XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente ‘
ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Avaliação de carbono incorporado em edificações: um panorama da produção técnico-científica brasileira entre 2010 e 2020

Embodied carbon assessment on buildings: an overview of the Brazilian academic-scientific production between 2010 and 2020

Cássia Laire Kozloski
UFSM | Santa Maria | Brasil | cassia.kozloski@ufsm.br
Marcos Alberto Oss Vaghetti
UFSM | Santa Maria | Brasil | marcos.vaghetti@ufsm.br
Mauricio Carvalho Ayres Torres
UFRGS | Porto Alegre | Brasil | mauricio.torres@ufrgs.br

Resumo
A construção civil está entre os grandes setores contribuintes para as emissões excessivas de dióxido de carbono. Nesse sentido, o presente trabalho busca identificar as abordagens utilizadas no Brasil para avaliação do carbono incorporado das edificações através de uma Revisão Sistemática de Literatura no Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES e em quatro bases de periódicos científicos internacionais. Nas 96 publicações selecionadas, a ACVE e ACVCO demonstraram maior acessibilidade de aplicação no país, e a análise de incertezas se mostra necessária pelo uso majoritário de dados secundários.

Palavras-chave: Revisão Sistemática de Literatura. Produção Acadêmico-científica. Avaliação do Ciclo de Vida. Edificações. Carbono Incorporado.

Abstract
Civil construction is among the major sectors contributing to excessive carbon dioxide emissions. In this sense, this paper seeks to identify the approaches used in Brazil to evaluate the embodied carbon of buildings through a Systematic Literature Review, using CAPES Database and four bases of international scientific journals. In the 96 selected publications, ACVE and ACVCO showed greater accessibility of application in the country, and because of the majority use of secondary data the uncertainty analysis proves necessary.

Como citar:
KOZLOSKI, C.; VAGHETTI, M.; TORRES, M. Avaliação de carbono incorporado em edificações: um panorama da produção técnico-científica brasileira entre 2010 e 2020. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. XXX-XXX.

Keywords: Systematic Literature Review. Academic-scientific Production. Life Cycle Assessment. Buildings. Embodied Carbon.

INTRODUÇÃO

A relação entre o setor da construção civil e o uso de recursos naturais não é um tema novo, principalmente no que diz respeito aos esforços acadêmicos, institucionais e governamentais para a otimização e aumento da eficiência durante o uso das edificações, a partir da premissa da inadiável redução do consumo energético em função da capacidade dos sistemas, do aumento populacional e do estilo de vida de parte dessa população. Entretanto, nas últimas décadas, a influência das edificações sobre o meio ambiente tem demonstrado que os aspectos incorporados possuem relevante participação na geração de impactos ambientais, e sua influência vem aumentando quando da observação do ciclo de vida completo das construções.

Em 2010, até 80% do uso energético de uma edificação resultava de práticas referentes a fase de operação [1]. Contudo, os avanços tecnológicos em materiais e sistemas mais eficientes do ponto de vista térmico vêm possibilitando a concepção de edificações de alta performance energética, para as quais a energia incorporada pode corresponder de 50% a 90% da energia total do ciclo de vida [2].

Além da alteração esperada da influência energética entre incorporada e operacional pelo melhor desempenho térmico e redução do consumo de energia operacional da edificação, esses novos materiais e sistemas requerem maior processamento em sua fabricação, contribuindo para o aumento da energia e emissões incorporadas.

Apesar da existência de múltiplas definições por diversos autores, podendo resultar em dificuldade para interpretação e comparação de estudos [3], a energia incorporada de um material, sistema ou edificação diz respeito aquela utilizada nos processos presentes desde a extração da matéria prima até a utilização do material finalizado em obra, pelos processos de manutenção da edificação durante o uso, e o os processos de fim de vida, considerando o transporte necessário entre essas atividades [4][5][6], e é preferencialmente quantificada em termos de energia primária.

Contabilizado a partir da mensuração da energia incorporada, abordagem internacionalmente utilizada e aceita [7][8], a estimativa do carbono incorporado depende da discriminação do conteúdo energético em fontes primárias do ciclo de vida de qualquer material ou sistema, o que está estritamente ligado a matriz energética de cada país ou região, sendo imprescindível a utilização de dados regionalizados quando possível. Nesse caso, é indissociável a relação entre emissões e energia.

Embora a energia e carbono incorporados possam ainda ser considerados parcialmente desconhecidos e com importância dada recente, pesquisas na área são necessárias para que os esforços realizados durante os anos anteriores para a mitigação de fatores durante a operação das edificações tornem-se, de fato,

globalmente eficazes a médio e longo prazo [8]. De caráter parcial, ou simplificado, a mensuração de energia e carbono incorporados pode ser alcançada com a realização da Avaliação do Ciclo de Vida Energética (ACVE) e Avaliação do Ciclo de Vida do Carbono (ACVCO, ACVCO2 ou ACVCO2 eq), com aplicação em determinado material de construção ou para a edificação como um todo.

Assim, da mesma forma como um produto, com sua respectiva Declaração Ambiental de Produto (EDP), o material de construção e a própria edificação se tornam também objetos de avaliação quanto aos impactos gerados ou recursos utilizados. Entretanto, os dados limitados e falta de padronização na indústria da construção no Brasil [1], bem como o conjunto de sistemas e serviços que compõe o produto edificação [9], tornam o processo de avaliação mais complexo.

Nesse contexto, como parte de um estudo mais amplo, o presente trabalho busca identificar o contexto da produção acadêmico-científica brasileira em relação às avaliações do carbono e energia incorporados das edificações, através de uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL).

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

O ciclo de vida é definido como "estágios sucessivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais à disposição final" [10] (p. 4), e a análise do mesmo busca identificar as cargas ambientais associadas a esse sistema, que são causadoras de impactos ambientais [10].

Sendo uma metodologia internacionalmente aplicada e consistente com normativas vigentes [11], com utilização em constante disseminação e aprimoramento, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é conhecida como uma ferramenta auxiliar no processo de identificação e mensuração dos impactos ambientais do ciclo de vida de um produto ou serviço a partir da análise de fatores influenciadores, seja, o fluxo de matérias e energia envolvidos nesses processos [12]. A ACV tem sido utilizada também no setor da construção civil, aplicada a materiais da construção e em edificações, sendo essa considerada um único produto, e, em função da complexidade e diversidade de sistemas que compõe tal produto único, algumas adaptações são necessárias, e indicadas por autores como [13], [8] e [7].

