

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA INICIAR O PROCESSO DE TRANSIÇÃO DE PARQUES INDUSTRIAIS RUMO À ECONOMIA CIRCULAR

FELIPE MOURA OLIVEIRA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (UFC)

LUÍS MATHEUS TAVARES SILVA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (UFC)

MÔNICA CAVALCANTI SÁ DE ABREU

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (UFC)

CAROLINE RODRIGUES VAZ

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA (UFSC)

Agradecimento à órgão de fomento:

Agradecimentos ao apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) Brasil (Processo: 409549/2022-3).

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA INICIAR O PROCESSO DE TRANSIÇÃO DE PARQUES INDUSTRIAIS RUMO À ECONOMIA CIRCULAR

1. INTRODUÇÃO

A Economia Circular (EC) emerge como abordagem capaz de mitigar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade em diversos setores da economia global (MacArthur *et al.*, 2013). A EC em parques industriais atua de modo a reutilizar materiais que seriam descartados, reduzindo a quantidade de resíduos que seriam direcionados para aterros sanitários, incineradores ou para outros locais de descarte inadequados (Geng; Sarkis; Bleischwitz, 2019), contrastando com o modelo de economia linear baseado em "extrair, produzir, usar e descartar" (Geissdoerfer *et al.*, 2017). Esse conceito pode ser aplicado em parques industriais que almejam a circularidade e incluir todos os atores, suas interações, seus valores e suas cadeias de suprimentos em um ecossistema que vise a redução do impacto ambiental e fomento de uma economia mais sustentável (Abreu, Mota; Paula, 2020; Ceglia, Abreu; Silva Filho, 2017). Isso envolve a regulamentação e a facilitação das inter-relações entre todas as entidades do ecossistema para a sincronização das atividades (Asgari; Asgari, 2021). A criação deste ecossistema circular implica em vantagens estratégicas como diferenciação de mercado e liderança por meio da redução de custos, mas a principal vantagem da atuação em um ecossistema circular é um melhor desempenho do ponto de vista social, financeiro e ambiental para os consumidores (Parida *et al.*, 2019).

No entanto, existem alguns impeditivos para a transição de parques industriais rumo à economia circular, como a falta de iniciativa para a troca de informações sobre os processos fabris e resíduos gerados (Abreu; Mota; Paula, 2020; Kirchherr *et al.*, 2018), lacuna de conhecimento sobre as oportunidades de reutilização de subprodutos existentes (Sellito *et al.*, 2021) e a falta de colaboração para gerar economia de escala (Zhang *et al.*, 2019). Uma primeira etapa para a transição rumo à economia circular é mapear os resíduos produzidos e identificar como estes resíduos podem ser reinseridos na cadeia produtiva, como matéria prima para outras indústrias (Atalano; Ibiapina; Machado, 2022). A avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma abordagem adequada para mapear processos fabris (Ruiz-Pastor *et al.*, 2022). Com base no exposto, questiona-se: Como iniciar o mapeamento de processos e de resíduos de um complexo industrial para incentivar a sua transição rumo a economia circular?

Para responder o questionamento, este estudo tem como objetivo propor uma metodologia para iniciar o processo de transição de parques industriais rumo à economia circular. Como materiais de análise, este estudo propõe a análise documental de EIA/RIMA das fábricas e a revisão de escopo de literatura científica que verse sobre os processos produtivos das fábricas, o tema economia circular e a ACV. Esta integração permite um mapeamento detalhado dos processos produtivos e resíduos, facilitando a proposição de possibilidades de economia circular baseadas nas práticas existentes e em evidências científicas.

Este artigo divide-se em: (a) introdução, que expõe a apresentação geral do estudo, (b) metodologia, que apresenta os passos a serem seguidos para a transição de um parque industrial rumo à economia circular, (c) análise dos resultados, com a presença da exposição da aplicação da metodologia proposta em um parque industrial, bem como os levantamentos de possibilidade de circularidade, (d) construção do fluxo metodológico proposto como a discussão deste estudo e (f) considerações finais sobre a metodologia proposta neste estudo.

2. METODOLOGIA

Neste artigo, propõe-se que o processo de transição de parques industriais rumo à economia circular deve ser iniciado por meio da identificação das fábricas nele presentes. Isto é importante, pois a troca de materiais entre empresas colocalizadas promove um ecossistema circular devido a circulação dos recursos (Wen; Meng, 2015). Em seguida, deve-se realizar o

mapeamento dos insumos, dos processos fabris, dos produtos e dos resíduos (Pereira; Gomes; Pacheco, 2023; Yu *et al.*, 2015). Para esta etapa, indica-se realizar a coleta e a análise documental de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e de Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA), quando existentes, das fábricas presentes no complexo industrial e a revisão de escopo da literatura científica sobre os processos principais das fábricas presentes no complexo industrial, bem como aplicações de economia circular para seus resíduos.

O EIA/RIMA são ferramentas úteis nesse processo, pois fornecem informações reais sobre as operações e os processos instalados, os produtos e os resíduos gerados por empreendimentos que possuam o potencial poluidor considerado alto pelos órgãos ambientais pela legislação (Rocha; Barbosa; Medeiros, 2023; Oliveira Filho *et al.*, 2024). A revisão de escopo é importante, pois explora os principais conceitos do tema em questão, condensa e sistematiza os dados em informações úteis para a análise (Mattos; Cestari; Moreira, 2023; Kastner *et al.*, 2012; Mays; Pope; Popay, 2005; Thomas; Harden, 2008). A partir disso, é possível identificar insumos, processos fabris, produtos e levantar oportunidades de reaproveitamento dos resíduos comumente encontrados no complexo industrial.

