

PROJETAR PARA DESMONTAR: REVISÃO SOBRE A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

*DESIGN FOR DISASSEMBLY: A REVIEW OF CONCRETE
STRUCTURES LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)*

*DISEÑAR PARA EL DESMANTELAMIENTO: UNA REVISIÓN DE LA EVALUACIÓN
DEL CICLO DE VIDA (LCA) DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN*

LUCAS CAON MENEGATTI, M.SC | Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil (UFRJ)

LUCAS ROSSE CALDAS, D.SC | Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil (UFRJ)

ROMILDO DIAS TOLEDO FILHO, D.SC | Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil (UFRJ)

RESUMO

O setor da construção tem se tornado um dos grandes motivos de preocupação ambiental, principalmente quando se trata da emissão de dióxido de carbono e geração de resíduos. Uma forma de mitigar tais impactos consiste na substituição de um sistema linear por um modelo de Economia Circular (EC). Neste modelo, a reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) corresponde a uma prática bastante estudada há mais de 20 anos, enquanto pesquisas sobre o reuso de elementos construtivos a partir da metodologia de projetar para desmontar (DfD, *Design for Disassembly/Deconstruction*) tem ganhado destaque apenas nos últimos cinco anos. Dentre tais pesquisas, a avaliação da sustentabilidade por meio de indicadores ambientais é ainda mais escassa. Desta forma, o presente artigo faz uma revisão sistemática da literatura, reunindo os principais aspectos considerados na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de estruturas DfD de concreto, como vida útil, fronteira do sistema, categorias de impacto e as abordagens utilizadas para contabilizar os ganhos ambientais ao adotar um sistema DfD. Com base nos artigos analisados, foi observado que, apesar da ausência de método unificado para quantificar seus benefícios, a prática de DfD se mostrou vantajosa para atenuar os impactos ambientais do setor da construção.

PALAVRAS-CHAVE

Projetar para desmontar; projetar para desconstrução; avaliação de ciclo de vida; impactos ambientais; estrutura de concreto.



ABSTRACT

The construction sector has become one of the major reasons for environmental concern, especially when it comes to the emission of carbon dioxide and waste generation. One way to mitigate such impacts is to replace a linear system with a Circular Economy (CE) model. In this model, the recycling of Construction and Demolition Waste (CDW) is a practice that has been extensively studied for over 20 years, while research on the reuse of constructive elements from the Design for Disassembly/ Deconstruction (DfD) perspective has gained prominence only in the last five years. Among such researches, the assessment of sustainability through environmental indicators is even more scarce. In this way, this article makes a systematic review of the literature, bringing together the main aspects considered in the Life Cycle Assessment (LCA) of concrete DfD structures, such as lifespan, system boundary, impact categories and the approaches used to account for environmental gains when adopting a DfD system. Based on the articles analyzed, it was observed that, despite the absence of a unified method to quantify its benefits, the practice of DfD proved to be advantageous to mitigate the environmental impacts of the construction sector.

KEYWORDS

Design for disassembly; design for deconstruction; life cycle assessment; environmental impacts; concrete structure.

RESUMEN

El sector de la construcción se ha convertido en uno de los principales motivos de preocupación medioambiental, especialmente en lo que se refiere a la emisión de dióxido de carbono y la generación de residuos. Una forma de mitigar tales impactos es reemplazar un sistema lineal con un modelo de Economía Circular (CE). En este modelo, el reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) es una práctica ampliamente estudiada desde hace más de 20 años, mientras que la investigación sobre la reutilización de elementos constructivos desde la perspectiva del Diseño para el Desmontaje/Deconstrucción (DfD) ha ganado protagonismo solo en los últimos cinco años. Entre tales investigaciones, la evaluación de la sustentabilidad a través de indicadores ambientales es aún más escasa. De esta forma, este artículo realiza una revisión sistemática de la literatura, reuniendo los principales aspectos considerados en el Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de las estructuras DfD de hormigón, tales como la vida útil, la frontera del sistema, las categorías de impacto y los enfoques utilizados para dar cuenta de los impactos ambientales. ganancias al adoptar un sistema DfD. Con base en los artículos analizados, se observó que, a pesar de la ausencia de un método unificado para cuantificar sus beneficios, la práctica de DfD demostró ser ventajosa para mitigar los impactos ambientales del sector de la construcción.

KEYWORDS

Diseño para desmontaje; diseño para la deconstrucción; evaluación del ciclo de vida; impactos ambientales; estructura de hormigón.

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção tem se tornado grande motivo de preocupação ambiental, principalmente quando se trata da emissão de dióxido de carbono (CO₂) e geração de resíduos. De acordo com relatório da Agencia Internacional de Energia (IEA, 2018), a indústria do cimento, principal insumo para produção de concreto, representa sozinha cerca de 7% das emissões de CO₂ produzidas globalmente, além de ser a terceira maior consumidora de energia industrial. Somado a isso, há ainda grande preocupação com a crescente extração de matéria-prima e com a ampla quantidade de resíduos gerados nos processos de construção e demolição. Desta forma, torna-se urgente e necessário adotar estratégias e políticas que visam reduzir a pegada de carbono, preservar recursos naturais, e reutilizar e reciclar resíduos, que muitas vezes são descartados de forma irregular.

A substituição de um sistema linear por um modelo de economia circular, consiste em uma forma de mitigar esses impactos. De acordo com Crowther (1999), o modelo de ciclo de vida linear de materiais e componentes de construção, que pode ser descrito como “do berço ao túmulo”, faz com que os elementos de concretos terminem como resíduos desnecessários. O modelo cíclico alternativo “do berço ao berço”, quando aplicado a elementos de concreto, não apenas economiza energia necessária para a fabricação e obtenção dos materiais, mas também evita as emissões de CO₂ e a geração acentuada de resíduos sólidos resultantes dos processos de demolição.

A reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) consiste em uma prática amplamente pesquisada, cuja viabilidade de aplicação em elementos estruturais já foi verificada por Amario *et al.* (2017). Entretanto, estudos de ACV realizados por Bennett *et al.* (2022) apontam que a substituição de agregado natural por agregado reciclado pouco impacta na redução de emissões de CO₂, uma vez que os maiores ganhos em termos ambientais estão relacionados ao menor consumo de cimento.

O’Grady *et al.* (2021) apontam que, juntamente com o uso de menos materiais, como consequência da reciclagem de resíduos, a abordagem da economia circular apoia a reutilização direta de elementos de construção como solução para mitigar impactos ambientais.

A prática de projetar para desmontar tem ganhado cada vez mais atenção nos últimos tempos. Segundo Kanter (2018), um adequado planejamento para reduzir a produção de resíduos ao final da vida útil de uma construção não apenas reduz o impacto ambiental, mas também

proporciona benefícios sociais e econômicos.

