

# O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E O CONCEITO DE TECNOCICLO DE MATERIAIS E COPRODUTOS PARA O TREINAMENTO DE ENGENHEIROS

Áurea Luiza Quixabeira Rosa e Silva Rapôso; Sheyla Karolina Justino Marques  
Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Instituto Federal de Alagoas

## RESUMO

---

Este capítulo objetiva apresentar a importância do conceito de tecnociclo para profissionais das Engenharias e áreas afins, visando à aplicação na reciclagem de materiais e coprodutos empregados na indústria da Construção Civil, a fim de promover a redução no uso dos recursos naturais e a ecoeficiência produtiva, por meio da compreensão dos processos produtivos nos ciclos técnicos dos materiais e da adoção de práticas e tecnologias ambientais alinhadas aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. O capítulo encontra-se organizado em duas partes. A primeira estrutura-se em torno dos conceitos de biociclo e tecnociclo, considerando as interseções com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, a partir dos fundamentos da Economia Circular e das estratégias de circularidade dos fluxos de materiais e coprodutos em ciclos fechados para a indústria da Construção Civil. O fechamento dos fluxos de materiais e coprodutos técnicos e biológicos requer o desenvolvimento de diferentes ciclos reversos, que podem ser praticados pelos engenheiros para a reengenharia dos processos produtivos e para o design de novos materiais e/ou produtos em prol de soluções ecoeficientes. A segunda parte do capítulo traz relatos de experiências na formação de engenheiros, tanto no desenvolvimento de tecnologias ambientais quanto no papel socioambiental como atores sociais proativos para a redução dos impactos ambientais no âmbito da indústria da Construção Civil.

Palavras-chave: Desenvolvimento Sustentável, Economia Circular, Tecnociclo, Materiais.

## THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND THE CONCEPT OF MATERIALS AND CO-PRODUCTS TECHNOCYCLE FOR ENGINEER TRAINING

### ABSTRACT

---

This chapter aims to present the importance of the technocycle concept for professionals in Engineering and related areas, aiming at the application in the recycling of materials and co-products used in the Civil Construction industry, in order to promote a reduction in the use of natural resources and productive eco-efficiency, through the understanding of production processes in the technical cycles of materials and the adoption of environmental practices and technologies, in line with the Sustainable Development Goals. The chapter is organized in two parts. The first is structured around the concepts of biocycle and technocycle, considering the intersections with the Sustainable Development Goals, based on the fundamentals of the Circular Economy and circularity strategies of material and co-product flows in closed cycles for the Civil Construction industry. Closing the flows of materials and technical and biological co-products requires the development of different reverse cycles, which can be practiced by engineers for the reengineering of production processes and for the design of new materials and/or products in favour of eco-efficient solutions. The second part of the chapter brings reports of experiences in the training of engineers, both in the development of environmental technologies and in the socio-environmental role as proactive social actors to reduce environmental impacts in the scope of the Civil Construction industry.

Keywords: Sustainable Development, Circular Economy, Technocycle, Materials.

## 1. INTRODUÇÃO

---

A compreensão do conceito de tecnociclo no desenvolvimento de novos materiais e coprodutos apresenta-se como matéria de suma importância para a área das Engenharias, com ênfase para a Engenharia Civil, perpassando de forma interdisciplinar pelas Engenharias de Materiais, Industrial e de Produção e pelo Desenvolvimento Sustentável, com vistas a equilibrar aspectos ambientais e socioeconômicos, e minimizar impactos socioambientais no ciclo de vida de materiais e/ou produtos, a fim de evitar e/ou reduzir a geração de resíduos.

Para McDonough e Braungart (2013), o sistema industrial alterou o equilíbrio natural dos materiais no planeta, ao condensar, alterar e sintetizar os recursos de forma que eles não possam retornar ao solo com segurança, bem como dividiu os fluxos dos materiais em dois: massa biológica e massa técnica ou industrial. Esses dois fluxos devem ser vistos, respectivamente, como: nutrientes biológicos, úteis à biosfera, e como nutrientes técnicos, úteis ao que foi denominado de tecnosfera, ou seja, sistemas de processos industriais. Ao reconhecerem os dois fluxos de nutrientes, McDonough e Braungart (2013) também reconheceram o metabolismo de dois ciclos nos quais os fluxos de recursos circulam: ciclo técnico e ciclo biológico. O ciclo técnico – neste capítulo denominado de tecnociclo – refere-se aos ciclos fechados, dentro dos quais materiais inorgânicos ou sintéticos podem permanecer em uso contínuo sem perder propriedades ou valor. O ciclo biológico refere-se aos nutrientes ou materiais orgânicos, que podem retornar ao sistema ou se decompor, sem causar danos ao meio ambiente e fornecer fonte de alimento para o sistema mais amplo (Moreno et al., 2016).

Os resíduos referem-se ao conjunto de recursos e/ou materiais, gerados pelas diversas atividades produtivas humanas, que são descartados por diversos agentes da sociedade. Diferentemente dos ciclos do sistema biológico – neste capítulo denominados de biociclos, que funcionam de forma cíclica, sistêmica e fechada, sem sobras ou desperdícios; a maioria dos ciclos do sistema industrial –, tecnociclos, cujos processos e operações são criados e gerenciados pelos seres humanos, geram desperdícios por ineficiência produtiva e/ou tecnológica e não apresentam planejamento para a não geração ou destinação ambientalmente correta (Santos, 2019). Os resíduos constituem-se em perdas produtivas geradas por ineficiência no uso dos materiais e por ineficiência de processos e operações do sistema produtivo a que pertencem, e podem assumir a condição de coprodutos ou subprodutos.

Neste estudo, o foco de abordagem para compreensão do conceito de tecnociclo situa-se no olhar para os resíduos, resultantes de desperdícios de recursos pelo modelo linear de produção e consumo, que podem ser redirecionados à indústria da Construção Civil [indústria da CC], por meio da otimização do sistema produtivo com a reintegração dos resíduos como insumos e/ou componentes, na forma de coprodutos ou subprodutos, bem como pela extensão da vida útil com a revalorização dos materiais. A reintegração de coprodutos e subprodutos, agregando novo valor, abrange o desenvolvimento e a implementação de soluções que os convertam em ativos

socioeconômicos; e a extensão da vida útil com revalorização dos materiais envolve o desenvolvimento e a implementação de soluções que incorporem os coprodutos ou subprodutos em biociclos e/ou tecnociclos (Sampaio et al., 2018; Santos, 2019).

