

ESTRUTURA METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL NO PROCESSO DE PROJETO DE EDIFÍCIOS PÚBLICOS

METHODOLOGICAL FRAMEWORK FOR ENVIRONMENTAL PERFORMANCE ASSESSMENT IN THE DESIGN PROCESS OF PUBLIC BUILDINGS

ESTRUCTURA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL EN EL PROCESO DE DISEÑO DE EDIFICIOS PÚBLICOS

Juliano Libraga da Silva¹, Ana Passuello¹

RESUMO:

O setor da construção possui protagonismo nos impactos ambientais globais. No Brasil, uma parcela significativa deste setor é representada por edifícios públicos, os quais possuem legislação para adoção de critérios de sustentabilidade em seus projetos, porém limitadas ações práticas. Neste contexto, o presente trabalho propõe uma estrutura metodológica para estimar potenciais impactos ambientais do ciclo de vida de edifícios públicos brasileiros, utilizando a técnica de avaliação do ciclo de vida (ACV) na comparação de soluções construtivas, durante o processo de projeto. O método foi estruturado a partir de revisão sistemática sobre as aplicações da ACV nas fases iniciais de projeto, da análise do processo de projeto de edifícios públicos e por normativas relativas à ACV. Um estudo de caso foi utilizado para testar o instrumento e os resultados apontam que, com a alteração no sistema construtivo de pisos, foi possível reduzir até 35% dos impactos do cenário base de projeto para depleção de recursos abióticos – elementos não fósseis, de 7% de aquecimento global, e reduções entre 3 a 8% nas demais categorias de impacto. Com isso, a aplicação da estrutura metodológica de forma pontual em um sistema construtivo com expressiva contribuição nos impactos gerou melhorias significativas no desempenho ambiental de todo o edifício. Adicionalmente, foi conduzida uma análise de sensibilidade, para verificar a influência dos períodos de vida útil de projeto, considerados para os cenários avaliados. Foi possível identificar que, com o suporte de especialistas, o método pode contribuir para a inclusão da avaliação de desempenho ambiental na Administração Pública.

PALAVRAS-CHAVE: Avaliação do ciclo de vida; avaliação de desempenho ambiental; sustentabilidade na administração pública.

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura - PPGCI/UFRGS

Fonte de Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Conflito de Interesse: Não há.

Ética em Pesquisa: Não há necessidade.

Submetido em: 06/09/2022
Aceito em: 26/08/2023

How to cite this article:

SILVA, J; PASSUELLO, A. Estrutura metodológica para avaliação de desempenho ambiental no processo de projeto de edifícios públicos. **Gestão & Tecnologia de Projetos**. São Carlos, v18, n1, 2023. <https://doi.org/10.11606/gtp.v18i1.201942>



ABSTRACT:

The construction sector has a leading role in global environmental impacts. In Brazil, a significant portion of this sector is represented by public buildings, which have legislation for adopting sustainability criteria in their projects but limited practical actions. In this context, this paper proposes a methodological framework to estimate the potential life cycle environmental impacts of Brazilian public buildings, using the technique of life cycle assessment (LCA) to compare construction solutions during the design process. The method was structured from a systematic review of LCA applications in early design phases, from analyzing the design process of public buildings, and from LCA-related regulations. A case study was used to test the tool. The results indicate that, with the change in the floor construction system, it was possible to reduce up to 35% of the base case impacts for the depletion of abiotic resources - non-fossil elements, 7% global warming, and reductions between 3 and 8% in the other impact categories. With this, applying the methodological framework in a punctual way in a building system with an expressive contribution to the impacts generated significant improvements in the overall environmental performance of the whole building. A sensitivity analysis was conducted to verify the influence of the design life periods considered for the evaluated scenarios. It was possible to identify that, with the support of specialists, the method can contribute to the inclusion of environmental performance assessment in Public Administration.

KEYWORDS: *Life cycle assessment; environmental performance assessment; sustainability in public administration.*

RESUMEN:

El sector de la construcción tiene un papel preponderante en los impactos ambientales globales y, en Brasil, tiene una parte significativa representada por los edificios públicos, que cuentan con legislación para la adopción de criterios de sostenibilidad en sus proyectos, pero con acciones prácticas limitadas. En este contexto, el presente trabajo propone un marco metodológico para estimar los impactos ambientales potenciales del ciclo de vida de los edificios públicos brasileños, utilizando la técnica de evaluación del ciclo de vida (ACV) en la comparación de soluciones constructivas, durante el proceso de diseño. El método se estructuró a partir de una revisión sistemática sobre las aplicaciones del ACV en las primeras fases de diseño, del análisis del proceso de diseño de edificios públicos y de la normativa relacionada con el ACV. Se utilizó un estudio de caso para probar el instrumento y los resultados indican que, con el cambio en el sistema de construcción del suelo, fue posible reducir hasta el 35% de los impactos del escenario de diseño base para el agotamiento de los recursos abióticos -elementos no fósiles-, del 7% del calentamiento global, y reducciones entre el 3 y el 8% en las demás categorías de impacto. Así, la aplicación del marco metodológico de forma puntual en un sistema constructivo con contribución expresiva en los impactos generó mejoras significativas en el desempeño ambiental de todo el edificio. Además, se realizó un análisis de sensibilidad para verificar la influencia de los periodos de vida de diseño, considerados para los escenarios evaluados. Se pudo identificar que, con el apoyo de expertos, el método puede contribuir a la inclusión de la evaluación del desempeño ambiental en la Administración Pública.

PALABRAS CLAVE: *Evaluación del ciclo de vida; evaluación del desempeño ambiental; sustentabilidad en la administración pública.*

INTRODUÇÃO

As ações antrópicas influenciaram mudanças rápidas e generalizadas em todo o sistema climático global, gerando uma situação sem precedentes. Tal situação segue se agravando e eventos extremos foram verificados com maior frequência recentemente, como ondas de calor, fortes precipitações, enchentes, secas e ciclones tropicais (IPCC, 2021).

Neste cenário de esgotamento de recursos naturais, a indústria da construção é a maior consumidora de matérias-primas e representa de 25 a 40% do total de emissões de carbono do planeta (WEF, 2016). Os edifícios são responsáveis por mais de 40% do uso global de energia e possuem uma duração relativamente longa (UNEP, 2009). Assim, é vital incorporar princípios de sustentabilidade desde as fases iniciais de projeto, nas definições de materiais e sistemas construtivos, cabendo uma análise técnica em cada situação, para escolha da solução que considere o melhor desempenho e menor impacto associado (SEV, 2009; JOHN, 2017).

No contexto brasileiro, a indústria da construção possui destaque na economia e em 2019 movimentou R\$ 288 bilhões, tendo a maior contribuição da construção de edifícios, com 44% do total dispendido. O setor público representa 30% nas obras e serviços de construção, com 20% do total de construção de edifícios (IBGE, 2021). Portanto, esta pesquisa é focada nesta fatia representativa do setor da construção no Brasil, tendo em vista a necessidade de critérios de sustentabilidade e de redução dos impactos ambientais associados à construção de edifícios públicos, os quais possuem normativas específicas sobre esta temática.

Como exemplo, desde 2010 há instrução normativa que dispõe sobre os critérios de sustentabilidade ambiental a serem seguidos nas contratações de serviços ou obras pela Administração Pública Federal, estabelecendo que as especificações de projetos para contratação de obras devem prever a economia da manutenção e operacionalização do edifício, a redução do consumo de energia e água, bem como a utilização de tecnologias e materiais que reduzam os impactos associados (BRASIL, 2010). Em 2012, foi promulgado o Decreto Federal nº. 7.746, estabelecendo a necessidade de critérios e práticas sustentáveis nas contratações realizadas pela administração pública federal (BRASIL, 2012).

Recentemente publicada, a nova Lei de licitações e contratos dispõe também que, desde a fase de estudo técnico preliminar, as contratações devem observar parâmetros visando a mitigação de impactos ambientais associados (BRASIL, 2021). Contudo, a implementação da sustentabilidade no setor público ainda é limitada, já que a legislação não prevê meios para operacionalização de ações nesta área. De acordo com auditoria realizada em 2017 pelo Tribunal de Contas da União em mais de 100 instituições federais, há falhas estruturais, como baixa evolução em práticas sustentáveis nas contratações e um nível incipiente de ações que visem a utilização de edifícios públicos mais eficientes e sustentáveis (TCU, 2017).

Entre as ferramentas para verificar o nível de implementação da sustentabilidade nos edifícios estão os sistemas de certificação ambiental, como o LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), utilizada em 165 países. O LEED possui 4 categorias de avaliação com o intuito de incentivar a transformação dos projetos, obras e operação dos edifícios, com o foco na sustentabilidade de suas atuações. De todos os países em que este sistema é utilizado, o Brasil está na 4ª. posição no número de projetos aprovados. Porém, menos de 2% se referem a certificações de edifícios públicos (GBCBRASIL, 2022).