Normatizada nacionalmente pela série de normas NBR ISO 14040 [12] em 2001, a partir da tradução da série internacional publicada pela ISO na década de 90, e com atualizações frequentes, a ACV possui quatro fases: definição dos objetivos e escopo; análise de inventário; avaliação dos impactos; e interpretação.

Na primeira fase, são definidos e caracterizados o objeto de estudo, as fronteiras temporal e geográfica, os cortes a serem realizados, as categorias de impacto a serem avaliadas, critérios de qualidade e a quem se destina a investigação [12]. Já na segunda fase, a coleta de dados é realizada e compilada em um inventário contendo os fluxos de massa e energia, a partir de levantamentos (fonte primária) ou bibliografia (fonte secundária). A fase três consiste na relação dos dados coletados na fase dois às respectivas categorias de impacto [14], para as quais existem

ferramentas específicas de caracterização e avaliação, como o CML 2002, Eco-Indicator 99 e ReCiPe [15]. Para a quarta e última fase, é atribuída a interpretação dos resultados e processos realizados anteriormente, com posterior sugestões e recomendações para as partes interessadas ou contratantes [16].

Na ACV, a avaliação de impacto pode ser de categoria única ou multicategoria, sendo essa de ponto médio (*midpoint*) ou ponto final (*endpoint*). Na categoria única, as emissões de carbono são parte das mudanças climáticas, avaliadas pelo potencial de aquecimento global, métrica do IPCC. Já nas multicategorias, no que diz respeito às emissões de carbono, o ponto médio refere-se aos indicadores dos impactos em potencial, como mudança climática ou poluição do ar, enquanto que o ponto final as consequências dos impactos são caracterizadas como dano a diversidade do ecossistema [17].

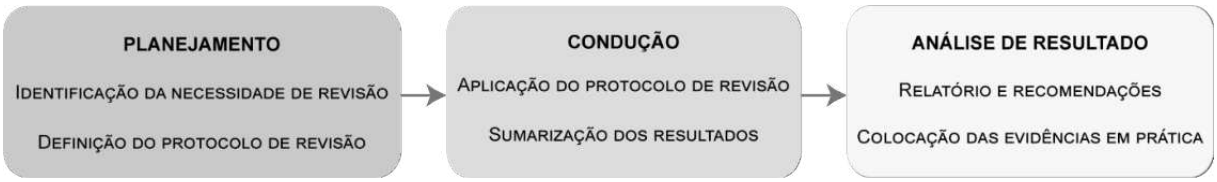
Na última fase, a execução de análises de sensibilidade, para que se possa investigar o quão sensíveis são os resultados finais com a mudança de condicionantes ou parâmetros no processo estabelecido e definido inicialmente é fortemente recomendada por [18], assim como a de incertezas, por considerar a qualidade dos dados utilizados e as margens de certeza nos valores resultantes. No que diz respeito a construção do inventário, fase dois, a utilização de dados secundários contribui para a ampliação das incertezas, e tal prática é comum em regiões onde não há ou há poucos dados locais disponíveis, como é o caso do Brasil.

No que diz respeito a ACVE e ACVCO, as mesmas são entendidas como ACVs parciais, modulares ou simplificadas, uma vez que os cortes definidos na fase um da avaliação definem que as entradas de massa e energia consideradas são somente aquelas relacionadas ao uso energético e/ou que resultam em emissões atmosféricas de Gases do Efeito Estufa (GEE) [19] [20]. Nesse sentido, cabe destacar que as emissões de GEE incorporados quanto às edificações podem ser obtidas a partir dos resultados de uma ACVE por equivalência às emissões de cada fonte da matriz energética, como indicado por [20] e como mostram os estudos de [21][22][23][24], e não necessariamente pela realização de uma ACVCO.

MÉTODO

Com utilização recente na área da construção civil, as RSL seguem protocolos e orientações de acordo com a área de aplicação. Com base nos protocolos desenvolvidos por [25] e [26] para as ciências da saúde, [27] nas ciências sociais, e [28] no gerenciamento e administração, a presente revisão foi organizada em três estágios, divididos em etapas, de acordo com a Figura 1.

Figura 1: Definição dos estágios e etapas da revisão sistemática de literatura



Fonte: o autor.

O método de pesquisa é estipulado pela descrição do Planejamento, e o Protocolo de Revisão é responsável por discriminar e caracterizar a Condução, seja, a realização prática da pesquisa.

PLANEJAMENTO

Após uma investigação exploratória sobre o tema e a identificação de um suposto problema de pesquisa, a primeira ação a ser desenvolvida é o planejamento, responsável por delimitar integralmente a condução da revisão sistemática. O planejamento é composto por duas etapas:

Identificação da Necessidade de Revisão

A necessidade de revisão foi definida como a busca (não existência) de uma síntese de informações e de abordagens utilizadas no Brasil sobre carbono incorporado no setor da construção civil.

Protocolo de Revisão

Seguindo as orientações de [26] e [27], o protocolo foi subdividido em: objetivo da busca; perguntas de pesquisa; estratégias de busca; critérios de elegibilidade; definição de qualidade dos estudos; estratégia de extração de dados e síntese dos mesmos:

(a) objetivo da busca: encontrar estudos nacionais que quantificam as emissões incorporadas de GEE na construção civil, que indiquem ou não os dados de fatores de emissão utilizados.