Ao propor a reutilização elementos e materiais em novas construções, deve-se garantir que estes sejam removidos em boas condições, de forma a garantir qualidade e segurança para a próxima utilização. De acordo com Salama (2017), no modelo tradicional de construção isso acaba não sendo possível, uma vez que, de modo geral, os edifícios são projetados e construídos para proporcionar funcionalidade e estética ao longo de sua vida útil, sem considerar sua fase de fim de vida.

Nesse contexto, a expressão “projetar para desmontagem/desconstrução”, do inglês “*Design for Disassembly/Deconstruction*” (DfD), consiste em uma metodologia que considera, ainda na etapa de planejamento inicial e de projeto, o destino de uma construção e seus elementos após o fim de sua vida de serviço (TLEUKEN *et al.*, 2022).

Xiao *et al.* (2017) apontam que a aplicação do DfD tende a ser mais desafiadora em estruturas de concreto do que para demais estruturas devido à utilização de ligações monolíticas entre os componentes estruturais. Em sua revisão da literatura, Salama (2017) apresenta o uso de elementos pré-fabricados como uma alternativa promissora para uso em construções projetadas para desmontar, uma vez que já apresentam dimensões e pesos adequados para manuseio e transporte, além de controle de qualidade no processo de fabricação. Por outro lado, a utilização de elementos pré-moldados, na maioria dos casos, é acompanhada de ligações moldadas *in loco*, produzindo conexões permanentes entre os elementos, o que resulta em dificuldades na etapa de desmontagem. Diversos estudos tem sido realizados com foco na conexão entre componentes de concreto, visando viabilizar e facilitar o processo de desmontagem. Xiao *et al.* (2017), por exemplo, avaliaram que as ligações fabricadas com concreto apenas com agregado natural ou concreto com agregado reciclado demonstraram um processo de fácil remoção mecânica. Entretanto, este tipo de conexão utiliza concreto fresco moldado no momento de junção das peças, o que torna a desmontagem um processo menos prático.

De acordo com Figueira *et al.* (2021), a maior parte das conexões realizadas em estruturas de concreto projetadas para desmontagem no fim de vida é realizada em sistemas de chapas e parafusos de aço. Entretanto, os autores apontam que esse tipo de sistema pode criar concentrações de tensão no elemento na região próxima aos parafusos.

Diversos pesquisadores (CAI, WALDMANN, 2019; DING *et al.*, 2020; ONG *et al.*, 2013) estudaram o desempenho de conexões metálicas para elementos de concreto.

Entretanto, ainda há uma grande lacuna na literatura em relação às conexões para elementos estruturais de concreto, o que acaba sendo um fator limitante para utilização desses componentes como parte de um sistema DfD.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma importante ferramenta que permite avaliar os potenciais impactos ambientais de um produto ao longo de seu ciclo de vida, podendo considerar desde a obtenção de matéria-prima até a disposição final após o fim de sua vida útil (BS, 2006a).

As normas internacionais ISO 14040:2006 (BS, 2006a) e ISO 14044:2006 (BS, 2006b) apresentam os princípios e diretrizes para elaboração de estudos de ACV de forma geral. Para análises direcionadas para o setor de construção civil é recomendável seguir as normas europeias EN 15978 (CEN, 2011) e EN 15804+A2 (CEN, 2019).

Joensuu *et al.* (2022) apontam que, apesar da existência de referências normativas consolidadas, diversos estudos reportam questões de falta de consistência e comparabilidade nos estudos de ACV de edifícios projetados para desconstrução, principalmente em relação à escolha da unidade funcional, à determinação da fronteira do sistema, e à definição da metodologia para análise do fim de vida. Segundo tais autores, no âmbito da economia circular, a ACV de edifícios apresenta deficiências, principalmente na modelagem dos benefícios ao se utilizar componentes DfD. Vandervaeren *et al.* (2022) também consideram que as normas falham por não capturarem as vantagens do DfD.

Embora alguns edifícios incluam alguns princípios do

DfD, eles podem não ser efetivamente desmontáveis ou podem não apresentar vantagens ambientais reais frente a sistemas construtivos convencionais (VANDERVAEREN *et al.*, 2022). Avaliar o desempenho de estruturas, componentes e edifícios DfD sob a ótica da ACV é fundamental para fazer uma análise justa dos impactos que essa metodologia pode evitar. Com base no exposto, este artigo tem por finalidade apresentar uma revisão sistemática da literatura para analisar a capacidade do DfD em mitigar impactos ambientais no setor da construção, com foco em estruturas de concreto armado. O estudo contribui cientificamente por reunir as principais metodologias empregadas para contabilizar os impactos ambientais evitados ao se usar DfD, bem como os parâmetros relevantes que podem influenciar na modelagem de ACV.

2. METODOLOGIA

O estudo foi segmentado em três etapas (planejamento, condução e documentação), conforme esquematizado na figura 01, com base na metodologia apresentada por Ribeiro Brandão & Campos (2019).

2.1 Planejamento

O primeiro passo foi definir as perguntas a serem respondidas pelo estudo: “quais são os impactos ambientais (gerados e evitados) associados ao processo de desconstrução de uma estrutura de concreto planejada para esse fim” e “como esses impactos são aferidos?”.

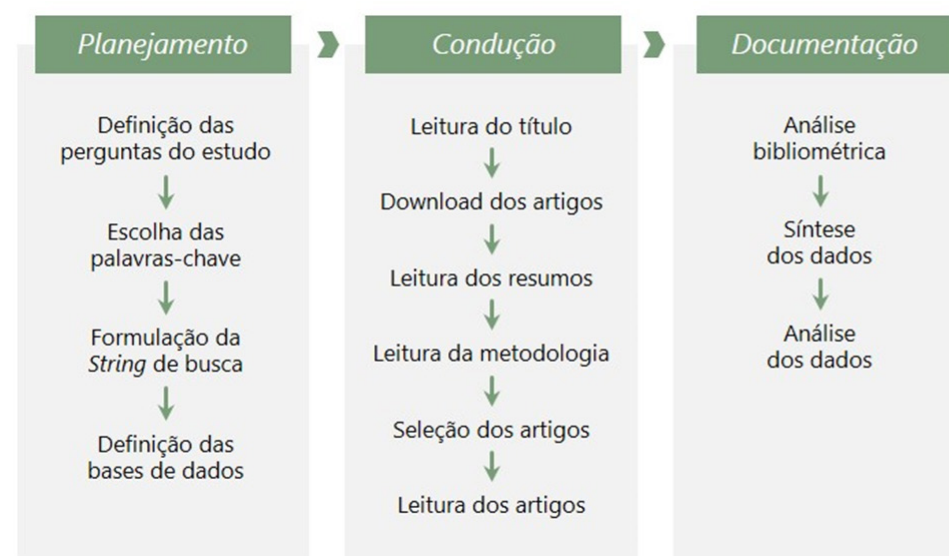


Figura 01: Esquema da metodologia utilizada
Fonte: Adaptado de Ribeiro Brandão & Campos (2019).