Uma iniciativa nacional de certificação ambiental é o Selo Procel Edificações, estabelecido em 2014 com o objetivo de identificar os edifícios que apresentem as melhores classificações de eficiência energética. Porém, até 2022 apenas 64 certificações foram emitidas para a categoria de edificações comerciais, de serviços e públicas, das quais apenas 42% se referem a certificações de projetos ou edifícios públicos (PROCEL, 2022). Desta forma, verifica-se que a

Administração Pública ainda está longe de atender os requisitos de sustentabilidade estabelecidos na legislação vigente para os edifícios públicos, havendo uma lacuna relacionada à falta de requisitos de desempenho a serem cumpridos neste setor, de forma objetiva. Para alterar o cenário atual, o desenvolvimento de ferramentas e a simplificação de técnicas de avaliação de desempenho ambiental podem auxiliar projetistas e gestores públicos a incluir critérios de sustentabilidade de forma prática e embasada cientificamente nos projetos de edifícios.

De modo complementar, o processo de projeto em organizações públicas possui especificidades que o tornam diferenciado em relação aos empreendimentos do setor privado. Isto se deve, por exemplo, em relação à legislação aplicada, requisitos de maior nível de detalhamento dos projetos, além de exigências de qualidade e sustentabilidade. Apesar de diversas destas características poderem ser observadas no setor privado, não há o caráter da obrigatoriedade a que são submetidas as obras de edifícios públicos (BRETAS, 2010).

Uma técnica que permite identificar oportunidades para a melhoria em vários estágios do ciclo de vida de um produto, ou edifício, é a avaliação do ciclo de vida (ACV), a qual pode subsidiar o processo de tomada de decisões de indústrias e nas organizações governamentais, auxiliando na seleção de indicadores de desempenho ambiental, além de possuir normatização em âmbito nacional, estabelecendo os requisitos de sua aplicação de forma abrangente (ABNT, 2009a). Tais características a diferenciam de certificações ambientais oriundas do mercado privado, sendo assim, a ACV pode ser utilizada para a avaliação de desempenho ambiental no setor público de forma isonômica e independente, respaldada em critérios normativos.

Os maiores benefícios do emprego da ACV para um edifício são percebidos quanto mais cedo a técnica é utilizada no processo de projeto. Porém, a ACV é mais empregada em etapas finais do planejamento dos empreendimentos ou em seus estágios de uso e operação (JUSSELME et al., 2018; HASIK et al., 2019; ROBERTS et al., 2020). Portanto, o setor público deve liderar a adoção da ACV para formação de requisitos de sustentabilidade e como política pública, porém são necessárias melhorias na sua metodologia de aplicação, especialmente para que a técnica seja utilizada no processo de projeto de obras públicas, o qual demanda o engajamento de diversas partes interessadas (TCU, 2014; COELHO FILHO et al., 2016).

Neste contexto, este trabalho possui como objetivo desenvolver uma estrutura metodológica para estimar impactos ambientais do ciclo de vida de edifícios públicos, empregando a ACV de forma sistemática na comparação de soluções construtivas, para considerar o desempenho ambiental na tomada de decisão durante o processo de projeto. O método desta pesquisa engloba a testagem da estrutura desenvolvida em um estudo de caso, verificando-se a sua aplicação prática e as correções necessárias para facilitar sua utilização. Assim, não compõe o foco principal deste trabalho desenvolver propriamente uma inovação à metodologia consagrada da técnica de ACV, mas criar uma ferramenta para empregá-la, de forma didática, dentro do processo de projeto na Administração Pública.

REFERENCIAL TEÓRICO

Este tópico apresenta, de forma sucinta, a estrutura do processo de projeto de edifícios públicos e uma revisão de estudos sobre a ACV nas fases iniciais de projeto de edifícios.

PROCESSO DE PROJETO DE EDIFÍCIOS PÚBLICOS

Na esfera pública, para atender os requisitos da legislação, o desenvolvimento de projetos de edifícios exige mais etapas e profissionais envolvidos, quando em comparação à projetos da

iniciativa privada, em que o processo é mais dinâmico e envolve, na maior parte do tempo, apenas o cliente e os responsáveis técnicos pelo projeto. Como a documentação do projeto de uma obra pública compõe um processo de licitação, todas as soluções técnicas necessitam ser justificadas e orçadas detalhadamente. Ainda, o projeto está sujeito à auditorias, assim como a necessidade de atendimento às diretrizes impostas para a orçamentação e especificações de projetos de edifícios públicos (TCU, 2014; CARVALHO et al., 2017; BRASIL, 2021).

O processo de projeto de um edifício público e os atores envolvidos podem variar significativamente, a depender da complexidade do empreendimento, da estrutura de cada instituição e dos profissionais técnicos disponíveis. De qualquer modo, as etapas mínimas para o processo de projeto envolvem o desenvolvimento sequencial do programa de necessidades, dos estudos de viabilidade, o anteprojeto, projeto básico e projeto executivo. Dentro da instituição deve haver pelo menos dois atores, que correspondem à gestão ou diretoria da instituição, com nível de poder decisório, e a área técnica, com profissionais de engenharia e arquitetura, responsáveis pela elaboração dos documentos técnicos, demandados pela área de gestão. Quando o órgão público não dispõe de equipe técnica suficiente para desenvolver os projetos, tais serviços são executados por empresa especializada. Há também pelo menos mais um conjunto de atores neste processo, que são os órgãos públicos regulamentadores, como prefeituras e órgãos de licenciamento ambiental, responsáveis pela análise legal do projeto, para atendimento aos códigos de obras e da legislação ambiental (BRETAS, 2010; TCU, 2014; ABNT, 2017; BRASIL, 2021). Assim, na Figura 1 é apresentado um fluxograma simplificado do processo de projeto de edifícios em uma instituição pública, contendo as etapas mínimas e atores envolvidos, a partir das principais referências encontradas da área.

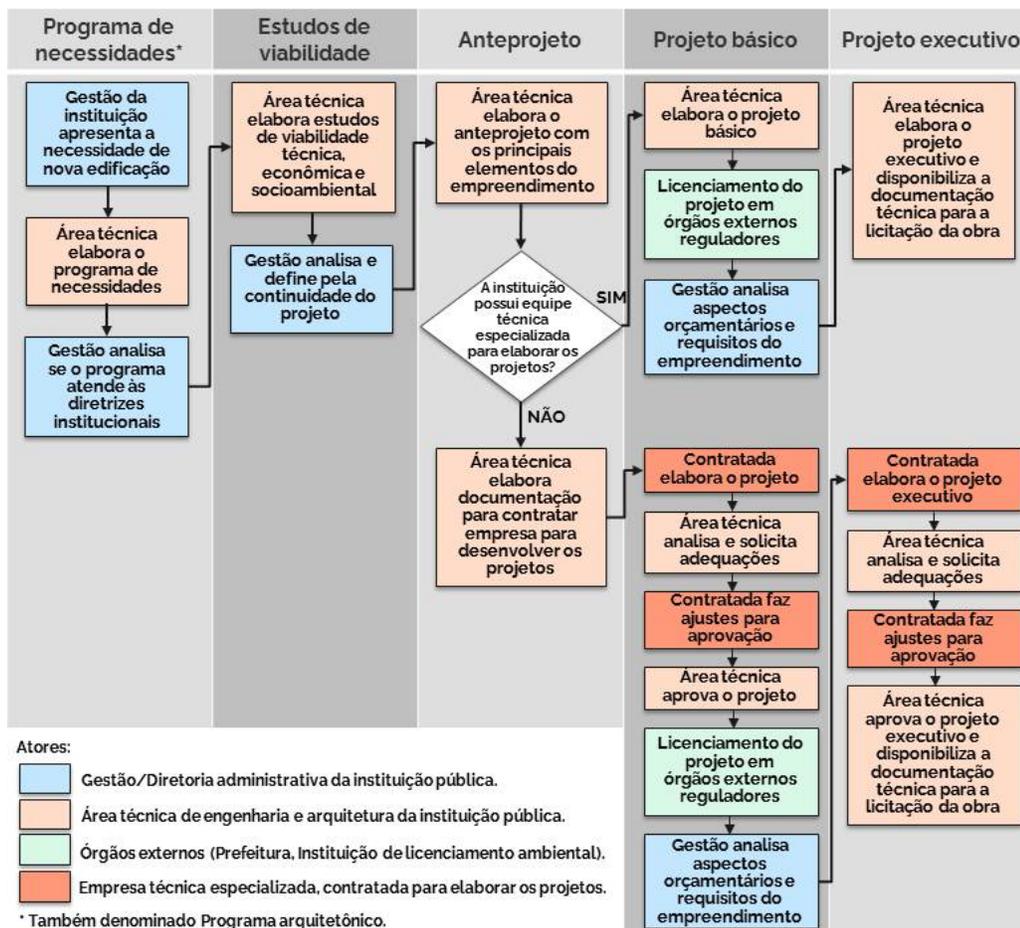


Figura 1. Fluxograma simplificado do processo de projeto de edifícios em uma instituição pública

Fonte: Autores, a partir de dados de Bretas (2010), TCU (2014), ABNT (2017), CARVALHO et al. (2017), BRASIL (2021)

O processo descrito na Figura 1 pode conter etapas adicionais e uma configuração diferenciada na prática, a depender da complexidade de cada projeto e da estrutura organizacional de cada instituição. De qualquer modo, o objetivo do fluxograma é fornecer uma visão ampla do processo de projeto e suas especificidades, além de auxiliar na definição de qual etapa é mais adequada para inserção da avaliação de desempenho ambiental.