2. 1 Etapas da metodologia

Neste estudo, o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) foi escolhido para aplicação desta metodologia, pois visa desenvolver a indústria cearense por meio da integração entre atividades portuárias e industriais (Abreu; Mota; Paula, 2020). O CIPP é uma *joint-venture* entre o Governo do Estado do Ceará e o Porto de Roterdã está localizado nos municípios de São Gonçalo do Amarante e Caucaia (Complexo do Pecém, 2023). As fábricas que atuam no CIPP produzem cimento, siderurgia, pré-moldados de concreto, ração animal, fertilizantes, cerâmica, pás eólicas e energia por meio da queima de carvão mineral (Complexo do Pecém, 2023). Durante os meses de fevereiro e abril de 2023, 7 EIA/RIMA foram coletados e analisados por meio de consulta eletrônica e duas visitas à Superintendência Estadual do Meio Ambiente (SEMACE-CE), sendo estes EIA/RIMA: 3 de empresas cimenteiras, 2 de siderurgias e 2 de termoeletrica. Em seguida, houve a busca de artigos científicos na base de dados *Web of Science* no mês de setembro do ano de 2023. A coleta e análise de dados é baseada na lista verificação *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews* (PRISMA) (Liberati *et al.*, 2009). Partindo disso, este estudo adotou os seguintes passos para a Revisão de Escopo: (1) identificação das *strings*; (2) estabelecimento de critérios para inclusão e exclusão de estudos; (3) definição das informações a serem extraídas dos estudos relacionados (categorização dos estudos); (4) interpretação dos resultados; (5) apresentação da revisão (síntese do conteúdo) (Munn *et al.* 2018; Pham *et al.* 2014; Tricco *et al.* 2016). Os termos utilizados nesta busca foram: (1) o ramo industrial; (2) economia circular; e (3) avaliação do ciclo de vida. Estes termos foram escolhidos, pois o primeiro delimita o segmento industrial foco, o segundo levanta possibilidades de economia circular neste segmento industrial e o terceiro foca-se nos insumos, processos, produtos e resíduos gerados. Com isto, 125 artigos científicos foram coletados. A etapa de identificação das *strings* pode ser observada na tabela 1.

Tabela 1 – Strings de Busca da revisão de escopo.

Atividade	String	Resultado
Cimenteira	“Cement industry” AND “circular economy” AND “Life Cycle Assessment”	11
Aciaria	“Steel industry” AND “circular economy” AND “Life Cycle Assessment”	12
Nutrição Animal	“Animal feed” AND “circular economy” AND “Life Cycle Assessment”	19
Pá eólica	“wind blade” AND “circular economy” AND “Life Cycle Assessment”	1
Termoeletrica	“steam thermal power plant” OR “coal-fired” OR “thermal power plant” AND “circular economy” AND “Life Cycle Assessment”	4

Pré-moldados	“Precast concrete” OR “prefabricated concrete” AND “circular economy” AND “Life Cycle Assessment”	7
Fertilizantes	“fertilizer*” AND “circular economy” AND “Life Cycle Assessment”	71
Cerâmica	“Potter*” OR Ceramic* AND “circular economy” AND “Life Cycle Assessment”	20

Fonte: Próprio dos autores (2023).

No tocante aos critérios de inclusão e exclusão (que é fornecida como parte integrante desta versão de escopo, de forma mais específica, a segunda etapa), foram adotados os critérios disponíveis na tabela 2.

Tabela 2 – Critérios de inclusão e exclusão dos artigos da revisão de escopo.

Critério	Pergunta
Inclusão	O artigo aborda diretamente a relação entre os princípios da Economia Circular (CE) e a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA)?
	O artigo explora a aplicação de LCA para avaliar conceitos de economia circular dentro dos segmentos industriais especificados?
	O artigo se concentra em um dos seguintes segmentos industriais: <ul style="list-style-type: none"> • Indústria de cimento? • Indústria siderúrgica? • Alimentação animal? • Fabricação de pás eólicas? • Usinas termelétricas a gás ou usinas a carvão? • Concreto pré-fabricado ou pré-moldado? • Produção de fertilizantes? • Indústrias de cerâmica ou de olaria?
	O artigo fornece uma descrição clara da metodologia de LCA, incluindo fontes de dados, limites do sistema e pressupostos?
	O artigo aborda ou explora os princípios, estratégias ou práticas da economia circular nos segmentos industriais especificados? Exemplos incluem design de produtos para longevidade ou reuso, reciclagem e recuperação de materiais, eficiência de recursos e redução de resíduos, remanufatura ou recondiçãoamento, responsabilidade estendida do produtor (REP) ou cadeias de suprimento circulares.
Exclusão	O artigo não se relaciona com a interseção da Economia Circular (CE) e da Avaliação do Ciclo de Vida (LCA)?
	O artigo não é uma publicação revisada por pares, como editoriais, artigos de opinião ou notícias?
	O artigo não foi publicado em inglês?
	O artigo se concentra em indústrias não relacionadas aos segmentos industriais especificados dentro do escopo da revisão?
	O artigo não está alinhado com o EIA/RIMA das empresas do complexo em estudo?
	O artigo apresenta um viés extremo ou desequilibrado em sua abordagem, comprometendo a imparcialidade e a objetividade?
	O artigo não fornece informações substanciais ou relevantes sobre a interseção de CE e LCA, mesmo que atenda a outros critérios.
	O artigo não está disponível em acesso aberto ou não pode ser acessado de maneira razoável pela equipe de revisão?

