AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL PARA UMA PROPOSTA DE HABITAÇÃO SOCIAL ADAPTÁVEL

ENVIRONMENTAL PERFORMANCE ASSESSMENT FOR AN ADAPTIVE SOCIAL HOUSING PROPOSAL

Patricia Dacosta Freitas [1]; Thiago Melo Grabois [2].

[1]Mestre | patricia.freitas@fau.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil; [2]Doutor | grabois@fau.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil.

Resumo:
Construções pouco adaptáveis estão sujeitas à obsolescência prematura quando são incapazes de acomodar mudanças físicas e sociais, contribuindo para a geração de resíduos de demolição e, de forma indireta, com emissões de gases do efeito estufa associados à construção de novas estruturas. Empreendimentos vinculados ao Programa Minha Casa Minha Vida, destinado ao financiamento de habitação social no Brasil, são caracterizados pela limitada adaptabilidade. Essa restrição frequentemente leva usuários a realizarem adaptações de forma autoconstruída, ocasionalmente resultando em cômodos inadequados. O objetivo desta pesquisa foi compreender a relação entre a adaptabilidade e o impacto ambiental em habitação social. O objetivo específico foi, com base em uma tipologia amplamente reproduzida no Programa, desenvolver um modelo atualizado e outro adaptável, comparando o desempenho ambiental dos três por meio de uma Avaliação do Ciclo de Vida simplificada, sob a ótica das camadas da construção. Os resultados indicam que, embora o modelo adaptável ofereça benefícios relevantes ao usuário, está associado à maiores emissões de carbono. A avaliação por camadas da construção permitiu identificar os sistemas adaptáveis propostos mais impactantes e propor ajustes. Desdobramentos futuros incluem uma análise ambiental abrangente, considerando todas as fases do ciclo de vida, de modo a ampliar a compreensão dos impactos à luz dos benefícios ao usuário.

Palavras-chave:
Adaptabilidade; Habitação social; Impacto ambiental; Sustentabilidade; ACV.

Abstract:
Poorly adaptable buildings are prone to premature obsolescence when they fail to accommodate physical and social changes, contributing to the generation of demolition waste and, indirectly, to greenhouse gas emissions associated with the construction of new structures. Social housing developments implemented under Brazil's *Minha Casa Minha Vida* Program, designed to finance affordable housing, are notably characterized by limited adaptability. This often prompts users to conduct self-constructed adaptations, which may result in inadequate spaces. The objective of this research was to examine the relationship between adaptability and environmental impact in social housing. The specific aim was to develop an updated and adaptable model, based on a typology widely replicated in the Program, and compare the environmental performance of all three through a simplified Life Cycle Assessment, considering the layers of construction. The results indicate that, although the adaptable model provides notable benefits to users, it is associated with increased carbon emissions. The layer-based assessment facilitated the identification of the most environmentally impactful adaptable systems and the proposition of adjustments. Future developments include a comprehensive environmental analysis encompassing all life cycle phases, with the goal of enhancing understanding of environmental impacts in light of user benefits

Keywords:
Adaptability; Social housing; Environmental impact; Sustainability; LCA.

1. INTRODUÇÃO

A adaptabilidade é reconhecida como uma estratégia fundamental para mitigar os impactos ambientais do ambiente construído. Essa abordagem favorece a sustentabilidade do setor ao estender a vida útil das edificações, prevenindo sua obsolescência prematura, física ou social (Hamida *et al*., 2022). Estruturas facilmente adaptáveis facilitam o reuso de construções existentes, contribuindo para a redução da extração de matérias-primas (Langston, 2008) e emissões incorporadas à novas construções (Heidrich *et al*., 2017). Além disso, favorece a redução da geração de resíduos provenientes da demolição, estimados em cerca de 45 milhões de toneladas no ano de 2023, apenas no Brasil (ABREMA, 2023).

Com base nesse conjunto de informações, é importante voltar a atenção ao papel desempenhado pelo Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) no suprimento habitacional recente no Brasil. Apesar de seu inegável alcance e relevância, estudos tem demonstrado que unidades residenciais financiadas pelo Programa são frequentemente reformadas e adaptadas por seus usuários, embora não tenham sido projetadas e construídas considerando tal cenário (Simões e Leder, 2024; Villa *et al*., 2022; Garrefa *et al*., 2021). A adaptabilidade emerge, nesse contexto, de forma reativa e autoconstruída, frequentemente resultando em cômodos inadequados e comprometendo soluções existentes de condicionamento térmico passivo, afetando, em última análise, a qualidade de vida dos usuários (Simões e Leder, 2024).

Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi desenvolver um modelo de habitação social unifamiliar adaptável compatível com a realidade do setor da construção brasileiro, e avaliar o seu desempenho ambiental, comparando-o à uma tipologia de habitação social representativa da produção nacional. Como objetivo específico, buscou-se compreender a relação entre a adaptabilidade e as emissões de carbono incorporadas aos sistemas adaptáveis propostos. A presente pesquisa busca preencher a lacuna na produção acadêmica brasileira sobre adaptabilidade, conforme identificada por Henriques (2021). O estudo se limita à compreensão dos impactos ambientais, com o objetivo específico de determinar e comparar as emissões de CO2 incorporadas aos materiais, componentes e sistemas empregados nos três modelos estudados.

Entre as limitações, destacam-se a escolha da tipologia habitacional unifamiliar, visto que outras configurações poderiam se beneficiar melhor de estratégias de adaptabilidade distintas daquelas adotadas no modelo proposto; e a ausência de análises relacionadas aos custos, como a avaliação do custo do ciclo de vida, fator central na discussão sobre habitação de interesse social.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Desde que o PMCMV foi criado, em 2009, mais de 6 milhões de residências já foram entregues (Brasil, 2023). Apesar da sua evidente relevância para a redução do déficit habitacional, a estratégia adotada em empreendimentos financiados pelo Programa frequentemente se baseia na reprodução de tipologias padronizadas e na implantação repetitiva, resultando, em muitos casos, em espaços públicos de baixa qualidade espacial (Simões e Leder, 2024) e paisagens urbanas monótonas (Cardoso, 2017). Tal estratégia perpetua a reprodução de um modelo cujos problemas já foram extensivamente documentados (CMAP, 2021; Simões e Leder, 2024; Villa *et al*., 2022; Garrefa *et al*., 2021; Bergan, 2005).