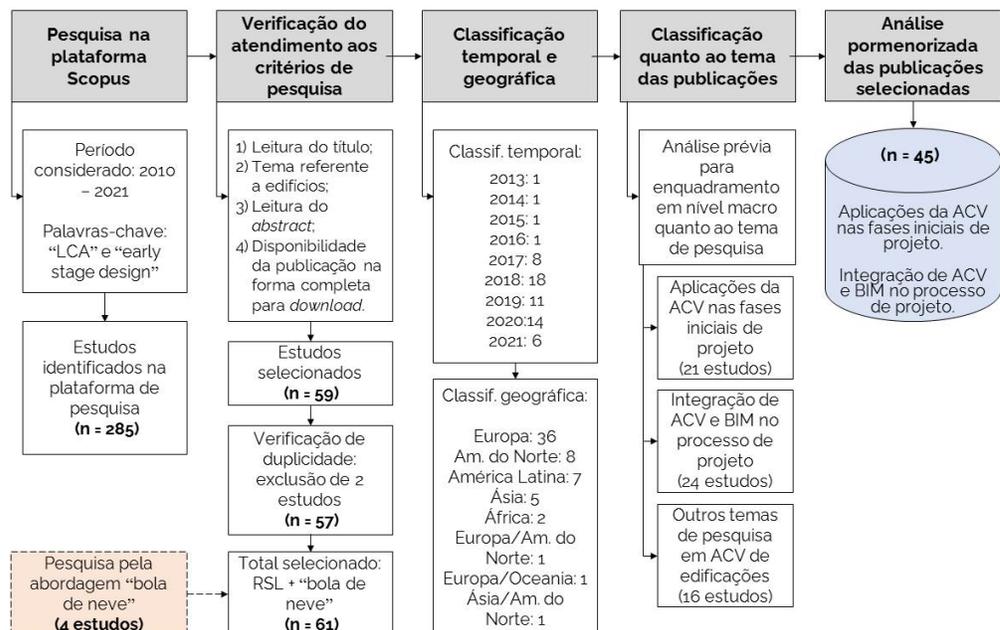
ACV NAS FASES INICIAIS DE PROJETO DE EDIFÍCIOS

Para verificar a abordagem atual sobre a aplicação da ACV nas fases iniciais de projeto de edifícios e subsidiar o desenvolvimento da estrutura metodológica, foi conduzida uma revisão sistemática de literatura (RSL), utilizando-se a plataforma “Scopus”, com os termos de busca “LCA”, “early stage design”, e o conector “and”, para os campos de título, resumo e palavras-chave. Foram analisados os documentos publicados entre os anos de 2010 e 2021, sendo que o repositório apresentou um total de 285 estudos. Como critérios de exclusão, foram desconsiderados os estudos que não estavam publicados em língua inglesa, não eram relacionados a edifícios, ou que não tratavam sobre a aplicação da ACV nas fases iniciais de projeto, mesmo que de forma secundária.

A partir disso, 57 publicações foram selecionadas, complementadas por outros 4 estudos, através de pesquisa com abordagem “bola de neve”, por apresentarem relevância sobre o tema analisado. Ao todo, foram obtidos 61 artigos para a primeira etapa de classificação. Na Tabela 1 do Apêndice A consta a relação de todos os artigos selecionados, incluindo título, autores, o periódico, e o resumo do objetivo ou aplicação propostos em cada publicação. Os estudos foram classificados em (1) aplicações da ACV nas fases iniciais de projeto, (2) integração de ACV e o *Building Information Modeling* (BIM) no processo de projeto, e em (3) outros temas de pesquisas relacionados à ACV de edifícios, com diferentes direcionamentos. Considerando a pluralidade dos objetos de pesquisa, os quais de algum modo englobam a ACV nas fases iniciais de projeto de edifícios, foi necessário delimitar os documentos a serem analisados de forma detalhada nos dois primeiros grupos temáticos. Através dos critérios adotados, buscou-se selecionar os principais métodos existentes para subsidiar o desenvolvimento da estrutura metodológica desta pesquisa, totalizando em 45 publicações com potenciais contribuições. O protocolo adotado na RSL é sintetizado na Figura 2.

Figura 2. Síntese do protocolo adotado para a revisão de estudos sobre a ACV nas fases iniciais de projeto de edifícios

Fonte: Autores



Nos estudos classificados como aplicações da ACV nas fases iniciais de projeto, foi verificada a grande variabilidade de enfoques e da estrutura dos métodos existentes. Embora o objetivo principal seja, na maioria dos métodos, subsidiar a tomada de decisão de projetistas, observa-se que não há uma padronização ou replicabilidade ampla dos modelos, demandando adaptações para diferentes locais e regionalização de bancos de dados.

Apesar das pesquisas possuírem diferenças significativas de abordagens, escopo e ferramentas utilizadas, um ponto comum entre os documentos é a relevância quanto à adoção da ACV o mais cedo possível no desenvolvimento de projetos, de forma que os benefícios ambientais no ciclo de vida sejam maximizados. Reforçando esta ideia, Roberts et al. (2020) verificaram, em vasta revisão sistemática, que dois temas se destacam quando se trata da utilização da ACV em projetos de edifícios: a importância das decisões em estágio inicial, observada em 68% dos estudos, e a seleção dos materiais, como forma de redução dos impactos incorporados, discutida em 50% das publicações avaliadas pelos autores.

Algumas temáticas se destacam entre os estudos como, por exemplo, o desenvolvimento de estruturas metodológicas baseadas em projetos paramétricos, em que as soluções de projeto são representadas por escolhas de parâmetros pré-estabelecidos, tendo como benefícios a possibilidade de um processo de otimização das configurações do projeto, testando diferentes soluções, simultânea e automaticamente (HESTER et al., 2018; JUSSELME et al., 2018; LOBACCARO et al., 2018; MEEEX et al., 2018; HOLLBERG et al., 2020).

Outras pesquisas desenvolveram métodos baseados em certificações ambientais de edifícios ou voltados para uma determinada localização (KREINER et al., 2015; MARSH, 2016; KUMANAYAKE; LUO, 2017; WAN OMAR, 2018; KANAFANI et al., 2019). Também foi verificada a exploração de métodos para integrar a ACV e a avaliação do custo do ciclo de vida (ACCV) como subsídio às decisões de projeto (BASBAGILL et al., 2017; DEJACO et al., 2020; DIAS et al., 2021). Das publicações contempladas no grupo temático referente às aplicações da ACV nas fases iniciais de projeto, apenas um estudo é voltado para edifícios públicos no cenário internacional (KREINER et al., 2015), e um artigo trata da inserção da avaliação de desempenho ambiental nas compras públicas do contexto brasileiro (TIMM et al., 2021).

Não há um alinhamento entre os métodos quanto ao escopo considerado em cada estudo. Apenas cerca de 30% dos artigos referentes à ACV nas fases iniciais de projeto permitem abordar de forma expressa todos os estágios do ciclo de vida dos objetos avaliados (AZZOUZ et al., 2017; KUMANAYAKE; LUO, 2017; HESTER et al., 2018; KANAFANI et al., 2019; DUPREZ et al., 2019; HOLLBERG et al., 2020; TIMM et al., 2021) e não se verificou uma abordagem consolidada nos modelos quanto à utilização de edifícios completos para a condução das ACVs nas comparações entre soluções de projeto.

Também não se identificou um consenso quanto à definição das fases iniciais de projeto. Os modelos que não empregam a ACV integrada ao BIM não formam um entendimento comum sobre em qual das fases iniciais de projeto a ACV deve ser empregada. As publicações analisadas possuem abordagens diversas, e por vezes complexas, voltadas para especialistas em ACV. Porém, há escassez de modelos simplificados, voltados à utilização conjunta com projetistas e profissionais do setor da construção, de forma integrada.

Quanto aos estudos classificados no tema de integração da ACV e BIM, foi possível verificar tendências promissoras para a inclusão da ACV no processo de projeto através da sua otimização em conjunto ao BIM. Entretanto, ainda são necessários maiores desenvolvimentos na integração entre os *softwares* de ACV e a plataforma BIM, existindo atualmente diferentes níveis desta integração. A maioria das aplicações voltadas à utilização do BIM referem-se à extração de listas de quantitativos e especificações de projeto para utilização separada em um

software de ACV (GOMES; BARROS, 2018; NILSEN; BOHNE, 2019; DALLA MORA et al., 2020; PASSER et al., 2020; AZARIJAFARI; SAFARI, 2021).

As pesquisas que abordam esta integração destacam o uso crescente do BIM, devido ao seu potencial de armazenamento de informações necessárias para a avaliação ambiental de edifícios. Porém, a maior parte dos estudos se concentra na abordagem dos estágios de produção (módulos A1-A3) e, em menor número, nos estágios de construção (módulos A4-A5), não utilizando o BIM para avaliação da energia operacional de edifícios, que possui impactos significativos. Os principais desafios do processo de integração entre BIM e ACV estão relacionados aos aspectos organizacionais e a padronização dos fluxos de trabalho. São necessários padrões em níveis industriais para aperfeiçoar essa integração, incluindo a criação de uma metodologia de ACV sincronizada, permitindo uma identificação clara dos dados de entrada necessários e o desenvolvimento de um banco de dados de informações em conformidade ao ambiente BIM (PASSER et al., 2020).

