 2,51E13 \text{ sej /kg}$ (este estudo)

Nota 15. $3.340 \text{ kWh/mês} \times 12 \text{ meses} = 40.080 \text{ kWh/ano} \times 1,82E-05 = 7,29E-01 \text{ kWh/ano}$.

UEV = 4,18E11 sej /kWh (Giannetti et al., 2015)

Nota 16. 4.800 toneladas (estimado) \times 1.000 kg = 4.800.000 Kg / 20 anos = 240.000 kg/ano \times 1,82E-05 = 4,37E00. UEV = 1,83E12 sej /Kg (Buranakarn , 1998)

Nota 17. 7.910 Kg/ano / 50 anos de vida útil = 158 kg/ano \times 1,82E-05 = 2,88E-03 Kg/ano. UEV = 6,69E12 sej /Kg. (Buranakarn , 1998)

Nota 18. 50.000 kg (estimado) / 20 anos = 2.500 kg/ano \times 1,82E-05 = 4,55E-02 Kg/ano. UEV = 2,01E12 sej /kg. (Pan et al., 2016)

Nota 19. 200 empregados \times 2.112 horas/ano = 422.400 horas/ano \times 1,82E-05 = 7,69E00 horas/ano. UEV Brasil = 6,57E24 (NEAD, 2015). 6,57E24 sej por ano / 2,10E08 população = 3,13E16 sej per capita por ano / 2032 horas trabalhadas por ano = 1,54E13 sej /hora

Nota 20. 643.693 USD/ ano (Sulis , 2023) \times 1,82E-05 = 1,17E01 USD/ ano . UEV = 8,41E12 (Faria, 2017)

Nota 21. 1.360 kg de aço em equipamentos (estimado) / 10 anos = 136 kg/ano = 1,36E02 kg/ano. UEV = 2,01E12 sej /kg (Pan et al., 2016)

Nota 22. 914.000 kg/ano (in situ) = 9,14E05 kg/ano. UEV = 1,27E+12 sej /kg (Odum , 1996)

Nota 23. 914.000 kg/ano (in situ) = 9,14E05 kg/ano. UEV = 1,27E+12 sej /kg (Odum , 1996)

Nota 24. 1.160 kg/ano (in situ) = 1,16E03 kg/ano. UEV = 7,28E+08 sej /kg (Buenfil , 2001)

Nota 25. 152.000 kg/ano (in situ) = 1,52E05 kg/ano. UEV = 2,50E12 sej /kg (Buranakarn , 1998)

Nota 26. 12.100 kWh/ano (in situ) = 1,21E04 kWh/ano. UEV = 4,18E11 sej /kWh (Giannetti et al., 2015)

Nota 27. 176 horas/mês \times 12 meses = 2.112 horas/ano \times 5 força de trabalho = 10.560 horas/ano = 1,06E04 horas/ano. UEV Brasil = 6,57E24 (NEAD, 2015). 6,57E24 sej por ano / 2,10E08 população = 3,13E16 sej per capita por ano / 2112 horas de trabalho por ano = 1,48E13 sej /hora

Nota 28. Máquina de bloco R\$ 60.000,00 + 2 correias transportadoras CTCM 1700 W-235 R\$ 22.000,00 + betoneira de 600 litros R\$ 22.500,00 = R\$ 104.500,00. Taxa de câmbio 1 USD/5,50 BRL = 19.000 USD. Depreciação em 10 anos = 1.900 USD /ano. Nenhum UEV específico encontrado. Considerado UEV no item #20.

APÊNDICE F: Memorial de cálculo para o inventário do cenário #2 (Tabela 13)

Os valores percentuais reduzidos equivalem a 10% de substituição total da massa de concreto dos componentes brita, pó de rocha e cimento. Este valor foi obtido de Portela et al. (2020).

