

ACV DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES E AGREGADOS RECICLADOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

LCA OF SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIALS AND RECYCLED AGREGGATES: A SYSTEMATIC REVIEW

ACV DE MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS Y ÁRIDOS RECICLADOS: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA

LIDIANNE DO NASCIMENTO FARIAS, M.SC. | UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

JOAQUIN HUMBERTO AQUINO ROCHA, M.SC. | UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

LUCAS ROSSE CALDAS, DR. | UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

ROMILDO DIAS TOLEDO FILHO, DR. | UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo realizar uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre a avaliação dos impactos ambientais por decorrentes do uso de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) e Agregado Reciclado (AR) em materiais de construção, por meio da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A metodologia consistiu na busca de documentos científicos sobre ACV para a avaliação de concretos e argamassas que empregam MCS e AR, nas bases de dados Scopus e Web of Science, período de 2015 e 2021. Os resultados mostram que estudos adotam uma fronteira do sistema berço ao portão, atribuindo-se que é o mais representativo. Para realizar a ACV, dados secundários são utilizados, principalmente bancos de dados (Ecoinvent e ELCD). O Potencial de Aquecimento Global é a categoria de impacto comum, seguido por Potencial de Depleção Abiótica e Potencial de Acidificação. Os métodos utilizados quantificam apenas os efeitos intermediários das categorias de impacto; esta etapa é assistida pelos programas Simapro e OpenLCA, preferencialmente. Os estudos mostraram que o uso de MCS e AR conseguem reduzir os impactos ambientais dos concretos e argamassas avaliadas, mas a redução é maior quando ambos são usados ao mesmo tempo do que quando usados separadamente.

PALAVRAS-CHAVE

Impactos ambientais; Ciclo de Vida; Argamassas.

ABSTRACT

This study aims to carry out a Systematic Literature Review (SLR) on the assessment of environmental impacts resulting from the use of Supplementary Cement Materials (SCM) and Recycled Aggregate (RA) in construction materials, through the methodology of Evaluation of the Life Cycle (LCA). The methodology consisted of searching for scientific documents on LCA for the evaluation of concretes and mortars that use SCM and RA, in the Scopus and Web of Science databases, from 2015 to 2021. The results show that studies adopt a border of the cradle system to the gate, claiming that it is the most representative. To perform the LCA, secondary data are used, mainly databases (Ecoinvent and ELCD). Global Warming Potential is the common impact category, followed by Abiotic Depletion Potential and Acidification Potential. The methods used quantify only the intermediate effects of the impact categories; this step is preferably assisted by Simapro and OpenLCA programs. Studies have shown that the use of MCS and AR can reduce



the environmental impacts of the evaluated concretes and mortars, but the reduction is greater when both are used at the same time than when used separately.

KEYWORDS

Environmental impacts; Life Cycle; Mortars.

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo realizar una Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) sobre la evaluación de impactos ambientales derivados del uso de Materiales Suplementarios de Cemento (MSC) y Agregado Reciclado (AR) en materiales de construcción, a través de la metodología de Evaluación del Ciclo de Vida (ECV). La metodología consistió en la búsqueda de documentos científicos sobre ECV para la evaluación de hormigones y morteros que utilizan MSC y AR, en las bases de datos Scopus y Web of Science, de 2015 a 2021. Los resultados muestran que los estudios adoptan una frontera del sistema cuna para la puerta, indicándose que es la más representativa. Para realizar la ECV se utilizan datos secundarios, principalmente bases de datos (Ecoinvent y ELCD). El Potencial de Calentamiento Global es la categoría de impacto común, seguida por el Potencial de Agotamiento Abiótico y el Potencial de Acidificación. Los métodos utilizados cuantifican únicamente los efectos intermedios de las categorías de impacto; este paso es asistido por los programas Simapro y OpenLCA, preferencialmente. Los estudios han demostrado que el uso de MSC y AR pueden reducir los impactos ambientales de los hormigones y morteros evaluados, pero la reducción es mayor cuando se usan ambos al mismo tiempo que cuando se usan por separado.

PALABRAS CLAVE

Impactos ambientales; Ciclo de vida; Morteros.



1. INTRODUÇÃO

A construção civil é uma das indústrias que mais impactam negativamente o meio ambiente, com a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e o consumo de recursos naturais. Neste sentido, surge a demanda e o desenvolvimento de materiais de construção mais sustentáveis (HOSSAIN et al., 2018). A incorporação de resíduos aos materiais cimentícios tem se mostrado como uma contribuição para ampliação do consumo consciente na construção civil e, como interesse comercial, pode resultar na fabricação de novos materiais e dar destino e valor a materiais que até então seriam descartados. Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) como escória de alto forno, sílica ativa e cinza volante, encontrados a partir de resíduos provenientes de outras indústrias, são altamente comercializados servindo como substituição parcial ao cimento e concreto na indústria da construção civil, para, além de proporcionar propriedades mais satisfatórias, reduzir o impacto ambiental causado pelos mesmos (LIMA et al., 2017). Outro plano de reaproveitamento é a utilização de Agregados Recicladados (AR) na produção de concretos e argamassas (KURDA et al., 2018; ZHANG et al., 2019a).

Com um vasto impacto ambiental, o concreto é o segundo material mais utilizado no mundo, com um consumo anual que chega a 6,5 bilhões de toneladas (VIEIRA et al., 2016) e se encontra em primeiro lugar como material de construção mais utilizado (ZHANG et al., 2019b). Dessa forma, buscar novas matérias-primas que possam substituir o usual cimento Portland e agregados (areia e brita), mostra ser cada vez mais importante. A começar pela indústria do cimento, componente-chave na produção de concretos, ela é causadora de impactos globais devido principalmente a sua grande emissão de gases de efeito estufa (GEE), dentre eles o dióxido de carbono (CO₂), além de propor esgotamento de recursos não-renováveis e alto gasto de energia (HOSSAIN et al., 2018).

A alta demanda de agregados para produção de concretos também pode trazer como consequência a escassez de matéria-prima ou distâncias cada vez maiores de transporte, com jazidas afastadas dos centros urbanos. Desse modo, para que haja redução do consumo de agregados naturais, a alternativa escolhida é a utilização de AR. Em correlação com a preocupação da destinação correta para os resíduos de construção e demolição (RCD), representativo por sua grande quantidade, com estimativa de mais 50% nas cidades brasileiras, de acordo com os dados da ABRELPE (2020), também se torna uma estratégia produzir AR a partir desses resíduos. Segundo Lima

et al. (2017), os AR, como os produzidos a partir de RCD, passaram a ser mais utilizados devido às características mineralógicas semelhantes às dos agregados naturais, entretanto, estudos prévios devem ser realizados para a garantia do desempenho dos materiais cimentícios.

A abordagem da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) se torna ideal para identificação de parâmetros atribuídos à utilização de MCS e AR inseridos no processo construtivo, pois demonstra ser uma ferramenta útil de análise de (novos) materiais em termos de desempenho ambiental do ciclo de vida em todo o processo, desde a origem da matéria-prima até o seu fim de vida (COLANGELO et al., 2018; HOSSAIN et al., 2018).

Nesse sentido, diversos estudos apresentam a metodologia ACV para determinar os impactos ambientais de concretos e argamassas, utilizando tanto MCS quanto AR. Adicionalmente, nestes estudos, foi demonstrado que o cimento é o principal contribuinte para a maioria dos impactos ambientais e que a sua substituição parcial por MCS, juntamente com a utilização de AR, pode reduzir significativamente os impactos ambientais (BRAGA et al., 2017; ROSADO et al., 2017).