Entende-se por coprodutos o conjunto de recursos e materiais que não foram 100% processados no sistema produtivo de origem, devido à ineficiência tecnológica e operacional do sistema a que pertencem, que se encontram em estado de perda, mas que podem assumir estado de fluxo de material e retornar ao tecnociclo como massa técnica em operações e processos internos na forma de insumos primários e/ou secundários (Almeida, 2014; Sampaio et al., 2018). Entende-se por subprodutos o conjunto de recursos e materiais que não foram 100% processados no sistema produtivo de origem, devido à ineficiência tecnológica e operacional do sistema de origem, que se encontram em estado de perda, mas que podem assumir estado de fluxo de material e retornar ao biociclo ou tecnociclo como massa biológica ou técnica em operações e processos externos na forma de insumos primários, secundários e/ou componentes (Almeida, 2014; Sampaio et al., 2018).

Em geral, tanto coprodutos quanto subprodutos gerados são matérias-primas nobres para confecção de novos materiais e produtos; contudo, são vistos pela maioria dos atores envolvidos nos processos como descartes. Poucos conseguem visualizar o valor agregado dos coprodutos e subprodutos, a fim de direcioná-los a cadeias produtivas para prevenção à poluição, produção mais limpa e eficiente, sem perdas. Santos (2019) destaca que coprodutos e subprodutos – enquanto nutrientes técnicos – representam desperdícios tanto de valor econômico e socioambiental quanto de valor não capturado, perdido e/ou destruído; ao não serem reintegrados, constituem-se em passivos ambientais com repercussões econômicas negativas em curto, médio e/ou longo prazo.

McDonough e Braungart (2013, p. 10) acrescentam que a questão principal do design de sistemas para ciclos fechados, intitulados do berço ao berço (*cradle-to-cradle*), quanto ao valor econômico e socioambiental não capturado, perdido e/ou destruído, não são as quantidades de resíduos que se elevam nos aterros sanitários, embora também seja ponto importante a ser considerado no contexto do tecnociclo, mas, sim, o que intituam de “monstros híbridos – misturas de materiais técnicos e biológicos que não podem ser recuperados” após vida útil. O que abre interseções entre desenvolvimento de novos materiais e produtos e tecnociclo, sob a perspectiva da Economia Circular [EC] e do Design para o Ciclo de Vida, com base nos ciclos reversos, em busca da ecoeficiência produtiva e do Desenvolvimento Sustentável.

Este capítulo objetiva apresentar a importância do conceito de tecnociclo para os profissionais das Engenharias e áreas afins, visando à aplicação na reciclagem de materiais e coprodutos empregados na indústria da CC, a fim de promover a redução no uso dos recursos naturais e a ecoeficiência produtiva, por meio da compreensão dos processos produtivos nos ciclos técnicos dos materiais e da adoção de práticas e tecnologias ambientais, alinhadas aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável [ODS]. O capítulo encontra-se or-

ganizado em duas partes. A primeira estrutura-se em torno dos conceitos de biociclo e tecnociclo, considerando as interseções com os ODS, a partir dos fundamentos da EC e das estratégias de circularidade dos fluxos de materiais e coprodutos em ciclos fechados para a indústria da CC. O fechamento dos fluxos de materiais e coprodutos técnicos e biológicos requer o desenvolvimento de diferentes ciclos reversos, que podem ser praticados pelos engenheiros para reengenharia dos processos produtivos e design de novos materiais e/ou produtos em prol de soluções ecoeficientes. A segunda parte do capítulo traz relatos de experiências na formação de engenheiros, tanto no desenvolvimento de tecnologias ambientais do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais do Instituto Federal de Alagoas [PPGTEC-Ifal] quanto no papel socioambiental como atores sociais proativos para a redução dos impactos ambientais no âmbito da indústria da CC.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 2.1 Desenvolvimento Sustentável, Economia Circular e Design para o Ciclo de Vida

Vista como economia de ciclo fechado, a EC apresenta-se como conceito evolutivo no âmbito industrial e socioambiental quanto às metas sistêmicas do Desenvolvimento Sustentável, baseado na cultura sem desperdício, em que o fim de vida de produtos e materiais deve ser substituído pela restauração e regeneração. A EC pode ser definida como sistema regenerativo que visa minimizar, reduzir, fechar e estreitar ciclos de materiais e energia, por meio do projeto, da manutenção, reparação, reutilização, remanufatura, reforma e reciclagem de longa duração. Trata-se de processo contínuo para obtenção de maior eficiência e eficácia dos recursos (Geissdoerfer et al., 2017) e que também considera o uso de energia renovável e a eliminação de produtos químicos tóxicos e resíduos (De Los Rios & Charnley, 2016). Moreno et al. (2016) corroboram que a EC se define como sistema industrial restaurador ou regenerativo por intenção e design; contudo, destacam que, sem mudança sistêmica na forma como produtos, serviços, sistemas e infraestrutura são projetados, o potencial da EC não será alcançado. Segundo os autores, a EC permite ciclo de desenvolvimento contínuo, que preserva e aprimora o capital natural (conjunto de recursos renováveis e não renováveis), otimiza a produção de recursos e minimiza os riscos do sistema, gerenciando estoques finitos e fluxos renováveis.