Em seguida, foram estabelecidas as seguintes palavras-chave: “Design for Disassembly” e “Design for Deconstruction”, relacionadas à prática de projetar para desconstruir. Para apresentar apenas os artigos relacionados ao setor de construção com concreto, foi utilizado também os termos “building”, “concrete” e “precast”. A partir dessas palavras-chave, foi definida a string de pesquisa (“Design for Disassembly” OR “Design for Deconstruction”) AND (Building OR concrete OR precast), aplicada em ambas bases de dados utilizadas neste estudo: Scopus e Web of Science. A busca foi realizada considerando títulos, resumos e palavras-chave das publicações.

A princípio a pesquisa não restringiu termos relacionados à ACV, com o objetivo de primeiro identificar a

dimensão explorada na literatura a respeito da técnica de projetar pensando na etapa de fim de vida, ou seja, considerando a desconstrução da estrutura proposta pelo DfD.

2.2 Condução

A pesquisa foi limitada apenas a publicações em inglês considerando o horizonte temporal de 20 anos, período compreendido entre 2002 e 2022 (até a data da pesquisa: maio de 2022). O resultado de busca apresentou 168 resultados na base Scopus e 150, na base Web of Science. As informações dos documentos foram organizadas em uma planilha, a partir da qual foi aplicada a metodologia apresentada na figura 02.

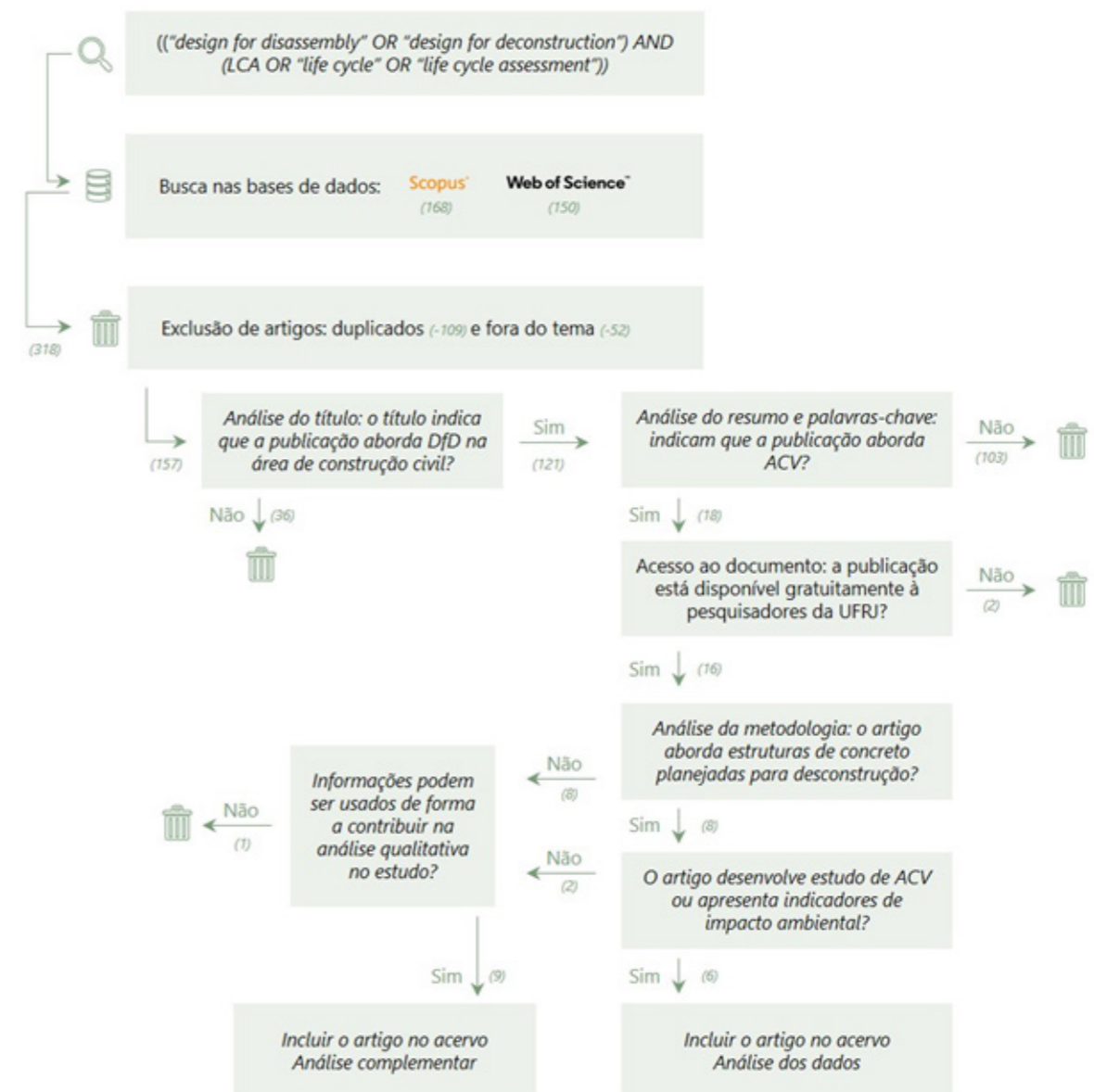


Figura 02: Fluxograma dos critérios utilizados para seleção dos artigos
Fonte: Autores, 2022.

A seleção dos artigos foi conduzida de forma a manter apenas os artigos relevantes para a pesquisa. Portanto, foi realizada uma análise sistemática e manual para desconsiderar documentos duplicados (109) e que não atendessem ao tema de estudo (52).

Nessa primeira etapa, com base na análise apenas do título, foram excluídos os estudos em que DfD não era aplicado diretamente a elementos de construção ou a edificações (36). Os 121 arquivos selecionados formam o grupo de documentos denominado “acervo geral”. Em seguida, os resumos foram avaliados de forma a identificar quais apresentavam abordagem referente à ACV. Nessa etapa, 103 documentos foram desconsiderados.

Do montante remanescente (18 documentos), dois não estavam com acesso liberado para pesquisadores da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Desta forma, o “acervo específico” da pesquisa foi composto por 16 documentos. Por fim, foi analisada a seção de metodologia para identificar se o artigo realiza o estudo de avaliação do ciclo de vida para construções em concreto ou se apenas trata do tema de forma qualitativa. As principais informações dos artigos selecionados foram organizadas e catalogadas em uma planilha.