Desse modo, baseado na busca de materiais que proporcionam consumo mais baixo de energia e menor impacto ao meio ambiente, diversos estudos empregaram a metodologia de ACV. Não obstante, têm mostrado que ainda existem limitações e problemas na aplicação da metodologia de ACV e ainda existe uma lacuna científica sobre a avaliação conjunta desses dois tipos de materiais (MCS e AR) em materiais de construção. Diante do contexto, o objetivo deste trabalho é identificar o alcance da metodologia de ACV em materiais de construção com o emprego de MCS e AR por meio de uma revisão bibliográfica de artigos publicados em periódicos internacionais de grande relevância entre os anos de 2015 e 2021.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

No presente estudo foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) seguindo as recomendações propostas por Fink (2013). Foram realizadas buscas em bases de dados por artigos científicos publicados entre os principais periódicos internacionais.

Para a realização do trabalho, foram consideradas as bases científicas da Scopus e Web of Science (WoS) para compilar os trabalhos, esses preferencialmente em inglês.

Como o intuito do trabalho foi determinar os principais estudos do impacto ambiental dos MCS e AR por meio da ACV, foram definidas palavras-chave em inglês

que serviram para a busca dos artigos. Os termos de busca utilizados foram: Life Cycle Assessment (LCA), Supplementary Cementitious Materials (SCM), Recycled Aggregate (RA) e suas respectivas siglas, realizando a busca em Título, Resumo e Palavras-chave. O Quadro 01 resume os critérios utilizados na busca dos estudos para a revisão e apresenta os questionamentos da pesquisa.

Sendo o principal objetivo deste estudo identificar o alcance da metodologia de ACV em materiais de construção com o uso de MCS e AR, a busca 3 (B3) foi priorizada.

Encontradas as publicações relacionadas ao campo

de estudo, foram verificados o título e o resumo, a fim de identificar as publicações mais relevantes e descartar aquelas que não se enquadram no objetivo da pesquisa. Para isso, foi utilizado o critério de avaliação de qualidade proposto por Dabous e Feroz (2020) e as pesquisas foram consideradas conforme clareza e metodologia do estudo, credibilidade do estudo, robustez da pesquisa e qualidade do estudo. Também foram utilizadas algumas ferramentas de análise como, por exemplo: SankeyMATIC que gerou o diagrama de Sankey.

Filtro de pesquisa	Critério
Base	Scopus - Web of Science
Tipo de documento	Artigo de revista científica
Idioma	Inglês
Busca em Título, Resumo e Palavras-chave	<ul style="list-style-type: none"> B1 - ("LCA" OR "Life Cycle Assessment") AND ("SCM" OR "Supplementary Cementitious Materials") B2 - ("LCA" OR "Life Cycle Assessment") AND ("RA" OR "Recycled Aggregate"). B3 - ("LCA" OR "Life Cycle Assessment") AND ("SCM" OR "Supplementary Cementitious Materials") AND ("RA" OR "Recycled Aggregate").
Período de análise	Entre os anos 2015 – 2021
Questionamentos de pesquisa	<ul style="list-style-type: none"> Qual tem sido o alcance da metodologia ACV de MCS; AR e MCS e AR (conjunto) em aplicações na construção civil? Quais os países e periódicos que mais publicam esse tipo de pesquisa? Quanto aos aspectos metodológicos de ACV, como métodos de impacto, fronteira do estudo, categorias de impacto ambiental, entre outros, quais são as tendências? O uso de MCS e AR reduzem os impactos ambientais de materiais cimentícios? É possível identificar lacunas de conhecimento para o estudo de ACV de MCS e AR?

Quadro 1: Critérios de pesquisa.

Fonte: Autores.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Aspectos gerais

Esta RSL resume os principais estudos de ACV realizados em MCS e RA para a produção de materiais de construção à base de cimento, especialmente na produção de concretos e argamassas (Figura 01 e Quadro 02). Dos 28 estudos, 12 consideram MCS e AR, 10 MCS e apenas 6 AR. Observa-se que o MCS mais utilizado é a Cinza Volante (CV), 50% (14/28) dos estudos, seguido de Escória Granulada de Alto Forno (EGAF), 14,28% (4/28) e Sílica Ativa (SA), 7,14% (2/28), mas em menor proporção, sendo que diferentes MCS são

utilizados em outros estudos, como resíduos de biomassa e de cerâmica.

Em relação à aplicação, observou-se que, em sua maioria, foi concreto, com 57,14% (16/28) e, considerando o seu uso para blocos foi 10,71% (3/28). Aplicações em argamassas, cimento, terra estabilizada e agregados também foram relatadas, mas apenas em 32,14% dos estudos (9/28).

A Figura 02 mostra os países de origem das pesquisas, onde Portugal se destaca com a maioria das publicações, 17,86% (5/28), seguido da China com 14,29% (4/28) e Austrália com 10,71% (3/28). Os maiores avanços e aplicações da ACV para o tema estudado são dados pelo continente europeu, seguido pela Ásia, América e Oceania. A

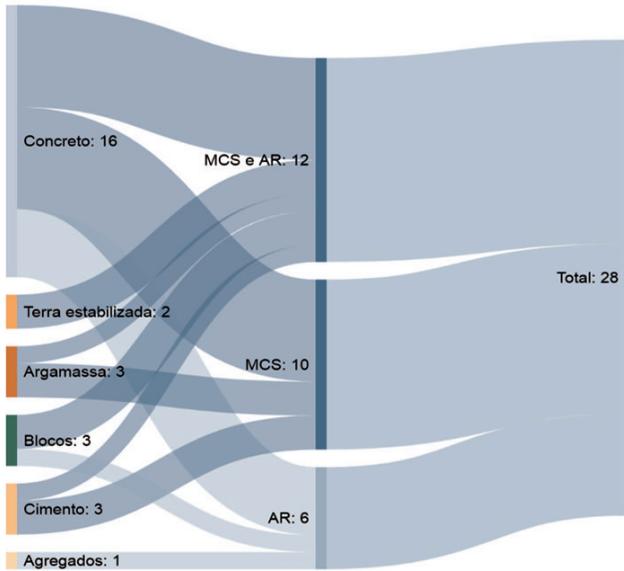


Figura 1: - Resumo e aplicação dos estudos.
Fonte: Autores.

Autores	Materiais		Aplicações
	MCS*	Agregado	
Lee et al. (2021)	EGAF, CV	-	Concreto binário
Lo et al. (2021)	CVC, CIC, CCA	-	Concreto permeável
De Souza et al. (2021)	EGAF, CV, CCA, CBC, RPPO	AR	Concreto
Zhou et al. (2021)	Sedimento Bruto de Engenharia	-	Argamassa
Roh et al. (2020)	-	AR	Concreto
Caldas et al. (2021)	Metacaulim, CV	-	Bioconcreto de madeira
Sabau et al. (2021)	-	AR	Concreto
Guo et al. (2020)	-	AR	Blocos de concreto
Hossain et al. (2020)	SMC, CVIRSU, CVP, EGAF, CLEI, PV	AR	Materiais de preenchimento e blocos
Meek et al. (2021)	CV, SA, EGAF, Cal Hidratada	AR	Materiais de terra compactada
Moreno-Juez et al. (2020)	Concreto Reciclado Ultrafino	-	Cimento/Argamassa
Moro et al. (2020)	Nanopartículas de TiO2	AR	Argamassa
Visintin et al. (2020)	-	AR	Concreto
Kurda et al. (2020)	CV	AR	Concreto
Fořt e Černý (2020)	Tijolos residuais em pó e álcali ativado	AR	Cimento/Blocos/AR
Li et al. (2019)	PC, TD	-	Argamassa/Concreto
Zhang et al. (2019b)	CV, SA	-	Concreto
Kurda et al. (2018)	CV	AR	Concreto
Arrigoni et al. (2018)	CV	AR	Materiais de terra estabilizada
Borghini et al. (2018)	-	AR	AR Mistos
Marinkovic et al. (2017)	CV, CV ativada por álcali	AR	Concreto
Hossain et al. (2017)	Resíduo de Lama de Concreto	AR	Blocos de concreto
Robayo-Salazar et al. (2017)	Resíduo de Tijolo de Argila Vermelha	-	Cimento/Argamassa
Kurda et al. (2017)	CV	AR	Concreto
Braga et al. (2017)	-	AR	Concreto
Suárez et al. (2016)	Gesso Reciclado	-	Cimento Portland
Teixeira et al. (2016)	CVC, CV de Biomassa	-	Concreto
Anastasiou et al. (2015)	CV Balcária	AR	Pavimento de concreto

*CV-Cinza Volante; SA-Sílica Ativa; EGAF-Escória Granulada de Alto Forno; CCA-Cinza de casca de arroz; CBC-Cinza de bagaço de Cana-de-açúcar; RPPO-Resíduos do Processamento de Pedras Ornamentais; CVC-Cinza Volante de Carvão; CIC-Cinza Inferior de Carvão; CLEI-Cinzas de Lodo de Esgoto Incineradas; CVP-Cinza Volante Pulverizada; PC-Pó de Calcário; TD-Terra Diatomácea; PV-Pó de Vidro; SMC-Sedimentos Marinhos Contaminados; CVIRSU-Cinzas Volantes de Incineração de Resíduos Sólidos Urbanos.