Adaptações autoconstruídas tornam-se comuns em ditos empreendimentos, abrangendo desde ajustes pontuais até remodelações por completo (Bergan, 2005, p. 93). As principais motivações por trás dessas adaptações incluem falhas de projeto, dimensões reduzidas dos imóveis, baixa privacidade, ausência de espaço para atividades laborais e a baixa qualidade construtiva (Simões e Leder, 2024; Villa *et al*., 2022; Garrefa *et al*., 2021). As áreas de serviços, cozinha e banheiro são frequentemente adaptadas, a fim de melhorar as condições de ventilação e iluminação naturais (Bergan, 2005, p. 9). Outras modificações comuns incluem a ampliação da unidade para adição de espaços destinados ao trabalho, alterando o uso originalmente previsto (Simões e Leder, 2024; Garrefa *et al*., 2021).

Estudos que exploram alternativas para aprimorar a qualidade espacial e construtiva das tipologias residenciais comumente reproduzidas pelo PMCMV, do ponto de vista do desempenho ambiental, são relativamente comuns na literatura acadêmica brasileira.

Bianchi *et al*. (2021) compararam três sistemas construtivos para a tipologia de habitação social unifamiliar térrea isolada (HUT) e os resultados indicam que o sistema *light steel frame* demonstra o melhor desempenho ambiental quando comparado aos sistemas de concreto armado com fechamento em alvenaria e alvenaria estrutural. De Melo *et al*. (2023) analisaram o desempenho ambiental de cinco tipologias típicas de habitação social, utilizando dez combinações de materiais. Os resultados indicaram que, para a tipologia HUT, o sistema de estrutura de madeira combinado com bioconcreto apresentou o melhor desempenho ambiental, enquanto o sistema de alvenaria convencional de blocos de concreto mostrou-se o mais impactante. Fischer e Schmid (2017) compararam o impacto ambiental de uma tipologia HUT com uma alternativa adaptável baseada no sistema *wood frame*. Os resultados indicam que a versão adaptável apresentou um desempenho ambiental superior em comparação ao projeto original, em alvenaria estrutural.

O conceito de adaptabilidade em projeto está relacionado à implementação de estratégias que capacitam as construções a serem reconfiguradas ou convertidas para acomodar mudanças em sua função ou uso ao longo de toda a vida útil, visando minimizar o risco de demolição (Dams *et al*., 2021; Ross *et al*., 2016) e maximizar o tempo em que materiais permanecem no ciclo de vida da construção, reduzindo a geração de resíduos (Hasani, Riggio, 2025).

Diversos autores destacam as contribuições de John Habraken para a consolidação do paradigma da adaptabilidade em arquitetura (Ottenhaus *et al*., 2023; Watt *et al*., 2023). Partindo da identificação dos níveis de controle na construção, o arquiteto propõe a separação entre camadas de suporte e de recheio: a primeira, sob responsabilidade de arquitetos e entidades governamentais, deve oferecer toda a infraestrutura necessária para as camadas de recheio, estas sob responsabilidade e gestão dos usuários (Habraken, 2019, p. 77). A coordenação modular, a pré-fabricação e a estandardização de componentes de recheio são recursos importantes para esse fim (Habraken, 2002).

A metodologia *Open Building* (OB), baseada nas proposições de Habraken, visa o desenvolvimento de projetos que incorporem recursos para que uma construção possa ser facilmente adaptada pelo usuário, conforme suas demandas mutáveis de uso e função (Kendall e Teicher, 2010). O OB visa ampliar a vida útil da construção, promovendo, simultaneamente, a autodeterminação dos usuários e a construção de estruturas mais resilientes e sustentáveis (Open Building, 2025).

Outras contribuições relevantes para a consolidação do paradigma da adaptabilidade incluem a separação das camadas da construção por tempo de vida útil e funcionalidade, proposta por Brand (1994), com base nas contribuições de Duffy (1992). A separação das camadas garante que camadas com tempo de vida mais longo não bloqueiem processos de manutenção e/ou substituição de camadas com o tempo de vida curto, que limitariam a vida útil do conjunto (Ottenhaus *et al*., 2023).

A metodologia *Design for Disassembly and Adaptability* (DfD/A) fornece um bom ponto de partida para explorar os vários aspectos da adaptabilidade na construção. O objetivo do DfD/A é orientar o projeto para construções que possam se adaptar a demandas mutáveis ou que possam ser desmontadas para o reuso ou reciclagem, enfatizando a versatilidade, conversibilidade e expansibilidade (ABNT, 2020). Desmembrando o conceito DfD/A, pode-se dizer que os princípios do *Design for Disassembly* (DfD) dizem respeito à gestão de componentes e materiais enquanto o *Design for Adaptability* diz respeito ao uso do espaço (Salama, 2017).

Aspectos relevantes do DfD para a adaptabilidade incluem o uso de materiais duráveis, seguros para a saúde humana, recicláveis e disponíveis localmente; uso de conexões resistentes, repetitivas, comuns, reversíveis e acessíveis; e o uso de componentes leves e que permitem o manuseio manual (Grze´skowiak e Baborska-Naro˙zny, 2023). Estruturas e componentes devem ser modulares, expansíveis, montados por encaixes mecânicos, e superdimensionados para acomodar eventuais ampliações ou mudanças de funções (Hassani e Riggio, 2025).

Referentes à adaptabilidade do espaço, uso e função, aspectos chave são a planta livre e ampla, o uso de divisórias móveis, um pé direito generoso (Hassani e Riggio, 2025, Geraedts, 2016), e o desenho universal para acessibilidade (Estaji, 2017; Gosling *et al*., 2013). Relevante à habitação, o princípio da incrementalidade é fundamental para acomodar processos de retração e expansão das famílias (Ottenhaus *et al*., 2023; Hipwood, 2022), ou ainda, especialmente no caso da habitação social, a possibilidade de converter espaços para a geração de renda (O'Brien, Carrasco e Dovey, 2020). Somam-se à incrementalidade os princípios de indeterminação (Till e Schneider, 2005) e incompletude (Askar, Bragança e Gervásio, 2021), seguindo a abordagem "*loose-fit*" que preconiza a adaptabilidade por meio da autodeterminação do usuário (Till e Schneider, 2005).