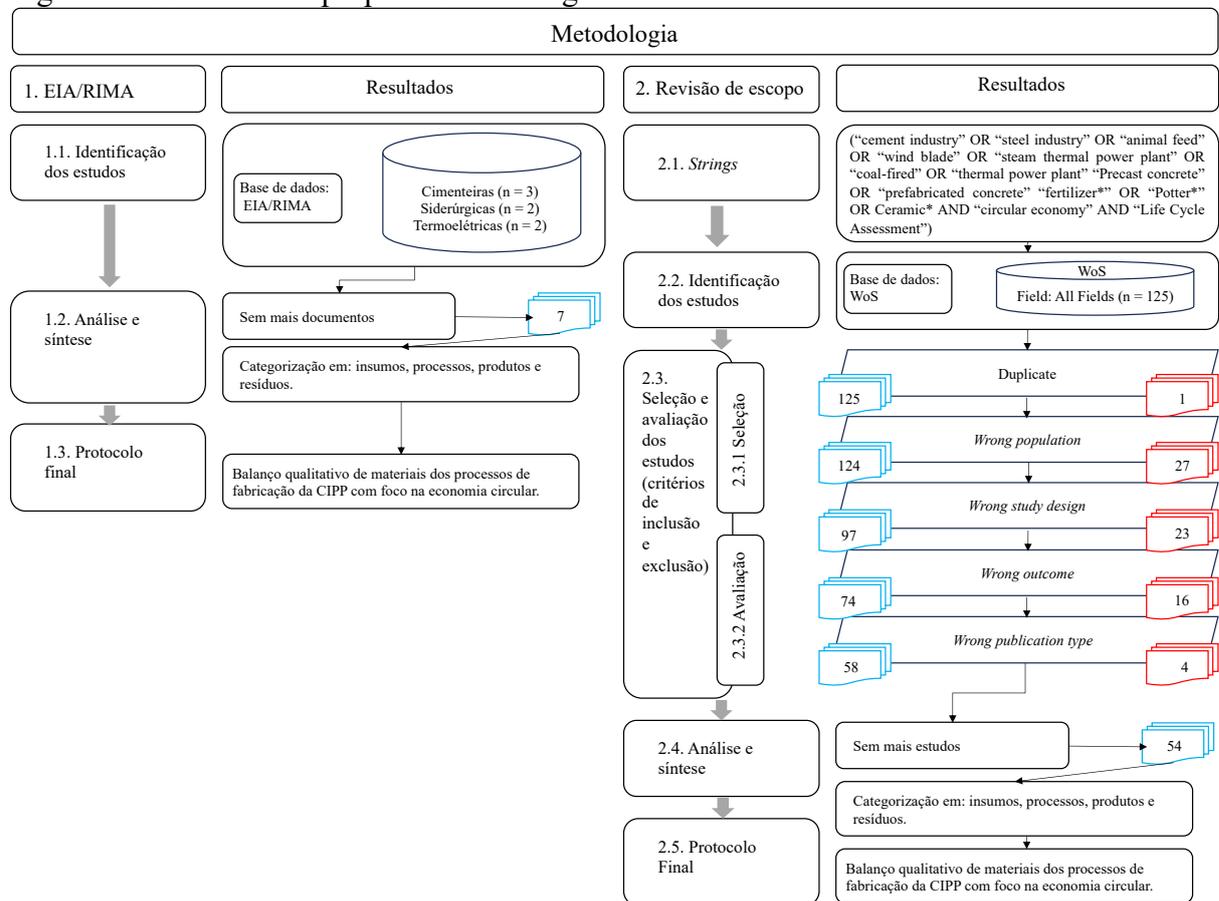
Fonte: Próprio dos autores (2023).

Para a realização da seleção inicial dos artigos da revisão de escopo, este trabalho contou com 3 juízes com expertise no tema, sendo eles com perfil de academia, egressos de programas de pós-graduação *stricto sensu* e com atuação no magistério superior, antes dos julgamentos, todos tiveram acesso aos EIA/RIMA das empresas do complexo, pois ele serve como um manual direcionador para a qualidade dos trabalhos selecionados. O primeiro juiz tem formação

em engenharia civil e pós-graduação em engenharia ambiental, atuando na escolha dos artigos da cimenteira, aciaria, pá eólica, termoelétrica, pré-moldados e cerâmica, totalizando 55 artigos julgados. O segundo juiz tem formação inicial em engenharia ambiental e auxiliou na escolha de nutrição animal, pá eólica, termoelétrica, pré-moldados e fertilizantes, totalizando 102 artigos julgados. O terceiro juiz tem formação inicial em economia e pós-graduação em pesquisa operacional e julgou os estudos de cimenteira, aciaria, cerâmica, nutrição animal e fertilizantes, totalizando 114 artigos. Após o julgamento, restaram 54 artigos que estavam elegíveis para continuar no estudo e serem lidos na íntegra para a realização da catalogação.

Os julgamentos foram realizados por meio do software Rayyan, plataforma on-line e gratuita para o auxílio de revisões sistemáticas de literatura. O modo *blind on* foi aplicado para que cada juiz tivesse acesso apenas aos seus trabalhos. Nesta perspectiva, foi possível identificar a quantidade de trabalhos a serem utilizados como base desta pesquisa, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Protocolo da proposta metodológica.



Fonte: Próprio (2023).

Na revisão de escopo realizada, após o julgamento dos especialistas, foram selecionados artigos que atendiam aos critérios previamente estabelecidos de inclusão e exclusão, para cada área de estudo específica. Restaram 1 artigo para a pá-eólica, 3 artigos para a termoelétrica, 4 artigos para a pré-moldados, 3 artigos para a cimenteira, 4 artigos para a aciaria, 14 artigos para a nutrição animal, 11 artigos para a cerâmica e 14 artigos para a área de fertilizantes, totalizando 54 artigos.

3. RESULTADOS DA APLICAÇÃO

Este estudo sistematiza 54 artigos provenientes para a revisão de escopo e os 7 EIA/RIMA. Após isso, extraem-se as informações necessárias para iniciar o processo de transição de parques industriais rumo à economia circular, sendo eles: insumo, processos fabris, produto e resíduos gerados). A tabela 3 apresenta o modelo de negócios de forma linear (com os insumos que cada empresa produz, somado ao seu processo fabril, seus produtos e os resíduos gerados). Alguns destes resíduos podem ser incorporados como insumos de processos industriais dentro do complexo, implicando no aumento da circularidade no CIPP. Essa prática pode trazer inúmeros benefícios para organizações como mitigação dos impactos ambientais e aumento da vida útil de um resíduo (Ghisellini; Cialani; Ulgiati, 2016).

A escória é subproduto da fundição de metais ou da produção de aço e consiste em materiais não metálicos e impurezas que são separadas do metal durante o processo de fusão (Uddin et al., 2023; Ren et al., 2017; Perathoner et al., 2021), sendo rica em sílica e alumina, dois componentes cruciais na composição do cimento. Portanto, este resíduo pode ser empregado como um substituto total ou parcial do clínquer, que é o principal componente do cimento (Perathoner et al., 2021). Outra aplicação da escória como insumo é no processo produtivo do concreto. Inclusive, a incorporação da escória neste processo produtivo implica em melhora na resistência à compressão e abrasão e na durabilidade do concreto. Por fim, um último uso da escória como insumo seria no processo produtivo de asfalto e outros materiais de construção (Pinto; Diemer, 2020). Outro resíduo produzido no CIPP é a cinza proveniente do processo produtivo de termoelétricas. Por ser rica em sílica e alumina, este resíduo aumenta a resistência do cimento à abrasão e à fissuração, tornando mais durável e resistente (Batuecas et al., 2022; Uddin et al., 2023). Os resíduos sólidos de produção da pá eólica, cimento e concreto também podem ser utilizados para a incorporação no cimento, por meio de processo físico da tritura (Batuecas *et al.*, 2021).