Quadro 2: Resumo dos estudos analisados.
Fonte: Autores.

Europa deve se destacar pelo fato de ser um continente com pouca área para a disposição final de resíduos e, portanto, onde a reutilização e reciclagem se faz necessária. Sendo que em alguns países, é permitido o emprego de AR para a produção de concretos estruturais, diferente do caso do Brasil. Os outros continentes (Ásia e América Latina) são os que mais cresceram nos últimos anos, compostos dos países considerados em desenvolvimento e que normalmente ainda possuem um elevado déficit habitacional e de infraestrutura. Esse crescimento pode levar a um incremento da geração de resíduos e ao mesmo tempo pode ser uma oportunidade para o destino desses resíduos em vez do descarte.

Quando analisadas as revistas científicas que fornecem estudos de ACV, o Journal of Cleaner Production se destaca com 42,86% (12/28), seguido por Resources, Conservation & Recycling e Construction and Building Materials, com 14,29% (4/28) e 10,71% (3/28), respectivamente. As duas primeiras revistas têm escopo mais geral, envolvendo questões relacionadas à sustentabilidade e possuem maior fator de impacto, o que pode explicar a preferência dos pesquisadores em publicar suas pesquisas nesses veículos.

A maioria das publicações pertence aos anos de 2020 e 2021 (53,57%), mostrando que o tema tem relevância nos últimos anos (Figura 03). No entanto, há um crescimento contínuo do número de publicações nos últimos cinco anos, conforme observado na metodologia.

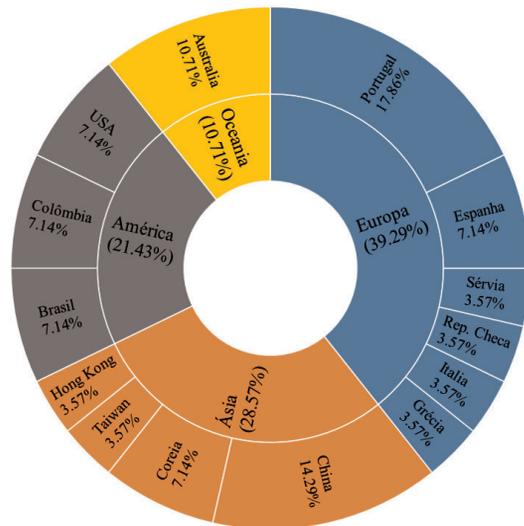


Figura 2: País de origem dos estudos.
Fonte: Autores.

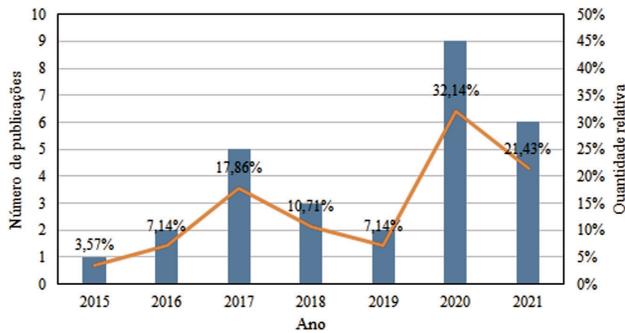


Figura 2: Datas das publicações revisadas.

Fonte: Autores.

3.2. Aspectos metodológicos da ACV

A metodologia ACV consiste em avaliar, qualitativa e quantitativamente, os potenciais impactos ambientais e os recursos utilizados de um produto ao longo de seu ciclo de vida, incluindo desde a matéria-prima, produção, uso, manutenção, reciclagem e descarte. A metodologia também permite gerar estratégias para otimizar os materiais, a energia e o desempenho ambiental do sistema analisado (DOSSCHE et al., 2018).

Existem diferentes normativas que fornecem diretrizes, estrutura, terminologia e fases metodológicas (ISO, 2006a, 2006b; European Committee for Standardization, 2012). Geralmente, estudos de ACV compreendem quatro fases: (1) Definição de objetivo e escopo; (2) Análise do Inventário de Ciclo de Vida (ICV); (3) do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e (4) Interpretação (ISO, 2006a, 2006b). O resultado da RSL foi apresentado conforme essa divisão da ACV, além do mapeamento dos estudos (item 3.1), pois permite verificar o escopo de cada metodologia utilizada na literatura (fase 1); os aspectos metodológicos: métodos de impacto, fronteiras do estudo, categorias de impacto ambiental (fase 2 e 3), e a análise da redução dos impactos ambientais com o uso de AR e MCS (fase 4). Por fim, são indicadas as principais lacunas de conhecimento sobre a ACV de MCS e AR.

3.2.1. Definição de objetivo e escopo

Nesta fase, devem ser especificados o objetivo do estudo, a definição da unidade funcional, o sistema do produto estudado, os limites do sistema, os insumos e os procedimentos de atribuição dos produtos. Dentre os 28 estudos analisados, foi observado que todos fornecem claramente o objetivo do estudo da ACV, separado dos objetivos do artigo.

Em relação aos limites do sistema, na metodologia ACV são utilizados três limites de sistema: do “berço ao

portão”, do “berço ao túmulo” e do “berço ao berço”. No primeiro, é considerado o ciclo desde a extração da matéria-prima até a saída do produto da fábrica. Outros limites consideram o uso, manutenção, demolição, reciclagem de resíduos, entre outros (VIEIRA et al., 2016). Observou-se que o sistema mais utilizado para estudos de ACV em MCS e AR é o do “berço ao portão”, o que inclui a avaliação dos impactos ambientais decorrentes da extração de matérias-primas, produção e preparação de materiais, transporte e produção do produto, excluindo impactos relacionados ao uso e fim de vida.

Embora 96,43% (27/28) dos estudos considerem este limite do sistema (Berço ao portão), 28,57% (7/28) não o mencionam explicitamente e apenas um estudo (3,57%) considera como limite do berço ao berço. Nesse sentido, estudos mencionam que a escolha do limite se deve a incertezas tanto nos dados quanto no comportamento do produto até o final da sua vida útil (LO et al., 2021). De Souza et al. (2021) consideram que o limite do sistema Berço ao portão é o mais relevante em termos de impactos ambientais específicos. No entanto, como muitos MCS e AR são originados de resíduos seria interessante que o escopo “berço ao berço” fosse mais utilizado para se contabilizar os impactos evitados (ou benefícios) oriundos do reaproveitamento destes resíduos.

No que diz respeito à absorção de CO₂ pelos AR, devido ao processo de carbonatação, apenas alguns estudos consideram esse fenômeno. Embora a carbonatação no concreto armado seja uma das principais causas de corrosão, também é uma forma de absorção de CO₂ (GALAN et al., 2010) e ainda mais com AR, devido à sua exposição e maior área superficial, após o processo de reciclagem e antes de ser misturado ao concreto ou argamassa (COLLINS, 2010). Hossain et al. (2020) mencionam esse fenômeno, mas não o consideram em seu estudo, justificando-o pelo limite do sistema escolhido (Berço ao portão); no entanto, Visintin et al. (2020) e Moro et al. (2020), utilizando o mesmo limite do sistema, consideram a absorção de CO₂ em seus respectivos estudos, mostrando uma contribuição significativa nos resultados do impacto de potencial de aquecimento global (ZHANG et al., 2019a).