Apresenta potencial para enfrentar os complexos desafios econômicos e socioambientais do século XXI, dos quais se destacam, neste capítulo, o esgotamento de recursos não renováveis e o uso racional de recursos renováveis e não renováveis, associados ao modelo econômico circular de produção e consumo. Soluções no âmbito dos ODS para enfrentar esses desafios inserem-se no contexto do: Objetivo 9. Indústria, Inovação e Infraestrutura, cujo propósito consiste em "Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação", tomando por referência a meta de "9.4 Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as

indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente corretos”, o que inclui pensar mudanças gerenciais e operacionais para a indústria da CC; e Objetivo 12. Consumo e Produção responsáveis, que se propõe “Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis”, considerando as metas de “12.5 Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso” e “12.a Apoiar países em desenvolvimento a fortalecer suas capacidades científicas e tecnológicas para mudar para padrões mais sustentáveis de produção e consumo”, o que se relaciona com o papel socioambiental dos profissionais das Engenharias em prol do Desenvolvimento Sustentável na indústria da CC (Organização das Nações Unidas Brasil [ONU], 2022).

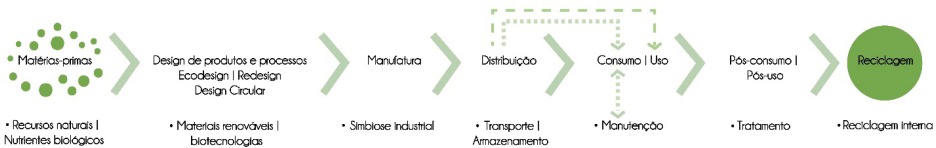
Segundo dados da *Organization for Economic Cooperation and Development* [OECD] (2015), a EC pode viabilizar potenciais soluções para os desafios socioambientais e de desenvolvimento, relacionados ao consumo excessivo de recursos nos níveis global e local. No nível global, a quantidade de materiais extraídos dobrou desde 1980, atingindo perto de 72 gigatoneladas (Gt) em 2010, e está projetada para atingir 100 Gt até 2030. Para Schroeder et al. (2018), as abordagens da EC trazem benefícios econômicos promissores para a geração de emprego e renda e para inovação, produtividade e eficiência de recursos nos países desenvolvidos e nos países em desenvolvimento, como o Brasil. Contudo, apenas 6% de todos os materiais processados pela economia global são reciclados e contribuem para o fechamento do tecnociclo. Segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais [ABRELPE] (2017), o Brasil recicla apenas 3% dos resíduos gerados nos processos de produção.

Os dados corroboram que não haverá estoques de recursos não renováveis e renováveis suficientes, seja em nível global ou local, para alimentar ciclos biológicos e técnicos, se o tecnociclo não respeitar o capital natural e a capacidade de regeneração dos ecossistemas, promovendo a resiliência e o Design Circular, a favor da redução da intensidade de material em uso e da aplicação de estratégias circulares para os ciclos reversos.

## **2.2 Design Circular: pensar o tecnociclo para gestão integrada dos resíduos da indústria da Construção Civil no Brasil**

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos [PNRS] (Lei n. 12.305, 2010) incorporou, nos princípios do Art. 6º (Incisos VII e VIII), conceitos e ferramentas importantes relacionados à gestão integrada dos resíduos, como a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos e o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania. Segundo a PNRS (Lei n. 12.305, 2010), a gestão integrada dos resíduos consiste no conjunto de ações voltadas a soluções para coprodutos e subprodutos, considerando as dimensões política, ambiental, econômica, cultural e social, sob a premissa do Desenvolvimento Sustentável.

O olhar sobre o ciclo de vida de materiais e produtos incide sobre o processo, ou seja, sobre a reflexão quanto ao projeto (design) e ao uso (aplicação). A EC promove pensamento para o tecnociclo e para o ecossistema industrial, com base na corrente da Ecologia Industrial [EI] (Araújo et al., s.d.), de forma que os processos produtivos do tecnociclo evoluam dos ciclos abertos para ciclos fechados, tomando por referência o biociclo e as estratégias de Design Circular para ciclos reversos no sentido da minimização do impacto socioambiental (Figura 1). Esse pensamento da EC conecta-se aos objetivos da PNRS (Lei n. 12.305, 2010), constantes no Art. 7º (Incisos II, IV, VI e VII) para a não geração (evitar ou recusar), redução, reutilização, reciclagem, recuperação e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, e para desenvolvimento e/ou aprimoramento de tecnologias ambientais, integradas à gestão das perdas produtivas, a fim de minimizar impactos ambientais e econômicos.

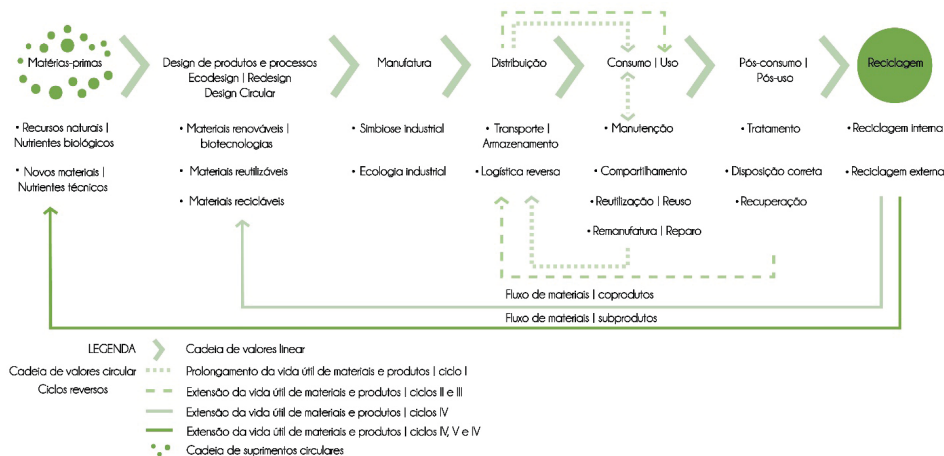


**Figura 1** Estratégias de Design Circular para os ciclos reversos. *Fonte:* Elaboração própria.

As inter-relações existentes entre ciclo de vida de materiais e produtos no âmbito do biociclo e do tecnociclo, em função do não desperdício e/ou da produção e consumo sem perdas, considerando os estados de perdas e de fluxos aos quais materiais e energias fluem ao longo dos diversos subciclos, permitem definir estratégias baseadas na não geração, redução, reutilização, reciclagem e recuperação (Figura 1), a fim de direcionar o ecossistema industrial para impactos ambientais mais positivos quanto ao uso dos recursos. O ciclo de vida de materiais e produtos compreende as etapas de desenvolvimento do produto, extração das matérias-primas e insumos, passando pela manufatura (processos produtivos), distribuição (transportes e armazenamentos), consumo e uso, pós-consumo e pós-uso, até a disposição final e/ou o retorno de materiais e/ou componentes por meio de coprodutos e subprodutos dos processos produtivos de origem ou processos externos, como mostra a Figura 2.