2.2 Documentação

Com base no conjunto de documentos selecionado, foi realizada a análise bibliométrica dos dados e um estudo para identificar os parâmetros de DfD que são relevantes para avaliação dos impactos ambientais desse tipo de abordagem construtiva. Foram coletadas informações de unidade funcional, fronteiras do sistema, impactos ambientais considerados, definição da vida útil dos componentes e/ou da estrutura, e formas de contabilizar os benefícios da metodologia DfD na ACV. Desta forma, o objetivo deste estudo consiste em compilar as informações disponíveis na literatura a respeito do tema e discutir aspectos que podem ser levados em consideração na modelagem de ACV, seja de um elemento construtivo ou de um edifício como um todo.

3. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Na primeira etapa da análise bibliométrica, o foco foi direcionado para uma abordagem geralista do tema, visando identificar o contexto em que os estudos de DfD se desenvolveram. A figura 03 apresenta a distribuição temporal dos documentos que abordam DfD aplicado no setor da construção.

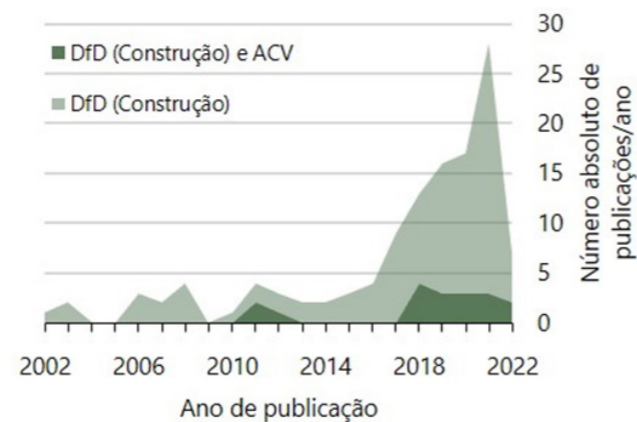


Figura 03: Distribuição temporal dos documentos publicados nos últimos 20 anos
Fonte: Autores, 2022..

A região do gráfico em verde claro corresponde às publicações sobre DfD aplicado à construção. Em verde escuro, tem-se o número de estudos que abordam ACV relacionada ao DfD, seja de forma quantitativa ou por meio de estudos qualitativos. É possível observar que esse segmento ainda é pouco explorado na literatura (representando 13,2% dos estudos avaliados), tendo em vista que os estudos de ACV começaram a ser publicados, ainda em pequeno número (15), nos últimos 5 anos. Uma menor quantidade de artigos (3) foi observada entre 2011 e 2012, mesmo período em que foram publicadas as normas europeias com diretrizes para elaboração de ACV voltados para o setor da construção (EN 15978 e EN 15804+A2). Toniolo *et al.* (2021) observaram que, apesar de DfD ser um tema estudado desde o início dos anos 2000, a abordagem era direcionada principalmente para componentes eletrônicos e aparelhos eletrodomésticos, ao passo que, nos últimos anos, a atenção se estendeu para o setor da construção.

Com base no acervo geral de documentos foi realizada a análise das palavras-chave mais utilizadas pelos autores, conforme indicado na figura 04, em que a intensidade de recorrência está representada pelo tamanho da fonte das palavras.

Desconsiderando os dois termos principais (“*Design for Deconstruction*” e “*Design for Disassembly*”, que tiveram, respectivamente, 38 e 33 ocorrências), os termos “*Circular Economy*” (do inglês, economia circular), “*Reuse*” (do inglês, reutilização) e “*Sustainability*” (do inglês, sustentabilidade) foram os termos mais utilizados, com 27, 19 e 17 ocorrências, respectivamente. Por outro lado, o termo “*Life Cycle Assessment*” (do inglês, Avaliação do Ciclo de Vida) é constatado apenas 12 vezes entre os documentos analisados. Esses dados levantam um importante

questionamento sobre o rótulo atribuído ao DfD como uma prática sustentável, muitas vezes sem que tenha sido feito um estudo ACV para de fato avaliar se a técnica apresenta vantagens para mitigar impactos ambientais. Com base no acervo geral da pesquisa, 26,4% dos artigos incluem os termos relativos a sustentabilidade e/ou economia circular na lista de palavras-chave, mas sem abordar, ou ao menos citar, ACV. Vandervaeren *et al.* (2022) ressaltam que se deve fazer uma análise cuidadosa dos benefícios do sistema DfD em conjunto com o estudo de ACV, uma vez que, mesmo incluindo alguns princípios do DfD, construções podem não ser efetivamente desmontáveis e nem fáceis de manter.

Adicionalmente, observa-se que o termo “*Building Information Modeling*” (BIM, do inglês, Modelo de

Informação da Construção) aparece entre as palavras-chave da pesquisa com 11 ocorrências. Esta vertente de estudos que relacionam a aplicação de BIM com práticas DfD traduz a necessidade do planejamento adequado na etapa de concepção do projeto, visando otimizar a reutilização de peças e componentes da estrutura após o fim de vida da edificação.

Em uma análise territorial, observa-se no mapa apresentado na figura 05 que as pesquisas estão concentradas principalmente na Europa, América do Norte, Leste Asiático e Oceania. Reino Unido, Estados Unidos da América e China lideram o ranking com maior número de publicações referentes a construções DfD: 18, 17 e 10 artigos, respectivamente.



Figura 04: Palavras-chave mais utilizadas.
Fonte: Autores, 2022..

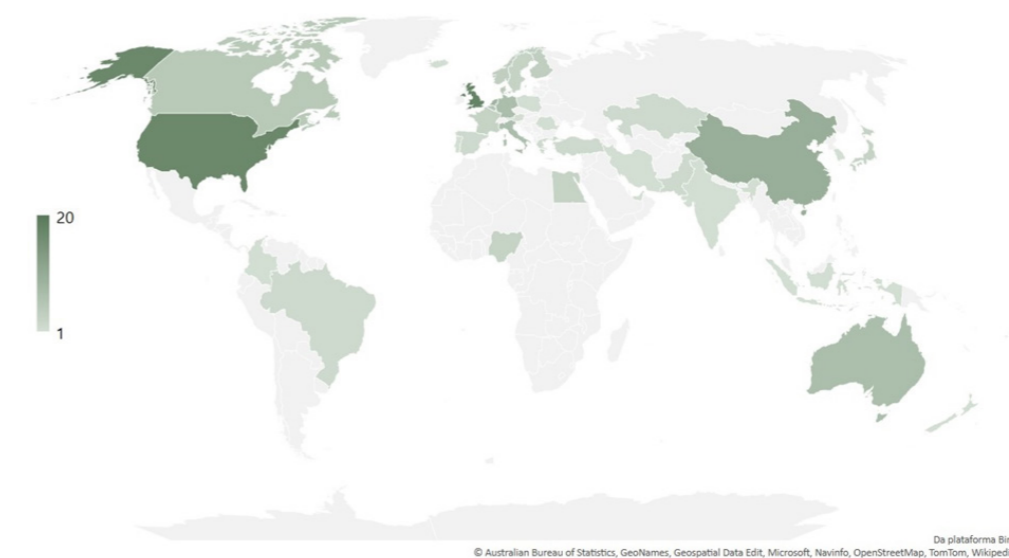


Figura 05: Número de publicações por país.
Fonte: Autores, 2022..