Durante o processo de produção de fertilizantes é formado o lodo por meio do tratamento anaeróbico. Este lodo é rico em gás metano e pode ser utilizado na produção de energia, o biogás. A queima do biogás, por sua vez, gera cinzas, que podem ser direcionadas para a produção de cimentos e pré-moldados de concreto (Rufi-Salís et al., 2020). O Plano de Ações Estratégicas de Recursos Hídricos do Estado do Ceará prevê a operação de uma estação produtora de água de reúso para abastecimento do CIPP. Esta estação será abastecida por meio de efluentes advindos de efluentes urbanos captados da Região Metropolitana de Fortaleza (Ceará, 2018). O lodo surge como resultado do tratamento de efluentes. Este material pode ser utilizado na produção de fertilizantes por meio da formação de cristais de estruvita. Três processos são empregados para a formação dos cristais de estruvita: (1) REM-NUT®, que é um processo baseado em troca iônica que pode recuperar fósforo na forma de estruvita a partir do efluente tratado secundário, adicionando Mg^{2+} para cumprir a relação estequiométrica e precipitando a estruvita; (2) Ostara® que requer um reator específico e produtos químicos com Mg^{2+} e NH_4^+ para precipitar a estruvita do digestato; e (3) AirPrex® que também envolve a adição de Mg^{2+} via cloreto de magnésio antes de entrar no reator AirLift, onde a aeração intensa é adicionada por meio de *stripping* de CO_2 para aumentar o pH e produzir cristais de estruvita no fundo do reator (Rufi-Salís *et al.*, 2020).

As partículas finas são resíduos resultantes do processo de produção de cerâmica e de pré-moldados, sendo elas são um tipo de poluente atmosférico que se refere a partículas sólidas ou líquidas com diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 micrômetros (PM 2,5) ou 10 micrômetros (PM 10). Estas partículas podem ser inaladas e até mesmo entrar na corrente sanguínea, causando uma série de problemas de saúde, incluindo doenças respiratórias, cardiovasculares e câncer (Blundo *et al.*, 2019). As partículas finas podem ser inseridas no processo produtivo de concreto ou asfalto, desde que sejam submetidos a processos químicos para que sua toxicidade seja eliminada (Perathoner et al., 2021).

Tabela 3 – Sistematização da busca

Indústria	Insumos	Processos Fabris	Produto	Resíduos
Cimenteira	Calcário, argila, minério de ferro, gesso, areia e cinzas de carvão.	Moagem, mistura, cozimento, moagem de clínquer.	Cimento, clínquer.	Gases de efeito estufa (CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x , N ₂ O e SO ₂) e compostos orgânicos voláteis (VOCs), partículas finas (PM 2,5 e PM 10) e metais pesados (As, Cr, Hg e Ni).
Aciaaria	Sucata de aço, minério de ferro, coque, carvão e calcário.	Fusão, refino e laminação.	Aço	Escória, poeira, gases e águas residuais.
Nutrição Animal	Proteína, água, resíduos de alimentos e grãos.	Mistura, granulação, embalagem.	Ração.	Resíduos de produção, coprodutos de compostagem, CH ₄ , N ₂ O e VOCs.
Pá Eólica	Fibra de carbono, fibra de vidro e epóxi	Fabricação, moldagem e montagem.	Pás eólicas.	Retalhos de material e resíduos de fabricação.
Termoelétrica	Carvão, gás, biomassa, água, O ₂ , resíduos orgânicos, inorgânicos, inertes para produzir biogás, lama vermelha e escória (alumínio e carboneto).	Combustão, geração de eletricidade.	Energia	Cinzas, águas residuais, gases (CO ₂ , SO ₂ , NO _x , CO e CH ₄), metais pesados (Zn, As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb e V) e compostos orgânicos voláteis não metano (NMVOC).
Pré-Moldados	Concreto, aço, madeira, cimento e agregados (areia, cascalho e pedra britada.) água, partículas sólidas (fly ash), cimento, água, areia, superplastificante e lixos de construção e demolição (CDW).	Moldagem, cura, acabamento.	Produtos pré-moldados.	Gases de efeito estufa (CO ₂ , CO, CH ₄ , NO _x , N ₂ O e SO ₂) e compostos orgânicos voláteis (VOCs), partículas finas (PM2,5 e PM10) e metais pesados (As, Cr, Hg e Ni).
Fertilizantes	Nitrogênio, Cálcio, silício, fósforo, potássio, estruvita, materiais orgânicos, herbicida, amônia, águas residuais tratadas, fosfato, magnésio, NH ₄ NO ₃ , (NH ₄) ₂ HPO ₄ , estruvita, lodo, esterco, resíduos sólidos municipais (MSW), resíduos lignocelulósicos, fosfogesso e compostagem.	Mistura, granulação, gaseificação e purificação.	Fertilizantes.	lodo purgado e cinzas.
Cerâmica	Argila, feldspato, areia, água e carbonato de cálcio.	Moldagem, secagem, queima e esmaltação.	Produtos cerâmicos.	Resíduos de produção (quebras) e Gases poluentes (CO ₂ , NO _x , SO ₂ , HF e HCl).

Fonte: Próprio (2023)

Notou-se que todas as empresas de produção de cimento, de aço, de pré-moldados e termoelétrica emitem os gases de efeito estufa e que elas têm uma similaridade na emissão sendo eles: CO₂ (dióxido de carbono), CO (monóxido de carbono), CH₄ (metano), NO_x (óxidos de nitrogênio), N₂O (óxido nitroso), SO₂ (dióxido de enxofre), HCl (ácido fluorídrico) e HCL (ácido clorídrico). Esses gases podem ser utilizados para produzir fertilizantes seguindo as etapas: (1) processo de conversão catalítica, no qual o nitrogênio atmosférico (N₂) é transformado em óxido nitroso (N₂O) (Sem; Bakshi, 2023); (2) o óxido nitroso é submetido a uma reação com hidrogênio (H₂), resultando na formação de amônia (NH₃) (Mohammed et al., 2018). A amônia produzida desempenha um papel essencial na fabricação de fertilizantes nitrogenados, como ureia, nitrato de amônio e sulfato de amônia (Aleisa; Alsulaili; Almuzaini, 2021). O processo de produção da amônia mais difundido é o método Haber-Bosch, caracterizado por requerer alta pressão e temperatura (Humphreys; Lan; Tao, 2021).