Para o Design Circular, a EC substitui o conceito de fim de vida útil pela restauração e regeneração e visa à eliminação ou minimização de resíduos através do design de materiais, produtos, sistemas e modelos de negócios circulares (Moreno et al., 2016). Além dos fluxos de materiais e nutrientes técnicos, o Design Circular precisa considerar o modelo de negócios para o qual o material e/ou produto está sendo projetado, pois diferentes tipos de ciclos de produtos ocorrem na EC. Alguns ciclos envolvem empresa que mantém o valor econômico dos ativos durante todo o ciclo de vida; já outros envolvem a adoção de recursos que podem ser reintegrados à natureza ou alimentados em outras cadeias de suprimentos. Embora não exista modelo de negócios

‘ideal’, que seja preferível para alcançar a circularidade, são recomendadas abordagens personalizadas com vistas à transição bem-sucedida para a EC.

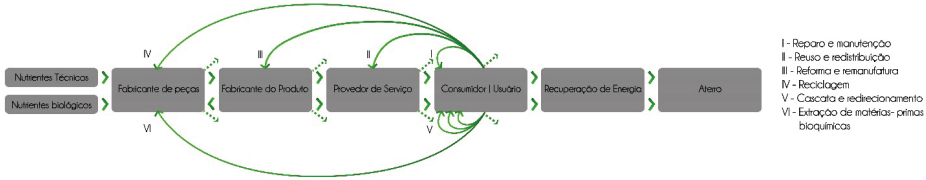


**Figura 2** Ciclo de vida de materiais e produtos. *Fonte:* Elaboração própria.

O design de materiais e/ou produtos circulares precisa estar ‘adequado ao objetivo’, de acordo com o modelo de negócios escolhido (Moreno et al., 2016). O fechamento dos fluxos de nutrientes técnicos e biológicos requer o desenvolvimento de diferentes ciclos reversos.

A Figura 3 e o Quadro 1 sintetizam os seis principais ciclos reversos para a EC, apresentados por Lüdeke-Freund, Gold e Bocken (2019), que podem ser praticados para a reengenharia dos processos e design de materiais por meio de coprodutos e subprodutos circulares, de forma individual ou combinada, em prol de soluções ecoeficientes.

A discussão teórico-prática do conceito de tecnociclo no âmbito do Design Circular de materiais obtidos por coprodutos e subprodutos para a indústria da CC permite a interlocução com o treinamento de profissionais das Engenharias – Civil, de Materiais, Industrial e de Produção – quanto à reengenharia dos processos, inspirada nos ciclos reversos para tecnociclo e no biociclo, a fim de estimular a EC, com vistas à gestão integrada dos resíduos (Almeida, 2014; Sampaio et al., 2018). O fechamento dos ciclos técnicos, por meio da aplicação dos ciclos reversos para materiais derivados de coprodutos e subprodutos voltados à indústria da CC e o exercício do Design Circular pelos engenheiros, é primordial para que os conceitos de tecnociclo e EC sejam práticas efetivas. Empresas e engenheiros precisam ressignificar a forma de consumir e produzir materiais e produtos do setor, antes que os recursos naturais se tornem escassos e os resíduos permaneçam como problema econômico e socioambiental, gerando colapso no planeta.



**Figura 3** Principais ciclos reversos para a Economia Circular. *Fonte:* Elaboração própria.

**Quadro 1** Principais ciclos reversos aplicados à economia circular.

1º ciclo reverso   ciclo I: <b>Reparo e manutenção</b>	As operações de reparo e manutenção prolongam a vida útil dos materiais e produtos no ponto de uso por meio de inspeção e manutenção, que mantêm e/ou restauram as funcionalidades.
2º ciclo reverso   ciclo II: <b>Reuso e redistribuição</b>	As operações de reuso e redistribuição estendem a vida útil dos materiais e produtos para a finalidade à qual foram originalmente projetados e produzidos, com mínimo aprimoramento ou alteração.
3º ciclo reverso   ciclo III: <b>Reforma e remanufatura</b>	As operações de reforma e remanufatura denotam a revisão mais abrangente dos materiais e produtos, substituindo peças que falham ou que poderão falhar, garantindo que materiais e produtos cumpram as especificações de desempenho do fabricante por meio da restauração dos componentes.
4º ciclo reverso   ciclo IV: <b>Reciclagem</b>	As operações de reciclagem (interna ou externa) ocorrem quando os materiais não podem ser remanufaturados, sendo separados, coletados, processados e reinseridos no processo de produção de novos materiais e produtos. Os materiais reciclados podem apresentar qualidade e funcionalidade mais baixas ( <i>downcycling</i> ) ou mais altas ( <i>upcycling</i> ) do que o material original.
5º ciclo reverso   ciclo V: <b>Cascata e redirecionamento</b>	As operações de cascata e redirecionamento referem-se a múltiplos usos de materiais biológicos, explorando primeiro as funcionalidades desses materiais como componentes e, finalmente, recuperando energia ao longo do processo de aumento da entropia.
6º ciclo reverso   ciclo VI: <b>Extração bioquímica de matérias-primas</b>	As operações de extração de matéria-prima bioquímica são realizadas por meio de processos de conversão que transformam biomassa simultaneamente em produtos químicos e em uma ou mais formas de energia.