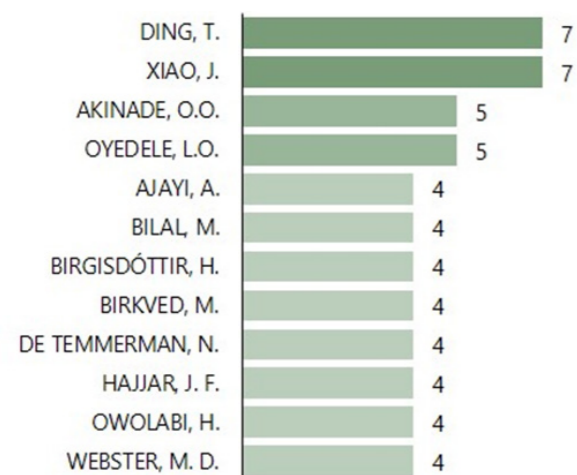


Figura 06: Autores com maior número de publicações
Fonte: Autores, 2022..

Quanto ao ranking de pesquisadores (figura 06), Ding e Xiao apresentaram o maior número de publicações em DfD (7 documentos, cada). Ambos possuem trabalhos em comum com foco na análise estrutural de peças e componentes estruturais para aplicação DfD.

Akinade e Oyedele aparecem em segundo lugar, com 5 publicações cada. Esses autores também possuem publicações em conjunto, e realizaram pesquisas de DfD voltadas para análise de economia circular com contribuições na aplicação integrada com BIM.

4. REVISÃO DA LITERATURA

Neste tópico são apresentados os estudos desenvolvidos com base na metodologia DfD que de certa forma fazem abordagem de ACV, seja de forma qualitativa ou por meio de estudos de caso (análise quantitativa). Dentre os estudos realizados de forma quantitativa, é possível ainda observar duas formas distintas de análise: os que consideram apenas o reuso na escala do elemento construtivo e os que consideram o projeto DfD da construção como um todo. Dentro deste último grupo, há ainda a subdivisão entre estruturas temporárias, como pavilhões de exibição, e construções prediais, como edifícios residenciais ou comerciais. A figura 07 apresenta a natureza das publicações no que diz respeito a forma de abordagem de ACV realizada.

Apesar de não realizarem avaliação de ciclo de vida propriamente dita, as publicações de cunho qualitativo apresentam contribuições relevantes para o estudo de ACV aplicado a prática DfD. Paduart *et al.* (2011) avaliaram as vantagens e desvantagens tanto no âmbito ambiental (por meio de ACV) quanto no âmbito financeiro (Custo do

Ciclo de Vida, CCV) ao se utilizar estratégias de reuso no setor da construção. Os autores apontam a importância da avaliação das taxas de alteração das camadas do edifício, para verificar o potencial de aplicação do DfD. Com propósito de difundir a prática de DfD, Tingley e Davison (2012) desenvolveram uma ferramenta (Sakura) capaz de calcular o carbono incorporado, com base em uma metodologia que considera que os impactos ambientais devem ser compartilhados também com as vidas úteis previstas para reutilização do material ou componente. Machado *et al.* (2018) analisaram diretrizes e características do processo de DfD, e desenvolveram uma metodologia em formato de questionário para auxiliar na avaliação do potencial de DfD de componentes e construções. Tais características foram agrupadas quanto a influência direta para possibilitar a desconstrução; influência na facilidade do processo; e, influência no prolongamento do ciclo de vida da construção. Cai e Waldmann (2019) propuseram a criação de um banco de materiais e componentes com o objetivo de impulsionar a economia circular na indústria da construção, uma vez que os bancos fariam o gerenciamento dos itens extraídos de estruturas demolidas ou desconstruídas para uma nova estrutura.

Na escala de elementos e componentes construtivos DfD, Eckelman *et al.* (2018) compararam diferentes sistemas de piso por meio da ACV, considerando como diferentes cenários a variação do número de reutilização. Eberhardt *et al.* (2020) avaliaram diferentes abordagens de alocação para verificar o desempenho de quatro diferentes elementos (pilar de concreto, pilar de madeira, telhado e janela). Xiao *et al.* (2021) analisaram o efeito do uso de agregados reciclados no comportamento sísmico de conexões viga-pilar DfD sob carregamento cíclico, realizando ACV para verificar o desempenho dos materiais quanto a emissão de carbono. Vandervaeren *et al.* (2022) desenvolveram uma metodologia de ACV que considera a interdependência dos elementos no momento de desconstrução, comparando os resultados obtidos para um pavilhão simples com os resultados calculados com base na metodologia apresentada na EN 15978.

No que diz respeito à aplicação de metodologia DfD em edificações, Eberhardt *et al.* (2019) apresentam um estudo de caso de um escritório dinamarquês, com estrutura de concreto em DfD, em que foram analisadas 11 categorias de impacto ambiental. Rasmussen *et al.* (2019) compararam construção de casas com método de reuso/reciclagem de elementos com o método DfD, em que os elementos e componentes são projetados para serem reutilizados após o fim de sua primeira vida útil. Xia *et al.*

(2020) conduziram um estudo de caso de uma estrutura de concreto construída em Xangai, na China, em que se utilizou concreto de agregado reciclado associado com DfD. Joensuu *et al.* (2022) analisaram os efeitos de escolhas metodológicas de ACV para três edifícios com o mesmo layout espacial, mas diferentes soluções estruturais: construção convencional, estruturas de madeira e edifício híbrido com estruturas DfD.

Dentre os diferentes tipos de construção, obras temporárias, como galerias e pavilhões de exposição, são as que apresentam grande potencial para aplicação de estruturas DfD, tendo em vista seu curto período de vida útil. Para investigar os potenciais benefícios dessas estruturas temporárias projetadas com princípios de DfD, Arrigoni *et al.* (2018) realizaram um estudo de ACV de um pavilhão temporário construído para a EXPO Milão 2015. Toniolo *et al.* (2021) apresentam estudo de caso de uma área de exposição, utilizando princípios DfD aplicados a metodologia de avaliação de pegada de carbono.

Com base nos estudos selecionados, aspectos inerentes a metodologia de ACV e relacionados com a prática DfD foram analisados. A análise inclui a definição da vida útil, fronteira do sistema, categorias de impacto consideradas e a forma como os benefícios de DfD são contabilizados na ACV.