A maioria dos estudos desta temática trata de edifícios de uso residencial, sendo limitada a aplicação para edifícios públicos e comerciais. Além disso, as aplicações que integram as duas técnicas são utilizadas majoritariamente para sistemas específicos, como vedações, cobertura, pisos, com uma lacuna de pesquisa para modelos mais complexos, com todos os componentes de construção. O foco atual das pesquisas tem sido a adoção de métodos de integração entre BIM e ACV para prover a interoperabilidade e aplicabilidade dos resultados de ACV de forma válida e compreensiva, sendo que a maior parte dos estudos indica a aplicação das fases iniciais de projeto (AZARIJAFARI; SAFARI, 2021). Desta forma, a análise dos artigos deste tema auxiliou na definição da etapa de projeto para inserção da avaliação de desempenho ambiental. Embora seja pacífico o entendimento de que o emprego da ACV seja mais eficiente nas fases iniciais de projeto, são necessários dados e especificações mínimas para que um estudo deste tipo possa ter um nível de robustez aceitável e seja válido (PASSER et al., 2020; ROBERTS et al., 2020).

Portanto, há de se encontrar um equilíbrio entre a fase de projeto que ainda permita flexibilidade em alterações de soluções construtivas, a depender dos resultados da avaliação de desempenho ambiental, mas, ao mesmo tempo, que possua um maior nível de detalhamento, fornecendo os dados necessários para a realização da ACV com precisão. Nesse sentido, os estudos apontam que o nível de detalhamento mais utilizado em projetos BIM para integração com a ACV é o LOD 300 (GOMES; BARROS, 2018; DALLA MORA et al., 2020; PASSER et al., 2020; AZARIJAFARI; SAFARI, 2021), o que corresponde ao desenvolvimento do projeto básico da estrutura de projeto de um edifício público.

MÉTODO

Para o desenvolvimento da estrutura metodológica, foram consideradas as normas NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044, que descrevem os princípios e a estrutura para condução de estudos de ACV (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b). As normas europeias EN 15978:2011 e EN 15804:2013 foram utilizadas para detalhar as etapas da estrutura, já que tais normativas tratam especificamente da ACV no setor da construção (CEN, 2011; CEN, 2013).

A estrutura metodológica considera a possibilidade do projeto ser ou não desenvolvido em BIM, de modo a contemplar da forma mais ampla a realidade dos projetos de edifícios. Para acelerar a implementação do BIM na área pública, em 2020 foi publicado o Decreto Federal nº. 10.306, o qual estabelece a sua utilização por órgãos públicos federais. O Decreto determina que o BIM será implementado de forma gradual, em três fases, sendo a última em 2028, são dispostos critérios e requisitos para adequações nos projetos, além de regras gerais para elaboração de projetos com a utilização desta ferramenta (BRASIL, 2020).

O método para a obtenção do *framework* considerou as seguintes ações sequenciais: (1) desenvolvimento de versão preliminar da estrutura metodológica, a partir de análises do processo de projeto em instituições públicas, dos estudos sobre métodos existentes de ACV para fases iniciais de projeto e das normas relacionadas à ACV; (2) aplicação em um estudo de caso, verificando-se a aplicação prática, com identificação de lacunas e correções necessárias; (3) revisão da estrutura metodológica, com reorganização das etapas e inclusão de subitens adicionais; e (4) análise de sensibilidade e discussão com outros estudos, para avaliar a influência dos parâmetros definidos nos resultados obtidos e se a aplicação do *framework* permitiu obter resultados robustos, aderentes a outros estudos do contexto nacional.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estrutura metodológica proposta integra a ACV com as informações disponíveis no desenvolvimento do projeto básico, sendo que este enfoque está relacionado ao momento em que são realizadas as definições mais importantes, de modo que a avaliação de desempenho ambiental seja inserida de forma eficiente, sem inviabilizar a conclusão do projeto.

Tendo em vista complexidade relacionada à ACV, para aplicação do instrumento são necessários especialistas da área ambiental, com domínio desta técnica, para garantir maior confiabilidade aos resultados. Portanto, independentemente do projeto ser elaborado pela própria instituição ou por empresa contratada, a avaliação deve ocorrer de forma similar a uma disciplina de projeto, elaborada por um especialista, mas com a colaboração de projetistas das demais áreas e da equipe técnica da instituição pública. De forma complementar, a estrutura desenvolvida possui como pressupostos para sua aplicação o atendimento prévio aos requisitos de desempenho técnico e econômico das soluções de projeto a serem avaliadas, assim como às orientações das normas ABNT NBR ISO 14040 e ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b).

O *framework* proposto é apresentado na Figura 3 e possui 7 etapas, sendo que a etapa 1 contempla a definição do objetivo, escopo e unidade funcional, necessários para definir metas e permitir futuras comparações. A etapa 2 se refere à seleção de dados existentes até então em um cenário base de projeto e prevê a verificação quanto à utilização do BIM no desenvolvimento do projeto, para determinar como irá ocorrer a coleta de dados. Nesta etapa, também são coletadas outras informações técnicas do edifício. Na etapa 3 estão concentradas definições relacionadas às prescrições normativas de ACV, como a aplicação de critérios de corte, quais estágios do ciclo de vida serão considerados e o método de avaliação de impactos.

A obtenção das informações de desempenho ambiental deve ocorrer na etapa 4, com o levantamento dos dados primários, quando possível, a verificação de distâncias de transporte e modais previstos, a definição da base de dados a ser utilizada e os respectivos processos de materiais, com organização dos dados disponíveis de projeto para inclusão no *software*.

A modelagem de ACV é prevista na etapa 5 do método, com a definição do *software* a ser utilizado, a inserção e configuração dos dados no *software* de acordo com o ICV definido e o cálculo dos impactos ambientais potenciais.

Na etapa 6 do *framework* consta a avaliação de impactos, com a exportação dos resultados do *software* para planilha eletrônica, ajuste dos dados para considerar substituições e reposições de materiais e sistemas construtivos no estágio de uso e um detalhamento da avaliação dos impactos do cenário base de projeto. Tal avaliação contempla uma análise de contribuição dos módulos do ciclo de vida com maior representatividade nos impactos ambientais, seguida da análise dos sistemas construtivos destes módulos com maiores impactos associados e, por fim, a identificação de *hotspots* nos processos de materiais da base de dados, para verificar soluções alternativas de projeto.

Figura 3. Framework de avaliação de desempenho ambiental para aplicação no projeto básico de edifícios públicos

Fonte: Autores



Concluindo a avaliação de desempenho ambiental, a etapa 7 contempla a seleção da melhor configuração de projeto para cada edifício estudado, mediante a comparação gráfica e numérica dos resultados de avaliação de impactos dos diferentes cenários de projeto. Ainda pode ser considerada, quando houver, a avaliação do custo do ciclo de vida das alternativas modeladas, assim como conduzida a verificação de consistência da avaliação.

ESTUDO DE CASO

O estudo de caso se refere a edifício do Ministério Público Federal (MPF), conforme a Figura 4, e possui área total construída de 830,85 m². O projeto foi executado em 3 municípios da região nordeste do Brasil e o edifício considerado localiza-se em Caxias, no Maranhão.

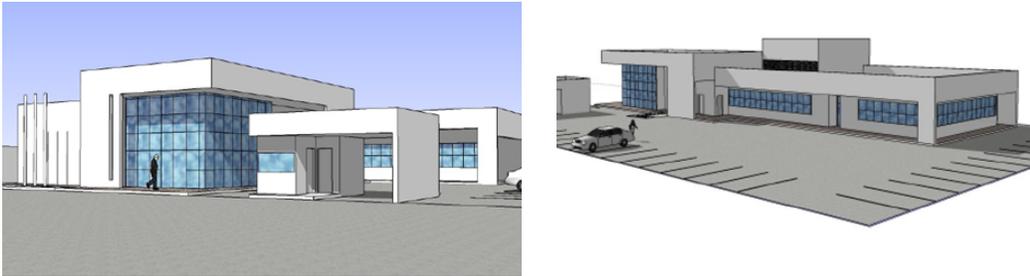


Figura 4. Perspectivas do projeto de edifício público adotado como estudo de caso

Fonte:
MPF (2019)

O sistema estrutural do edifício é composto em concreto armado, as vedações são dispostas em alvenarias de tijolos cerâmicos e a cobertura com telhas em aço galvanizado. As esquadrias externas possuem caixilhos de alumínio e os pisos são em porcelanato. O projeto apresenta ainda especificações de instalações hidrossanitárias, elétricas, sistema de prevenção e combate a incêndio, sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA), climatização, rede estruturada (instalações de telecomunicações e internet) e sistemas adicionais.