### 3. MÉTODO

A abordagem metodológica deste capítulo encontra-se fundamentada em pesquisa aplicada e qualitativa, analítico-descritiva, para contextualização das estratégias circulares de reintegração e valorização dos materiais derivados de subprodutos, cujo procedimento de análise de conteúdo consistiu na triangulação teórica e prático-reflexiva. O estudo foi dividido em duas fases:

- ◆ Fase 1. Revisão de literatura: pesquisa bibliográfica para contextualização dos conceitos de resíduos, coprodutos, subprodutos, biociclo, tecnociclo, EC, Design Circular, Ciclo de Vida do Produto e para definição dos



ciclos reversos baseados na EC. A revisão de literatura foi realizada no período de 2021 a 2022, utilizando como termos os principais conceitos do estudo: economia circular e ciclo técnico;

- ◆ Fase 2. Pesquisa aplicada: estudos de casos derivados das pesquisas de desenvolvimento tecnológico e inovação no Mestrado Profissional do PPGTEC-Ifal. Os quatro estudos de casos foram selecionados de pesquisas realizadas no período de 2017 a 2021. Foram selecionadas as pesquisas que apresentaram soluções para a integração de ciclos biológico-técnico ou técnico-técnico, desenvolvidas por engenheiros, aplicando os conceitos abordados neste estudo.

Com o objetivo de formar engenheiros e profissionais de áreas afins, mestres em Tecnologias Ambientais, cientes do papel socioambiental e dos impactos gerados ao meio ambiente pela indústria da CC, as disciplinas de Desenvolvimento de Materiais Compósitos de Interesse Ambiental e de Design para o Meio Ambiente do PPGTEC-Ifal abordam estratégias circulares de reintegração e valorização de coprodutos e subprodutos baseados na EC, as quais proporcionam os seguintes resultados:

- ◆ Design para o meio ambiente: diagnóstico ambiental do tecnociclo e do ecossistema industrial de origem, identificando ponto de interrupção do ciclo por ineficiência produtiva;
- ◆ Desenvolvimento de materiais compósitos de interesse ambiental: caracterização de coprodutos e subprodutos, reengenharia do tecnociclo (redesign dos processos) e desenvolvimento de alternativas para novos materiais e/ou produtos por meio de ensaios tecnológicos, identificando soluções técnica e economicamente viáveis.

Analisando biociclos e tecnociclos de cadeias produtivas de Alagoas, Brasil, as pesquisas do PPGTEC-Ifal, apresentadas como estudos de casos, investigaram a viabilidade técnica de aplicação de subprodutos gerados no ciclo extrativista do sururu, na incineração de resíduos de serviços de saúde [RSS], no cascalho de petróleo e nas cinzas da fibra do coco em materiais compósitos de interesse ambiental de base cimentícia, como concreto e argamassas, a partir da identificação dos pontos de interrupção do ciclo, ao exercitar o pensamento do ciclo de vida, e a partir dos procedimentos para pesquisa experimental, conforme ilustra o fluxograma da Figura 4.

Para a caracterização físico-química dos objetos de estudo, foram realizados ensaios de análise granulométrica, fluorescência de raios X, difração de raios X, análise termogravimétrica e microscopia eletrônica de varredura. Posteriormente, foram realizados ensaios tecnológicos de: resistência mecânica à compressão, absorção de água, índice de consistência, MEV da superfície de fratura e ensaios específicos, de acordo com a norma de cada produto confeccionado.

Os estudos buscaram organizar os processos produtivos analisados como tecnociclos, integrados aos ciclos originais, com o propósito de iniciar transição para o sistema de produção e consumo fechado, por meio da combinação

de estratégias de redução e de estratégias de reciclagem externa e/ou cascata e redirecionamento dos subprodutos, como ilustram as Figuras 2 e 3 e conforme descrito no 4º e 5º ciclos reversos do Quadro 1 da Revisão Bibliográfica.



**Figura 4** Fluxograma dos procedimentos de pesquisa experimental para materiais de base cimentícia. *Fonte:* Elaboração própria.

## 4. NOVOS MATERIAIS TÉCNICOS PARA INDÚSTRIA DA CC: CONTRIBUIÇÕES DAS ENGENHARIAS NO DESIGN DE POTENCIAIS TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

### 4.1 Materiais compósitos de interesse ambiental voltados à indústria da CC

A reciclagem externa de subprodutos para a indústria da CC significa tanto redução financeira de custos como perspectiva de crescimento do ecossistema industrial responsável, implicando melhor qualidade de vida para a sociedade. Nesse tópico, são apresentadas as pesquisas desenvolvidas no PPGTEC-Ifal, com aplicação do tecnociclo e dos ciclos reversos para a indústria da CC em Alagoas, Brasil.

#### 4.1.1 Fabricação de argamassa com incorporação de grãos das conchas de sururu

O estado de Alagoas, Brasil, possui, dentre seus recursos naturais, o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú, Manguaba [CELMM], composto pelas lagoas Mundaú e Manguaba e pelos rios Paraíba, Sumaúma e Mundaú, com área total de aproximadamente 81 km<sup>2</sup> (Duarte, 2010). Encontrado no CELMM, o

sururu [*Mytella falcata*] está entre os moluscos mais comercializados, devido seu valor sociocultural dentro da culinária alagoana. Após a pesca, este molusco é cozido e retirado do interior das conchas, que são dispostas em terrenos baldios, vias públicas e margens das lagoas, gerando impactos socioambientais, como contaminação do lençol freático, proliferação de vetores de doenças infecciosas, assoreamento das lagoas, rios e manguezais, além do aumento no volume de resíduos sólidos urbanos (Menezes, 2019).

Considerando a importância socioeconômica da extração e comercialização do sururu e a necessidade de destinação ambientalmente correta das conchas, Menezes (2019) desenvolveu argamassa para assentamento e revestimento com incorporação de grãos das conchas do sururu, com o objetivo de analisar a viabilidade técnica de produção. As conchas do sururu foram trituradas e substituíram, parcialmente, a areia em percentuais que variaram de 0% a 50% (Menezes, 2019).

A cadeia do sururu no CELMM apresenta-se como ciclo extrativista aberto (Figura 5, ciclo à esquerda, em cinza). Após a pesca, ocorre o processo de separação do molusco, que será comercializado e consumido, enquanto as conchas serão descartadas em terrenos e áreas públicas e/ou recolhidas pela Superintendência de Limpeza Urbana de Maceió [SLUM], sendo destinadas ao aterro sanitário local.