3. MÉTODOS

Considerando o predomínio da tipologia residencial unifamiliar no estoque habitacional brasileiro (IBGE, 2025), foram propostos dois modelos alternativos baseados numa tipologia HUT amplamente reproduzida em empreendimentos financiados pelo PMCMV, cujas especificações estão disponíveis na publicação Cadernos Caixa (2007), designado como "modelo OR". O modelo acessível proposto, denominado "modelo AC," se baseia no modelo OR, porém incorpora o desenho universal e atualiza as especificações, em conformidade com as normas NBR 15575 (ABNT, 2013) e NBR 9050 (ABNT, 2015), adicionando camadas construtivas que conferem maior qualidade à unidade. O modelo adaptável proposto, denominado "modelo AD," preserva a volumetria original do modelo OR, mas introduz sistemas construtivos fundamentados nas diretrizes da adaptabilidade, conforme levantadas na subseção 2. Em seguida, o desempenho ambiental dos três modelos é comparado por meio da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) simplificada, limitada às emissões de CO2, do berço ao portão.

3.1. MODELOS OR, AC & AD

As plantas baixas dos modelos OR, AC e AD estão representados na Figura 1. O modelo AC distingue-se do modelo OR em três aspectos principais: (i) a alvenaria estrutural do modelo OR é composta por blocos da família 40, com 10 cm de espessura, enquanto no modelo AC foram especificados blocos da família 30, com 15 cm de espessura – além da modularização mais eficiente, essa espessura garante maior inércia térmica; (ii) o modelo AC incorpora amarrações verticais nos encontros das empenas e nas laterais das aberturas, aumentando a qualidade da construção; e (iii) o piso originalmente especificado como uma camada de concreto magro de 5 cm sobre piso apiloado, seguida de uma camada de cimentado liso com 2,5 cm de espessura, foi substituído por um piso em concreto armado, com traço 1:2:3 e espessura de 10 cm, agregando maior qualidade e robustez ao modelo. Demais especificações do modelo OR e reproduzidas no modelo AC podem ser consultadas na publicação Cadernos Caixa (Caixa, 2007).

O modelo AD, por sua vez, distingue-se do modelo OR por incorporar um conjunto de estratégias voltadas à adaptabilidade da unidade, selecionadas com base na viabilidade para habitação social e alinhando-se às práticas construtivas convencionais do setor no Brasil. Entre as soluções adotadas, destacam-se: planta livre, viabilizada pela estrutura em pórticos de concreto armado moldado *in loco*; pilares com seção quadrada (Geraedts, 2016), visando a adequação à malha modular; pé-direito generoso (*ibid*.); painéis móveis, inspirados na publicação Habitação Social em Madeira (HSM) (Brasil, 2024), pré-fabricados e montados por encaixes reversíveis; piso duplo no quadrante das "áreas molhadas", garantindo o fácil acesso às infraestruturas de serviços; acessibilidade; fachada livre; superdimensionamento de estruturas; encaixes mecânicos e reversíveis para o madeiramento do piso, do forro e da cobertura. Por fim, o fechamento lateral em alvenaria permite a implantação na tipologia de sobrado geminado, além de se tratar de uma solução convencional ao setor.

Os painéis especificados na publicação HSM (Brasil, 2024) foram adaptados no modelo AD como painéis móveis, com modificações para aprimorar o conforto térmico e acústico, além de permitir a passagem das instalações elétricas e hidrossanitárias. Os painéis, compostos por montantes de madeira plantada, passam a incluir recheio de lã de vidro e diferentes tipos de fechamento,

incluindo: (i) fechamento em chapa OSB nas divisórias internas; (ii) fechamento em placa cimentícia nas divisórias das “áreas molhadas;” e (iii) painéis de fachada com fechamento interno em chapa OSB e externo em tábuas maciças com encaixe macho-fêmea. O sistema de painéis móveis é complementado pelo sistema de forro, uma vez que a altura do pé direito deve ser constante para garantir a livre movimentação dos painéis.

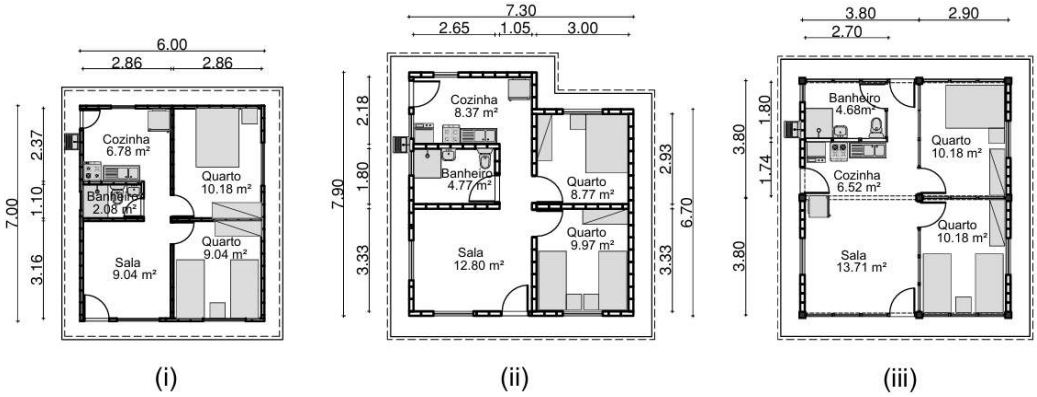

Figura 1 Plantas baixas dos modelos (i) original, (ii) acessível e (iii) adaptável
Fonte: os autores, com base na publicação Cadernos Caixa (2007)

A subseção 3.2 descreve a ACV comparativa entre os três modelos analisados. A principal base de dados empregada nessa etapa foi o Sidac, sendo aquela que melhor representa as particularidades dos setores produtivo e energético brasileiros. Para aqueles componentes e materiais que não estão catalogados no Sidac, foram realizadas as seguintes adequações às especificações descritas na publicação Cadernos Caixa (2007): (i) a telha tipo plan foi substituída nos três modelos pela telha tipo americana; e (ii) a argamassa de assentamento no traço 1:0,5:8 foi substituída nos três modelos pela argamassa no traço 1:1:6.