Além disso, na indústria de fertilizantes, o CH₄ pode ser empregado na produção de fertilizantes nitrogenados (Colley et al., 2021; Li et al., 2022). O CO₂, por sua vez, é útil na fabricação de fertilizantes fosfatados, como superfosfato simples e superfosfato triplo (Cobo et al., 2019). Essa abordagem de reaproveitamento de gases residuais é um aspecto significativo da eficiência e sustentabilidade na indústria de fertilizantes, contribuindo para a otimização dos recursos e a redução do impacto ambiental (Colley et al., 2021).

Outrossim, a utilização desses gases residuais pode ser a produção de ração (Teigiserova, et al., 2022). O metano, produzido a partir da digestão anaeróbica de matéria orgânica, como dejetos de animais pode ser empregado diretamente na produção de ração (Laso et al., 2018). Da mesma forma, o CO₂ e a NH₃ podem ser utilizados na produção de ração por meio da fermentação (Laso et al., 2018). A utilização de gases residuais na produção de ração emerge como um desafio tecnológico para o complexo industrial, pois necessita de atenção para as técnicas requeridas (Ojha et al., 2020).

Empresas de produção de pré-moldados em contratos e cimenteiras apresentaram, com base na literatura, o resíduo Composto Orgânico Volátil (VOCs), que é uma categoria de poluentes atmosféricos não metálicos. Em geral, VOCs são compostos químicos orgânicos que têm baixo ponto de ebulição e alta pressão de vapor, o que significa que eles podem facilmente evaporar e se tornar gases na atmosfera (Yu et al., 2024). Muitos VOCs são prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente, e são frequentemente emitidos por processos industriais, produtos químicos, solventes, combustíveis e outras fontes. Contudo, os artigos não especificaram esses compostos e não mencionaram possibilidades de circularidade entre as empresas do complexo industrial, nesta perspectiva, orienta-se a destinação destes resíduos para um aterro sanitário industrial.

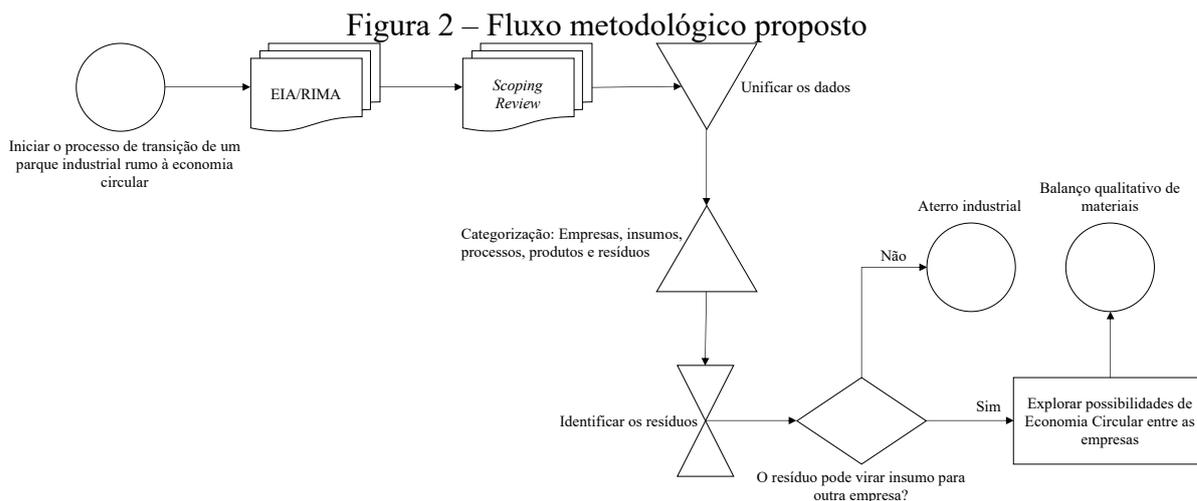
Na mesma situação, a literatura também evidencia que empresas como cimenteira, termoelétricas e pré-moldados geram metais pesados como resíduos, sendo eles: As (arsênio), Cr (cromo), Hg (mercúrio), Ni (níquel), Zn (zinco), Pb (chumbo), V (vanádio). Eles se encontram sem circularidade comprovada pela literatura, com isso, também se indica o seu direcionamento um aterro sanitário industrial. Estes elementos, nas palavras de Zhang et al. (2023), se forem descartados de forma inadequada podem causar contaminação da água, do solo, do ar e afetar toda a cadeia da biosfera implicando em uma ameaça à saúde humana.

4. CONSTRUÇÃO DO FLUXO METODOLÓGICO PROPOSTO

Para a realização do balanço qualitativo de materiais no Complexo Industrial e Portuário do Pecém com foco na circularidade, surgiu a necessidade/opportunidade de propor uma metodologia para iniciar o processo de transição de parques industriais rumo à economia circular, que neste trabalho é apresentada como a união da análise dos EIA/RIMA com a revisão de escopo. Esse levantamento analisou os procedimentos empregados na compreensão e

aprimoramento das operações das empresas de um complexo, permitindo bem-estar ecológico, social e oportunidades de novos negócios.

A figura 2 exibe um fluxograma que propõe os procedimentos necessários para reproduzir os passos iniciais de identificação de oportunidades de economia circular EC entre empresas dentro de um complexo. A ACV é um fator determinante para entender as trocas de materiais realizadas pois ela é uma metodologia que determina limites do processo produtivo a serem estudados, apresentando seus componentes (insumos, processos fabris, produtos e resíduos) e os impactos ambientais.



Fonte: Próprio (2023).

