

Avaliação do Ciclo de Vida de habitações de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e painéis pré-moldados de concreto considerando diferentes zonas bioclimáticas

Life cycle assessment of structural ceramic masonry and precast concrete panels houses considering different bioclimatic zones

Análisis de ciclo de vida de viviendas de albañilería estructural ceramica y paneles premoldados de hormigón considerando diferentes zonas bioclimáticas

Submetido em 31 março 2017 | Aceito em 25 julho 2017 | Disponível em 18 dezembro 2017

Lucas Rosse Caldas¹

Júlia Santiago de Matos Monteiro Lira²

Rosa Maria Sposto²

Resumo

O setor da construção civil é apontado como um grande consumidor de recursos naturais e causador de diversos impactos ambientais. Neste sentido, verificam-se, nos últimos anos, iniciativas do setor para melhoria da qualidade e aumento da eficiência de seus processos, entre eles o desenvolvimento de sistemas construtivos mais racionalizados e industrializados, podendo ser citados a alvenaria estrutural e painéis pré-moldados de concreto armado. No entanto, o setor ainda carece de formas de avaliar os reais impactos ambientais desses diferentes sistemas, ao longo de seus ciclos de vida. Assim, o presente estudo buscou aplicar a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para a comparação de impactos ambientais de dois projetos de habitação de interesse social (HIS), sendo um de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e outro de painéis pré-moldados de concreto armado, considerando o impacto dos diferentes desempenhos térmicos desses sistemas em seis zonas bioclimáticas brasileiras. O estudo apresentado é do tipo “berço ao portão com opções”, em que os estágios de produção, substituição dos materiais e uso de energia da habitação foram considerados. Foram utilizados dados secundários, modelagem ambiental no software SimaPro e simulação termoenergética

1 Programa de Engenharia Civil, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

| lrc.ambiental@gmail.com

2 Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília (UnB)

no software DesignBuilder. A habitação de painéis pré-moldados de concreto apresentou maiores impactos ambientais nas seis zonas bioclimáticas estudadas, sendo que a cidade de Teresina foi a maior, e Curitiba a menor. O estágio de uso se mostrou o mais significativo para todas categorias de impacto ambiental avaliadas. Conclui-se a importância de se avaliar o desempenho térmico em diferentes zonas bioclimáticas para estudos de ACV aplicados às edificações brasileiras.

Palavras-chave: ACV. Habitações. Sistemas construtivos. Desempenho térmico. Zonas bioclimáticas.

Abstract

The construction industry is a large consumer of natural resources and is responsible for several environmental impacts. In this sense, it is verified, in recent years, initiatives of the sector to improve the quality and increase the efficiency of its processes, among them the development of more rationalized and industrialized construction systems, such as structural masonry and precast reinforced concrete panels. However, the sector still lacks ways to assess the real environmental impacts of these different systems, throughout their life cycles. Thus, the present study aimed to apply the Life Cycle Assessment (LCA) methodology for the comparison of environmental impacts of two social housing projects (HIS), one of ceramic brick structural masonry and another one of precast reinforced concrete panels, considering the impact of the different thermal performances of these systems in six Brazilian bioclimatic zones. The study presented is “cradle-to-gate with options” type, including the stages of production and replacement of materials and energy use of the house were considered. Secondary data were used, environmental modeling in SimaPro software and thermal-energetic simulation in DesignBuilder software were done. The precast concrete panel's house presented larger environmental impacts in the six bioclimatic zones, since the city of Teresina was the largest and Curitiba the smallest. The use stage was the most significant for all environmental impact categories assessed. We conclude the importance of evaluating the thermal performance in different bioclimatic zones for LCA studies applied to Brazilian buildings.

Keywords: LCA. Housing. Building systems. Thermal performance. Bioclimatic zones.

Resúmen

El sector de la construcción es señalado como um grande consumidor de recursos naturales por consiguiente de diversos impacto ambientales. En este sentido, se