3.2. METODOLOGIA ACV SIMPLIFICADA

A presente avaliação tem como finalidade comparar o desempenho ambiental dos modelos OR, AC e AD. A base para a avaliação do desempenho ambiental utilizado nesta pesquisa é a ACV simplificada (Crawford, 2011, p. 42), considerando exclusivamente as emissões de CO2 de berço-ao-portão. A unidade funcional adotada nesta pesquisa foi de 1m² de construção.

Conforme mencionado, a principal base de dados utilizada nesta pesquisa foi o Sidac (2025). As emissões de materiais e componentes não catalogados no Sidac foram determinadas segundo diferentes fontes: a Declaração Ambiental de Produto da fabricante Isover (2016) para a lã de vidro; a pesquisa de Costa *et al*. (2024) para as chapas de OSB; e o banco de dados Ecoinvent V.3 para as placas cimentícias. O consumo energético dos materiais é informado no Sidac em mega joules, sendo convertida para quilowatts-hora e multiplicada pelo fator médio anual de emissões do setor elétrico da região Sudeste do Brasil, conforme os dados do banco de dados Ecoinvent V.3.

No caso de componentes especificados que não estão constam no Sidac, foi adotado um fator de conversão a elementos similares disponíveis no sistema, com base na diferença de volume: (i) para o bloco estrutural de 09 x 19 x 39 cm, foram consideradas as emissões do bloco de 14 x 19 x 29 cm, com uma redução de 36%; (ii) para a lajota cerâmica utilizada no sistema de laje pré-moldada, com dimensões de 20 x 30 x 08 cm, especificada nos modelos OR e AC, foram consideradas as emissões do bloco estrutural cerâmico de 14 x 19 x 29 cm, com uma redução de 38%; e (iii) para os blocos de concreto estrutural de 14 x 19 x 29 cm, foram consideradas as emissões do bloco de concreto estrutural de 14 x 19 x 39 cm, com uma redução de 26%.

O quantitativo de consumo foi obtido por meio da modelagem dos três modelos no software *Rhinoceros*, com exceção do consumo das telhas, que foi determinado com base nas informações disponíveis no Sidac. O Inventário de Ciclo de Vida foi elaborado no programa *Microsoft Excel*.

Os resultados foram organizados considerando as emissões por camadas da construção, em referência à recomendação bem estabelecida no paradigma da adaptabilidade em construção. A separação proposta inclui camadas de fundações, piso, estrutura e fechamento, divisórias internas, forro e cobertura. Dado que a lógica da separação por camadas encontra uma barreira no sistema de alvenaria estrutural, foi proposto que as paredes internas dos modelos OR e AC componham a camada de "divisórias internas," enquanto as paredes externas componham a camada de "estrutura e fechamento." No modelo AD, isso significa que, além da estrutura em concreto armado, os painéis móveis nas fachadas de frente e fundos também compõem o sistema de fechamento e estrutura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados revelaram que o desempenho ambiental dos sistemas adaptáveis propostos no modelo AD está condicionado à origem da madeira nativa. Isso ocorre pelo elevado consumo desse material, especialmente nas camadas de piso, divisórias internas, fechamento externo e forro, sendo frequentemente usado em substituição total ou parcial de sistemas e componentes com uso intensivo do concreto nos modelos OR e AC.

O Sidac considerando três tipos de manejo para a madeira nativa, sendo eles com ou sem manejo florestal ou certificada pelo *Forest Stewardship Council* (FSC), abreviados nesta pesquisa como MCM, MSM e M FSC respectivamente. Os resultados revelam que a especificação da M FSC é uma estratégia eficaz para reduzir as emissões totais de todos os modelos e, particularmente, do modelo AD, conforme demonstra a Figura 2.

Porém, ainda que especificado com a M FSC, o modelo AD apresenta as maiores emissões totais, com uma diferença de aproximadamente 54 kg CO_2 em relação ao modelo AC e cerca de 250 kg CO_2 em relação ao modelo OR. A diferença significativa entre as emissões dos modelos AD e OR pode ser atribuída, em parte, à exclusão de camadas construtivas relevantes para a qualidade da unidade habitacional, o que se traduz num menor consumo de materiais e, consequentemente, numa pegada de carbono inferior em comparação aos demais modelos. O mesmo não ocorre em relação ao modelo AC, que representa uma versão atualizada do modelo OR e, portanto, tem um consumo de material mais elevado, associado a um aumento das emissões.

Conforme apresenta na Figura 2, quando as emissões da M FSC são consideradas para todos os modelos, os materiais cimentícios passam a representar o maior volume de emissões. Considerando apenas as emissões associadas aos materiais cimentícios, o modelo AC demonstra a maior pegada de carbono, seguido pelos modelos AD e OR. Embora a alvenaria estrutural em blocos de concreto ocorra nos modelos OR e AC, a espessura dos blocos no modelo AD, somada à amarração vertical nas empenas e o piso em concreto armado eleva a participação das emissões do concreto no total de emissões.

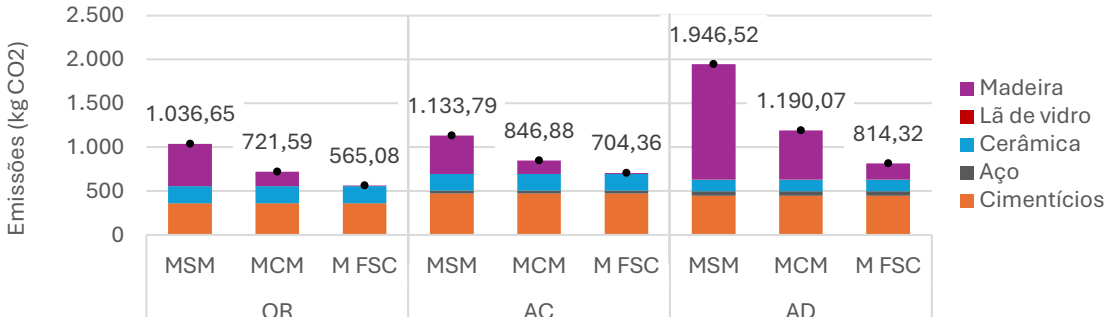

Figura 2: Emissões totais dos modelos OR, AC e AD, considerando as diferentes origens da madeira
Fonte: os autores

Já no modelo AD, a Figura 3 demonstra que as emissões dos materiais cimentícios são principalmente associadas ao uso do concreto traço 1:2:3, presente nas camadas de fundação, estrutura e piso. Esse resultado revela que modificações em projeto visando reduzir a pegada de

carbono do modelo AD, e considerando o uso da M FSC, devem estar focadas em alternativas para reduzir o consumo de materiais cimentícios, nominalmente do concreto traço 1:2:3.