ASPECTOS DE ACV PARA APLICAÇÃO DA ESTRUTURA METODOLÓGICA NO ESTUDO DE CASO

Objetivo e escopo

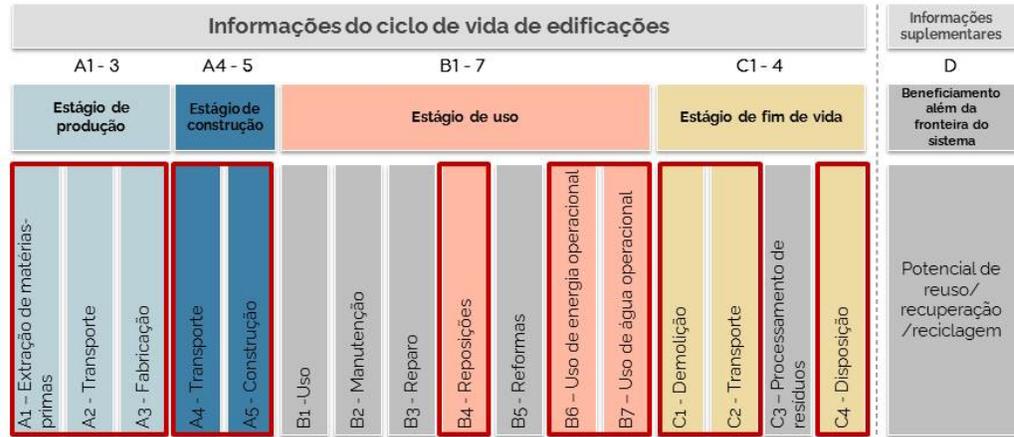
O objetivo da ACV nesta pesquisa é avaliar os potenciais impactos ambientais de edifícios públicos, com base em comparações de cenários de ciclo de vida na etapa de projeto básico, subsidiando a escolha de soluções de melhor desempenho ambiental. O público-alvo é composto por engenheiros e arquitetos de instituições públicas e projetistas de edifícios. A unidade funcional para a aplicação do estudo de caso é o edifício completo, com área total de 830,85 m². Neste sentido, buscou-se utilizar a maior quantidade de dados de materiais disponíveis para o cenário base de projeto.

A EN 15804 dispõe sobre os critérios de exclusão de entradas e saídas de dados em um processo unitário, e estabelece que os cortes devem ser de 1% do uso de energia primária renovável e não renovável e 1% da entrada em massa total do processo unitário avaliado (CEN, 2013). A partir da análise do projeto existente, foram buscados processos na base de dados de impactos ambientais para os materiais especificados, considerando apenas os itens incorporados ao edifício. Desta forma, 99,12% da massa total do edifício foi incluída no escopo da avaliação e, a partir dos critérios de corte adotados, apenas 0,88% da massa total foi excluída do inventário, atendendo ao critério normativo de exclusão. Os materiais selecionados foram agrupados de acordo com a sua matéria-prima predominante, gerando 32 processos de materiais da base de dados, e foram incluídos também outros 6 processos da base de dados, relativos aos consumos de energia, água, combustíveis no transporte e disposição de resíduos.

Com base na EN 15978 (CEN, 2011), os estágios do ciclo de vida considerados são os de produção (módulos A1 a A3), construção (módulos A4-A5), uso (módulos B4, B6 e B7), e de fim de vida (módulos C1, C2 e C4), resultando em uma abordagem do berço ao túmulo, conforme delimitado em vermelho na Figura 5.

Figura 5. Delimitação dos estágios considerados do ciclo de vida do edifício, de acordo com a EN 15978:2011

Fonte:
Adaptado de CEN (2011)



Inventário do ciclo de vida (ICV)

O inventário do ciclo de vida do cenário base seguiu a categorização dos sistemas construtivos, conforme o projeto do estudo de caso, e o levantamento dos quantitativos a partir dos arquivos de projeto, sem disponibilização em modelo BIM. O *software* utilizado para a ACV foi o *OpenLCA* (2019), versão 1.10.2, e a base de dados *Ecoinvent*, versão 3.6. O critério de seleção de dados foi por alocação com corte por classificação (*Allocation, cut-off by classification*). Para avaliar soluções construtivas de melhor desempenho ambiental, foram definidos cenários alternativos de projeto, com utilização de dados de declarações ambientais de produto (DAPs) obtidas na plataforma *EPDSystem*, (EPD, 2022).

Para o módulo A4, foi realizado levantamento das distâncias de transporte de potenciais indústrias, priorizando-se a proximidade ao canteiro de obras. Devido à dificuldade de obtenção de dados nacionais para os consumos por equipamentos durante a construção do edifício, no módulo A5 utilizou-se como estimativa o consumo de energia e combustível por m² de área bruta de um edifício alto, localizado em Hong Kong (YAN et al., 2010).

No estágio de uso, foi considerada a vida útil de projeto (VUP) de 50 anos, conforme a indicação da norma de desempenho de edificações NBR 15575:2021. De igual modo, a vida útil dos componentes dos sistemas construtivos foi baseada na tabela C6 da NBR 15575:2021, parte 1, com uma análise entre os níveis mínimo e intermediário, considerando-se a substituição integral dos materiais ao final da sua vida útil de projeto (ABNT, 2021). Embora a normativa seja voltada para edifícios residenciais, é a única referência no contexto nacional que aborda os prazos de vida útil no setor da construção. Para os módulos B6 e B7, foram considerados os consumos de energia elétrica e água potável durante um ano de utilização do edifício, projetados para 50 anos.

Quanto ao fim de vida, no módulo C1 foi considerado o consumo de diesel de equipamentos e máquinas para a demolição do edifício, conforme dado de primeiro plano apresentado por Gomes et al. (2018) e Pulgrossi (2020). Para o cálculo da distância de transporte dos resíduos de demolição no estágio C2, foi considerado o local previsto no município do estudo de caso para disposição dos resíduos de construção civil (CAXIAS, 2022).

Os processos da base de dados para todos os estágios do ciclo de vida foram selecionados com localização geográfica preferencialmente nacional. Mais de 90% da massa total referente aos módulos A1-A3 e B4 concentrou-se em apenas 5 itens (areias, cimento, concreto usinado 25MPa, pedras britadas, tijolos cerâmicos), para os quais parte dos processos da base de dados foi adaptada, substituindo-se o *dataset* da base de dados por um processo correspondente à matriz elétrica regional, visando melhorar a qualidade dos dados utilizados. O detalhamento do ICV completo consta no Apêndice A.

Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV)

O método de avaliação de impactos utilizado para testagem do *framework* foi o CML (*baseline*) versão 4.4, considerando 7 categorias de *midpoint*, conforme a EN 15804: aquecimento global, depleção da camada de ozônio, acidificação de solo e água, eutrofização, formação de ozônio fotoquímico, depleção de recursos abióticos – combustíveis fósseis e elementos não fósseis (CEN, 2013). Os resultados dos impactos ambientais obtidos no *OpenLCA* foram exportados para planilhas eletrônicas, com análise da contribuição dos estágios do ciclo de vida. Na sequência, verificaram-se quais sistemas construtivos possuem maior impacto associado, a fim de definir os *hotspots* do cenário base, para a adoção de cenários alternativos.

O CML está entre os modelos de caracterização indicados na EN 15804:2012 + A2:2019, para as categorias de impactos essenciais (CEN, 2019), e foi adotado em parte significativa da bibliografia consultada, embora outras metodologias mais atualizadas estejam disponíveis. Contudo, a aplicação do *framework* em outros casos pode considerar diferentes métodos, visto que em uma de suas etapas está prevista a escolha do método de AICV mais adequado para cada situação, com indicação de que tal decisão seja documentada.

RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL NO ESTUDO DE CASO

Resultados para o cenário base de projeto

A modelagem de ACV foi conduzida seguindo a estrutura metodológica proposta, e na Figura 6 constam os resultados totais de impactos para o cenário base de projeto.

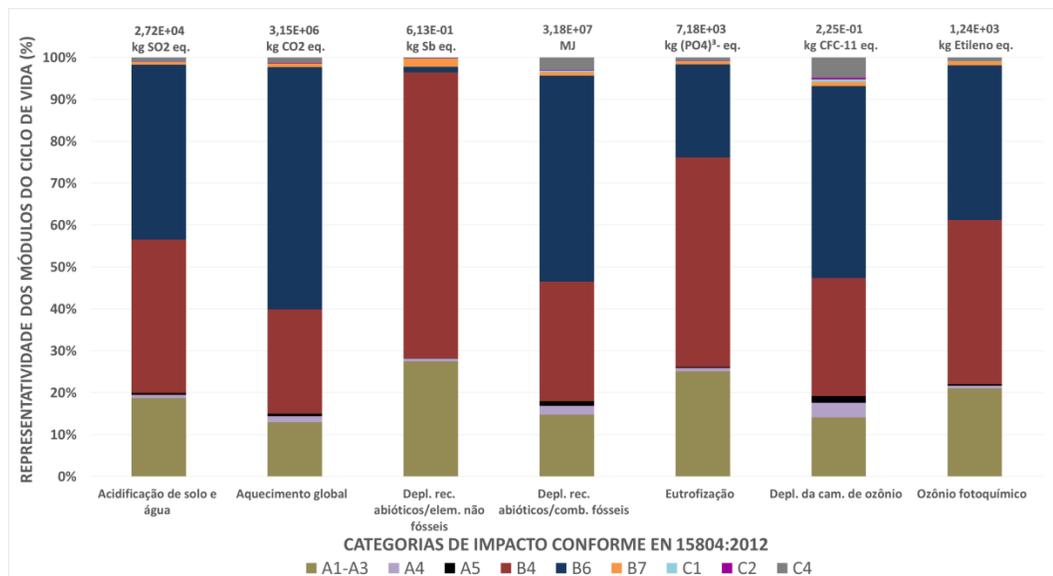


Figura 6. Distribuição dos resultados totais de impactos ambientais do cenário base de projeto entre os módulos do ciclo de vida

Fonte:
Autores

Os impactos estão concentrados nos módulos A1-A3 (extração de matérias-primas e fabricação dos materiais), B4 (reposições dos sistemas construtivos), e no módulo B6 (consumo de energia elétrica operacional). Destes, o módulo B6 obteve o maior impacto em 4 das 7 categorias, com 57,8% do total de aquecimento global. Para as outras 3 categorias, a maior contribuição foi do módulo B4, com destaque para 68,3% do total de depleção de recursos abióticos – elementos não fósseis. Os módulos A1-A3 tiveram representatividade média de 19,2% (variações de 12,9% a 27,5% entre as categorias de impacto).