4.1 Vida útil

Quando se trata de estudo de ACV de componentes e estruturas DfD, a vida útil consiste em um parâmetro fundamental para a análise. De acordo com Paduart *et al.* (2011), o número de substituições de elementos de construção pode depender da vida útil global da construção ou da vida útil da camada em que o elemento está montado. Tingley e Davison (2012) apontam que quanto maior a vida útil de um produto, menor o impacto ambiental que o produto tem por ano. Portanto, ao reutilizar componentes que têm uma vida útil maior do que o edifício montado, o impacto ambiental atribuído ao primeiro edifício pode ser potencialmente reduzido. Entretanto, é justamente essa possibilidade de vida útil extensa que proporciona certo grau de incerteza nos estudos de ACV de edifícios e de elementos construtivos (PADUART *et al.*, 2011). Muitas vezes, por conta da complexidade de se calcular e estimar a vida útil da construção, uma prática corriqueira observada entre os artigos analisados foi a adoção de períodos estabelecidos por normas ou provenientes de referência na literatura para vida útil de componentes e construções. Tingley e Davison (2012) adotaram o

valor de 50 anos com base em diversos estudos da literatura que também consideraram esse período para estruturas prediais. Eberhardt *et al.* (2019) consideraram os períodos de 50 e 80 anos para avaliar uma edificação de forma comparativa, enquanto Rasmussen *et al.* (2019) realizaram estudo de elementos construtivos de concreto projetados para duas vidas úteis, considerando o período de 120 anos. No caso de obras temporárias, observou-se a adoção da duração do evento para a primeira vida útil de pavilhões, por exemplo, sendo estimada as vidas úteis futuras, com foi apresentado por Arrigoni *et al.* (2018). Desta forma, recomenda-se que um valor razoável de vida útil para se adotar em um estudo de ACV de estruturas não temporárias e que não estão sujeitas a ambientes agressivos seja de 50 anos ou de acordo com as normas locais vigentes.

4.2. Fronteira do Sistema

A fronteira do sistema determina quais fases e processos do ciclo de vida do produto devem ser incluídos na ACV. De acordo com Tingley e Davison (2011), a prática DfD requer um uma abordagem do berço ao berço (cradle-to-cradle), permitindo que os materiais sejam facilmente separados com danos mínimos para que estejam prontos para a próxima vida. Entretanto, vários estudos (ARRIGONI *et al.*, 2018; ECKELMAN *et al.*, 2018; JOENSUU *et al.*, 2022) acabam delimitando a fronteira do sistema como do berço ao túmulo (cradle-to-grave). Em seu estudo, Joensuu *et al.* (2022) analisaram três abordagens diferentes de ACV, sendo a definição da fronteira a principal diferença entre elas. Todos os cenários consideram a fronteira do sistema como berço ao túmulo, sendo nenhuma atividade de reciclagem considerada na fase de fim de vida, e o módulo D (referente aos benefícios além das fronteiras, segundo a EN 15804+A2) não foi empregado. Na primeira abordagem adotada pelos autores, o limite do sistema foi estendido para considerar a vida útil subsequente; na segunda metodologia empregada, foi realizada o particionamento e divisão com base nos ciclos de uso; e, por fim, foi realizada uma abordagem considerando a vida útil de cada componente.

4.3. Categorias de Impacto

Dentre as categorias de impacto mais avaliadas, destaca-se o potencial de aquecimento global, presente em 50% dos estudos que realizaram abordagem quantitativa de ACV. A tabela 01 reúne os indicadores abordados nos

estudos analisados nesta revisão. Dependendo da metodologia ACV empregada, outros parâmetros relacionados às emissões de GHG (Greenhouse Gas, do inglês, gases de efeito estufa) foram avaliados, como pegada de carbono, por exemplo. Desta forma, todos os estudos quantitativos verificaram a questão de emissão de GHG em estruturas ou componentes DfD. Essa constatação pode ser justificada pelo fato de o aquecimento global e a mudança climática serem dois dos maiores desafios da humanidade e estarem presentes na agenda de vários países como temas prioritários.

4.4. Contabilização dos benefícios do DfD na ACV

Nas diretrizes das normas europeias EN 15978 e EN 15804+A2, a multifuncionalidade e os benefícios do DfD são tratados por meio de uma forma simplificada de expansão do sistema, em que os benefícios e encargos líquidos da função secundária são relatados separadamente em um módulo D (EBERHARDT *et al.*, 2020).

Vandervaeren *et al.* (2022) relatam que as normas europeias negligenciam os benefícios do DfD ao estabelecerem um método de cálculo do número de reutilizações de um elemento ou componente de construção que não considera a dependência entre os elementos na composição da construção. Em outras palavras, não é avaliada a influência que a retirada de um elemento pode provocar nos elementos posicionados ao seu redor. Paduart *et al.*

(2011) consideram o tipo de conexão como parâmetro chave para substituições de componentes no sistema DfD. Isso faz com que estruturas em madeira e aço apresentem menos barreiras para o processo DfD do que estruturas integralmente projetadas em concreto. Isso é explicado pelo fato de que as conexões de concreto geralmente são monolíticas, o que dificulta (e muitas vezes inviabiliza) o processo de desmontagem sem provocar danos ao elemento.

Para contabilizar os benefícios do sistema DfD, Eberhardt *et al.* (2019) adotaram uma abordagem simplificada de alocação 50:50, em que todos os encargos e créditos dos elementos reutilizáveis são divididos entre os edifícios que potencialmente irão compartilhá-los. Esses autores, realizaram uma posterior pesquisa (EBERHARDT *et al.*, 2020) para comparar quatro métodos de alocação: o cut-off, da norma EN15804+A2 e EN15978; fórmula da pegada circular (CFF, do inglês, Circular Footprint Formula); abordagem 50:50; e um método de regressão linear. Xia *et al.* (2020) desenvolveram um parâmetro, denominado taxa de degradação, que é introduzida para definir uma regra de alocação não linear para componentes reutilizáveis com base na característica de durabilidade das estruturas de concreto. E Joensuu *et al.* (2022) desenvolveram uma metodologia para ACV de construções em DfD que considera os componentes separadamente, e não como um todo (edificação) durante a análise do fim de vida. Desta forma, os autores avaliam os benefícios da reutilização dentro do sistema do produto.

5. RECOMENDAÇÕES PARA A MODELAGEM DO DfD EM ESTUDOS DE ACV

A partir dos dados coletados na revisão bibliográfica são propostas algumas recomendações para os itens avaliados:

- Caso não tenha sido estabelecida na etapa de projeto, a vida útil de 50 anos corresponde a um período razoável para edificações que não estão expostas em ambientes agressivos. No caso de obras temporárias, convém-se utilizar o período para qual será desenvolvida.

- Em relação à fronteira do sistema, a abordagem recomendada nos estudos para avaliar os princípios da desconstrução seria a fronteira do berço ao berço, entretanto, diversos autores consideram apenas do berço ao túmulo.