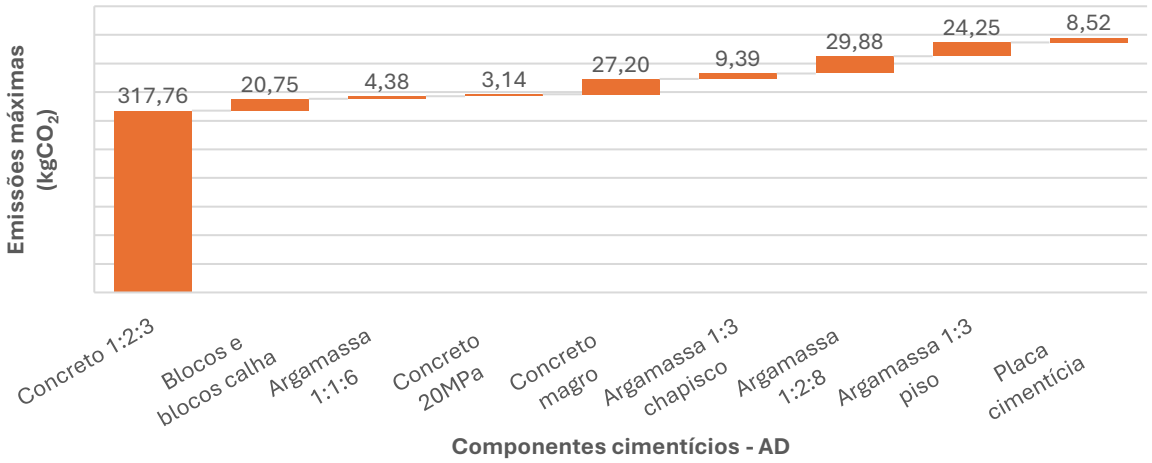

Figura 3: Emissões por materiais cimentícios no modelo AD
Fonte: os autores

Ao analisar a pegada de carbono por camada da construção, conforme a Figura 4 (considerando as emissões da MSM) e a Figura 5 (considerando as emissões da M FSC), observa-se que, no modelo AD, a substituição de componentes e materiais cimentícios por sistemas alternativos com uso intensivo de madeira resultou na redução das emissões totais do modelo, desde que a M FSC seja especificada. A redução das emissões é mais evidente nas camadas de divisórias internas, forro e piso.

Quanto às camadas de estrutura e fechamento, embora os painéis móveis tenham substituído parcialmente a alvenaria de fechamento no modelo AD, o uso intensivo do concreto na camada de estrutura contribuiu para manter as emissões totais desse conjunto de camadas mais elevada em relação aos demais modelos.

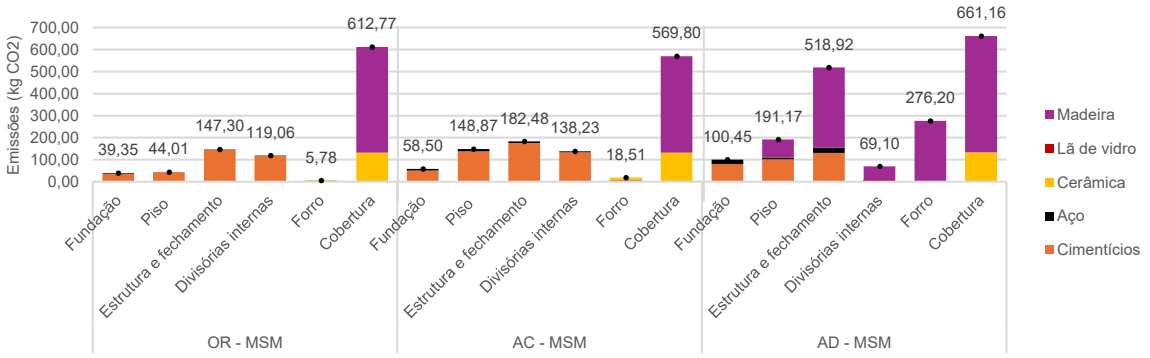

Figura 4: Emissões por camadas da construção nos modelos OR, AD e AD, considerando as emissões da MSM
Fonte: os autores

A Figura 5 revela que a composição AD–M FSC apresenta menor pegada de carbono em relação à composição OR–M FSC apenas nas camadas de divisórias internas e na combinação divisórias-forro. Já em relação à composição AC–M FSC, o modelo AD–M FSC apresenta menor pegada de carbono nas camadas de piso, divisórias internas e forro. A redução da pegada de carbono que os sistemas adaptáveis do modelo AD–M FSC apresentam em relação aos sistemas convencionais no modelo AC–M FSC é particularmente significativo por se tratar de três camadas que agregam enormes benefícios em relação à adaptabilidade da unidade.