Para replicar este estudo de forma a utilizá-lo metodologicamente, primeiramente, necessita-se destacar a relevância da economia circular para o complexo em análise. Após isso, deve-se seguir os seguintes comandos:

- 1) Escolher o complexo industrial e mapear suas empresas;
- 2) Coletar os documentos de EIA/RIMA das empresas que estão no complexo industrial escolhido, pois eles direcionam as análises de seleção/exclusão e a qualidade dos estudos obtidos na etapa da revisão de escopo;
- 3) Conduzir uma revisão de escopo para mapear e compreender o estado atual do conhecimento científico sobre os processos fabris no contexto do complexo em estudo;
- 4) Categorizar as informações, abrangendo aspectos como empresas envolvidas, insumos utilizados, processos adotados, produtos gerados e resíduos resultantes;
- 5) Identificar as potenciais oportunidades de aproveitar os resíduos como insumos por outras empresas;
- 6) Integrar os resultados obtidos nas fases anteriores, de forma visual, por meio de uma tabela com a presença de categorias já definidas;

Esse passo a passo permite uma visão abrangente e holística do sistema, identificando não apenas os pontos de otimização e eficiência, mas também mapeando estratégias concretas para promover a economia circular por meio da troca de materiais entre as empresas e fortalecer a abordagem de economia circular no complexo em estudo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo propôs uma metodologia para iniciar o processo de transição de parques industriais rumo à economia circular. Isto se fez necessário devido às lacunas de falta de iniciativa na troca de informações sobre os processos fabris e resíduos gerados em parques

industriais, pouco conhecimento sobre as oportunidades existentes de reutilização de subprodutos em complexos industriais e a falta de colaboração para gerar economia de escala. Para isso, identificou-se quais resíduos podem ser reinseridos na cadeia produtiva por meio da avaliação do ciclo de vida e da economia circular.

Em suma, por meio deste estudo, concluiu-se que a realização da identificação dos EIA/RIMA seguido por revisão de escopo destaca-se como o ponto de partida essencial para a construção de um *roadmap* em direção à economia circular. Este estudo oferece uma metodologia para identificar oportunidades de economia circular por meio de trocas de resíduos entre as empresas de um complexo industrial. Como limitações da pesquisa, não houve a identificação da viabilidade tecnológica, financeira e institucional do complexo industrial para a adoção das possibilidades sugeridas. Sendo assim, o desenvolvimento futuro deste trabalho promoverá entrevistas com especialistas em economia circular para auxiliar na validação das possibilidades identificadas na aplicação desta metodologia.

REFERÊNCIAS

ABREU, Mônica Cavalcanti Sá de; MOTA, Renata Castro; PAULA, Eugênia Vale de. Identificação de barreiras e proposição de caminhos para implantação de projetos de simbiose industrial. **Revista de Administração da Ufsm**, v. 13, n. 3, p. 517-534, 2020.

ALBIZZATI, Paola Federica; TONINI, Davide; ASTRUP, Thomas F. A quantitative sustainability assessment of food waste management in the European Union. **Environmental Science & Technology**, v. 55, n. 23, p. 16099-16109, 2021.

ALBIZZATI, Paola Federica; TONINI, Davide; ASTRUP, Thomas Fruergaard. High-value products from food waste: An environmental and socio-economic assessment. **Science of the Total Environment**, v. 755, p. 142466, 2021.

ALEISA, Esra; ALSULAILI, Abdalrahman; ALMUZAINI, Yasmeen. Recirculating treated sewage sludge for agricultural use: Life cycle assessment for a circular economy. **Waste Management**, v. 135, p. 79-89, 2021.

ANTONETTI, Elena et al. Waste-to-chemicals for a circular economy: the case of urea production (waste-to-urea). **ChemSusChem**, v. 10, n. 5, p. 912-920, 2017.

APODI. **Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental**. Quixeré: Apodi, 2019.

ARCELLORMITTAL. **Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental**. Mateus Leme: ArcellorMittal, 2017.

ASGARI, Amir; ASGARI, Reza. How circular economy transforms business models in a transition towards circular ecosystem: the barriers and incentives. **Sustainable Production and Consumption**, v. 28, p. 566-579, 2021.

ASIF, Zunaira et al. Update on air pollution control strategies for coal-fired power plants. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 24, n. 8, p. 2329-2347, 2022.

ATALANIO, Manuella; IBIAPINA, Helaine; MACHADO, Thales. A economia circular como modelo de desenvolvimento sustentável. **Revista de Direito, Economia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 8, n. 1, 2022.

BARBOSA, Márcio Zago et al. Life cycle approach applied to the production of ceramic materials incorporated with ornamental stone wastes. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-14, 2022.

BATUECAS, Esperanza et al. Recycling CO₂ from flue gas for CaCO₃ nanoparticles production as cement filler: A Life Cycle Assessment. **Journal of CO₂ Utilization**, v. 45, p. 101446 - 101260, 2021.

BIANCHI, Iacopo et al. Life cycle assessment of carbon ceramic matrix composite brake discs containing reclaimed prepreg scraps. **Journal of Cleaner Production**, v. 413, p. 137537, 2023.

BLUNDO, Davide et al. Sustainability as source of competitive advantages in mature sectors: The case of Ceramic District of Sassuolo (Italy). **Smart and Sustainable Built Environment**, v. 8, n. 1, p. 53-79, 2019.

BROADBENT, Clare. Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, p. 1658-1665, 2016.

CAMPOS, Ines et al. Life-cycle assessment of animal feed ingredients: Poultry fat, poultry by-product meal and hydrolyzed feather meal. **Journal of Cleaner Production**, v. 252, p. 119845, 2020.

CANGUSSU, Nara; VASCONCELOS, Luana; MAIA, Lino. Environmental benefits of using sewage sludge in the production of ceramic bricks. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 10, p. 25344-25355, 2023.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará - SRH. **Plano de Ações Estratégicas de Recursos Hídricos do Ceará**. Patu. 169 p. Fortaleza – CE, 2018.

CEGLIA, Domenico; ABREU, Mônica Cavalcanti Sá; SILVA FILHO, José Carlos Lázaro. Critical elements for eco-retrofitting a conventional industrial park: Social barriers to be overcome. **Journal of environmental management**, v. 187, p. 375-383, 2017.

COBO, Selene et al. Economics of enhancing nutrient circularity in an organic waste valorization system. **Environmental science & technology**, v. 53, n. 11, p. 6123-6132, 2019.

COLLEY, Tracey Anne et al. Addressing nutrient depletion in Tanzanian sisal fiber production using life cycle assessment and circular economy principles, with bioenergy co-production. **Sustainability**, v. 13, n. 16, p. 8881, 2021.