A unidade funcional é a base de comparação para um estudo de ACV, depende do objetivo do estudo e fornece uma referência da relação entre entradas e saídas (ISO, 2006a). É necessário que a unidade funcional seja escolhida de forma adequada para garantir a precisão e comparação dos resultados (GUO et al., 2020). A seleção incorreta leva a resultados diferentes, ainda que para o mesmo sistema de produto (HISCHIER; REICHART, 2003;

KIM; DALE, 2006). Os estudos consideram diferentes unidades funcionais, sendo as unidades volumétricas (m³) as mais utilizadas, 57,14% (16/28), seguidas das unidades de massa, seja em quilogramas (kg) e/ou tonelada (ton), 21,43% (6/28) e 17,86% (5/28), respectivamente.

Embora não haja consenso sobre a utilização de uma unidade funcional, visto que cada estudo é único (ZHANG et al., 2019a), a volumétrica é a mais utilizada especificamente para a aplicação de concreto, o que era de se esperar já que concretos e argamassas normalmente são especificados nesta unidade no mercado. No entanto, estudos como Zhang et al. (2019b) consideram que apenas o uso do volume do concreto como unidade funcional pode trazer resultados tendenciosos e propõem o uso adicional de unidades de desempenho funcional, como resistência à compressão, em MPa, aos 28 dias e coeficiente de difusão de cloretos no concreto, para avaliar a durabilidade e vida útil. Nesse sentido, como a unidade funcional influencia diretamente os resultados da ACV, é necessário estabelecer uma unidade comum para evitar diferenças nos estudos de ACV e fazer comparações entre os diferentes materiais. Os resultados quando são normalizados por MPa acabam por mostrar que um dado traço de concreto/argamassa que parecem ter menor impacto ambiental em um primeiro momento, podem ser mais desvantajosos quando uma unidade de MPa é considerada. Alguns autores chamam esta unidade de indicador de ecoeficiência ou intensidade de potencial de aquecimento global (normalmente apresentada em kgCO₂-eq/m³.MPa).

A alocação em ACV significa a partição dos impactos ambientais de acordo com a relação de massa ou valor econômico entre o produto e os subprodutos (HOSSAIN et al. 2018). Se a alocação for considerada, dois procedimentos foram propostos, em massa e econômico (VAN DEN HEEDÉ; DE BELIE, 2012). O primeiro refere-se à diferenciação dos impactos ambientais de acordo com a proporção em massa do produto final e dos subprodutos; enquanto, no segundo caso, a divisão dos impactos ambientais é baseada no valor econômico. Porém, em relação ao MCS e AR, normalmente, a alocação não é considerada (BÖSCH; HELLWEG, 2010), isso porque esses materiais são reciclados e reaproveitados em cimento e concreto, em substituição aos materiais originais. Isso está de acordo com a presente investigação onde 71,43% (20/28) dos estudos não realizaram alocações.

De acordo com a ISO 14040 (ISO, 2006a) a alocação deve ser evitada sempre que possível, aplicando-se a abordagem de expansão do sistema, esta tem sido recomendada na literatura (KIM; CHAE, 2016). No entanto,

outras referências mencionam que devem ser alocados por serem coprodutos ou subprodutos (EUROPEAN UNION DIRECTIVE, 2008). Na literatura também foi demonstrado que a alocação em massa gera impactos ambientais muito altos em aplicações de concreto que usam MCS, com relação à alocação econômica há menores impactos ambientais (CHEN et al. 2010), mas alguns estudos indicam que não há uma tendência clara (TURK et al. 2015). O maior problema da alocação econômica está no fato da grande variabilidade e não homogeneidade dos valores ao longo do tempo, que tem uma influência direta de fatores intrínsecos do mercado e contexto econômico onde o estudo foi realizado. A revisão indica que apenas 10,71% (3/28) fez alocação em massa, 7,14% (2/28) fez econômica, e 10,71% (3/28) ambos. Porém, não há consenso sobre o método de alocação a ser utilizado e dependerá do estudo. É visível que realizar a alocação, principalmente em massa, pode desestimular o reaproveitamento de resíduos e coprodutos, já que os impactos dos coprodutos (principalmente cinza volante e escória) podem aumentar consideravelmente.

Talvez uma saída para a questão da padronização da alocação, seja as Regras de Categoria de Produto (PCR, em inglês) de produtos de concreto conterem este tipo de informação, especificando quais os tipos de MCS que precisariam levar em consideração a alocação e como ela deve ser realizada. Este é um tema ainda mais relevante se for considerado a questão da economia circular, que tem sido bastante difundida tanto à nível acadêmico como do mercado. Para o incentivo de um processo mais circular na indústria da construção será necessário ter regras claras sobre como medir os ganhos (para quem gerou e quem recebeu) quando resíduos são reaproveitados.

3.2.2. Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

A criação e análise de ICV compila e quantifica as entradas, saídas e produtos, isso inclui a análise dos dados relativos ao sistema de produção, que é usado para o AICV (RASHID; YUSOFF, 2015; De LARRIVA et al., 2014). O ICV deve conter dados de entradas e saídas de cada processo individual do sistema em estudo, isso inclui: poluentes, materiais, recursos, transporte, fabricação, uso, descarte, reciclagem e desempenho (Kua e Kamath, 2014).

No presente estudo, observa-se que os dados foram adquiridos de forma primária no 64,29% (18/28) dos estudos, isso envolve diretamente as fontes; enquanto o restante usou bases de dados secundárias e fontes da literatura. Observa-se que a base de dados mais utilizada

é a Ecoinvent, seguida pela ELCD (European Reference Life Cycle Database), sendo as mais importantes intencionalmente (Vieira et al., 2016). Os bancos de dados ajudam a otimizar o tempo de aplicação da ACV e a ter maior presunção dos dados. Quando houver necessidade de informações que não façam parte de nenhum banco de dados, pode se fazer uma estimativa, desde que esse valor seja baseado em dados existentes na literatura científica e técnica, conforme realizado por diversos estudos (BRAGA et al., 2017; LI et al., 2019; HOSSAIN et al., 2020). Os dados disponíveis nas bases de dados também podem ser adaptados.

Como uma grande quantidade de dados é necessária, recomenda-se utilizar um software para tornar o estudo mais ágil, em alguns casos possuem bancos de dados e métodos de ACV integrados para avaliação de impactos ambientais, além de gerar tabelas e gráficos que colaboram na interpretação dos resultados (ISLAM et al., 2015). Nos estudos, os principais softwares foram o SimaPro e o OpenLCA, os quais possuem bancos de dados importantes. O grande uso SimaPro pode ser explicado por ser um dos que dominam o mercado de ACV, já ter o Ecoinvent integrado, possuir uma licença educacional e ter uma interface relativamente amigável. Enquanto o uso do OpenLCA por ser explicado pelo fato de ser um software livre.

3.2.3. Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida (AICV)

A AICV consiste em uma das etapas mais importantes para execução da metodologia ACV; no entanto, são diversificadas as categorias de impacto ambiental que podem ser analisadas. De acordo com Li et al. (2019) esta fase visa compreender o sentido ambiental dos resultados do ICV, pois analisa os seus resultados categorizando os impactos ambientais dos produtos por meio de modelos de caracterização.

Dessa forma, é preciso escolher qual método de impacto será utilizado de acordo com o objetivo do estudo, para que assim sejam selecionadas as suas categorias. O Quadro 3 mostra as categorias de impacto que foram encontradas nesta RSL, bem como são apresentados as unidades e siglas que serão utilizadas no estudo.