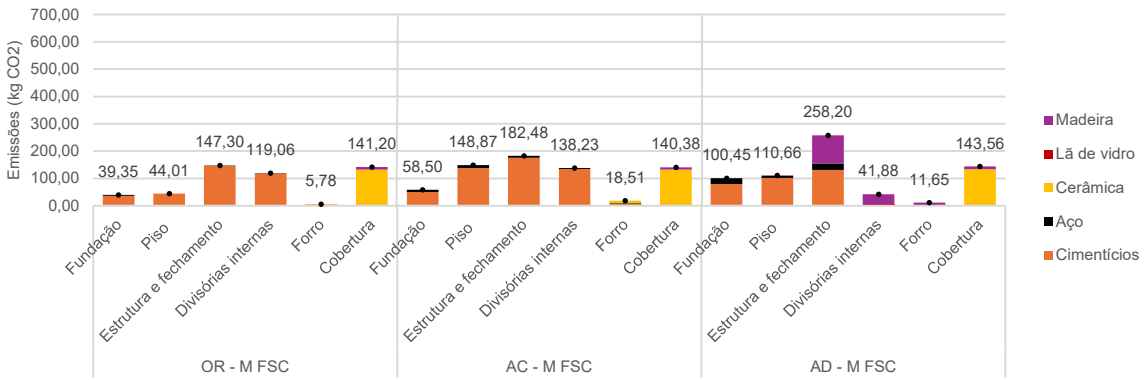

Figura 5: Emissões por camadas da construção nos modelos OR, AC e AD, considerando as emissões da M FSC
Fonte: os autores

As emissões elevadas associadas à camada de fundações no modelo AD, como revela a Figura 5, expõe a relação de custo e benefício que pode ocorrer entre estratégias para a adaptabilidade e o impacto ambiental: embora o superdimensionamento possibilite a adaptação da estrutura para outras funções, incluindo a ampliação vertical, também resulta no aumento do consumo de concreto, fôrmas e aço, elevando a pegada de carbono do modelo AD.

Baseado na Figura 5, os sistemas de divisórias internas e forro, propostos como sistemas adaptáveis no modelo AD, desde que especificada a M FSC, demonstram menores emissões em comparação aos mesmos sistemas nos modelos OR e AC, especificados com vigotas e lajotas pré-moldadas. A Figura 4 mostra que, ainda quando a MSM é especificada para o sistema de divisórias internas, as emissões dessa camada no modelo AD se mantém inferiores àquelas nos modelos OR e AC. O mesmo não ocorre na camada de forro devido ao elevado consumo da madeira nativa.

Destaca-se que, no modelo AD, a camada de forro se estende sobre toda a área útil da construção. Em contraste, nos modelos OR e AC, sua aplicação é restrita à área do banheiro, atuando como suporte para a caixa d'água. Além de garantir a livre disposição das divisórias internas ao manter a altura do pé-direito constante, o madeiramento utilizado na camada de forro pode ser posteriormente complementado com peças adicionais pelo usuário, permitindo que essa estrutura funcione como piso para um segundo pavimento, em um eventual cenário de ampliação vertical.

Apesar do modelo AD apresentar maiores emissões (814,32 kg CO2) em relação aos modelos OR e AC (565,09 kg e 760,36 kg CO2 respectivamente, considerando a M FSC), o mesmo agrega uma série de recursos voltados à adaptabilidade, os quais, em tese, oferecem maior autonomia ao usuário. O modelo AD, portanto, apresenta uma solução com mais recursos ao usuário, ainda que com um impacto ambiental ligeiramente superior ao do modelo AC – nesse caso, o impacto pode tornar-se irrisório frente aos potenciais benefícios oferecidos pela adaptabilidade.

Do ponto de vista da adaptabilidade como estratégia para reduzir o impacto ambiental da construção, um estudo ACV de berço-ao-túmulo, ou ainda, um estudo ACV dinâmico, poderiam melhor representar essa relação, trazendo à tona potenciais impactos evitados pelo uso de sistemas adaptáveis, especialmente durante a fase de uso da construção (Su, *et al*., 2017).

Os resultados indicam que medidas para reduzir as emissões do modelo AD incluem, por um lado, o uso da madeira nativa certificada e, por outro, alternativas para o uso do concreto. No modelo AD, a substituição parcial do concreto por madeira, já aplicada em elementos como fechamento, piso, forro e divisórias internas, é uma estratégia eficaz para reduzir as emissões totais associadas ao modelo e pode ser estendida ao sistema estrutural, conforme exemplificado no modelo apresentado pela publicação HSM (Brasil, 2024).

Os resultados obtidos, embora pautando-se em um sistema particular, confirmam o potencial do uso da madeira nativa certificada como material de menor impacto ambiental na construção de habitação de interesse social no Brasil, alinhando-se com os resultados de Souza (2024) e Cruz *et*

al. (2023), que investigam a viabilidade ambiental e o desempenho térmico do sistema de *wood-frame* em habitação social no Brasil, frente a outros sistemas convencionais.

No contexto da habitação social, onde o emprego da madeira ainda não demonstra ampla inserção, alternativas complementares para otimizar o modelo AD, sob a perspectiva das emissões de carbono, envolvem estratégias voltadas à redução do impacto do concreto. Entre essas, destaca-se a substituição total ou parcial do cimento Portland e dos agregados convencionais por materiais de menor impacto, cujos benefícios vêm sendo reiteradamente validados pela comunidade científica. Ou ainda, revisitar o uso do sistema de alvenaria convencional, projetado para vencer o maior vão livre possível conforme recomendações para a adaptabilidade, a exemplo das tipologias desenvolvidas pelo grupo Usina para a Comuna Urbana Dom Hélder Câmara, construído entre 2008 e 2012 em Jandira, São Paulo (Stédile, 2014).

A presente pesquisa apresenta como principais contribuições científicas o aprofundamento da aplicabilidade da adaptabilidade em habitação social sob a perspectiva do desempenho ambiental, o avanço na comprovação do potencial de uso da madeira nesse contexto e a aplicação da ACV considerando as diferentes camadas da construção, conforme proposta de Brand (1994). Essa abordagem possibilita a identificação e correlação mais precisa das camadas com maior pegada de carbono, orientando estratégias para mitigar o impacto ambiental total dos modelos. Pesquisas com enfoques semelhantes incluem o estudo de Pushkar (2015), que amplia convergência do conceito de camadas da construção com a metodologia ACV, pautando-se na eficácia de selos de desempenho ambiental em arquitetura. Fischer e Schmid (2017), por sua vez, propõem uma abordagem similar à esta pesquisa, avaliando o desempenho ambiental de um modelo de habitação social adaptável proposto, do berço-ao-túmulo, considerando cenários de ampliação e retração durante a fase de uso. Por fim, Davis *et al.* (2025) investigam como o cruzamento da metodologia ACV com a abordagem de camadas da construção, numa perspectiva ACV de berço-ao-túmulo, pode resultar em menor impacto ambiental.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo desenvolver um modelo de habitação social adaptável, baseado numa tipologia unifamiliar amplamente reproduzida no PMCMV, e avaliar seu desempenho ambiental. Como objetivo específico, buscou-se compreender a relação entre a adaptabilidade e as emissões de carbono incorporadas aos sistemas adaptáveis propostos. Com base nas informações reunidas na revisão da literatura, foram propostos os modelos acessível e adaptável, baseados no modelo original. O modelo acessível foi proposto como uma versão atualizada do modelo original, em conformidade com as normas de desempenho e acessibilidade. O modelo adaptável incorporou características da adaptabilidade relevantes à habitação social e alinhadas com tecnologias construtivas convencionais no setor.