- Quanto às categorias de impacto ambiental, não existe uma regra para definir quais ou quantas devem ser analisadas. Entretanto, com base nos estudos analisados, constata-se que categorias relacionadas com as emissões de gases de efeito estufa (que avaliam a pegada de carbono) sempre foram consideradas. Sugere-se que, se possível, mais categorias de impacto sejam avaliadas, a fim de se identificar possíveis trade-offs (estratégias que diminuam alguns impactos em detrimento do aumento de outros).

- Para contabilização dos benefícios, recomenda-se utilizar uma abordagem capaz de capturar a vantagem de utilizar um sistema DfD, mas tendo em vista que nem todo componente estará apto a ser reutilizado. Desta forma, uma abordagem de alocação 50:50 pode ser considerada, caso não seja possível aplicar um coeficiente de reaproveitamento dos elementos.

6. CONCLUSÕES

Estruturas DfD são aquelas que são projetadas pensando em seu destino após a primeira vida útil, de forma a possibilitar o reuso de seus componentes para construção (ou montagem) de novas estruturas, sejam obras temporárias ou não. O desempenho dessa prática depende, portanto, de uma série de fatores, tanto de projeto (dimensões, geometria, propriedades mecânicas da peça), quanto referentes à etapa de utilização e às propriedades de durabilidade. Adicionalmente a etapa de logística de relocação dessas estruturas é de extrema importância para garantir a integridade dos componentes construídos. A reutilização das estruturas em detrimento da demolição e descarte dos resíduos atribui à prática DfD um caráter mais sustentável. Entretanto, é necessário verificar

o desempenho ambiental por meio de ferramentas apropriadas, como a Avaliação de Ciclo de Vida antes de rotular tal sistema construtivo como ecologicamente correto. Desta forma, em relação aos estudos de ACV sobre estruturas DfD de concreto, com base nos artigos selecionados e analisados, foi possível constatar que:

- Existem poucos estudos que avaliam de forma quantitativa os benefícios do DfD por meio de ACV. Entretanto, nos artigos analisados, a prática de DfD se mostrou vantajosa para atenuar os impactos ambientais do setor da construção, principalmente em relação à redução de emissão de gases de efeito estufa;

- O desempenho ambiental da prática DfD pode ser realizada por meio de ACV tanto em escala do material/componente construtivo quanto de forma global, considerando toda a edificação;

- Embora não exista uma metodologia unificada para realizar ACV de DfD, a alocação consiste no método mais empregado para quantificar os benefícios de benefícios do DfD;

- Adoção de métricas como coeficiente de reuso e de metodologias para estimativa de vida útil (em detrimento dos valores “padronizados”) tornam o estudo de ACV mais representativo ao reduzir as incertezas da possibilidade de reuso dos componentes ao final de cada vida útil.

REFERÊNCIAS

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry**. Paris. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>>. Acesso em: 9 jul. 2022.

CROWTHER, P. DESIGNING FOR DISASSEMBLY TO EXTEND SERVICE LIFE AND INCREASE SUSTAINABILITY Architectural disassembly, In: **8th international Conference on Durability of Building Materials and Components**. Service Life and Asset Management: Vancouver (Canada): Institute for Research in construction, 1999.

AMARIO, M. *et al.* Optimization of normal and high strength recycled aggregate concrete mixtures by using packing model. **Cem. Concr. Compos.**v.84, p. 83-92, 2017. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.016.

BENNETT, B. *et al.* Global warming potential of recycled aggregate concrete with supplementary cementitious materials. **Journal of Building Engineering**, v. 52, 2022.

Pesquisadores	Categorias de impacto
Paduart <i>et al.</i> (2011)	Eco-indicator 99
Eckelman <i>et al.</i> (2018)	Uso de combustível fóssil; emissões de gases de efeito estufa; efeitos respiratórios; e formação de smog fotoquímico
Arrigoni <i>et al.</i> (2018)	Potencial de esgotamento de recursos abióticos para elementos; potencial de esgotamento de recursos abióticos de combustíveis fósseis; potencial de aquecimento global em 100 anos; potencial de depleção da camada de ozônio estratosférico; potencial de formação de oxidantes fotoquímicos de ozônio troposférico; potencial de acidificação da terra e da água; potencial de eutrofização
Rasmussen <i>et al.</i> (2019)	Potencial de aquecimento global
Eberhardt <i>et al.</i> (2019)	Potencial de aquecimento global; potencial de depleção de ozônio; potencial de criação de ozônio fotoquímico; potencial de acidificação; potencial de eutrofização; potencial de depleção abiótica para elementos; potencial de depleção abiótica para recursos fósseis; potencial de ecotoxicidade aquática de água doce; potencial de ecotoxicidade aquática marinha; potencial de toxicidade humana; e potencial de ecotoxicidade terrestre
Broniewicz <i>et al.</i> (2020)	Eco-indicator 99
Xia <i>et al.</i> (2020)	Potencial de aquecimento global e potencial de esgotamento abiótico
Eberhardt <i>et al.</i> (2020)	Pegada de carbono
Xiao <i>et al.</i> (2021)	Pegada de carbono
Toniolo <i>et al.</i> (2021)	Pegada de carbono
Vandervaeren <i>et al.</i> (2022)	Potencial de aquecimento global
Joensuu <i>et al.</i> (2022)	Potencial de aquecimento global

Tabela 01: Categorias de impacto consideradas nos estudos de ACV.

Fonte: Autores.

doi.org/10.1016/j.job.2022.104394.

O'GRADY, T. *et al.* Design for disassembly, deconstruction and resilience: A circular economy index for the built environment. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 175, 2021. doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2021.105847.

KANTERS, J. Design for Deconstruction in the Design Process: State of the Art. **Buildings**, v. 8, n. 11, p. 150, 2018. doi.org/10.3390/BUILDINGS8110150.

SALAMA, W. Design of concrete buildings for disassembly: An explorative review. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 6, n. 2, p. 617–635, 2017. doi.org/10.1016/J.IJSBE.2017.03.005.

TLEUKEN, A. *et al.* Design for Deconstruction and Disassembly: Barriers, Opportunities, and Practices in Developing Economies of Central Asia. **Procedia CIRP**. Elsevier B.V., 2022. doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.148.

XIAO, J.; *et al.* Structural behavior of a new moment-resisting DfD concrete connection. **Engineering Structures**, v. 132, p. 1–13, 2017. doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.11.019.

FIGUEIRA, D. *et al.* **Demountable connections of reinforced concrete structures: Review and future developments**. Structures Elsevier Ltd, 2021. doi.org/10.1016/j.istruc.2021.09.053.

DING, T. *et al.* Seismic behavior of concrete shear walls with bolted end-plate DfD connections. **Engineering Structures**, v. 214, 2020. doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2020.110610.