Apresentadas as categorias de impacto contabilizadas na literatura revisada, a seguir um resumo da AICV com base no tipo de método, abordagem, categoria de impacto e software utilizado por cada autor é apresentado no Quadro 04.

Categoria de impacto	Sigla utilizada	Unidade
Aquecimento global	GWP	kg CO2 eq
Depleção abiótica	ADP	kg Sb eq
Acidificação	AP	kg SO2 eq
Eutrofização	EP	kg PO4-3 eq
Criação fotoquímica de ozônio	POCP	kg C2 H4 eq
Energia não renovável	Pe-NRe	MJ primário
Destruição da camada de ozônio	ODP	kg CFC-11 eq
Orgânicos respiratórios	RO	kg C2H4 eq
Inorgânicos respiratórios	RI	kg PM2.5 eq
Extração mineral	ME	MJ excedente
Carcinógenos	CA	kg C2H3Cl eq
Não-carcinógenos	NCA	kg C2H3Cl eq
Ocupação do solo	LO	m2org.arabl
Acidificação aquática	AAC	kg SO2 eq
Radiação ionizante	IA	-
Ecotoxicidade terrestre	TE	kg TEG soil
Ecotoxicidade aquática	AE	kg TEG water
Eutrofização aquática	AEU	kg PO4 P-lim
Acidificação/nitrificação terrestre	TAN	-
Eutrofização terrestre	ETP	Mol N eq/t
Eutrofização de água doce	FAETP	-
Eutrofização marinha	MAETP	-
Ecotoxicidade de água doce	FAEP	-
Depleção abiótica de combustíveis fósseis	ADP-ff	MJ
Depleção abiótica de elementos	ADP-e	kg Sb-eq
Compostos orgânicos voláteis	VOC	Kg
Toxicidade humana	HTP	kg 1,4-DCB-eq

Quadro 3: Categorias de impacto ambiental.

Fonte: Autores.

Entre os métodos do impacto de ciclo de vida apresentados na Quadro 4, os que se destacam em grande parte na utilização são: Método CML, 28,6% (8/28), IMPACT 2002+,

14% (4/28), Demanda Cumulativa de Energia, 10,7% (3/28), IPCC, 21,4% (6/28), TRACI, 10,7% (3/28), outros métodos se dividem entre o restante dos autores. É importante salientar que os métodos avaliados podem ser de multicategorias, onde são classificados em pontos médios “midpoint” ou pontos finais “endpoint”. Os impactos de ponto médio como aquecimento global, acidificação e eutrofização foram os mais avaliados entre os estudos encontrados. Já os impactos que avaliam os danos finais, como mudança climática e saúde humana, só foram encontrados nos estudos de Fořt e Černý (2020) e Borghi et al. (2018).

No Quadro 4 pode ser observado que a única categoria de impacto utilizada por todos os autores foi o potencial de aquecimento global, isto está associado ao fato que os materiais cimentícios, normalmente, possuem uma emissão significativa de CO₂, devido a calcinação do carbonato de cálcio, e esta tem sido uma das maiores preocupações do setor.

Em alguns casos, como Lo et al. (2021), Sabau et al. (2021), Meek et al., (2021), Visintin et al. (2020), Robayo-Salazar et al. (2017), Kurda et al. (2017) e Anastasiou et al. (2015), houve apenas a consideração da categoria GWP. Porém, mesmo que o potencial de aquecimento global seja importante para qualquer estudo deste setor, apenas a análise dessa categoria não será suficiente para uma avaliação ambiental mais consistente, pois é importante identificar os trade-off que ocorrem entre diferentes categorias de impacto. Por exemplo, o uso de um certo MCS pode trazer ganhos em termos do potencial de aquecimento global, mas pode prejudicar outra categoria como por exemplo eutrofização ou ecotoxicidade. Dessa forma, a maioria dos estudos apresentados optaram por fazer correlações com outras categorias de impacto, principalmente quanto à avaliação do potencial de acidificação (AP), eutrofização (EP), destruição da camada de ozônio (ODP), potencial de criação fotoquímica de ozônio (POCP) e energias não renováveis (Pe-NRe).

Outro ponto analisado na AICV foi quanto aos softwares utilizados, neste caso, o SimaPro tende a ser a opção mais escolhida pelos pesquisadores com 54% (15/28) dos estudos, os demais artigos se dividem entre 6 diferentes softwares, entre eles o OpenLCA e Excel. Há também algumas lacunas na coluna de softwares do Quadro 04, onde referem-se aos dados que não foram mencionados na literatura.

Autores	Método AICV*	Categorias de impacto	Software
Lee et al. (2021)	-	GWP, AP, EP, POCP, ODP, ADP	-
Lo et al. (2021)	IPCC	GWP	SimaPro
De Souza et al. (2021)	IPCC	GWP, AP, EP, ODP, FAETP, EIR, MIR; GGR; EPR e EEP	-
Zhou et al. (2021)	-	GWP, Pe-NRe	SimaPro
Roh et al. (2020)	KOLID	GWP, AP, EP, POCP, ODP, ADP	ezEPD
Caldas et al. (2021)	CML-IA	GWP, ODP, AP, EP, POCP, ADP-e, ADP-ff	SimaPro
Sabau et al. (2021)	IPCC	GWP	SimaPro
Guo et al. (2020)	CML	GWP, AP, EP, POCP, HTP	Dutch LCA Handbook e Excel
Hossain et al. (2020)	IMPACT 2002 +	GWP, AP, Pe-NRe	SimaPro
Meek et al. (2021)	IPCC	GWP	AusLCA database v2.8
Moreno-Juez et al. (2020)	CML	GWP, AP, EP, POCP, HTP, ODP, ADP-e, ADP-ff	OpenLCA
Moro et al. (2020)	TRACI e CML	GWP, AP, EP, POCP, Pe-NRe, ODP,	-
Visintin et al. (2020)	TRACI	GWP	Green Concrete LCA Tool - Excel
Kurda et al. (2020)	NativeLCA	GWP, Pe-NRe	SimaPro
Fořt e Černý (2020)	IMPACT 2002+	Midpoint: GWP, AAC, AE, AEU, CA, IA, LO, ME, NCA, Pe-NRe, OLD, PO, RE, TAN e TE Endpoint: Saúde humana, qualidade do ecossistema, mudança climática e recursos	SimaPro
Li et al. (2019)	TRACI	GWP, Pe-NRe, VOC	Green ConcreteLC
Zhang et al. (2019b)	Literatura	GWP	GaBi
Kurda et al. (2018)	CML	GWP, ADP, POCP, AP, EP, Pe-NRe	SimaPro
Arrighoni et al. (2018)	ReCiPe2016	GWP, LO, Consumo de água	SimaPro
Borghi et al. (2018)	ILCD 2011 e Demanda Cumulativa de Energia	ODP, NCA, CA, POCP, AP, EP, EP_ad, EP_m, E_ad, ER, ERFM, Pe-NRe, Consumo de recursos naturais, Mudanças Climáticas	SimaPro
Marinkovic et al. (2017)	CML	GWP, ODP, AP, EP, POCP, ADP-ff	Excel
Hossain et al. (2017)	IMPACT 2002+	GWP, Pe-NRe, RI, AP, EP, ODP	SimaPro
Robayo-Salazar et al. (2017)	IPCC	GWP	OpenLCA
Kurda et al. (2017)	CML	GWP	SimaPro
Braga et al. (2017)	CML e Demanda Cumulativa de Energia	GWP, ADP, ODP, POCP, AP, EP, Pe- Re, Pe-NRe	SimaPro
Suárez et al. (2016)	IMPACT 2002+	GWP, OD, AP, EP, ME, POCP, NC, Pe-NRe, RI, LO	SimaPro
Teixeira et al. (2016)	CML2 e Demanda Cumulativa de Energia	GWP, ODP, AP, EP, POCP, ADP-ff	SimaPro
Anastasiou et al. (2015)	IPCC	GWP	SimaPro

*IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change; TRACI - Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other Environmental Impacts; KOLID - Korean Life Cycle Impact Assessment Method based on Damage-Oriented Modeling.