Complexo do Pecém. **Área Industrial**. 2023. Disponível em: <https://www.complexodopecem.com.br>. Acesso em: 04 dez. 2023.

DINO, Giovanna Antonella et al. Towards sustainable mining: Exploiting raw materials from extractive waste facilities. **Sustainability**, v. 12, n. 6, p. 2383, 2020.

- DONG, Liang et al. Towards preventative eco-industrial development: an industrial and urban symbiosis case in one typical industrial city in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 387-400, 2016.
- GAIBOR, Norma et al. Sustainability assessment of half-sandwich panels based on alkali-activated ceramic/slag wastes cement versus conventional building solutions. **Journal of Cleaner Production**, v. 389, p. 136108, 2023.
- GEISSDOERFER, Martin et al. The Circular Economy—A new sustainability paradigm?. **Journal of cleaner production**, v. 143, p. 757-768, 2017.
- GENG, Yong; SARKIS, Joseph; BLEISCHWITZ, Raimund. How to globalize the circular economy. **Nature**, v. 565, n. 7738, p. 153-155, 2019.
- GERDAU. **Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental**. Caucaia: Gerdau, 2012.
- 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.
- GHOSH, Tapajyoti et al. The Circular Economy Life Cycle Assessment and Visualization Framework: A Multistate Case Study of Wind Blade Circularity in United States. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 185, p. 1 - 10, 2022.
- HUMPHREYS, John; LAN, Rong; TAO, Shanwen. Development and recent progress on ammonia synthesis catalysts for Haber–Bosch process. **Advanced Energy and Sustainability Research**, v. 2, n. 1, p. 2000043, 2021.
- JAGTAP, Sandeep et al. Codesign of food system and circular economy approaches for the development of livestock feeds from insect larvae. **Foods**, v. 10, n. 8, p. 1701, 2021.
- KASTNER, Monika et al. What is the most appropriate knowledge synthesis method to conduct a review? Protocol for a scoping review. **BMC medical research methodology**, v. 12, n. 1, p. 1-10, 2012.
- KIRCHHERR, Julian et al. Barriers to the circular economy: Evidence from the European Union (EU). **Ecological economics**, v. 150, p. 264-272, 2018.
- LASO, Jara. et al. Combined application of Life Cycle Assessment and linear programming to evaluate food waste-to-food strategies: Seeking for answers in the nexus approach. **Waste Management**, v. 80, p. 186-197, 2018.
- LI, Dong-Ying et al. Recovery of phosphate and ammonia from wastewater via struvite precipitation using spent refractory brick gravel from steel industry. **Journal of Environmental Management**, v. 302, p. 114110 - 114117, 2022.
- LIBERATI, Alessandro *et al.* The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. **Journal of clinical epidemiology**, v. 62, n. 10, p. 1-34, 2009.

- LÓPEZ-GARCÍA, Ana B. et al. Application of life cycle assessment in the environmental study of sustainable ceramic bricks made with ‘alperujo’(olive pomace). **Applied Sciences**, v. 11, n. 5, p. 2278, 2021.
- MACARTHUR, Ellen et al. Towards the circular economy. **Journal of Industrial Ecology**, v. 2, n. 1, p. 23-44, 2013.
- MATTOS, Samuel Miranda; CESTARI, Virna Ribeiro Feitosa; MOREIRA, Thereza Maria Magalhães. Protocolo de revisão de escopo: aperfeiçoamento do guia PRISMA-ScR. **Rev Enferm UFPI**, p. e3062-e3062, 2023.
- MAYS, Nicholas; POPE, Catherine; POPAY, Jennie. Systematically reviewing qualitative and quantitative evidence to inform management and policy-making in the health field. **Journal of health services research & policy**, v. 10, n. 1, p. 6-20, 2005.
- MINUNNO, Roberto et al. Exploring environmental benefits of reuse and recycle practices: A circular economy case study of a modular building. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 160, p. 104855 - 104869, 2020.
- MOHAMMED, Feisal et al. Sustainability assessment of symbiotic processes for the reuse of phosphogypsum. **Journal of Cleaner Production**, v. 188, p. 497-507, 2018.
- MØLLER, Hanne et al. Circularity indicators and added value to traditional LCA impact categories: example of pig production. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, p. 1-13, 2023.
- MORENO-JUEZ, Jaime et al. Treatment of end-of-life concrete in an innovative heating-air classification system for circular cement-based products. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121515 - 121530, 2020.
- MPX. **Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental**. Caucaia: MPX, 2001.
- MUNN, Zachary et al. Systematic review or scoping review? Guidance for authors when choosing between a systematic or scoping review approach. **BMC medical research methodology**, v. 18, p. 1-7, 2018.
- OJHA, Shikha; BUßLER, Sara; SCHLÜTER, Oliver K. Food waste valorisation and circular economy concepts in insect production and processing. **Waste Management**, v. 118, p. 600-609, 2020.
- OLDFIELD, Thomas et al. A life cycle assessment of biosolarization as a valorization pathway for tomato pomace utilization in California. **Journal of cleaner production**, v. 141, p. 146-156, 2017.
- OLIVEIRA FILHO, Olavo Bilac Quaresma et al. A trajetória do processo de licenciamento ambiental da Usina Hidrelétrica de Ferreira Gomes-AP. **Caderno Pedagógico**, v. 21, n. 6, p. e4742-e4742, 2024.

OWSIANIAK, Mikołaj et al. Performance of second-generation microbial protein used as aquaculture feed in relation to planetary boundaries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 180, p. 106158, 2022.

PAGLIARO, Mario et al. Amino Acids in New Organic Fertilizer AnchoisFert. **ChemistrySelect**, v. 7, n. 47, p. e202203665, 2022.

PAJURA, Rebeka; MASŁOŃ, Adam; CZARNOTA, Joanna. The Use of Waste to Produce Liquid Fertilizers in Terms of Sustainable Development and Energy Consumption in the Fertilizer Industry—A Case Study from Poland. **Energies**, v. 16, n. 4, p. 1747, 2023.

PARIDA, Vinit et al. Orchestrating industrial ecosystem in circular economy: A two-stage transformation model for large manufacturing companies. **Journal of business research**, v. 101, p. 715-725, 2019.