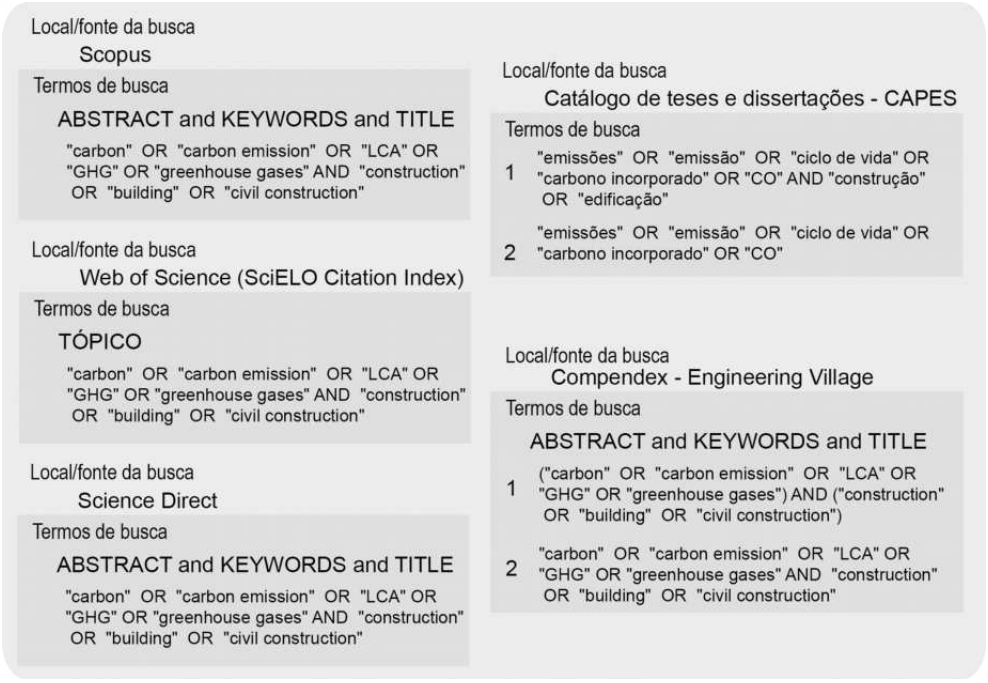
(b) perguntas de pesquisa: “Qual é o método de quantificação de GEE incorporado está sendo utilizado em estudos da área da construção civil no Brasil? ”; e, “Qual a fonte e natureza de dados dos fatores de emissão dos materiais de construção utilizados em estudos da área da construção civil no Brasil? ”.

(c) estratégia de busca: as buscas pelos estudos foram realizadas no Portal de Teses e Dissertações da CAPES, por apresentar as produções científicas acadêmicas de pós-graduação do país, com respaldo do órgão maior de referência nesse tipo de estudo, e nas bases internacionais *Engineering Village; Science Direct e Scopus,* e *Web of Science*, respectivamente por ser referência na área de pesquisa; contemplarem grande quantidade de estudos de diversas áreas; e, por incluir periódicos brasileiros. O recorte temporal da busca foi estabelecido para produções publicadas entre janeiro de 2010 e abril de 2020, e os termos de busca foram determinados com base em uma análise bibliográfica exploratória precedente, utilizando palavras-chave identificadas nos artigos referência sobre o assunto e tema. Ainda, para alcançar os objetivos da pesquisa, a busca excluiu artigos de revisão.

Em relação as palavras-chave elencadas em análise exploratória, considerando o uso do idioma Inglês como linguagem científica, os termos “*carbon*”, “*carbon emission*”, “*LCA*”, “*GHG*”, “*greenhouse gases*” e “*embodied carbon*”; e “*building*”, “*construction*” e “*civil construction*” foram utilizados para todas as bases de dados e combinados com operadores lógicos booleanos “*and*” e “*or*”, como mostra a figura 2. E, apesar de

as emissões incorporadas de carbono no setor da construção civil se apresentarem, hoje, em tendência de indissociação à energia incorporada quando em países com banco de dados escasso como o Brasil, como demonstrado anteriormente, optou-se pela não inclusão de termos como "*embodied energy*", "*LCEA"* e "*energy analysis*", recorrentes na análise exploratória, uma vez que o objetivo da busca era explicitamente estudos que possuíssem emissões como escopo, o que não exclui a presença desses últimos termos nas palavras-chave e escopo de qualquer trabalho.

Figura 2: Termos de busca por base de dados



Fonte: o autor.

Quanto aos artigos científicos, para a seleção de produções realizadas e aplicadas no Brasil e por pesquisadores brasileiros, se utilizou também o filtro de busca de afiliação dos autores, com posterior conferência dos resultados de aplicação da pesquisa ao país. Ainda, para contemplar estudos previamente conhecidos e que não foram apresentados como resultados para as buscas, uma seleção manual de trabalhos foi conduzida, adotada também por [29], conhecida como *Snowballing system* [30].

(d) Critérios de elegibilidade: Para a definição dos estudos elegíveis para a extração de dados e sumarização de resultados, critérios de elegibilidade foram elencados e aplicados a cada trabalho encontrado em todas as bases de dados (Figura 3). Os critérios foram definidos considerando o tipo e cronologia dos estudos, já definidos nas estratégias de busca, além do escopo. Os critérios de inclusão "a", "b" e "c" devem ser obrigatoriamente atendidos, enquanto que os critérios "d" e "e", apesar de obrigatórios, não necessariamente devem ser atendidos em um mesmo trabalho, uma vez que cada um desses critérios se refere a uma das duas perguntas de pesquisa. Já nos critérios de exclusão, o preenchimento de qualquer um é suficiente para o descarte de um estudo, com exceção do critério "e", que não exclui o trabalho

caso o critério de exclusão “d” não seja atendido, ou seja, o critério “d” exclui “e”, mas o critério “e” não exclui “d”.

Figura 3: Critérios de elegibilidade para seleção dos estudos

Critérios de elegibilidade adotados para seleção em primeira etapa		
INCLUSÃO		
TIPO	a	Dissertação, tese, artigo.
CRONOLOGIA	b	O estudo foi realizado entre os anos de 2010 e 2020.
LOCAL	c	O estudo deve ter sido aplicado no Brasil.
ETAPAS DE QUANTIFICAÇÃO	d	O estudo deve considerar as etapas relacionadas às emissões de GEE incorporado.
ESTIMATIVAS	e	O estudo deve apresentar dados relativos aos fatores de emissão dos materiais ou estimativa de emissão de GEE de material por unidade/tipologia de edificação.
EXCLUSÃO		
TÍTULO	a	O título não satisfaz o escopo da busca.
RESUMO	b	O estudo, através do resumo, não satisfaz o escopo da busca.
TIPO	c	Artigo de revisão.
METODO DE QUANTIFICAÇÃO	d	Não apresenta ou indica a metodologia de quantificação utilizada.
↳ ESTIMATIVAS	e	O estudo não apresenta a fonte de dados dos fatores de emissão utilizados.

Fonte: o autor.

(e) Avaliação da qualidade dos estudos: realizada dentro do protocolo [31] e pelos autores, a avaliação qualitativa, exclusivamente para categorização dos estudos, utilizou como base os critérios apresentados na Figura 4, e os trabalhos foram categorizados em alta, média e baixa qualidade, correspondendo respectivamente à: trabalhos que contemplam positivamente todos os itens apresentados na Figura 3; trabalhos que respondem negativamente ao item “a” ou “b”; e trabalhos que apresentam resposta negativa aos itens “a” ou “b”, além de outros itens subsequentes.