Nota 1. Tara de um caminhão de 8 toneladas, depreciação em 10 anos. $8.000 \text{ Kg} / 10 \text{ anos} = 800 \text{ Kg/ano}$. $800 \text{ Kg/ano} / 360 \text{ dias} = 2,22 \text{ Kg/dia} / 24 \text{ horas} \times 36 \text{ horas/ano} = 3,33 \text{ Kg/ano} = 3,33\text{E}+00 \text{ Kg/ano}$. UEV = $2,01\text{E}12 \text{ sej /kg}$ (Pan et al., 2016)

Nota 2. Distância média de 9,85 Km e eficiência de combustível de 4,9 Km/ Litro , equivalente a 2,02 litros por viagem, 12 viagens por ano. $2,02 \text{ litros} \times 12 \text{ viagens} = 24,13 \text{ litros de diesel/ano}$. 1 litro de diesel equivale a 0,853 Kg = $20,6 \text{ Kg/ano} = 2,06\text{E}+01 \text{ Kg/ano}$. UEV = $5,99\text{E}12 \text{ sej /kg}$ (Brown et al., 2011)

Nota 3. 2 horas (ida e volta) por mês $\times 12 \text{ meses} = 24 \text{ horas por ano} = 2,40\text{E}+01 \text{ Kg/ano}$. UEV Brasil = $6,57\text{E}24$ (NEAD, 2015). $6,57\text{E}24 \text{ sej por ano} / 2,10\text{E}08 \text{ população} = 3,13\text{E}16 \text{ sej per capita por ano} / 2.112 \text{ horas trabalhadas por ano} = 1,48\text{E}13 \text{ sej /hora}$

Nota 4. Caminhão Volkswagen Constellation modelo 32.360 6x4 com caçamba roll on/roll off = R\$ 919.000.000. Dólar 5,50 = 167.090 USD. Depreciação em 10 anos = 16.709,00 USD/ano / 360 dias no ano = 464,14 USD/dia / 8 horas = 58 USD/hora $\times 2 \text{ horas} \times 12 \text{ meses} = 1.392 \text{ USD/ano} = 1,39\text{E}+03 \text{ USD/ano}$. UEV = $8,41\text{E}+12 \text{ sej /USD}$ (Faria, 2017)

Nota 5. 1.360 kg de aço em equipamentos (estimado) / 10 anos = $136 \text{ kg/ano} = 1,36\text{E}02 \text{ kg/ano}$. UEV = $2,01\text{E}12 \text{ sej /kg}$ (Pan et al., 2016)

Nota 6. 914.000 kg/ano (in situ) — $4,6\%a = 8,23\text{E}05 \text{ kg/ano}$. UEV = $1,27\text{E}+12 \text{ sej /kg}$ (Odum , 1996)

Nota 7. 914.000 kg/ano (in situ) — $4,6\%a = 8,23\text{E}05 \text{ kg/ano}$. UEV = $1,27\text{E}+12 \text{ sej /kg}$ (Odum , 1996)

Nota 8. 1.160 kg/ano (in situ) = $1,16\text{E}03 \text{ kg/ano}$. UEV = $7,28\text{E}+08 \text{ sej /kg}$ (Buenfil , 2001)

Nota 9. 152.000 kg/ano (in situ) — $0,8\%a = 1,37\text{E}05 \text{ kg/ano}$. UEV = $2,50\text{E}12 \text{ sej /kg}$ (Buranakarn , 1998)

Nota 10. 12.100 kWh/ano (in situ) = $1,21\text{E}04 \text{ kWh/ano}$. UEV = $4,18\text{E}11 \text{ sej /kWh}$ (Giannetti et al., 2015)

Nota 11. 176 horas/mês $\times 12 \text{ meses} = 2.112 \text{ horas/ano} \times 5 \text{ força de trabalho} = 10.560 \text{ horas/ano} = 1,06\text{E}04 \text{ horas/ano}$. UEV Brasil = $6,57\text{E}24$ (NEAD, 2015). $6,57\text{E}24 \text{ sej por ano} / 2,10\text{E}08 \text{ população} = 3,13\text{E}16 \text{ sej per capita por ano} / 2112 \text{ horas de trabalho por ano} = 1,48\text{E}13 \text{ sej /hora}$

Nota 12. Máquina de bloco R\$ 60.000,00 + 2 correias transportadoras CTCM 1700 W-235 R\$ 22.000,00 + betoneira de 600 litros R\$ 22.500,00 = R\$ 104.500,00. Taxa de câmbio 1 USD/5,50 BRL = 19.000 USD. Depreciado em 10 anos = 1.900 USD/ano. Nenhum UEV específico encontrado. Considerado UEV na Tabela #11, item #20.