A ACV simplificada permitiu identificar que o modelo adaptável tem uma pegada de carbono superior aos demais, embora possa se tornar mais competitivo com o uso da madeira nativa certificada. Nesse cenário, as diferenças entre as emissões do modelo AD e AC tornam-se irrisórias frente aos potenciais benefícios da adaptabilidade aos usuários ao longo da vida útil da construção.

Além disso, a ACV aplicada às diferentes camadas da construção nos três modelos permitiu identificar os sistemas mais intensivos em emissões de carbono. Essa abordagem não somente reproduz o importante conceito de separação das camadas do paradigma da adaptabilidade, como também direcionar ações para a redução dos impactos dos modelos com maior precisão.

Além da especificação da madeira nativa certificada, estratégias para mitigar as emissões do modelo adaptável proposto incluem, ações para reduzir as emissões do concreto tais como a substituição total ou parcial do cimento Portland e dos agregados por alternativas menos impactantes. Outras soluções incluem revisitar o sistema de alvenaria estrutural, projetado para grandes vãos livres, ou ainda, substituir sistemas construtivos com elevado consumo de cimento por madeira, inspirando-se em soluções como a publicação HSM (Brasil, 2024).

As limitações desta pesquisa incluem a tipologia estudada e a definição da fronteira da ACV simplificada de berço ao portão, excluindo os demais impactos ao longo da vida útil dos modelos. Além disso, o estudo foca exclusivamente nas emissões de carbono, sem considerar outros impactos ambientais associados ao ambiente construído. A base de dados utilizada representa a realidade do setor produtivo brasileiro e, portanto, constitui outra limitação relevante da pesquisa. O modelo adaptável proposto não pretende ser uma solução definitiva, uma vez que outras estratégias de adaptabilidade podem se mostrar mais adequadas a contextos específicos.

Como recomendação para pesquisas futuras, destaca-se a relevância da avaliação de custo do ciclo de vida dos modelos propostos, aspecto central no debate sobre habitação de interesse social. Recomenda-se, também, a aplicação da abordagem ACV de berço ao berço, permitindo evidenciar possíveis benefícios adicionais dos sistemas adaptáveis, especialmente durante a fase de uso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. Brasil, 2023. Disponível em: https://www.abrema.org.br/download/92323/?tmstv=1709314789. Acesso em: 22 jul. 2025.

ASKAR, R.; BRAGANÇA, L.; GERVÁSIO, H. Adaptability of buildings: a critical review on the concept evolution. **Applied sciences**, v. 11, n. 10, p. 4483, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 20887:2020 – Sustentabilidade em edificações e obras de engenharia civil — Projeto para desmontagem e adaptabilidade — Princípios, requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1: Edificações habitacionais — Desempenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS**. NBR 9050:2020 — Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

BERGAN, K. **Casa saudável**: um estudo sobre os sentidos da moradia. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

BIANCHI, P. F. *et al*. Study of alternatives for the design of sustainable low-income housing in Brazil. **Sustainability**, v. 13, n. 9, p. 4757, 2021.

BRAND, S. **How buildings learn:** What happens after they're built. Penguin, 1994.

BRASIL. Ministério da Cidades**. Portaria nº 725, de 15 de junho de 2023**. Diário Oficial da União, seção 1-Extra A, 4, 16 de junho de 2023. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mcid-n-725-de-15-de-junho-de-2023-490336615>. Acesso em: 16 maio 2025.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Conheça o programa Minha Casa, Minha Vida**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/assuntos/noticias-1/conheca-o-programa-minha-casa-minha-vida>. Acesso em: 16 maio 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, Serviço Florestal Brasileiro, Laboratório de Produtos Florestais. **Habitação Social em Madeira**. [recurso eletrônico]. Brasília: LPF, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/sfb_habitacao_social_em_madeira.pdf. Acesso em: 01 abr. 2025.

CABEZA, L. F., *et al*. Buildings. IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. **Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.011

CAIXA Econômica Federal. **Cadernos CAIXA:** Projeto padrão – casas populares. Vitória: GIDUR/VT, 36 p., 2006.

CARDOSO A. Novas paisagens urbanas do Programa Minha Casa Minha Vida. [Entrevista concedida a] Thery, H. **Mercator**, volume 16. 2017

CONEJOS, S.; LANGSTON, C.; SMITH, J. AdaptSTAR model: A climate-friendly strategy to promote built environment sustainability. **Habitat international**, v. 37, p. 95-103, 2013.

CONSELHO DE MONITORAMENTO E AVALIAÇÃO DE POLÍTICAS Públicas (CMAP). **Relatório de Avaliação:** Programa Minha Casa, Minha Vida, Ciclo 2020. Secretaria Federal de Controle Interno e Controladoria-Geral da União. Brasília, 2021.

COUNCIL ON OPEN BUILDING. **Council on Open Building**. Disponível em: <https://councilonopenbuilding.org/>. Acesso em: 12 maio 2025.

CRUZ, A. S. *et al*. Avaliação do sistema de" wood frame" para habitação de interesse social considerando o desempenho térmico, energético, e emissão de carbono via otimização multiobjetivo. ENCONTRO LATINO AMERICANO E EUROPEU SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, **Anais [...]** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/euroelecs/article/view/3263>. Acesso em: 28 jul. 2025.

DAMS, B. *et al*. A circular construction evaluation framework to promote designing for disassembly and adaptability. **Journal of Cleaner Production**, v. 316, p. 128122, 2021.