**Figura 5** Ciclo extrativista do sururu em ciclo aberto e alternativa de Design Circular a partir da argamassa. *Fonte:* Elaboração própria.

A reciclagem dos grãos das conchas do sururu, como alternativa de Design Circular para o fechamento do ciclo, considerando a simbiose industrial do ciclo extrativista para tecnociclo da argamassa (Figura 6, tecnociclo à direita, na cor verde), possibilitou a aplicação do 4º e 5º ciclos reversos (Figuras 2 e 3 e Quadro 1), com o *upcycling* e o redirecionamento do material biológico, que seria disposto de forma inadequada, em material técnico usado na produção de argamassa para concreto, viabilizando a transição para EC em estudo inicial de tecnociclo para a indústria da CC.

As argamassas com incorporação dos grãos das conchas de sururu diminuíram o consumo de areia em até 50%, comprovando a viabilidade técnica como agregado miúdo. As argamassas com teor de até 20% de conchas de sururu trituradas apresentaram índices de consistência adequados, resistências à compressão acima da mínima prevista para argamassas e coeficientes

de absorção de água semelhante à argamassa de referência (0% de grãos das conchas), viabilizando a aplicação técnica pretendida (Menezes, 2019).

O resultado da resistência à compressão com melhor desempenho obteve valor médio de 18 MPa para argamassas com incorporação de grãos das conchas em comparação com a argamassa de referência, que apresentou média de 22 MPa, ambas aos 14 dias de cura, tendo em vista que a norma específica estabelece resistência mínima de 2 MPa. Analisando-se os valores do ensaio de absorção de água por capilaridade, evidenciou-se que o resultado mais satisfatório para argamassas com grãos das conchas de sururu obteve valor médio de 0,54%, enquanto a argamassa de referência apresentou média de 0,55%, ambas após 72 horas submersas em água (Menezes, 2019). Além da contribuição como tecnologia ambiental, a argamassa gerou contribuições socioeconômicas, com o desenvolvimento de novo material técnico, abrindo caminho para novos arranjos produtivos com base na EC e nos ODS 9 e 12.

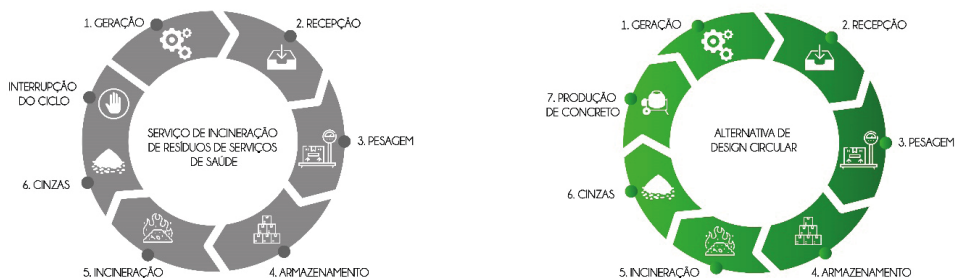
#### 4.1.2 Fabricação de concreto com cinzas da incineração de RSS

Os RSS causam impactos imensuráveis ao meio ambiente, sendo necessárias medidas para monitoramento e controle, visando à redução e, assim, contribuir para minimização da poluição e aumento da vida útil dos locais de disposição final ambientalmente correta, como os aterros sanitários, evitando que novas áreas urbanas sejam transformadas em células. Esta forma de tratamento tem vida útil limitada; após utilizada, a área perde boa parte da riqueza ambiental (ABRELPE, 2017). Entende-se a incineração como tecnologia de tratamento térmico de resíduos sólidos, por meio da combustão, na presença de oxigênio (ar de combustão), e como combustível auxiliar, em sistema fechado, do qual resultam sólidos (cinzas), gases e líquidos (Barros, 2012).

A pesquisa desenvolvida por Pontes (2019) teve por objetivo realizar avaliação química, física e mecânica das cinzas obtidas por incineração dos RSS em Alagoas para reciclagem externa como novo material técnico constituinte do concreto, de forma que a aplicação gerasse impactos positivos ao produto. A caracterização das cinzas de RSS indicou a possibilidade de aplicação na indústria da CC como matéria-prima para incorporação parcial de 5% a 20% na produção de concreto. Os resultados dos ensaios tecnológicos para a resistência à compressão do concreto com as cinzas de RSS, enquanto novo material técnico para agregado miúdo, mostraram-se satisfatórios e atenderam às normas brasileiras (Pontes, 2019).

Na Figura 6, observa-se o processo de incineração em ciclo aberto (ciclo à esquerda, na cor cinza) e a alternativa de Design Circular, a partir do uso das cinzas de RSS como material técnico para a produção de concreto, visando a potencial solução eficiente (tecnociclo à direita, na cor verde). As cinzas de RSS, como potencial alternativa de Design Circular para fechamento do ciclo, possibilitaram a aplicação do 4º e 5º ciclos reversos (Figuras 2 e 3 e Quadro 1), com o *upcycling* das cinzas, viabilizando transição para EC em estudo inicial de tecnociclo.

A aplicação das cinzas em substituição parcial do agregado miúdo na produção de concreto traz benefícios no que se refere à redução do impacto da disposição em aterros sanitários e à extração de minerais, que são incorporados como matéria-prima na produção de materiais de base cimentícia da indústria da CC, contribuindo para os ODS 9 e 12.



**Figura 6** Serviço de incineração de RSS em ciclo aberto e alternativa de design circular a partir do concreto. *Fonte:* Elaboração própria.

#### 4.1.3 Fabricação de concreto permeável com cascalho de perfuração de poços de petróleo

A indústria de petróleo e gás no Brasil gera vários produtos e inúmeros subprodutos. Um dos principais subprodutos da atividade de perfuração de poços de petróleo e gás são os cascalhos de perfuração, que se constituem em fragmentos de rochas e fluido provenientes da perfuração, podendo conter fragmentos de cimento curado em composição (Almeida, 2016).