Figura 4: Critérios de qualidade para categorização dos estudos

Critérios de avaliação qualitativa dos trabalhos selecionados em última instância	
a	O trabalho deve ser estruturado, demonstrando rigor e organização.
b	O trabalho apresenta apronfundamento no tema, com demonstração crítica sobre o assunto.
c	A estimativa de emissões de GEE no estudo é realizada pela aplicação de método aceito, seja, IPCC, ACV (ISO).
d	Quando a estimativa for realizada utilizando-se Software, os limites/fronteiras e condicionantes utilizados devem ser explícitos.
e	O estudo deve indicar explicitamente a fonte de dados das informações.
f	O estudo utiliza fatores de emissão a partir de bases de dados (software), mas não apresenta compreensivelmente a razão pela escolha, bem como o valor quantitativo dos dados.

Fonte: o autor.

(f) estratégia de extração de dados: buscando responder às perguntas inicialmente definidas, os principais dados necessários e posteriormente extraídos foram organizados em um arquivo em formato tabular.

(g) Síntese dos dados: desenvolvida sob duas conduções, sendo uma de análise qualitativa e quantitativa de informações extraídas dos estudos; e outra, caracterizada do tipo bibliométrica. Assim, serão levantados os dados das publicações, como ano, local e tipo, e os aspectos de conteúdo apresentados, como a metodologia de avaliação que consideram as emissões de carbono ou uso energético incorporados, as fronteiras do sistema analisadas e utilização de ferramentas digitais ou softwares. Com exceção da metodologia utilizada por cada trabalho e de parte da investigação bibliométrica, a síntese de todos os outros itens é realizada em conjunto entre teses, dissertações e artigos científicos.

RESULTADOS

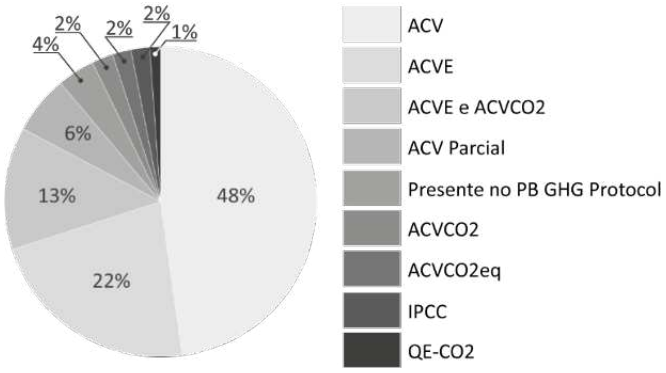
Os resultados foram analisados individualmente para cada item: metodologia; fronteiras temporais do sistema; utilização de softwares, ferramentas ou plug-ins; e, perdas, análise de sensibilidade e análise de incertezas. Foram selecionados 29 artigos científicos e 67 estudos entre dissertações e teses, com um total de 19429 estudos excluídos na etapa de elegibilidade.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada por cada trabalho selecionado foi contabilizada separadamente para dissertações e teses e artigos científicos, uma vez que, por meio dessa análise, pode-se identificar qual abordagem possui maior aceitação para divulgação em periódicos, geralmente de escala e acessibilidade internacional.

Entre a produção acadêmica da pós-graduação brasileira, a Figura 4 apresenta as nove abordagens metodológicas encontradas, das quais 48%, ou seja, 32 estudos, utilizaram a ACV completa (Figura 5). Nesse sentido, entende-se que esses trabalhos desenvolveram, além das questões energéticas e de emissões, a avaliação de outros impactos ambientais previstos em uma realização de ACV completa.

Figura 5: Metodologias de avaliação utilizadas pela produção acadêmica entre 2010 e 2020



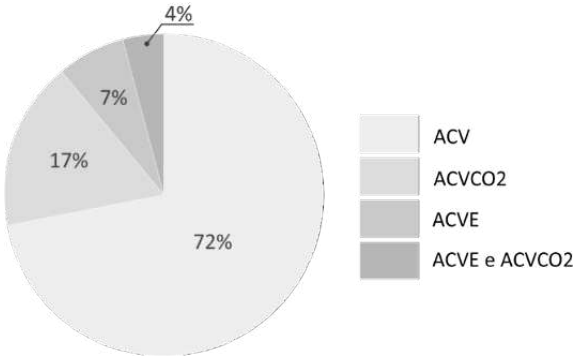
Fonte: o autor.

Entretanto, 35%, o que corresponde a 24 trabalhos, se restringe a análise energética das edificações ou materiais e sistemas, considerando ou não as emissões. Tal fato demonstra uma aplicação praticamente já estabelecida de ACVE no Brasil, e pode-se

concluir que a dificuldade em obtenção de dados para essas análises não impede que as mesmas aconteçam, mesmo que com diversas adaptações e simplificações.

Com relação a metodologia presente no Programa Brasileiro *GHG Protocol*, indicado por órgãos governamentais brasileiros para a realização de avaliações de emissões, a utilização se deu por três trabalhos, indicando pouca aplicabilidade ao setor da construção civil.

Figura 6: Metodologias de avaliação utilizadas por artigos científicos entre 2010 e 2020