observan en los últimos años iniciativas para beneficio de la calidad y la eficiencia en sus procesos, como por ejemplo el desarrollo de sistemas constructivos más racionalizados e industrializados, pudieran citarse la albañilería estructural y paneles pre-fabricados de hormigón armado. Sin embargo, este sector aún carece de caminos para evaluar los reales impactos ambientales de los diferentes sistemas a lo largo de su ciclo de vida. En este contexto, el presente estudio busco aplicar la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para comparar los impactos ambientales de dos proyectos de viviendas de interés social (HIS), siendo en este caso uno de ellos de albañilería estructural utilizando bloques cerámicos y el otro, con utilización de paneles pre-fabricados de hormigón armado. El presente estudio es un “cuna a la puerta con opciones” en donde cada etapa que comprendía producción, substitución y el uso de energía en la vivienda fue considerada. Fueron utilizados para procesar los datos, para el modelo ambiental el software SimaPro y para la simulación termo energética DesignBuilder. La vivienda de paneles pre-fabricados de hormigón presentó mayor impacto ambiental en las seis zonas bioclimáticas estudiadas, donde en el caso de la ciudad de Teresina se presento el mayor impacto y en Curitiba el menor. La etapa de uso se mostró lo más significativo para todas las categorías de impacto ambiental evaluadas. Se concluye que evaluar el desempeño térmico en diferentes zonas bioclimáticas es de grande importancia para estudios de ACV aplicados en las viviendas brasileiras.

Palabras-chaves: ACV. Viviendas. Sistemas constructivos. Rendimiento térmico. Zonas bioclimáticas.

1. Introdução

Considerando o déficit habitacional brasileiro que, em 2014, era de mais de seis milhões de unidades habitacionais (FJP, 2016), a indústria da construção civil cresceu consideravelmente ³, especialmente pelo incentivo de programas habitacionais do governo, como o programa “Minha Casa, Minha Vida”. Com a demanda por construções mais produtivas, surgiram novos sistemas construtivos que objetivam uma indústria da construção civil com maior racionalização e industrialização, reduzindo o consumo de materiais e geração de resíduos. Desse modo, torna-se possível executar um processo de produção em série de habitações, semelhante às linhas de montagem das fábricas.

³ Entre 2003 e 2009 as obras de edificações aumentaram quase 20% ao ano, segundo CBIC (2016).

A NBR 15575-1 (ABNT, 2013) recomenda que “os empreendimentos sejam construídos mediante exploração e consumo racionalizado de recursos naturais, objetivando a menor degradação ambiental, menor consumo de água, de energia e de matérias-primas”. Considera ainda que devem ser incentivados os materiais que causem menor impacto ambiental, desde as fases de exploração de suas matérias primas à sua destinação final.

Desse modo, é necessário avaliar a adequação ambiental de sistemas construtivos, para que esteja presente a comprovação de que o sistema inovador é um sistema ambientalmente mais favorável. Como salientam Carvalho e Sposto (2012) e Caldas et al. (2016), é preciso definir critérios ambientais para auxiliar projetistas, arquitetos e engenheiros para especificar sistemas mais sustentáveis do ponto de vista ambiental, como ocorre nas habitações de interesse social (HIS).

A NBR 15575-1 (ABNT, 2013) recomenda aos projetistas que avaliem, junto aos fabricantes, os resultados de inventários de ciclo de vida de seus produtos, como forma de auxiliar a tomada de decisão na avaliação do impacto que estes elementos provocam ao meio ambiente. Portanto, fica subentendido o uso da ferramenta Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para quantificação dos impactos ambientais de produtos ou sistemas da construção.

Segundo a NBR ISO 14040 (ABNT, 2014), a ACV é uma metodologia no qual o produto ou processo é avaliado em todo o seu ciclo de vida. A ACV tem sido apontada como uma das metodologias de avaliação de impactos ambientais mais utilizadas internacionalmente, podendo ser aplicada a qualquer atividade, processo ou produto, inclusive aqueles no âmbito da construção civil, como pode ser verificado nos estudos de Cabeza et al. (2014), Chau et al. (2015); Anand and Amor (2017). Esses estudos realizaram estados da arte internacionais sobre a aplicação da ACV no setor de edificações e construção civil, mostrando o que vem sendo pesquisado, abordagens metodológicas utilizadas, resultados apresentados, limitações e lacunas existentes.

Cabeza et al. (2014) concluíram que os países em desenvolvimento dominaram a quantidade de publicação de ACV em edificações e elogiaram a clareza dos artigos analisados. Chau et al. (2015) avaliaram três métodos de estudos de ciclo de vida: ACV, Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) e Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões de CO₂ (ACVCO₂). Os autores concluíram que a fase de uso de um edifício contribui com os maiores impactos do ciclo de vida, mas observaram-se grandes discrepâncias nos três fluxos analisados e uma crítica dos autores é que não há diretrizes sólidas sobre quais fluxos de métodos devem ser aplicados em circunstâncias específicas. Anand; Amor (2017) recomendam o envolvimento industrial que ajudará no desenvolvimento de melhores bases de dados. Os autores definiram algumas lacunas e propuseram diretrizes: unidade funcional padrão para relatórios de resultados para fins de comparação, métodos padronizados de cálculo de vida útil, desenvolvimento de bases de dados e integração da ACV com certificações ambientais.