Quadro 4 - Dados da AICV.

Fonte: Autores.

3.2.4. Interpretação

A interpretação consiste em avaliar os resultados encontrados através do ICV e AICV. Essa etapa geralmente fornece algumas análises, conclusões e recomendações. Desse modo, para complementar estes resultados pode haver a necessidade de novas formulações como a normalização, ponderação, análise de sensibilidade e incertezas.

Os cálculos dos resultados da AICV podem incluir a normalização e ponderação, que devem apoiar a interpretação dos resultados obtidos. No entanto, foi verificado que nem todos os estudos aplicaram essa etapa em

suas avaliações. Quanto à normalização dos resultados, foram identificados apenas os autores Marinkovic et al. (2017), Sabau et al. (2021), Fořt e Černý (2020) no nível “end-point”, Hossain et al. (2017), Teixeira et al. (2016), Meek et al. (2021), Moreno-Juez et al. (2020), Moro et al. (2020), Zhou et al. (2021) e Roh et al. (2020) implementaram essa etapa em seus estudos. Quanto à ponderação, apenas Marinkovic et al. (2017), Borghi et al. (2018), Teixeira et al. (2016) e Moreno-Juez et al. (2020). Portanto, muitos autores optaram por não implementar estas etapas, devendo-se ao fato que a normalização e ponderação podem ser incluídas ou não no processo e pelo fato dos fatores disponíveis para normalização e ponderação não retratarem o contexto de onde os estudos foram realizados.

Sabau et al. (2021) avaliaram o potencial de aquecimento global (GWP) de concretos com cinzas volantes e agregados reciclados. Os resultados mostraram que concretos com até 100% de agregados reciclados e 25% de cinzas volantes possibilitam reduções na emissão de carbono em comparação ao concreto convencional. Os autores constataram que os benefícios ambientais do uso de MCS são compensados até em grandes distâncias de transportes para cinzas volantes, até 504 km, como mostrado no estudo. Com uma substituição de 25% do cimento por cinzas volantes foram apresentadas reduções no GWP entre 8% e 17% (média de 12,5%). Importante ressaltar que se deve levar em consideração a substituição do cimento até teores que possibilitem a obtenção de boas propriedades mecânicas e de durabilidade para aplicação estrutural dos concretos.

Moro et al. (2020) verificaram que, embora os agregados representem entre 60 e 70% do volume total do concreto, eles influenciam pouco nos resultados do GWP, aproximadamente entre 2 e 3% do GWP total. O estudo sugere que o AR pode trazer maiores benefícios ao considerar os impactos evitados pela geração de resíduos e o esgotamento abiótico. Em particular, Meek et al. (2021) garantem que reduzir a distância transportada é fundamental para redução do GWP.

As incertezas nos resultados de ACV são comuns, principalmente, quando há uma baixa qualidade dos dados e não há uma análise de sensibilidade apropriada. Hossain et al. (2020) consideraram em seu estudo a fronteira do sistema berço ao berço, pois os dados necessários não estavam disponíveis para a fase de uso e final de vida, e, mostraram que os resultados de ACV são sensíveis por diferentes considerações. No entanto, os autores não realizaram uma análise de sensibilidade, como foi vista em Caldas et al. (2021) que realizou um estudo de ACV para

produção de bioconcretos e a análise de sensibilidade foi feita para as avaliações dos combustíveis utilizados durante o processo de calcinação e alocação de cinzas volantes e aparas de madeira.

No mesmo sentido, Marinkovic et al. (2017) optaram por fazer uma análise de sensibilidade pautada na influência de possíveis diferenças na resistência à carbonatação e comportamento deformacional à longo prazo dos concretos. Em um estudo mais completo, Visintin et al. (2020) consideraram análises de sensibilidade em diversos cenários, em que o concreto é demolido e aterrado em grandes blocos, demolido e depositado em aterro após a britagem e demolido e utilizado em concreto de agregado reciclado. Estas análises foram realizadas para avaliação do impacto da composição da matriz de energia elétrica, para avaliação do combustível do forno nas emissões de CO₂ equivalente e energia incorporada, para distâncias de transporte, para análise do impacto da alocação das emissões associadas à reciclagem de agregados, além disso, para análise de absorção de CO₂ da atmosfera.

Outros autores também realizaram análises de sensibilidade, porém, em sua maior parte, a consideraram apenas para as distâncias de transportes, isso inclui os estudos de Guo et al. (2020), Kurda et al. (2018), Sabau et al. (2021), Moro et al. (2020), Anastasiou et al. (2015), Borghi et al. (2018), e Li et al. (2019).

Conforme Guo et al. (2020), a carga ambiental associada ao transporte do material ocorre em todas as fases do ciclo, portanto a inclusão de impactos de transporte no estudo é de grande importância. Os autores verificaram que o GWP gerado a partir do transporte de agregados reciclados foi 60% menor que o natural, pois a distância de transporte dos agregados reciclados estava a 20 km, enquanto os agregados naturais estavam a uma distância de aproximadamente 1000 km. Já o GWP total da produção de blocos normais de concreto são 5,53% maiores do que os blocos reciclados.

Para Borghi et al. (2018), as análises de sensibilidade confirmaram o papel fundamental do transporte, portanto, reduzir o transporte de resíduos pode melhorar o desempenho do sistema de gestão da reciclagem de RCD. Conforme Li et al. (2019), as atividades de transporte têm a segunda maior demanda de energia depois da produção de cimento. Portanto, podem implicar em um aumento de mais de 50% no GWP e energia.

O estudo mostra a importância de seleção dos modais de transporte mais verdes e locais de origem mais próximos. Dessa forma, assim como Anastasiou et al. (2015) recomendam o uso de agregado de escória de aço apenas

para distâncias mais curtas, Arrigoni et al. (2018) e Caldas et al. (2021) mostram que os benefícios ambientais provenientes da utilização de materiais reciclados podem ser prejudicados pelas condições de logística, como por exemplo, distâncias mais longas e transportes pouco eficientes. Nesse caso, pode até ser mais sustentável para algumas categorias de impacto, como o GWP, a utilização de agregados naturais.

Foi verificado a predominância do emprego da cinza volante como MCS. No entanto, é importante ressaltar que a substituição em altos teores de cimento e concreto por esse coproduto pode se tornar inviável em um futuro próximo. Isto pode ocorrer já que esse coproduto é originado de usinas à carvão, que é justamente uma das fontes energéticas mais criticadas do ponto de vista das emissões de GEE. Rehana (2015) relata que nos Estados Unidos, por exemplo, algumas regiões possuem excesso de oferta de cinza volante, porém, outras já têm passado por escassez, devido principalmente às mudanças de queima da usina de carvão para combustível de gás natural. Dessa forma, é de se esperar uma redução no uso dessa fonte, e, conseqüentemente na disponibilidade de cinza volante.

Uma categoria que pode ser vantajosa em termos de reaproveitamento de AR seria alguma ligada à exaustão de recursos minerais, como a brita e a areia, já que estes materiais seriam evitados de serem extraídos da natureza. No entanto, é preciso ter métodos de AICV que possuam modelos e fatores de caracterização capazes de fazer esta avaliação. Nenhum dos estudos encontrados apresentaram esse tipo de avaliação.

3.2.5. Principais lacunas científicas e recomendações

Embora existam vários estudos sobre AVC com AR e MCS, é possível identificar questões e abordagens não resolvidas. As principais lacunas de conhecimento sobre o tema foram obtidas a partir da análise dos artigos selecionados, considerando: a) questões não abordadas na literatura; b) a necessidade de aprofundar temas apresentados superficialmente; c) pontos controversos e/ou contraditórios nos estudos, e d) tendências recentes na AVC e materiais de construção. Neste sentido, são propostas algumas sugestões e recomendações que poderão servir para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

- Recomenda-se um estudo de ACV mais extenso, dessa forma, aumentando o escopo do estudo, incluindo as etapas de uso e fim de vida.
- Melhorar a definição da unidade funcional, incluindo

aspectos relacionados ao desempenho e durabilidade dos elementos que usarão os materiais contendo MCS e AR.