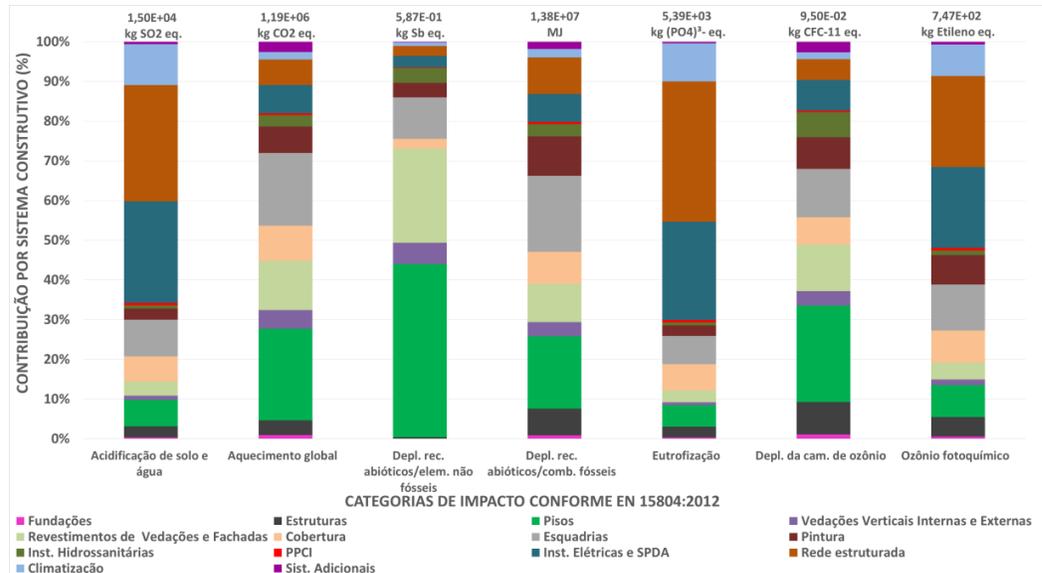
Considerando estes resultados, foi dado enfoque ao detalhamento dos impactos dos módulos A1-A3 e B4, pela sua relação direta com as definições de sistemas construtivos na fase de

projeto, para que sejam identificadas soluções alternativas. Os sistemas construtivos com maiores impactos nestes estágios foram rede estruturada, instalações elétricas e de SPDA, esquadrias, pisos e revestimentos de vedações e fachadas, conforme pode ser verificado na Figura 7. O sistema de rede estruturada foi o mais representativo em 3 categorias (acidificação de solo e água, eutrofização e ozônio fotoquímico), tendo as instalações elétricas e de SPDA como o segundo item com maior representatividade.

Os pisos tiveram maior contribuição em aquecimento global (23%), depleção de recursos abióticos – elementos não fósseis (44%) e depleção da camada de ozônio (24%). As esquadrias se destacaram para a depleção de recursos abióticos – combustíveis fósseis e os revestimentos de vedações e fachadas completaram os 5 sistemas com maior contribuição.

Figura 7. Distribuição dos resultados de impactos ambientais do cenário base de projeto por sistemas construtivos, nos módulos A1-A3 e B4

Fonte: Autores



Os significativos impactos associados às instalações elétricas e de rede estruturada decorrem principalmente pela presença do cobre, que possui impactos importantes no seu processo produtivo. Entretanto, tais sistemas não são de fácil otimização, dificultando a escolha de soluções alternativas. De qualquer forma, a identificação da relevância desses materiais nas categorias de impactos pode auxiliar para que sejam priorizados projetos com traçados de instalações e infraestrutura que reduzam, na medida do possível, os seus quantitativos previstos.

Resultados para os cenários alternativos de projeto e discussão com outros estudos

Foi priorizada a definição de cenários alternativos para os itens de maior relevância nos impactos totais, e que possuam soluções usuais de mercado com equivalência técnica, para verificar se a aplicação da estrutura metodológica, nestes casos, auxiliaria na redução de impactos. Portanto, neste trabalho foram definidos cenários alternativos de modelagem para o sistema de pisos, embora outras análises mais avançadas possam ser conduzidas.

O inventário deste sistema possui 9 componentes e os revestimentos de porcelanato representam a maior contribuição para 4 das 7 categorias de impacto. O cimento foi o item mais representativo para aquecimento global e depleção da camada de ozônio, pois é previsto em quantidades significativas para a regularização sarrafeada de base e na própria base para execução dos pisos. Já as argamassas de assentamento corresponderam ao maior impacto na categoria de ozônio fotoquímico. A segunda maior contribuição nas diferentes categorias também ficou concentrada entre estes três componentes citados.

Nos cenários alternativos, foram definidas soluções para substituir os revestimentos de porcelanato, resultando também na diminuição das argamassas de assentamento, utilizadas na execução dos pisos. Assim, foram mantidos no projeto apenas os quantitativos de argamassa colante e porcelanato para as áreas úmidas, como banheiros e copas. Para salas de uso administrativo e circulação foram estabelecidos 3 cenários alternativos, considerando o uso de pisos vinílico, laminado e de madeira, a partir de dados ambientais dos módulos A1-A3 obtidos de DAPs de soluções comerciais (EPD, 2022). Os dados ambientais divulgados consideram os insumos necessários para o assentamento de cada solução alternativa de piso. Os demais componentes do sistema de pisos foram mantidos conforme as definições do cenário base. A Tabela 1 apresenta os cenários alternativos definidos e na Tabela 3 do Apêndice A constam os respectivos dados de inventário.

| Sistema construtivo | Cenário | Descrição | VUP (anos) |
|---------------------|---------|---|------------|
| Pisos | Base | Porcelanato e argamassa de assentamento | 13 |
| | A | Vinílico | 10 |
| | B | Laminado | 20 |
| | C | Madeira | 25 |

Tabela 1. Descrição dos cenários alternativos definidos para o estudo de caso

Fonte: Autores

A modelagem dos cenários alternativos de pisos permitiu concluir que o piso de madeira (cenário C) apresenta o melhor desempenho ambiental, com impactos que variam de 16 a 37% do total de impactos para os pisos de porcelanato no cenário base para os módulos A1-A3 e B4, conforme resultados expressos na Figura 8. O cenário B (piso laminado) também apresentou redução significativa de impactos para todas as categorias, com resultados entre 27 a 62% em relação ao cenário base, demonstrando ser também uma solução viável quanto ao desempenho ambiental. Já o cenário A (piso vinílico) apresentou impactos superiores em relação ao cenário base para 5 das 7 categorias, e reduções singelas em outras 2 categorias. Isto se deve à VUP de 10 anos do piso vinílico, com 4 trocas no módulo B4.

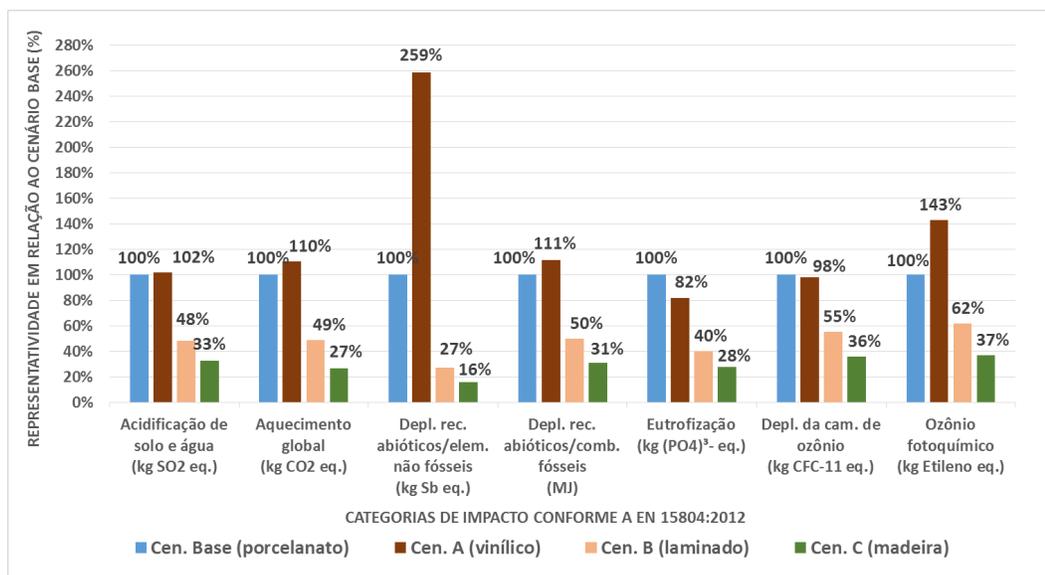


Figura 8. Comparação dos resultados de impactos ambientais dos cenários alternativos de pisos em relação ao cenário base, para os módulos A1-A3 e B4 do ciclo de vida

Fonte: Autores

Como a solução com o melhor desempenho ambiental nos módulos A1-A3 e B4 é composta por madeira, foi realizada uma análise específica, para verificar a influência das emissões do CO₂ incorporado na madeira sobre os resultados obtidos para o módulo C4, no estágio de fim de vida, no cenário C.