Kovacic et al. (2016) desenvolveram uma ferramenta para projeto de fachadas industriais com base na ACV, mostrando a importância da etapa de concepção e projeto para a diminuição dos impactos ambientais ao longo da vida útil. Roh et al. (2017) avaliaram o impacto ambiental incorporado dos edifícios, os principais serviços de construção e os materiais que contribuem para esses impactos, apoiando que devem ser analisados antecipadamente de acordo com as características dos edifícios e do ambiente regional.

Estudos voltados para a realidade brasileira também têm focado em sistemas construtivos. Condeixa et al. (2014) avaliaram divisórias internas de alvenaria cerâmica, típicas do Brasil, utilizando a ACV. Bueno et al. (2016) avaliaram diferentes sistemas construtivos utilizados no Brasil, também por meio da ACV, mas com foco nos métodos de avaliação de impactos utilizados. Os autores concluíram que diferentes métodos de AICV podem levar a diferenças consideráveis nos resultados. Souza et al. (2016) aplicaram a ACV para a comparação entre alvenaria estrutural cerâmica, de concreto e

paredes de concreto moldadas no local, no entanto, somente considerando a etapa de produção e fim de vida dos materiais. Moraga et al. (2016) aplicaram a ACV para avaliação dos impactos ambientais de uma parede de alvenaria estrutural de concreto considerando os estágios de manutenção e fim de vida.

Outros estudos, mas com foco em HIS e sistemas construtivos, analisaram somente o consumo de energia e/ou as emissões de CO₂, como pode ser verificado em Paulsen e Sposto (2013), Caldas et al. (2016), Lira et al. (2016) e Caldas et al. (2017).

A partir da avaliação desses estudos, percebe-se que a aplicação da ACV e outras metodologias mais simplificadas, para sistemas construtivos, com foco em vedações verticais já é um tema bastante explorado. No entanto, a sua grande maioria está focada na parte de produção dos materiais. Poucos dos estudos apresentados avaliaram o impacto do desempenho térmico dos sistemas construtivos no consumo de energia no estágio operacional (uso da edificação). Entre os estudos avaliados, nenhum considerou diferentes zonas bioclimáticas brasileiras, que variam de 1 a 8, segundo classificação da NBR 15220 (ABNT, 2003).

Embora a avaliação de desempenho térmico e energético de edificações no Brasil seja também um tema já bastante discutido, a abordagem utilizando a ACV ainda foi pouco explorada, principalmente para a avaliação de sistemas construtivos racionalizados e industrializados.

A maioria dos estudos exploraram esse tema com foco principalmente nas emissões de CO₂. Taborianski e Prado (2012) avaliaram as emissões de CO₂ de diferentes soluções de fachadas para um edifício de escritório localizado em São Paulo, e verificaram que o sistema de pele de vidro foi o que apresentou pior desempenho térmico, o que contribuiu para mais emissões de CO₂ no ciclo de vida da fachada. Lira et al. (2016) compararam as emissões de CO₂ entre um sistema de alvenaria cerâmica com o sistema de Casa Express, mostrando que o pior desempenho térmico do último sistema foi responsável pelo aumento das emissões no ciclo de vida da habitação. Caldas et al. (2017) avaliaram as

emissões de CO₂ no ciclo de duas habitações, sendo uma de alvenaria e outra de light steel framing, para a realidade de Brasília, também verificando o pior desempenho térmico do último sistema e maiores valores de emissões. Não foi encontrado nenhum estudo que avaliou o impacto do desempenho térmico para o sistema de painéis pré-moldados de concreto, como também avaliando o impacto de diferentes zonas bioclimáticas e outras categorias de impactos ambientais, além da categoria de mudanças climáticas.

Nesse sentido, o presente estudo traz importante contribuição para o avanço da fronteira do conhecimento relacionado à pesquisa de ACV aplicada a edificações, quando se propõe a realizar a comparação desses sistemas construtivos considerando o impacto do desempenho térmico para diferentes zonas bioclimáticas brasileiras.

2. Objetivo

O presente estudo tem como objetivo a aplicação da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para a comparação de impactos ambientais de dois projetos de habitação de interesse social (HIS) com diferentes sistemas construtivos. Foram avaliados a alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e os painéis pré-moldados de concreto armado, levando em consideração o impacto dos diferentes desempenhos térmicos desses sistemas em seis cidades brasileiras, sendo que cada uma está localizada em uma zona bioclimática diferente.