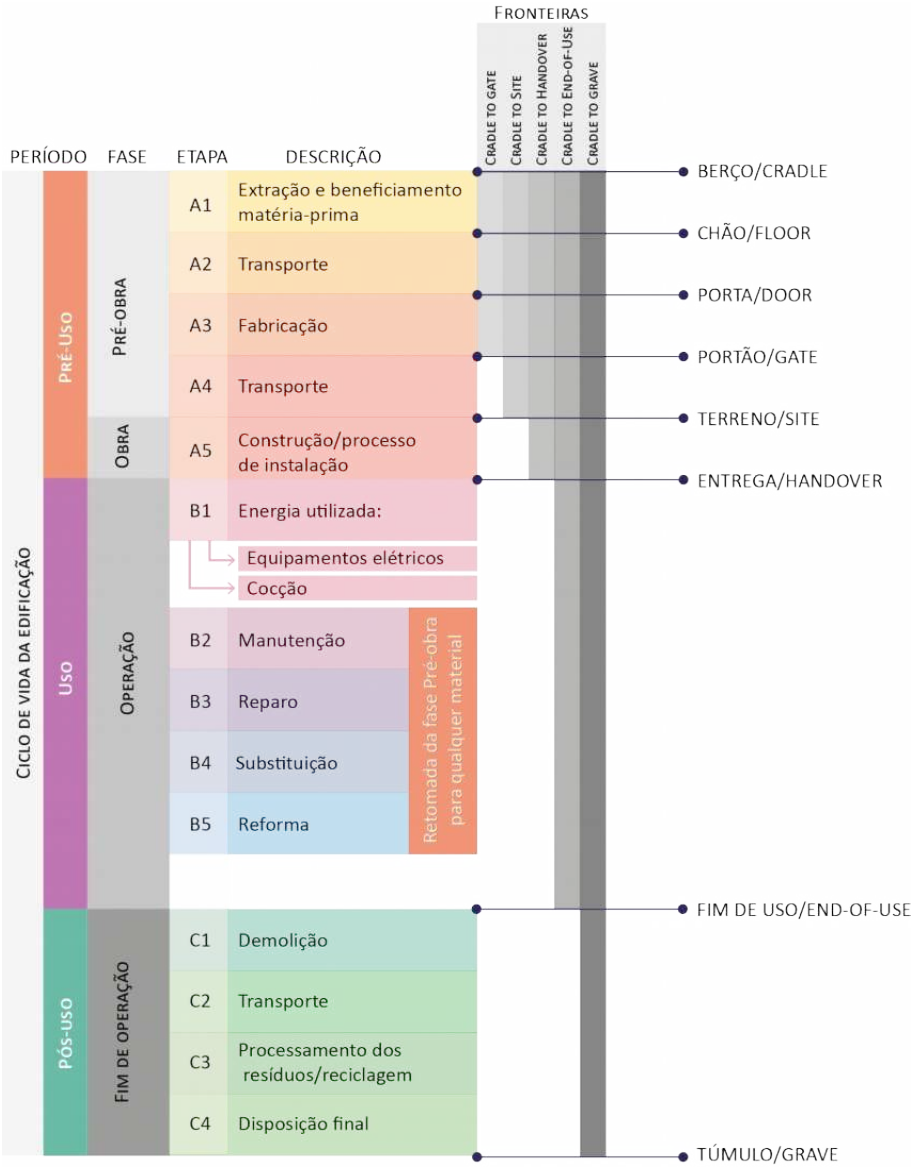
Fonte: o autor.

Já na produção científica em periódicos, 72% dos estudos realizaram a ACV completa, o que pode indicar o maior interesse pela comunidade científica em abordagens que consideram diferentes categorias de impacto ambiental (Figura 6). Ainda, diferente do encontrado nas publicações acadêmicas, a aplicação da ACVCO foi mais frequente que a ACVE, correspondendo respectivamente a 6 e 3 estudos. O interesse mundial quanto ao efeito estufa e preocupação com o aquecimento global pode estar relacionado a essa constatação.

FRONTEIRAS TEMPORAIS DO SISTEMA

Considerando que há variedade entre nomenclatura, fases e etapas entre autores, houve dificuldade na síntese e comparação das informações apresentadas pelos estudos selecionados no que diz respeito aos processos analisados por cada um. Assim, uma nova estrutura de fronteiras do sistema para o ciclo de vida de uma edificação, material ou sistema foi elaborada, desenvolvida com base em [32], [20], [33], [34], [35], [6], [36] e [7], apresentada na Figura 7, e adotada para a identificação das fronteiras em cada trabalho.

Figura 7: Fronteiras do sistema consideradas para categorização e comparação dos estudos

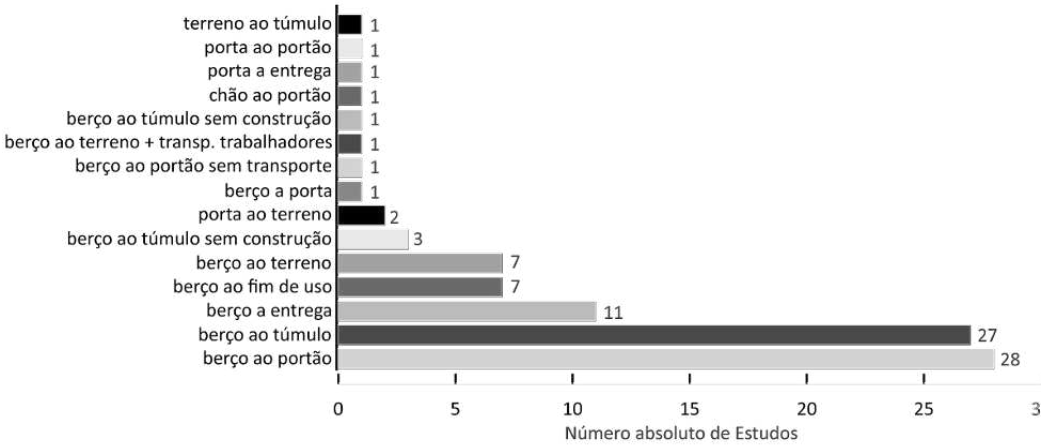


Fonte: o autor.

De acordo com o computo final (Figura 8), é possível afirmar que a fronteira “berço ao portão” é a mais avaliada, correspondendo a aproximadamente 30% de todos os estudos. Isso demonstra a importância da etapa pré-obra e os esforços para o desenvolvimento de inventários e disponibilização de dados para as questões incorporadas da construção civil.

Ainda, para esse intervalo, deve-se destacar que todos os autores apontaram a inexistência de um banco de dados brasileiro, com dificuldades no levantamento de dados e complexidade na formulação de inventários, utilizando, sobretudo, dados secundários nacionais de outras pesquisas (onde o mesmo já havia ocorrido), e quando não encontrados, em bases de dados internacionais. A avaliação para a fronteira “berço ao túmulo” corresponde também por aproximadamente 30% dos estudos, evidenciando que avaliações completas do ciclo de vida são bastante abordadas já no Brasil e possuem representatividade em relação às demais.