Para tanto, foram avaliados os impactos informados na DAP do fabricante do piso de madeira para o módulo C4, verificando-se a relevância para 4 categorias de impacto, principalmente

aquecimento global, em que a disposição do piso de madeira apresentou, isoladamente, o equivalente a 44% de todo o impacto da disposição do edifício no fim de vida, no fluxo utilizado inicialmente, sem considerar um processo específico para a madeira, na modelagem do módulo C4 (*inert waste, for final disposal*). Apesar da significativa contribuição dos processos relativos à disposição da madeira dentro das categorias do módulo C4, ainda assim, tal contribuição não foi substancial, ao ponto de alterar a representatividade do fim de vida frente aos demais estágios do ciclo de vida do estudo de caso, neste cenário C.

Considerando os resultados obtidos para os cenários alternativos, conclui-se que alterações pontuais em componentes chaves de um sistema construtivo podem auxiliar significativamente na redução de impactos de todo o ciclo de vida do edifício, sendo que a configuração de projeto ajustada para os pisos de madeira gera redução de 7% no potencial de aquecimento global de todo o ciclo de vida do edifício, por exemplo. Se considerados apenas os módulos A1-A3 e B4, as reduções dos impactos ambientais são mais significativas ainda. De igual modo, para todas as demais categorias são verificadas reduções nos impactos, em especial para a depleção de recursos abióticos – elementos não fósseis, para a qual a nova solução de projeto reduziria em 35% os impactos do ciclo de vida completo do edifício, e para as demais categorias a redução varia de 3 a 8%. Com a aplicação do método para outros sistemas construtivos relevantes em termos de impactos ambientais, estima-se que a melhoria no desempenho ambiental de todo o projeto pode ser significativamente ampliada.

Os resultados da aplicação no estudo de caso foram também comparados com outras pesquisas, preferencialmente nacionais, de modo a verificar se a estrutura metodológica propiciou a execução da modelagem de ACV com resultados aderentes à literatura pertinente. Como exemplo, em modelagem de ACV para uma escola térrea de 1.100 m² de área total, localizada em Campinas, São Paulo, Pulgrossi (2020) verificou que o módulo B4 possui maior expressividade no ciclo de vida, com mais de 60% dos impactos. Tal estudo não incluiu os módulos B6, B7 e C4, considerou o mesmo período de vida útil e base de dados desta pesquisa, com modelagem no software SimaPro. Nesta pesquisa, o módulo B4 também apresentou notoriedade nos impactos. Quanto aos sistemas construtivos, a estrutura e o envelope do edifício escolar predominaram para o aquecimento global (somados 51%) e outras duas categorias. De modo similar, nos resultados de aquecimento global para os módulos A1-A3 deste estudo de caso, as esquadrias, sistemas de vedações verticais internas e externas, estrutura e revestimentos de vedações e fachadas somaram 54% dos impactos.

Friskhnecht et al. (2019) avaliaram o ciclo de vida de um edifício de escritórios referencial com área de 2.421 m², a partir de abordagens de ACV com dados regionais de 21 países, na base Ecoinvent, com foco na comparação dos resultados de emissões de gases de efeito estufa, que ficaram entre 5,7 a 15 kgCO₂-eq/m²/ano nos diferentes países considerados. Para o aquecimento global no estágio de produção, a presente pesquisa identificou um total de 9,83 kgCO₂-eq/m²/ano, o que se alinha ao verificado pelos referidos autores.

Em pesquisa que comparou duas tipologias convencionais de habitação popular no Sul do Brasil através da ACV, com utilização de dados regionalizados, Morales et al. (2019) verificaram que os principais impactos se concentraram no estágio de uso, nos módulos B4 e B6, em 6 das 7 categorias avaliadas. O estudo considerou o escopo do berço ao túmulo, a base de dados Ecoinvent e o software OpenLCA. Para os módulos A1-A3, Morales et al. (2019) concluíram que os materiais cimentícios, metálicos e cerâmicos apresentaram a maior contribuição da categoria de aquecimento global. Tais resultados são similares aos encontrados nesta pesquisa, em que as esquadrias, pisos cerâmicos e estruturas estão entre os 5 sistemas de maior contribuição para o aquecimento global, no estágio de produção.

Mesmo com as diferenças metodológicas, de escopo e de tipologias dos edifícios em cada pesquisa, a comparação da modelagem de ACV deste estudo de caso com outras publicações

trouxe maior robustez aos resultados obtidos. Foi corroborada a maior contribuição do estágio operacional, seguido do estágio de produção, e foram confirmados os sistemas construtivos de maior relevância nas categorias de impacto. Também foi possível reforçar o entendimento de que o escopo, os critérios da modelagem de ACV e as características construtivas de cada caso podem apresentar significativa influência nos resultados, sendo de vital importância considerar tais diferenças de modelagem em análises comparativas.

Análise de sensibilidade

Para verificar a influência dos períodos de vida útil nas comparações entre os cenários base e alternativos, e considerando que os componentes podem possuir diferentes características de durabilidade, foi conduzida uma análise de sensibilidade para o sistema de pisos.

Na análise inicial, foi considerado o cenário base com VUP de 13 anos, com 3 reposições integrais, e para os cenários A, B e C, a VUP considerada foi, respectivamente, de 10, 20 e 25 anos, de acordo com o informado pelo fabricante das soluções. Na análise de sensibilidade, foram avaliadas outras duas situações de vida útil, considerando uma substituição adicional dos cenários B e C, em relação à análise inicial; e duas substituições adicionais dos cenários B e C em relação ao previsto inicialmente. Nas duas análises de sensibilidade, se considerou uma substituição a menos dos pisos de porcelanato, em relação à análise inicial. Um resumo da análise conduzida pode ser verificado na Tabela 2.

| Cenário | Descrição do sistema de pisos | Substituições consideradas no módulo B4 | | |
|---------|---|---|----------------------------|----------------------------|
| | | Análise inicial | Análise de sensibilidade 1 | Análise de sensibilidade 2 |
| Base | Porcelanato e argamassa de assentamento | 3 | 2 | 2 |
| A | Vinílico | 4 | 4 | 5 |
| B | Laminado | 2 | 3 | 4 |
| C | Madeira | 1 | 2 | 3 |

Tabela 2. Estrutura da análise de sensibilidade conduzida para o sistema de pisos

Fonte: Autores

Através da análise de sensibilidade 1, verificou-se que a solução dos pisos de madeira resulta em menores impactos ambientais quando considerado o mesmo número de substituições dos pisos em porcelanato, ao longo do estágio de uso do ciclo de vida. Na situação de uma substituição dos pisos de madeira a mais que os pisos de porcelanato (análise de sensibilidade 2), a solução alternativa do cenário C mantém menores impactos em 4 categorias avaliadas e, nas outras 3, apresenta um acréscimo discreto em relação aos impactos da solução do cenário base.

Portanto, a análise de sensibilidade permitiu concluir que a influência das definições dos períodos de vida útil dos materiais no módulo B4 não foi tão significativa, ao ponto de inviabilizar, sob o aspecto do desempenho ambiental, a adoção da configuração alternativa de projeto.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação de soluções de sustentabilidade nos edifícios públicos ainda é limitada, embora exista legislação que trate do tema, da Administração Pública cobrir uma parcela significativa da construção de edifícios no contexto brasileiro, e do setor da construção possuir protagonismo nos impactos ambientais globais. Frente a isso, este estudo propôs uma estrutura metodológica baseada na técnica de ACV, a partir de revisão sistemática sobre os métodos e lacunas existentes, de modo a subsidiar a tomada de decisão de projetistas e equipes técnicas sobre o desempenho ambiental na concepção de edifícios públicos.

Os resultados da aplicação do *framework* em um estudo de caso mostraram que, com a análise de cenários alternativos de projeto, foi possível reduzir até 35% dos impactos do cenário base para depleção de recursos abióticos – elementos não fósseis, de 7% de aquecimento global, e reduções que variam de 3 a 8% nas demais categorias de impacto. Assim, a alteração pontual em um sistema construtivo com expressiva contribuição nos impactos gerou melhorias significativas no desempenho ambiental de todo o edifício.

Quanto às limitações desta pesquisa, a aplicação do *framework* foi restrita a um estudo de caso, e a definição de cenários alternativos de soluções construtivas foi realizada para um sistema construtivo, apenas. Os dados da modelagem de ACV foram adaptados apenas parcialmente para o contexto regional, embora tenha se priorizado o uso de dados nacionais, quando disponíveis. Outra limitação se refere aos períodos de vida útil considerados a partir da NBR 15575:2021, voltada a edifícios residenciais, sendo que em outras aplicações, dados reais podem influenciar nos resultados obtidos (ABNT, 2021). No que se refere aos estágios do ciclo de vida, embora o módulo B6 possua significativa contribuição nos impactos totais, a redução dos seus impactos através de alterações de projeto demandaria uma análise complexa, contemplando, por exemplo, simulações energéticas, avaliação do sistema de climatização e da envoltória do edifício, fatores que geralmente possuem grande influência no consumo energético. Tais avaliações não foram contempladas no escopo do estudo.