PERATHONER, Siglinda et al. Reuse of CO₂ in energy intensive process industries. **Chemical Communications**, v. 57, n. 84, p. 10967-10982, 2021.

PEREIRA, Lyne Sussuarana; GOMES, Thiago Santiago; PACHECO, Elen Beatriz Acordi Vasques. Métodos de alocação de impactos ambientais para avaliação do ciclo de vida na reciclagem de resíduos plásticos. **Peer Review**, v. 5, n. 19, p. 303-324, 2023.

PETIT, Gaëlle et al. Environmental evaluation of new brewer's spent grain preservation pathways for further valorization in human nutrition. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 27, n. 14, p. 1-25, 2023.

PHAM, Mai T. et al. A scoping review of scoping reviews: advancing the approach and enhancing the consistency. **Research synthesis methods**, v. 5, n. 4, p. 371-385, 2014.

PINTO, Julian; DIEMER, Arnaud. Supply chain integration strategies and circularity in the European steel industry. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 153, p. 104517 - 104533, 2020.

POLIMIX. **Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental**. Quixeré: Polimix, 2016.

RATHORE, Pradeep; SARMAH, Sarada Prasad. Economic, environmental, and social optimization of solid waste management in the context of circular economy. **Computers & Industrial Engineering**, v. 145, p. 106510 - 106510, 2020.

REN, Changzai et al. Comparative life cycle assessment of sulfoaluminate clinker production derived from industrial solid wastes and conventional raw materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 1314-1324, 2017.

ROCHA, Jeremias; BARBOSA, Jane Roberta; MEDEIROS, Sara Raquel Fernandes Queiroz. Projeto Hídrico e Transformações Territoriais no Ceará-Brasil: Colonization and Appropriation of the Amazon Territory: the Exploitation of the “Drogas Do Sertão” and the Indigenous Labor. **Revista GeoNordeste**, v. 34, n. 1, p. 55-71, 2023.

RUFÍ-SALÍS, Martí et al. Can wastewater feed cities? Determining the feasibility and environmental burdens of struvite recovery and reuse for urban regions. **Science of the Total Environment**, v. 737, p. 139783, 2020.

RUIZ-PASTOR, Laura; CHULVI, Vicente; MULET, Elena; ROYO, Marta. A metric for evaluating novelty and circularity as a whole in conceptual design proposals. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 337, p. 130495, 2022.

SAN MARTIN, David et al. Multi-criteria assessment of the viability of valorising vegetable by-products from the distribution as secondary raw material for animal feed. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 13, p. 15716-15730, 2021.

SANCHEZ, Joan et al. Potentials and limitations of the bioconversion of animal manure using fly larvae. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, p. 3497-3520, 2021.

SELLITTO, Miguel Afonso et al. Barriers, drivers, and relationships in industrial symbiosis of a network of Brazilian manufacturing companies. **Sustainable production and consumption**, v. 26, p. 443-454, 2021.

SEN, Amrita; BAKSHI, Bhavik R. Techno-economic and life cycle analysis of circular phosphorus systems in agriculture. **Science of The Total Environment**, v. 872, p. 162016, 2023.

SILVESTRI, Luca et al. Circular economy strategy of reusing olive mill wastewater in the ceramic industry: How the plant location can benefit environmental and economic performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 326, p. 129388, 2021.

SIMÃO, Francisco Veiga et al. Mine waste as a sustainable resource for facing bricks. **Journal of Cleaner Production**, v. 368, p. 133118, 2022.

SUCKLING, James et al. Supply chain optimization and analysis of *Hermetia illucens* (black soldier fly) bioconversion of surplus foodstuffs. **Journal of Cleaner Production**, v. 321, p. 128711, 2021.

TAIFOURIS, Manuel R.; MARTIN, Mariano. Multiscale scheme for the optimal use of residues for the production of biogas across Castile and Leon. **Journal of cleaner production**, v. 185, p. 239-251, 2018.

TEIGISEROVA, Dominika Alexa et al. Circular bioeconomy: Life cycle assessment of scaled-up cascading production from orange peel waste under current and future electricity mixes. **Science of the Total Environment**, v. 812, p. 152574, 2022.

TERMOLUX. **Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental**. Caucaia: Termolux, 2008.

THOMAS, James; HARDEN, Angela. Methods for the thematic synthesis of qualitative research in systematic reviews. **BMC medical research methodology**, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2008.

- TRICCO, Andrea C. et al. A scoping review on the conduct and reporting of scoping reviews. **BMC medical research methodology**, v. 16, p. 1-10, 2016.
- UDDIN, Azfar et al. Circular economy and its implementation in cement industry: A case point in Pakistan. **Science of The Total Environment**, v. 898, p. 165605 - 165617, 2023.
- VIANA, Luciano et al. Life Cycle Assessment of Oat Flake Production with Two End-of-Life Options for Agro-Industrial Residue Management. **Sustainability**, v. 15, n. 6, p. 5124, 2023.
- VOTORANTIM. **Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental**. Sobral: Votorantim, 2014.
- WEN, Zongguo; MENG, Xiaoyan. Quantitative assessment of industrial symbiosis for the promotion of circular economy: a case study of the printed circuit boards industry in China's Suzhou New District. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 211-219, 2015.
- YU, Fei; HAN, Feng; CUI, Zhaojie. Evolution of industrial symbiosis in an eco-industrial park in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, p. 339-347, 2015.
- YU, Yong et al. Cleaner production of the precast concrete industry: comparative life cycle analysis of concrete using recycled aggregates from crushed precast rejects. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 8, n. 47, p. 17335-17344, 2024.
- ZENGFENG, Z. H. A. O. et al. Use of recycled concrete aggregates from precast block for the production of new building blocks: An industrial scale study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 157, p. 104786 - 104799, 2020.
- ZHANG, Abraham et al. Barriers to smart waste management for a circular economy in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 240, p. 118198, 2019.
- ZHANG, Chunbo et al. Life cycle assessment of material footprint in recycling: A case of concrete recycling. **Waste Management**, v. 155, p. 311-319, 2023.
- ZYGMUNTOWICZ, Justyna et al. Environmental footprint as a criterion in the ZTA composites forming process via centrifugal slip casting. **Ceramics International**, v. 47, n. 13, p. 18053-18064, 2021.