Figura 8: Fronteiras temporais do sistema analisadas

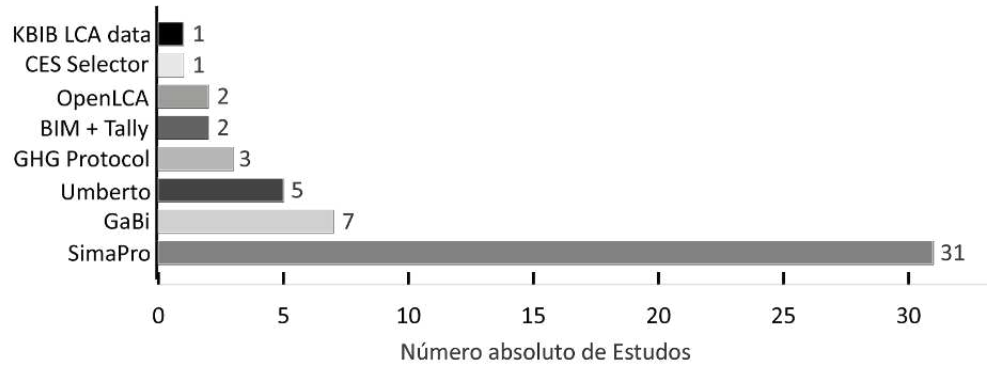


Fonte: o autor.

UTILIZAÇÃO DE *SOFTWARES*, FERRAMENTAS OU *PLUG-INS*

Em relação ao uso ou não de softwares, ferramentas eletrônicas ou módulos de extensão (conhecidos também como plug-ins) específicos de ACV ou análise ambiental, 50% dos estudos foram realizados com os mesmos, apesar de autores como Campos (2012), Costa (2012) e Braga (2018) destacarem a complexidade de utilização e custo elevado para aquisição de alguns. Dentre eles, o SimaPro, software de origem Holandesa que oferece licenças pagas profissional e educacional, é utilizado por mais da metade dos trabalhos não descritivos, como mostra a Figura 9.

Figura 9: Softwares, ferramentas ou plug-ins utilizados pelos trabalhos de análise não descritiva



Fonte: o autor.

Dentre as 53 publicações que realizaram ACVs completas, dez não utilizaram algum tipo de software específico de ACV. Dentre essas dez, estão dois do total de vinte que consideraram a fronteira temporal do sistema do “berço ao portão”, assim como entre esses dez estão cinco do total de dezoito que avaliaram a fronteira “berço ao túmulo”. Já para as ACVEs e ACVCO, somente seis das 38 publicações utilizaram algum tipo de software ou ferramenta, não havendo relação com a fronteira temporal analisada, sendo o restante dessas avaliações executadas de modo descritivo.

PERDAS, ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E ANÁLISE DE INCERTEZAS

No que diz respeito a consideração de perdas de material resultantes de processos de manufatura desses materiais da construção ou oriundas do canteiro de obras, 47% dos estudos inserem as mesmas nos quantitativos da análise. Nesse sentido, dentre aqueles autores que consideraram as perdas, destacam-se as seguintes abordagens: [37] utiliza dados de [38] para as perdas em canteiro de obras, assim como [39] e [40], a qual utiliza também as Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO) [41], como [42].

Todos os trabalhos analisados desenvolveram o inventário de massas e energia a partir de dados secundários nacionais e majoritariamente internacionais, independente da realização de uma ACV completa ou parcial. Desse total, dezessete estudos utilizaram dados secundários a partir de bibliografia ou banco de dados de softwares internacionais como complementação para levantamentos e dados de fornecedores e indústrias locais, constituindo a base do inventário a partir de dados primários.

Logo, quanto a análise de sensibilidade e de incertezas, as mesmas não foram realizadas por, respectivamente, 81% e 91% das publicações analisadas. Dos 17 trabalhos que realizaram a primeira análise, as práticas versam em: aplicação de bases de dados ou inventários distintos [43] [44]; alteração do comportamento do usuário [45] e da matriz energética [46] na fase de operação; e teste de distâncias percorridas pelo transporte dos materiais da fábrica até o terreno [47].

Quanto a análise de incertezas, [48] e [49] executam o procedimento pelo s*oftware SimaPro*, que, de modo programado, realiza a Matriz de Qualidade dos Dados (Matriz *Pedigree*). Essa mesma matriz é utilizada também por avaliações executadas descritivamente, como por [50] e [51]. Para aquelas realizadas com apoio do programa *GHG Protocol*, tanto [52] como [53] fazem uso das indicações do [54], que atribui percentuais de incertezas de acordo com os escopos das emissões, diferenciação e categorização inerente ao *GHG Protocol*, e as atividades realizadas, indicadas em tabela. Já [55] utiliza valores mínimos, médios e máximos encontrados na literatura, considerando a necessidade de utilização de dados secundários, procedimento aparentemente também realizado por [56].

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando o já existente movimento de redução do uso energético na operação das edificações no Brasil, representado principalmente pelo programa PBE Edifica, as análises que consideram os requisitos incorporados, tanto energéticos como de emissões, buscam a completude do entendimento e das avaliações de edificações relacionadas ao uso de recursos naturais e os consequentes impactos ao meio.

Nessa perspectiva, os resultados demonstraram que as avaliações específicas para energia e carbono incorporados, dentro do escopo da presente pesquisa, não exigiram a utilização de softwares complexos ou onerosos, estando acessíveis a qualquer pesquisador, mesmo que de modo ainda inicial e muitas vezes rudimentar.

Ainda, a utilização de dados secundários ainda é uma alternativa aceitável para o país enquanto inventários regionalizados não são exigidos para o setor industrial e disponibilizados oficialmente de modo público, exigindo do pesquisador bom senso e transparência na manipulação de dados, buscando sempre o uso daqueles mais próximos a realidade do objeto de avaliação.

Isso se dá, em parte, pela realização de análise de incertezas, demonstrando transparência, aceitação e divulgação de margens de erro no resultado final, denotando maior confiabilidade e consistência para a pesquisa, e, ao oposto de possíveis julgamentos, jamais sendo interpretado como má condução da avaliação. Ainda, deve-se enfatizar a consideração das perdas nas avaliações, uma vez que as mesmas não estão isentas de impactar o ambiente, sendo geralmente descartadas ao final dos processos produtivos ou fim de obra, partindo para a fase de fim de vida sem exercer função operacional ou de utilização.

Ademais, se percebeu que as diferenças entre nomenclaturas utilizadas podem comprometer a interpretação e comparações das avaliações, suscitando ocasionalmente a manipulação das informações para utilização de uma mesma base de apreciação pelo agente leitor, como demonstrado nos resultados pelas “fronteiras do sistema”. Por isso, a inexistência de uma única regulamentação, guia ou normatização detalhada e específica nacional, em consonância com práticas internacionais, pode ser reconhecida como uma limitação para a execução e difusão dessas práticas.