Nicolli e Soares (2010) consideram que, em média, 1 poço de petróleo e gás gera entre 500 m<sup>3</sup> e 800 m<sup>3</sup> de material derivado da trituração das rochas pela broca. Segundo Almeida (2017), estima-se que, no Nordeste, a quantidade de subprodutos é da ordem de 100 mil m<sup>3</sup>, oriundos do processo de perfuração de poços para produção de petróleo. Volume significativo, considerando-se que os cascalhos, quando dispostos inadequadamente, poluem o solo, deterioram a paisagem urbana e constituem passivo ambiental, caso sejam destinados a aterros sanitários sem tratamento prévio (Fialho, 2012).

A pesquisa desenvolvida por Almeida (2021) objetivou caracterizar o cascalho proveniente da bacia Sergipe-Alagoas de forma física, química e morfológica, visando à aplicação em concretos permeáveis. Na caracterização do cascalho, constatou-se que o material apresenta pequena quantidade de agregados miúdos, tendo aproximadamente 80% do cascalho com diâmetro superior a 0,6 mm, configurando-se como areia grossa, o que viabilizou a substituição de 25% a 100% do agregado miúdo na produção de concretos permeáveis (Almeida, 2021; Almeida et al., 2021).

Nos ensaios tecnológicos, o ensaio mecânico de tração mostrou que todos os concretos permeáveis do estudo satisfizeram as condições para apli-

cação em tráfego de pedestre. Porém, somente o concreto de referência e o traço com substituição de 25% satisfizeram a condição para aplicação como pavimento de tráfego leve. Todos os concretos com cascalho de petróleo apresentaram permeabilidade superior à exigida pelas normas brasileiras e internacionais (Almeida, 2021).

O cascalho de perfuração de poços de petróleo, como potencial alternativa de Design Circular para fechamento do ciclo, possibilitou a aplicação do 4º e 5º ciclos reversos (Figuras 2 e 3 e Quadro 1), com o *downcycling*, enquanto novo material técnico para a produção de concreto, viabilizando a transição para EC em estudo inicial de tecnociclo. A aplicação do cascalho em substituição parcial do agregado miúdo na produção de concreto para indústria da CC traz benefícios no que se refere à redução do impacto relativo à disposição em aterros sanitários e à extração de minerais, corroborando para os ODS 9 e 12.

#### 4.1.4 Fabricação de concreto com cinzas da queima por combustão da fibra de coco

O Brasil destaca-se na produção mundial de coco, gerando cerca de 3,0 milhões de toneladas por ano, sendo que aproximadamente 85% do peso bruto do coco torna-se perda produtiva, disposta em lixões, aterros sanitários e locais públicos de forma inapropriada (Corradini et al., 2009; Nunes, 2021). Em Alagoas, o coco é um dos produtos agrícolas mais emblemáticos da região litorânea, com destaque para o município de Coruripe, onde 4 mil hectares de área são destinados à plantação de coqueiros (2% da área nacional), com produção superior a 20 milhões de cocos ao ano, cerca de 4% da produção nacional (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2017).

O cultivo do coco em Alagoas visa à produção de insumos da indústria alimentícia. Como coprodutos, são geradas milhões de toneladas de cascas por ano. Embora orgânica, a fibra da casca do coco mostra-se de difícil degradação – leva de 8 a 12 anos para se decompor – e, devido ao volume produzido e à disposição inadequada, gera problemas ao meio ambiente (Corradini et al., 2009; Nunes, 2021). O estudo de Silva (2021) teve por objetivo analisar a viabilidade de aplicação das cinzas da fibra do coco, derivadas da queima por combustão, sem controle de temperatura, como adição mineral em concretos. A casca do coco constitui-se em coproduto com potencial para aplicação como subproduto em diversos setores de produção no Brasil, incluindo a indústria da CC.

Os resultados da caracterização das cinzas classificaram-nas como agregado miúdo. Quanto à consistência do concreto no estado fresco, verificou-se que a substituição do cimento por cinzas alterou a trabalhabilidade da mistura, deixando o concreto mais seco, quanto maior o percentual de substituição de cimento por cinzas, que variaram de 3% a 7% nos ensaios tecnológicos. A consistência do concreto também aumentou, quanto maior o percentual de cinzas incorporadas. A absorção de água foi maior, quanto maior o percentual de cinzas, variando de 5,85% a 7,56%. Quanto à resistência à compressão, houve aumento de 12,19% de resistência em MPa na formulação com substituição de 3% de cimento por cinzas. Os resultados demonstraram que é viável a aplicação das cinzas como adição mineral no concreto (Silva, 2021).

As cinzas das cascas de coco obtidas por combustão, como potencial alternativa de Design Circular para fechamento do ciclo, possibilitou a aplicação do 4º e 5º ciclos reversos (Figuras 2 e 3 e Quadro 1), com o *upcycling*, enquanto novo material técnico para a produção de concreto, viabilizando a transição para EC em estudo inicial de tecnociclo. A aplicação das cinzas como aditivo na produção de concreto traz benefícios ambientais no que se refere à redução do impacto relativo à disposição em aterros sanitários e locais inadequados, alinhados aos ODS 9 e 12.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

A abordagem do conceito de tecnociclo aplicado ao desenvolvimento de novos materiais técnicos para indústria da CC no âmbito da formação de engenheiros e profissionais de áreas afins, de forma a promover a compreensão das inter-relações que ele estabelece no âmbito da EC e do Design para o Ciclo de Vida, além de sensibilizar o olhar para nova concepção acerca dos resíduos, com vistas à valorização e reintegração nos processos produtivos como coprodutos e/ou subprodutos, estendendo a vida útil dos materiais, promove a reflexão teórico-prática quanto às potencialidades do design para sistemas de ciclo fechado e destaca as potenciais contribuições de pesquisas aplicadas e de inovação tecnológica para novos ciclos de materiais técnicos, cujos desempenhos ambientais sejam direcionados à redução dos impactos e à conservação e regeneração dos recursos em ciclos biológicos e ciclos técnicos.