- Considerar a absorção de CO₂ no ciclo de vida do concreto e produtos de construção produzidos com AR para não superestimar a emissão de CO₂.
- Realizar o processo de alocação principalmente como análise de sensibilidade.
- Necessidade de incluir outros itens na análise de sensibilidade além das distâncias de transporte, como por exemplo eficiência do transporte, avaliação do combustível na produção de CO₂, impactos provenientes da alocação, influência dos aspectos de durabilidade dos materiais.
- Categorias de impacto sensíveis à redução da extração dos minerais utilizados nos materiais cimentícios (brita e areia principalmente).

4. CONCLUSÃO

Neste estudo, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) da aplicação da metodologia ACV para determinar os impactos ambientais da utilização de Materiais Cimentícios Suplementares (MCS) e Agregados Reciclados (AR) em concretos, especialmente, e outros materiais de construção.

Quanto à fronteira do sistema, o limite "Berço ao portão" é o mais utilizado que é justificado devido às incertezas dos produtos analisados até seu fim de vida. A alocação não é muito utilizada nos estudos e poucos fazem alocações em massa e econômicas.

Embora não haja consenso sobre a unidade funcional, a mais utilizada é a unidade volumétrica, porém, recomenda-se utilizar outras, que forneçam critérios de desempenho e durabilidade, para padronizar e assim ter resultados mais confiáveis e poder comparar estudos. Apesar da maioria dos estudos utilizar dados primários para o inventário do ciclo de vida, também é observado um predomínio por parte das bases de dados, entre elas Ecoinvent e ELCD.

O uso de MCS e AR geram menos impactos ambientais em comparação ao concreto tradicional ou materiais de construção convencionais, em destaque, na maioria dos estudos, Potencial de Aquecimento Global seguido por Potencial de Depleção Abiótica e Potencial de Acidificação. Substituições de cimento por MCS, como cinzas volantes, vista como maior incidência nesse estudo, mostra boa incidência na redução de emissões de gases de efeito estufa, que vem sendo uma grande

preocupação no setor da construção civil. Além disso, substituições de agregados naturais por AR se evitam os impactos gerados pelo descarte de mais resíduos, principalmente, quando se utiliza os resíduos provenientes da construção, além de reduções nos encargos ambientais da produção do concreto e podem trazer maiores benefícios ambientais, mas que vai depender muito das distâncias de transporte utilizadas. Portanto, é difícil mensurar e/ou comparar diferentes estudos de ACV com a inclusão de AR. Já os MCS contribuem positivamente no desempenho ambiental de concretos e argamassas, muitas vezes, independente da distância de transporte.

É necessário maior número de pesquisas dos impactos ambientais do uso de AR para consolidar seu uso, uma vez que não há consenso de resultados por serem influenciados pela região, tecnologia e considerações específicas dos autores. Também foi observado que ainda há uma demanda de estudos para avaliação de ciclo de vida com ambas substituições (MCS e AR).

Sugere-se para trabalhos futuros a inclusão da previsão de vida útil como unidade funcional na ACV de materiais de construção com MCS e AR, a avaliação de categorias de impacto que mensurem a disponibilidade da brita e areia, entre outros. Também é dado como sugestão considerar a possível indisponibilidade de alguns MCS no futuro, com destaque para as cinzas volantes, material encontrado em 50% dos estudos analisados.

REFERÊNCIAS

ANASTASIOU, E. K.; LIAPIS, A.; PAPAYIANNI, I. Comparative life cycle assessment of concrete road pavements using industrial by-products as alternative materials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 101, p. 1–8, 2015.

ARRIGONI, A. et al. Rammed Earth incorporating Recycled Concrete Aggregate: a sustainable, resistant and breathable construction solution. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 137, n. May, p. 11–20, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. ABRELPE, São Paulo, 2020.

BORGHI, G.; PANTINI, S.; RIGAMONTI, L. Life cycle assessment of non-hazardous Construction and Demolition Waste (CDW) management in Lombardy Region (Italy). **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 815–825, 2018.

BÖSCH, M.; HELLWEG, S. Identifying improvement potentials in cement production with life cycle assessment. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 23, p. 9143–9149, 2010. Doi: 10.1021/es100771k

BRAGA, A. M.; SILVESTRE, J. D.; DE BRITO, J. Compared environmental and economic impact from cradle to gate of concrete with natural and recycled coarse aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 529–543, 2017.

CALDAS, L. R. et al. Environmental impact assessment of wood bio-concretes: Evaluation of the influence of different supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 268, 2021.

CHEN, C. et al. LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: an application to mineral additions in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1231–1240, 2010. Doi: 10.1016/j.resconrec.2010.04.001

COLANGELO, F.; FORCINA, A.; FARINA, I.; PETRILLO, A. Life cycle assessment (LCA) of different kinds of concrete containing waste for sustainable construction. **Buildings**, v. 8, n. 5, 2018. Doi: 10.3390/buildings8050070

COLLINS, F. Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, p. 549–556, 2010. Doi: 10.1007/s11367-010-0191-4

DABOUS, S. A.; FERROZ, S. Condition monitoring of bridges with non-contact testing technologies. **Automation in Construction**, v. 116, 103224, 2020. Doi: 10.1016/j.autcon.2020.103224

De LARRIVA, R. et al. decisionmaking LCA for energy refurbishment of buildings: conditions of comfort. **Energy Buildings**, v. 70, p. 333–342, 2014. Doi: 10.1016/j.enbuild.2013.11.049

De SOUZA, A. et al. Application of the desirability function

for the development of new composite eco-efficiency indicators for concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 40, 102374, 2021. Doi: 10.1016/j.jobe.2021.102374

DOSSCHE, C.; BOEL, V.; CORTE, W.D. Comparative material-based life cycle analysis of structural beam-floor systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 194, p. 327-341, 2018. Doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.062

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 15804, **Sustainability of Construction Works - Environmental Product Declarations - Core Rules for the Product Category of Construction Products**, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2012.

EUROPEAN UNION DIRECTIVE. EU Directive 2008/98/EC of the European parliament and of the council on waste and repealing certain directives. Official **Journal of the European Union**, L312:3–30, 2008.

FOŘT, J.; ČERNÝ, R. Transition to circular economy in the construction industry: Environmental aspects of waste brick recycling scenarios. **Waste Management**, v. 118, p. 510–520, 2020.

GALAN, I.; ANDRADE, C.; MORA, P.; SANJUAN, M. A. Sequestration of CO₂ by Concrete Carbonation. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 8; p. 3181-3186, 2010. Doi: 10.1021/es903581d

GUO, Z. et al. Life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates—A case study in China. In *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling*. **Woodhead Publishing**, 2020, p.515-535. Doi: 10.1016/B978-0-12-819055-5.00025-5

HISCHIER, R.; REICHART, I. Multifunctional electronic media-traditional media. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 8, n. 4, p. 201-208, 2003. Doi: 10.1007/BF02978472

HOSSAIN, U.; XUAN, D.; POON, C. S. Sustainable management and utilization of concrete slurry waste: A case study in Hong Kong. **Waste Management**, v. 61, p. 397–404, 2017

HOSSAIN, M.; POON, C.; DONG, Y.; XUAN, D. Evaluation of environmental impact distribution methods for supplementary cementitious materials. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 597–608, 2018. doi:

10.1016/j.rser.2017.09.048

HOSSAIN, M. et al. Evaluating the environmental impacts of stabilization and solidification technologies for managing hazardous wastes through life cycle assessment: A case study of Hong Kong. **Environment International**, v. 145, 106139, 2020. Doi: 10.1016/j.envint.2020.106139

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14040, *Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework*, **International Organization for Standardization**, Geneva, Switzerland, 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14044, *Environmental Management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006b.