No que se refere às perguntas de pesquisa definidas na primeira etapa da RSL, a condução da mesma e a análise quantitativa dos resultados permitiram definir que: o método de quantificação de gases do efeito estufa incorporado que está sendo utilizado em estudos da área da construção civil no Brasil é a ACV; e a fonte e natureza de dados dos fatores de emissão dos materiais de construção utilizados em estudos da área da construção civil no Brasil são majoritariamente e respectivamente, internacionais e secundária.

É necessário salientar que a necessidade de uma seleção manual de estudos previamente conhecidos ou encontrados em outros meios, e que não apareceram como resultado durante a busca por protocolo e estratégias de busca da RSL demonstra que, possivelmente, o presente estudo não esgotou os trabalhos que se propôs identificar e selecionar.

Por fim, a revisão sistemática de literatura se mostrou uma metodologia de pesquisa eficaz para investigar o contexto da produção acadêmica e científica nacional quanto as emissões de carbono incorporado relacionadas ao setor da construção civil. Esse procedimento de revisão bibliográfica difere-se de uma descritiva por delimitar a busca por produções e aprofundar, de acordo com objetivos estabelecidos, a pesquisa sobre determinado assunto, e se mostra útil para aplicação em qualquer área com possíveis adaptações.

REFERÊNCIAS

[1] RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. Life Cycle energy analysis of buildings: an overview. **Energy and Buildings**, n. 42, p. 1592-1600, 2010.

[2] RÖCK, M. et al. Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. **Applied Energy**, [s. l.], v. 258, p. 12, 2020.

[3] DIXIT, M. K. Life cycle recurrent embodied energy calculation of buildings: A review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 209, p. 731–754, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.230>. . Acesso em: 22 mar. 2020.

[4] HAMMOND, G.; JONES, C. **Inventory of Carbon & Energy (ICE**): Version 1.6a. Bath, UK: University of Bath, 2008. Disponível em: <www.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied/%0APeer>. Acesso em: 26 dez. 2019.

[5] DIXIT, M. K.; FERNANDEZ-SOLIS, J.L.; LAVY, S.; CULP,C. H**. Protocol for Embodied Energy Measurament Parameters**. Departament of Architecture, Texas A&M University. U.S.A. 2010..

[6] YOKOO, N; YOKOYAMA. K. (Ed). **Evaluation of Embodied Energy and CO2eq for Buildings Construction (Annex 57)**. Overview of Annex 57 Results. Japan: Institute for Building Environment and Energy Conservation, 2016.

[7] HAUSCHILD, M. Z.; ROSENBAUM, R.; OLSEN, S. I**. Life Cycle Assessment: Theory and Practice**. Switzerland: Springer International Publishing, 2018.

[8] POMPONI, F.; DE WOLF, C.; MONCASTER, A. (EDS.). **Embodied carbon in buildings**: Measurement, management, and mitigation. Switzerland: Springer International Publishing, 2018.

[9] MUNARIM, U. Benefícios ambientais da preservação do patrimônio edificado: Análise do ciclo de vida da reabilitação de edificações vs. nova construção. Florianópolis: UFSC, 2014. 291 p. **Tese** (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2014.

[10] MDIC/CONMETRO. Resolução nº 03, de 22 de abril de 2010. Dispõe sobre a Aprovação do Termo de Referência do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 12 maio 2010. Seção 1, p. 86-87.

[11] PASSUELLO, A. C. B. et al. Aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 7–20, 2014.

[12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040: gestão ambiental** - avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

[13] LÜTZKENDORF, T.; BALOUKTSI, M. **Basics**, IEA-EBC Annex 57 Subtask 1 report -Actors and Concepts. Evaluation of Embodied Energy and CO2eq for Building Construction (Annex 57). International Energy Agency, Institute for Building Environment and Energy Conservation, Japan, 2016.

[14] BILAR, M. M. Análise do ciclo de vida de um sistema vertical de vedação com adição de cinza pesada. Florianópolis: UFSC, 2016. 198 p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2016.

[15] MENDES, N. C. Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil. São Carlos: USP, 2013. 149p. **Dissertação de Mestrado**. Departamento de Engenharia de Produção, São Carlos: Universidade de São Paulo, 2013.

[16] MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 160–175, 2016.

[17] IPCC. Introduction to the 2006 Guidelines. In: IPCC. 2006 **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Genebra, Suíça: IPCC, 2006. p. 1-12.

[18] HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M. a J. A review of approaches to treat uncertainty in LCA. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL MODELLING AND SOFTWARE 2004, Osnabrück, Germany. **Anais**... Osnabrück, Germany: Brigham Young University, 2004. Disponível em: <http://www.iemss.org/iemss2004/pdf/lca/heijarev.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2018.

[19] HUNT, R. G. et al. Case Studies Examining LCA Streamlining Techniques. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 1998. v. 3, n. 1, p. 36–42.

[20] TAVARES, S. F. Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras. Florianópolis: UFSC, 2006. 225 p. **Tese** (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2006.

[21] PEREIRA, M. F. B. Conteúdo energético e emissões de CO2 em coberturas verdes, de telha cerâmica e de fibrocimento: estudo de caso. 2014. 148 p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014.

[22] PESSOA, R. G. A. de Q. Indicadores de emissões de CO2 na construção de edifícios: estudo de múltiplos casos na cidade do Recife-PE. 2019. 176 p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia) - Universidade de Pernambuco, Recife, PE, 2019.

[23] AZEVEDO, N. C. de. Avaliação do ciclo de vida energético e de CO2 através da modelagem da informação da construção (BIM) e simulação termo energética de uma habitação unifamiliar em wood frame. 2019. 157 p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2019.

[24] SARTORI, T.; CALMON, J. L. Analysis of the impacts of retrofit actions on the life cycle energy consumption of typical neighbourhood dwellings**. Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 21, n. October 2018, p. 158–172, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.009. Acesso em: 14 jun. 2020.

[25] TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review* Introduction: the need for an evidence- informed approach. **British Journal of Management**, [s. l.], v. 14, p. 207–222, 2003.

[26] KITCHENHAM, B. **Procedures for Performing Systematic Reviews**. Technical Report TR/SE-0401, Department of Computer Science, Keele University, UK, 2004. 27 p.

[27] LITTELL, J. H.; CORCORAN, J.; PILLAI, V**. Systematic reviews and meta-analysis**. New York: Oxford University Press, Inc., 2008.