DAVIS, A. et al. The impact of lifespan assumptions in LCA: Comparing the replacement of building parts versus building layers—A housing case study. **Energy and Buildings**, v. 326, p. 115050, 2025.

DAVIS, A. Design for disassembly in housing: the need to adapt LCA to shearing layers. 3rd Valencia International Biennial of Research in Architecture, VIBRArch, **Proceedings [...]** p. 636-647, 2022. <https://doi.org/10.4995/VIBRArch2022.2022.15170>

DE MELO, P. C. *et al*. The potential of carbon storage in bio-based solutions to mitigate the climate impact of social housing development in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 433, p. 139862, 2023.

ESTAJI, H. A review of flexibility and adaptability in housing design. **International Journal of Contemporary Architecture**, v. 4, n. 2, p. 37-49, 2017.

FISCHER, R. S.; SCHMID, A. L. Estratégias de adaptabilidade na habitação social: implicações no ciclo de vida energético do edifício. **Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão (ISSN: 2525-4782)**, v. 2, n. 1, 2017.

GARREFA, F. *et al*. Resilience in social housing developments through post-occupancy evaluation and co-production. **Ambiente construído**, v. 21, n. 2, p. 151-175, 2021.

GERAEDTS, R. FLEX 4.0, a practical instrument to assess the adaptive capacity of buildings. **Energy Procedia**, v. 96, p. 568-579, 2016.

GOSLING, J. *et al*. Adaptable buildings: A systems approach. **Sustainable Cities and Society**, v. 7, p. 44-51, 2013.

HABRAKEN, N. J. **Supports: an alternative to mass housing**. 3. ed. London; New York: Routledge, 2019.

HABRAKEN, N. J. **The structure of the ordinary**: form and control in the built environment. MIT press, 2000.

HAMIDA, A. *et al*. Parametric study of the impact of building envelope systems on embodied and operational carbon of residential buildings. **International Journal of Building Pathology and Adaptation**, v. 40, n. 5, p. 753-774, 2022.

HASANI, N; RIGGIO, M. Achieving Circular Economy Through Adaptable Design: A Comparative Analysis of Literature and Practice Using Mass Timber as a Case Scenario. **Journal of Building Engineering**, p. 111802, 2025.

HEIDRICH, O. *et al*. A critical review of the developments in building adaptability. **International Journal of Building Pathology and Adaptation**, v. 35, n. 4, p. 284-303, 2017.

HENRIQUES, J. E. M. R. **O design para adaptabilidade no Brasil:** um debate entre a Biomimética e a produção acadêmica atual. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Design, Recife, 2022.

HIPWOOD, T. Adapting owner-occupied dwellings in the UK: lessons for the future. **Buildings and Cities**, v. 3, n. 1, p. 186, 11 maio 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5334/bc.186>. Acesso em: 20 abr. 2025.

ISOVER - Saint-Gobain Brasil. **Environmental Product Declaration:** Feltro Wallfelt. São Paulo, 2016. Disponível em: <https://www.isover.com.br/documents/environmental-product-declaration/epd-wallfelt-0.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2025.

KENDALL, S. H.; TEICHER, J. **Residential open building**. Spon Press, 2010.

KRĘT-GRZEŚKOWIAK, A.; BABORSKA-NAROŻNY, M. Guidelines for disassembly and adaptation in architectural design compared to circular economy goals-a literature review. **Sustainable Production and Consumption**, v. 39, p. 1-12, 2023.

O'BRIEN, D.; CARRASCO, S.; DOVEY, K. Incremental housing: harnessing informality at Villa Verde. **Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research**, v. 14, n. 3, 2020.

OTTENHAUS, L. M. *et al*. Design for adaptability, disassembly and reuse–A review of reversible timber connection systems. **Construction and Building Materials**, v. 400, 2023.

PUSHKAR, S. Application of life cycle assessment to various building lifetime shearing layers: site, structure, SKIN, services, space, and stuff. **Journal of Green Building**, v. 10, n. 2, p. 198-214, 2015.

ROSS, B. E. *et al*. Enabling adaptable buildings: Results of a preliminary expert survey. **Procedia Engineering**, v. 145, p. 420-427, 2016.

SALAMA, W. Design of concrete buildings for disassembly: An explorative review. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 6, n. 2, p. 617-635, 2017.

SCHNEIDER, T.; TILL, J. Flexible housing: opportunities and limits. **Arq: Architectural Research Quarterly**, v. 9, n. 2, p. 157-166, 2005.

SIMÕES, G. M. F.; LEDER, S. M. Do assentamento irregular para a habitação seriada no Brasil: conflitos e fragmentação espacial na adaptação a uma nova forma de morar. **Revista brasileira de estudos urbanos e regionais**, v. 26, p. e202424pt, 2024.

SOUZA, C. M. **Estudo comparativo entre a sustentabilidade de habitações de interesse social com foco nos materiais de três sistemas construtivos diferentes:** Alvenaria Convencional, Paredes de Concreto e Wood-Frame. Araranguá-SC, 2024. Dissertação (Mestrado em Energia e Sustentabilidade) – Universidade Federal de Santa Catarina, Campus

STÉDILE, J. A. Projetando utopias: a comuna urbana Dom Helder Câmara. In: **I Congreso Internacional de Vivienda Colectiva Sostenible**, Barcelona, 25, 26 y 27 de febrero de 2014. Máster Laboratorio de la Vivienda Sostenible del Siglo XXI, 2014. p. 138-143.

SU, S. et al. Dynamic LCA framework for environmental impact assessment of buildings. **Energy and buildings**, v. 149, p. 310-320, 2017.

VILLA, S. B. *et al*. Lack of adaptability in Brazilian social housing: impacts on residents. **Buildings & Cities**, v. 3, n. 1, 2022.

WATT, H. *et al*. What should an adaptable building look like? **Resources, Conservation & Recycling Advances**, v. 18, p. 200158, 2023.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências brasileiras de fomento à pesquisa CAPES, CNPq e FAPERJ pelo suporte financeiro. Este projeto de pesquisa é parcialmente financiado pela FAPERJ (Processo nº E-26/201.369/2022).