ISLAM, H.; JOLLANDS, M.; SETUNGE, S. Life cycle assessment and life cycle cost implication of residential buildings—a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 129–140, 2015. Doi: 10.1016/j.rser.2014.10.006

KIM, S.; DALE, B. Ethanol fuels: E10 or E85 – Life cycle perspectives. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 11, n. 2, p. 117-121, 2006. Doi: 10.1065/lca2005.02.201

KIM, T.; CHAE, C. Environmental impact analysis of acidification and eutrophication due to emissions from the production of concrete. **Sustainability**, v. 8, n. 6, 578:1–20, 2016. Doi: 10.3390/su8060578

KUA, H.; KAMATH, S. An attributional and consequential life cycle assessment of substituting concrete with bricks. **Journal of Cleaner Production**, v. 81, p. 190–200, 2014. Doi: 10.1016/j.jclepro.2014.06.006

KURDA, R. et al. Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 485–502, 2017.

KURDA, R.; SILVESTRE, J. D.; DE BRITO, J. Life cycle assessment of concrete made with high volume of recycled concrete aggregates and fly ash. **Resources, Conservation**

- and Recycling**, v. 139, 407-417, 2018. Doi: 10.1016/j.resconrec.2018.07.004
- KURDA, R.; DE BRITO, J.; SILVESTRE, J. A comparative study of the mechanical and life cycle assessment of high-content fly ash and recycled aggregates concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 29, 101173, 2020. Doi: 10.1016/j.job.2020.101173
- LEE, J.; LEE, T.; JEONG, J.; JEONG, J. Sustainability and performance assessment of binary blended low-carbon concrete using supplementary cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, 124373, 2021. Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124373
- LI, J.; ZHANG, W.; LI, C.; MONTEIRO, P. J. Green concrete containing diatomaceous earth and limestone: Workability, mechanical properties, and life-cycle assessment. **Journal of cleaner production**, v. 223, p. 662-679, 2019. Doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.077
- LIMA, P. R. L.; ROQUE, A. B.; FONTES, C. M. A.; LIMA, J. M. F.; BARROS, J. A. Potentialities of cement-based recycled materials reinforced with sisal fibers as a filler component of precast concrete slabs. In **Sustainable and Nonconventional Construction Materials Using Inorganic Bonded Fiber Composites**, Woodhead Publishing, 399-428, 2017. Doi: 10.1016/B978-0-08-102001-2.00017-6
- LO, F.; LEE, M.; LO, S. Effect of coal ash and rice husk ash partial replacement in ordinary Portland cement on pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 286, 122947, 2021. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122947
- MARINKOVIC et al. Environmental assessment of green concretes for structural use. **Journal of Cleaner Production**, v. 154, p. 633-649, 2017.
- MEEK, A.; ELCHALAKANI, M.; BECKETT, C.; GRANT, T. Alternative stabilised rammed earth materials incorporating recycled waste and industrial by-products: Life cycle assessment. **Construction and Building Materials**, v. 267, 120997, 2021. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120997
- MORENO-JUEZ, J.; VEGAS, I.; GEBREMARIAM, A.; GARCÍA-CORTÉS, V.; DI MAIO, F. Treatment of end-of-life concrete in an innovative heating-air classification system for circular cement-based products. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, 121515, 2020. Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121515
- MORO, C.; FRANCIOSO, V.; SCHRAGER, M.; VELAY-LIZANCOS, M. TiO₂ nanoparticles influence on the environmental performance of natural and recycled mortars: A life cycle assessment. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 84, 106430, 2020. Doi: 10.1016/j.eiar.2020.106430
- RASHID, A.; YUSOFF, S. A review of life cycle assessment method for building industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 244-248, 2015. Doi: 10.1016/j.rser.2015.01.043
- ROBAYO-SALAZAR, R. A.; MEJÍA-ARCILA, J. M.; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R. Eco-efficient alkali-activated cement based on red clay brick wastes suitable for the manufacturing of building materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 242-252, 2017.
- ROH, S.; KIM, R.; PARK, W.; BAN, H. Environmental Evaluation of Concrete Containing Recycled and By-Product Aggregates Based on Life Cycle Assessment. **Applied Sciences**, v. 10, n. 217503, 2020. Doi: 10.3390/app10217503
- ROSADO, L. P.; VITALE, P.; PENTEADO, C. S. G.; ARENA, U. Life cycle assessment of natural and mixed recycled aggregate production in Brazil. **Journal of cleaner production**, v. 151, 634-642, 2017. Doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.068
- SABAU, M.; BOMPA, D. V.; SILVA, L. F. O. Comparative carbon emission assessments of recycled and natural aggregate concrete: Environmental influence of cement content. **Geoscience Frontiers**, v. 12, n. 6, p. 101235, 2021.
- SUÁREZ, S.; ROCA, X.; GASSO, S. Product-specific life cycle assessment of recycled gypsum as a replacement for natural gypsum in ordinary Portland cement: Application to the Spanish context. **Journal of Cleaner Production**, v. 117, p. 150-159, 2016.
- TEIXEIRA, E. R. et al. Comparative environmental life-cycle analysis of concretes using biomass and coal fly ashes as partial cement replacement material. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2221-2230, 2016.
- TURK, J.; COTIC, Z.; MLADENOVIC, A.; SAJNA, A. Environmental evaluation of green concretes

versus conventional concrete by means of LCA. **Waste Management**, v. 45, p. 194–205, 2015. Doi: 10.1016/j.wasman.2015.06.035

VAN DEN HEEDE, P.; DE BELIE, N. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: literature review and theoretical calculations. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 4, p. 431–42, 2012. Doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004

VIEIRA, D.R.; CALMON, J.L.; COELHO, F.Z. Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: a review. **Construction and Building Materials**, v. 124, p. 656–666, 2016. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125

VISINTIN, P.; XIE, T.; BENNETT, B. A large-scale life-cycle assessment of recycled aggregate concrete: The influence of functional unit, emissions allocation and carbon dioxide uptake. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, p. 119243, 2020. Doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119243

ZHANG, Y. et al. A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 209, p. 115-125, 2019a. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.078

ZHANG, Y. et al. Effect of compressive strength and chloride diffusion on life cycle CO₂ assessment of concrete containing supplementary cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 450-458, 2019b. Doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.335

ZHOU, A. et al. A novel approach for recycling engineering sediment waste as sustainable supplementary cementitious materials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 167, p. 105435, 2021. Doi: 10.1016/j.resconrec.2021

COMO CITAR ESTE ARTIGO

FARIAS, Lidiane do Nascimento; ROCHA, Joaquin Humberto Aquino; CALDAS, Lucas Rosse; FILHO, Romildo Dias Toledo. ACV de materiais cimentícios suplementares e agregados reciclados: Uma revisão sistemática. **MIX Sustentável**, v. 9, n. 3, p. 67-81, 2023. ISSN 244-73073. Disponível em: <<http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>>. Acesso em: dia/mês/ano doi: <<https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2023.v9.n3.67-81>>.

SUBMETIDO EM: 13/12/2022

ACEITO EM: 25/03/2023

PUBLICADO EM: 30/07/2023

EDITORES RESPONSÁVEIS: Aguinaldo dos Santos e Lisiane Ilha Librelotto

Registro da contribuição de autoria:

LNF: Conceituação, Curadoria de dados, Análise formal, Investigação, Metodologia, Visualização, Escrita - rascunho original, Escrita - revisão e edição.

JHAR: Conceituação, Curadoria de dados, Análise formal, Investigação, Metodologia, Visualização, Escrita - rascunho original, Escrita - revisão e edição.

LRC: Conceituação, Análise formal, Metodologia, Supervisão, Visualização, Administração de projetos, Escrita - revisão e edição.

RDTF: Supervisão, Aquisição de financiamento, Administração de projetos, Escrita - revisão e edição.

Declaração de conflito: nada foi declarado.