[28] BRINER, R. B.; DENYER, D. Systematic Review and Evidence Synthesis as a Practice and Scholarship Tool. In: ROUSSEAU, Denise M. (Ed.). **The Oxford Handbook of Evidence-Based Management**. [s.l.] : Oxford University Press, 2012. p. 112–129.

[29] ARIOLI, M. S. et al. The evolution of city-scale GHG emissions inventory methods: A systematic review**. Environmental Impact Assessment Review**, [s. l.], v. 80, n. November 2019, p. 106316, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106316>. Acesso em: 09 fev. 2021.

[30] WOHLIN, C. Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. In: Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE '14), 38, 2014, New York, NY, USA**. Anais...** New York, NY, USA Disponível em: <https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>. Acesso em: 16 abr. 2021.

[31] NEELY, J. G. et al. A practical guide to understanding systematic reviews and meta-analyses. **Otolaryngology - Head and Neck Surgery**, [s. l.], v. 142, n. 1, p. 6–14, 2010.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.otohns.2009.09.005>. Acesso em: 13 jun. 2020.

[32] TODD, J. A.; CURRAN, M. A. (Org.). **Streamlined Life-Cycle Assessment:** A Final Report from the SETAC North America Streamlined LCA Workgroup. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) and SETAC Foundation for Environmental Education, 1999.

[33] BRE. **BRE Global Methodology for the Environmental Assessment of Buildings using EN 15.978**:2011. PN 326 Rev 0.0. BRE Global Ltd: Londres, 2018.

[34] PAULSEN, J. S.; SPOSTO, R. M. A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case study for the program "MY HOUSE MY LIFE ". **Energy & Buildings**, [s l.], v. 57, n. 2013, p. 95–102, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.014>. Acesso em: 22 ago. 2018.

[35] INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA (IBICT). **Manual do Sistema ILCD**. Sistema internacional de referência de dados do ciclo de produtos e processos: Guia geral para avaliações do ciclo de vida: orientações detalhadas (União Europeia - tradução de Luiz Marcos Vasconcelos). IBICT: Brasília, 2014.

[36] CALDAS, L. R.; SPOSTO, R. M. Emissões de CO2 referentes ao transporte de materiais de construção no Brasil: estudo comparativo entre blocos estruturais cerâmicos e de concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 91–108, 2017.

[37] BESSA, V. M. T. Contribuição à metodologia de avaliação das emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida das fachadas de edifícios de escritórios. São Paulo: USP, 2010. 286 p. **Tese** (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2010.

[38] AGOPYAN, V.; et al. **Alternativas para a redução de desperdício de materiais nos canteiros de obra**s. São Paulo: PCC/EPUSP, 1998. v. 1-5.

[39] LIRA, J. S. de M. M. Depleção abiótica e potencial de aquecimento global no ciclo de vida de telhado verde comparativamente a um telhado convencional. Brasília: UnB, 2017. 120 p. **Dissertação** (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.

[40] MADEIRA, J. G. da S. Avaliação do ciclo de vida energético e desempenho da envoltória mediante ações de retrofit em edificação pública escolar. Vitória: UFES, 2019. 195 p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2019.

[41] PINI. **Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos**. 13. ed. São Paulo: PINI, 2008.

[42] INVIDIATA, A. Método de avaliação multicritério de estratégias de projeto de edificações mais sustentáveis. Florianópolis: UFSC, 2017. 333 p. **Tese** (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2017.

[43] NASCIMENTO, M. A. Metodologia de levantamento energético com base na análise de ciclo de vida na construção civil: Estudo de caso no centro interdisciplinar de energia e ambiente da Universidade Federal da Bahia. Salvador: UFBA, 2011. 211 p. **Tese** (Doutorado em Energia e Ambiente) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2011.

[44] MORALES, M. et al. Regionalized inventory data in LCA of public housing: A comparison between two conventional typologies in southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 238, p. 117869, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117869>. Acesso em: 15 jun. 2020.

[45] EVANGELISTA, P. P. de A. Desempenho ambiental na construção civil: parâmetros para aplicação da avaliação do ciclo de vida em edificações residenciais brasileiras. Salvador:

UFBA, 2017. 255 p. **Tese** (Doutorado em Energia e Ambiente) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2017.

[46] MAHECHA, R. E. G. Designing nearly zero energy buildings: energy efficiency and on-site generation. Rio de Janeiro: UFRJ, 2018. 171 p. **Tese** (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

[47] SOMBRIO, C. M. de O. ACV de painéis de blocos cerâmicos e concreto armado: um exercício de aplicação do manual do ILCD. Brasília: UnB, 2015. 138 p. **Dissertação** (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015.

[48] MEDEIROS, L. M.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A. Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 365–385, 2018.

[49] MAIA DE SOUZA, D. et al. Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 137, p. 70–82, 2016. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.069. Acesso em: 13 dez. 2018.

[50] TABORIANSKI, V. M.; PRADO, R. T. A. Methodology of CO2 emission evaluation in the life cycle of office building façades. **Environmental Impact Assessment Review**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 41–47, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eiar.2011.10.004>. Acesso em: 08 jun. 2020.

[51] BESSA, V. M. T. Contribuição à metodologia de avaliação das emissões de dióxido de carbono no ciclo de vida das fachadas de edifícios de escritórios. São Paulo: USP, 2010. 286 p. **Tese** (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2010.

[52] SILVA, E. S. Inventário de gases de efeito estufa na etapa de construção de edificações residenciais multifamiliares na região da Grande Florianópolis (SC). Florianópolis: UFSC, 2014. 229 p. **Dissertação (**Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

[53] MACIEL, M. A. D. Levantamento de inventário de emissões de gases de efeito estufa em obra da indústria da construção civil em Maringá/RS. Maringá: Unicesumar, 2016. 97 f. **Dissertação** (Mestrado em Tecnologias Limpas) – Centro Universitário de Maringá, Maringá, 2016.

[54] SINDUSCONSP. **Guia metodológico para inventários de emissões de gases de efeito estuga na construção civil**: setor edificações. São Paulo: ABAL, 2013. 76 p.

[55] CALDAS, L. R. Avaliação do ciclo de vida energético e de emissões de CO2 de uma edificação habitacional unifamiliar de light steel framing. Brasília: UnB, 2016. 174 p. **Dissertação** (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016.

[56] OLIVEIRA, L. S. Avaliação do ciclo de vida de blocos de concreto do mercado brasileiro: alvenaria e pavimentação. São Paulo: USP, 2015. 156 p. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2015.