A estrutura metodológica pode ser aperfeiçoada, para aplicação de forma mais independente por projetistas e profissionais de instituições públicas, sem demandar o acompanhamento de especialistas ambientais. Melhorias também podem ser obtidas incluindo-se a análise de aspectos dinâmicos do ciclo de vida dos edifícios, inserção de dados mais precisos da fase operacional, com um detalhamento da estrutura proposta e a consequente obtenção de resultados de impactos mais robustos. Portanto, em pesquisas futuras, sugere-se que o *framework* seja testado em outros estudos de caso de projetos de edifícios públicos, a fim de verificar sua adequação, limitações e possíveis melhorias, assim como o desenvolvimento de trabalho conjunto com instituições públicas para sua aplicação em contratações para elaboração de projetos, com acompanhamento de sua execução.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, através do projeto PQ 2021 nº 310208/2021-1), pelo apoio recebido para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Referências Bibliográficas

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009 a.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044**: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro, 2009 b.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1**: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16636**: Elaboração e desenvolvimento de serviços técnicos especializados de projetos arquitetônicos e urbanísticos – Partes 1 e 2. Rio de Janeiro, 2017.

- AZARIJAFARI, H.; SAFARI, K. Challenges and opportunities for integrating BIM and LCA: Methodological choices and framework development. **Sustainable Cities and Society**. 67, 102728. 2021.
- AZZOUZ, A. et al. Life cycle assessment of energy conservation measures during early stage office building design: A case study in London, UK. **Energy and Buildings**. 139, p. 547-568. 2017.
- BASBAGILL, J. P. et al. Measuring the impact of dynamic life cycle performance feedback on conceptual building design. **Journal of Cleaner Production**. 164, p. 726-735. 2017.
- BRASIL, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Instrução Normativa nº. 01/2010**. Brasília, 2010.
- BRASIL. **Decreto nº. 7.746**, de 5 de junho de 2012. Estabelecimento de critérios e práticas para a promoção do desenvolvimento nacional sustentável nas contratações públicas. Brasília, 2012.
- BRASIL. **Decreto nº. 10.306**, de 2 de abril de 2020. Utilização do BIM na Administração Pública Federal. Brasília, 2020.
- BRASIL. **Lei nº. 14.133**, de 1º de abril de 2021. Lei de Licitações e Contratos Administrativos. Brasília, 2021.
- BRETAS, E. S. **O processo de projetos de edificações em instituições públicas: proposta de um modelo simplificado de coordenação**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG. Belo Horizonte, 2010.
- CARVALHO, M. T. M. et al. **Gerenciamento de Obras Públicas**. Texto para discussão. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Rio de Janeiro, 2017.
- CAXIAS, Prefeitura Municipal de Caxias – Maranhão. Concorrência nº. 003/2021. Disponível em: <http://sis.caxias.ma.gov.br/ccl/admin/view/14702450-72dc-11ec-82a6-83129bccf130>. Acesso em: 19 fev. 2022.
- CEN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 15978:2011**: Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method. Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2011.
- CEN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 15804:2012 + A1:2013**: Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2013.
- CEN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 15804:2012 + A2:2019**: Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. Luxemburg: Publications Office of the European Union, 2019.
- COELHO FILHO, O. et al. **A avaliação do ciclo de vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil**. Texto para discussão. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília, 2016.
- DALLA MORA, T. et al. Key Parameters Featuring BIM-LCA Integration in Buildings: A Practical Review of the Current Trends. **Sustainability**. 12, 7182. 2020.
- DEJACO, M. C. et al. Combining LCA and LCC in the early-design stage: a preliminary study for residential buildings technologies. **IOP Conference Series: Earth Environmental Science**. 588, 042004. 2020.

DIAS, L. C. et al. Eco-efficiency in early design decisions: A multimethodology approach. **Journal of Cleaner Production**. 283, 124630. 2021.

DUPREZ, S. et al. Improving life cycle-based exploration methods by coupling sensitivity analysis and metamodels. **Sustainable Cities and Society**. 44, p. 70-84. 2019.

ECOINVENT, Life Cycle Inventory (LCI) database. Versão 3.6. Zurique: Ecoinvent, 2019. Disponível em: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/data-releases/ecoinvent-3-6/>. Acesso em: 28 dez. 2022.

EPD, The International Environmental Product Declarations System. Disponível em: <https://www.environdec.com/home>. Acesso em 06 jun. 2022.

FRISCHKNECHT, R. et al. Comparison of the environmental assessment of an identical office building with national methods. **IOP Conference Series: Earth Environmental Science**. 323, 012037. 2019.

GBCBRASIL, Green Building Council Brasil. Disponível em: <https://www.gbcbrazil.org.br/certificacoes/>. Acesso em 28 dez. 2022.

GOMES, V.; BARROS, N. N. Contribuição da modelagem BIM para facilitar o processo de ACV de edificações completas. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, São, Carlos, v. 13, n. 2, p. 19, 2018.

GOMES, V. et al. Exploring lifecycle energy and greenhouse gas emissions of a case study with ambitious energy compensation goals in a cooling-dominated climate. **Energy and Buildings**, v. 173, p. 302-314. 2018.

HASIK, et al. Whole building life cycle environmental impacts and costs: A sensitivity study of design and service decisions. **Building and Environment**. 163. 2019.

HESTER, J. et al. Building design-space exploration through quasi-optimization of life cycle impacts and costs. **Building and Environment**. 144, p. 34-44. 2018.

HOLLBERG, A. et al. A data-driven parametric tool for under-specified LCA in the design phase. **IOP Conference Series: Earth Environmental Science**. 588, 052018. 2020.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa anual da Indústria da Construção**. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=754>. Acesso em: 25 set. 2021.

IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 23 set. 2021.

JOHN, V. M. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. G Isaia, editor. **IBRACON**, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.

JUSSELME, T. et al. An integrative approach for embodied energy: Towards an LCA-based data driven design method. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 88, p. 123-132. 2018.

KANAFANI, K. et al. Early Design Stage Building LCA using The LCAbyg Tool: New Strategies For Bridging The Data Gap. **IOP Conference Series: Earth Environmental Science**. 323, 012117. 2019.

KREINER, H. et al. A new systemic approach to improve the sustainability performance of office buildings in the early design stage. **Energy and Buildings**. 109, p. 385-396. 2015.

KUMANAYAKE, R.; LUO, H. Development of automated tool for buildings' sustainability assessment in early stage design. **Procedia Engineering**. 196, p. 903-910. 2017.

LOBACCARO, G. et al. Parametric design to minimize the embodied GHG emissions in a ZEB. **Energy and Buildings**. 167, p. 106-123. 2018.

- MARSH, R. LCA profiles for building components: strategies for the early design process. **Building Research and Information**. 44, p. 358-375. 2016.
- MEEEX, E. et al. Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design. **Building and Environment**. 133, p. 228-236. 2018.
- 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**. 238, 117869. 2019.
- MPF, Ministério Público Federal. **Projeto padrão para construção de sedes de Procuradorias da República nos Municípios**. Brasília, 2019.
- NILSEN, M. BOHNE, R. A. Evaluation of BIM based LCA in early design phase (low LOD) of buildings. **IOP Conference Series: Earth Environmental Science**. 323, 012119. 2019.
- OPENLCA, Open source software for sustainability assessment. Versão 1.10.2. Berlim: GreenDelta, 2019. Disponível em: <https://www.openlca.org/>. Acesso em: 28 dez. 2022.
- PASSER, A. et al. BIM and LCA Integration: A Systematic Literature Review. **Sustainability**. 12, 5534. 2020.
- PROCEL, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, 2022. Disponível em: <http://www.eletrobras.com/pci/main.asp?View=%7b8E03DCDE-FAE6-470C-90CB-922E4DD0542C%7d>. Acesso em: 28 dez. 2022.
- PULGROSSI, L. M. **Influência das regras de corte nos resultados de avaliação do ciclo de vida de edificações completas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2020.
- ROBERTS, M. ALLEN, S. COLEY, D. Life cycle assessment in the building design process – A systematic literature review. **Building and Environment**. 185. 2020.
- SEV, A. How can the construction industry contribute to sustainable development? A conceptual framework. **Sustainable Development**. 17, p. 161-173. 2009.
- TCU, Tribunal de Contas da União. **Obras Públicas – Recomendações básicas para a contratação e fiscalização de obras de edificações públicas**. 4ª. ed. Brasília, 2014.
- TCU, Tribunal de Contas da União. **Sustentabilidade na Administração Pública Federal. Sumário Executivo**. Brasília, 2017.
- TIMM, J. F. G. et al. Green public procurement model for environmental assessment of constructive systems. **International Journal of Construction Management**. 2021.
- UNEP. **Buildings and Climate Change – Summary of Decision Makers**. França, 2009. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/32152>. Acesso em: 24 set. 2021.
- WAN OMAR, W. M. S. A hybrid life cycle assessment of embodied energy and carbon emissions from conventional and industrialised building systems in Malaysia. **Energy and Buildings**. 167, p. 253-268. 2018.
- WEF, Shaping the Future of Construction - a Breakthrough in Mindset and Technology. Prepared in collaboration with The Boston Consulting Group. **World Economic Forum**. 2016.
- YAN, H. et al. Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong. **Building and Environment**, 45. p. 949-955. 2010.

Juliano Libraga da Silva
jlibraga@gmail.com

Ana Passuello
ana.passuello@ufrgs.br