CAI, G.; WALDMANN, D. A material and component bank to facilitate material recycling and component reuse for a sustainable construction: concept and preliminary study. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 21, n. 10, p. 2015–2032, 2019. doi.org/10.1007/s10098-019-01758-1.

ONG, K. C. G. *et al.* Experimental investigation of a DfD moment-resisting beam-column connection. **Engineering Structures**, v. 56, p. 1676–1683, 2013. doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2013.08.006.

BS, 2006a, **ISO 14040**. Environmental Management—Life Cycle Assessment — Principles and framework; ISO: Geneva, Switzerland, 2006.

BS, 2006b, **ISO 14044**. Environmental Management—Life Cycle Assessment — Requirements and Guidelines; ISO: Geneva, Switzerland, 2006.

CEN, 2011. **EN 15978** Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method.

CEN, 2019. **EN 15804+A2** Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products

JOENSUU, T. *et al.* Developing Buildings' Life Cycle Assessment in Circular Economy-Comparing methods for assessing carbon footprint of reusable components. **Sustainable Cities and Society**, v. 77, 2022. doi.org/10.1016/j.scs.2021.103499.

VANDERVAEREN, C. *et al.* More than the sum of its parts: Considering interdependencies in the life cycle material flow and environmental assessment of demountable buildings. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 177, 2022. doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106001.

RIBEIRO BRANDÃO, V.; CAMPOS, M. A. S. Avaliação ambiental de sistemas de aproveitamento de água pluvial: um mapeamento da literatura. **Paranoá**, n. 23, p. 93–111, 2019. doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n23.2019.09.

TONIOLO, S. *et al.* Are design for disassembly principles advantageous for the environment when applied to temporary exhibition installations? **Sustainable Production and Consumption**, v. 28, p. 1262–1274, 2021. doi.org/10.1016/j.spc.2021.07.016.

PADUART, A. *et al.* Re-design for change: Environmental and financial assessment of a dynamic renovation approach for residential buildings. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 150, p. 273–284, 2011. doi.org/10.2495/SDP110241.

DENSLEY TINGLEY, D.; DAVISON, B. Developing an LCA methodology to account for the environmental benefits of design for deconstruction. **Building and Environment**, v. 57, p. 387–395, 2012. doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.005.

MACHADO, R. C. *et al.* Analysis of guidelines and identification of characteristics influencing the deconstruction

potential of buildings. **Sustainability**, v. 10, n. 8, 2018. doi.org/10.3390/su10082604.

ECKELMAN, M. J. *et al.* Life cycle energy and environmental benefits of novel design-for-deconstruction structural systems in steel buildings. **Building and Environment**, v. 143, p. 421–430, 2018. doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.017.

EBERHARDT, L. C. M. *et al.* Life cycle assessment of a Danish office building designed for disassembly. **Building Research and Information**, v. 47, n. 6, p. 666–680, 2019. doi.org/10.3390/su12229579.

XIAO, J. *et al.* Effect of recycled aggregate concrete on the seismic behavior of DfD beam-column joints under cyclic loading, **Advances in Structural Engineer**, v. 24, n. 8, p. 1709–1723, 2021. doi.org/10.1177/1369433220982729.

EBERHARDT, L. C. M. *et al.* Development of a life cycle assessment allocation approach for circular economy in the built environment. **Sustainability**, v. 12, n. 22, p. 1–16, 2020. doi.org/10.1080/09613218.2018.1517458.

RASMUSSEN, F. N. *et al.* **Upcycling and Design for Disassembly - LCA of buildings employing circular design strategies**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Anais. Institute of Physics Publishing, 2019. doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012040.

XIA, B. *et al.* Life cycle assessment of concrete structures with reuse and recycling strategies: A novel framework and case study. **Waste Management**, v. 105, p. 268–278, 2020. doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.015.

ARRIGONI, A. *et al.* Life cycle environmental benefits of a forward-thinking design phase for buildings: the case study of a temporary pavilion built for an international exhibition. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 974–983, 2018. doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.230.

TINGLEY, D. D.; DAVISON, B. Design for deconstruction and material reuse. **Proceedings of Institution of Civil Engineers: Energy**. 2011. doi.org/10.1680/ener.2011.164.4.195.

BRONIEWICZ, F.; BRONIEWICZ, M. Sustainability of steel office buildings. **Energies**, v. 13, n. 14, 2020. doi.org/10.3390/ener13143723.

AUTORES

ORCID: 0000-0003-4608-6834

LUCAS CAON MENEGATTI, M.Sc | Universidade Federal do Rio de Janeiro | Programa de Engenharia Civil | Rio de Janeiro, RJ - Brasil | Correspondência para: (Av. Athos da Silveira Ramos, 149, bloco I, sala 110 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro - RJ, 21941-909) | E-mail: lucas.menegatti@coc.ufrj.br

ORCID: 0000-0002-3108-2833

LUCAS ROSSE CALDAS, D.Sc | Universidade Federal do Rio de Janeiro | Programa de Engenharia Civil/Programa de Pós-graduação em Arquitetura | Rio de Janeiro, RJ - Brasil | Correspondência para: (Av. Pedro Calmon, 550 - Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro - RJ, 21941-485) | E-mail: lucas.caldas@fau.ufrj.br

ORCID: 0000-0001-5867-4452

ROMILDO DIAS TOLEDO FILHO, D.Sc | Universidade Federal do Rio de Janeiro | Programa de Engenharia Civil | Rio de Janeiro, RJ - Brasil | Correspondência para: (Rua Moniz Aragão, 360 - Bloco 1 - Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro - RJ, 21941-594) | E-mail: toledo@coc.ufrj.br

COMO CITAR ESTE ARTIGO

MENEGATTI, Lucas Caon; CALDAS, Lucas Rosse; FILHO, Romildo Dias Toledo. **Projetar para desmontar: Revisão sobre a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de estruturas de concreto**. MIX Sustentável, v. 9, n. 2, p. 157-170, 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.n2.157-170>.

SUBMETIDO EM: 26/09/2022

ACEITO EM: 16/12/2022

PUBLICADO EM: 31/03/2023

EDITORES RESPONSÁVEIS: Lisiane Ilha Librelotto e Rachel Faverzani Magnago.

Registro da contribuição de autoria:

Taxonomia CRediT (<http://credit.niso.org/>)

LCM: conceituação, curadoria de dados, análise formal, investigação, metodologia, administração de projetos, visualização, escrita - rascunho original, revisão e edição.

LRC: conceituação, metodologia, administração de projetos, supervisão, validação, visualização, escrita - rascunho original, revisão e edição.

RDTF: aquisição de financiamento, metodologia, administração de projetos, supervisão, validação, escrita - revisão e edição.

Declaração de conflito: nada foi declarado.