Os estudos de casos, aplicados nos processos de ensino-aprendizagem e de pesquisa no Mestrado Profissional em Tecnologias Ambientais do PPGTE-C-Ifal relatados, demonstraram que o pensamento prático-reflexivo voltado à circularidade, visando ao fechamento de biociclos e tecnociclos dos processos de cadeias produtivas em Alagoas, Brasil, apoiam a tomada de decisões, viabilizam o planejamento e desenvolvimento de soluções direcionadas à ecoeficiência e à eficácia dos processos, de forma a proporcionar novo valor aos fluxos de materiais técnicos, sob o ponto de vista dos ciclos reversos, com destaque para a reciclagem externa. A EC e o Design para o Ciclo de Vida aplicados ao Desenvolvimento Sustentável de novos materiais técnicos proporcionam também reflexão interdisciplinar e construção de novas capacidades transdisciplinares, voltadas aos contextos de produção e consumo responsáveis de recursos, que devem ser cultivadas nas práticas socioambientais de engenheiros e profissionais de áreas afins.

## REFERÊNCIAS

---

- Almeida, A. C. (2014). *Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos: Instrumento de Responsabilidade Socioambiental na Administração Pública*. Brasília, DF: MMA.
- Almeida, J. B., Neto. (2017). *Aproveitamento do cascalho de perfuração de poços para elaboração de pasta de cimentação primária*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, SE, Brasil.
- Almeida, J. D. B. (2021). *Aproveitamento de Cascalho de Perfuração de Poços de Petróleo na Produção de Concreto Permeável*. Dissertação de Mestrado, Instituto Federal de Alagoas, Marechal Deodoro, AL, Brasil.

Almeida, P. C. (2016). *Análise Técnico-ambiental de Alternativas de Processamento de Cascalho de Perfuração Offshore*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Almeida, J. D. B., Rapôso, A. L. Q. R. S., & Marques, S. K. J. (2021). Caracterização do cascalho de perfuração dos poços de petróleo da bacia Sergipe-Alagoas para produção de concreto permeável. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 12(7), 585-598.

Araújo, E. S., Hidalgo, V., Gianneti, B. F., & Almeida, C. M. V. B (s.d.). *Ecologia Industrial: um pouco de história*. Recuperado de <http://www.hottopos.com/regeq12/art2.htm>

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2017). *Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2017*. Recuperado de [http://www.abrelpe.org.br/noticias\\_detalhe.cfm?NoticiasID=2091](http://www.abrelpe.org.br/noticias_detalhe.cfm?NoticiasID=2091)

Barros, R. M. (2012). *Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade*. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, Minas Gerais, MG: Acta.

Corradini, E., Rosa, M. F., Macedo, B. P., Paladin, P. D., & Mattoso, L. H. C. (2009). Composição Química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de coco verde. *Rev. Brasileira de Fruticultura*, 31(3), 837-846.

De Los Rios, C., & Charnley, F. J. S. (2016). Skills and capabilities for a sustainable and circular economy: The changing role of design. *Journal of Cleaner Production*, 160, 109-122.

Duarte, R. O. (2010). *Orla lagunar de Maceió: apropriação e paisagem (1960-2009)*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, Brasil.

Fialho, P. F. (2012). *Cascalho de perfuração de poços de petróleo e gás: estudo do potencial de aplicação em concreto*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm?. *Journal of Cleaner Production*, 143, 1-12.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2017). *Produção agrícola municipal - lavoura permanente - 2017*. Recuperado de <http://cod.ibge.gov.br/1JIN2>.

*Lei Federal n. 12.305, de 02 de agosto de 2010*. (2010). Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF. Recuperado de [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)

Lüdeke-Freund, F., Gold, S., & Bocken, N. M. P. (2019). A Review and Typology of Circular Economy Business Model Patterns. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 2019, 36-61.

McDonough, W., & Braungart, M. (2013). *Cradle to cradle: criar e reciclar ilimitadamente* (1. ed.). São Paulo, SP: Editora G. Gili.

Menezes, R. C. (2019). *Desenvolvimento de argamassa de assentamento e revestimento com conchas de sururu descartadas do complexo estuarino lagunar Mundaú-Manguaba*. Dissertação de Mestrado, Instituto Federal de Alagoas. Marechal Deodoro, AL, Brasil.

Moreno, M., De los Rios, C.; Rowe, Z., & Charnley, F. (2016). A conceptual framework for circular design. *Sustainability*, 8(9), 1-15.

Nicolli, D., & Soares, C. B. P. (2010). Avaliação da Dispersão do Cascalho de Perfuração lançado em águas profundas. Campinas, SP: [s.e].

Nunes, L. A. (2021). *Diagnóstico do desperdício, possibilidades de aplicação e demanda futura das cascas do coco verde, com avaliação da incerteza das informações*. 2021. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, Brasil.

Organization for Economic Cooperation and Development (2015). *Material resources, productivity and the environment*. Paris: OECD Green Growth Studies, OECD Publishing.



Organização das Nações Unidas Brasil. *Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil*. Recuperado de <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em 2022.

Pontes, L. A. B. (2019). Avaliação do potencial de reuso das cinzas provenientes da incineração dos resíduos de serviço de saúde para fabricação de concreto. Dissertação de Mestrado, Instituto Federal de Alagoas, Marechal Deodoro, AL, Brasil.

Sampaio, C. P., Ferroli, P. C. M., Santos, A., Chaves, L. L., Engler, R. C., Lepre, P. R., Libretlotto, L. I., Lopes, C. S. D., Martins, S. B., Nunes, V. G. A., & Trein, F. A. (2018). *Design para a sustentabilidade: dimensão ambiental*. Curitiba, PR: Insight.

Santos, A. (Org.). (2019). *Design para a sustentabilidade: dimensão econômica*. Curitiba, PR: Insight.

Schroeder, P., Anggraeni, K., & Weber, U. (2018). The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. *Journal of Industrial Ecology*. 23(1), 77-95.

Silva, M. V. P. (2021). *Estudo da aplicação das cinzas provenientes da queima da fibra do coco em concretos*. Dissertação de Mestrado, Instituto Federal de Alagoas, Marechal Deodoro, AL, Brasil.