3. Metodologia

3.1. Definição do objetivo e escopo

O objetivo do estudo consistiu na avaliação dos impactos ambientais de duas habitações, sendo uma de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e

outra de painéis estruturais pré-moldados maciços de concreto armado. Foram consideradas somente as vedações verticais (externas e internas) da habitação. Adotou-se que os outros sistemas (fundações, cobertura, pisos, esquadrias, instalações) seriam comuns às duas habitações e por isso não foram avaliadas. Na figura 1, são apresentados os sistemas construtivos avaliados neste estudo.

Figura 1: Sistemas construtivos avaliados no estudo. (A) Alvenaria estrutural de blocos cerâmicos Fonte: TECHNE (2017). (B) Painéis estruturais pré-moldados de concreto armado.



Fonte: Ministério das Cidades (2015).

Nos projetos de alvenaria estrutural, os blocos cerâmicos devem possuir resistência suficiente para garantir a função estrutural e resistir a todas as cargas verticais, além de ainda exercerem a função de vedação (TECHNE, 2017). Para fachadas de habitações de interesse social, são comumente utilizados blocos de 14 cm de espessura. Para este trabalho, foram considerados revestidos externa e internamente com argamassa mista de cimento, cal e areia (com 2,5 cm em cada face), resultando em uma espessura total do sistema de 19 cm.

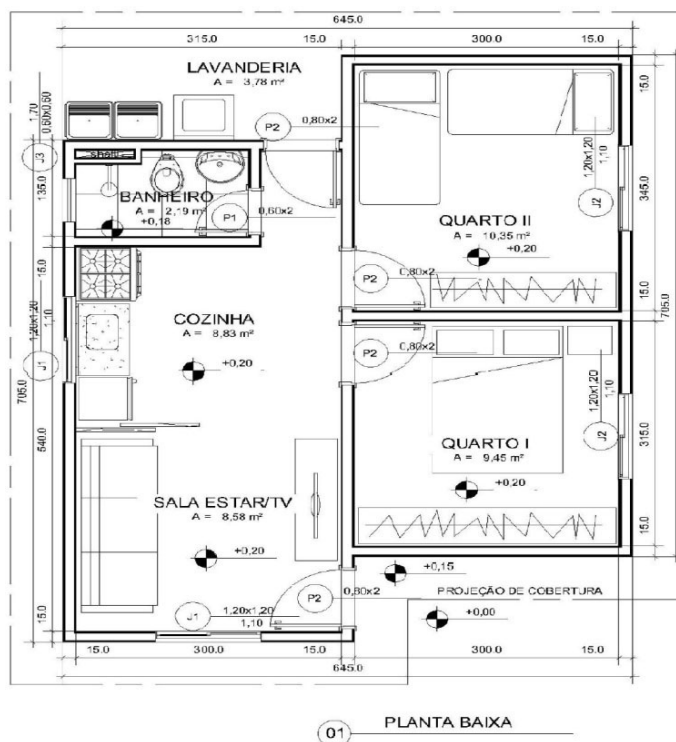
De acordo com a Diretriz de Avaliação Técnica (DATec) 003b, os painéis estruturais pré-moldados maciços de concreto armado possuem espessura de 10 cm (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2015), podendo ser empregados em paredes externas e internas. Painéis de 8 cm de espessura são empregados

apenas em vedações internas. A fabricação dos painéis é feita em unidade de produção montada no próprio canteiro de obras ou em unidade fabril. Inicialmente, faz-se a montagem da armadura, posicionando-a no interior das fôrmas (usualmente metálicas para este sistema) e em seguida conferem-se espaçadores e cobrimento adequado. Após isso, faz-se o travamento das fôrmas e lança-se o concreto autoadensável (Ministério das Cidades, 2015). Segundo o DATec 003b, do Ministério das Cidades (2015), as bordas laterais dos painéis recebem uma camada de argamassa colante, como elemento de ligação entre os painéis.

Comparando os valores de transmitância térmica (U), o sistema de alvenaria estrutural, com espessura total de 19 cm apresenta $1,9 \text{ W/m}^2\text{K}$, enquanto o sistema de painéis de concreto, de espessura total de 10 cm, apresenta $4,4 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ambos os valores de transmitância foram calculados conforme indicações da NBR 15220-2 (ABNT, 2005). Na NBR 15575-4 (ABNT, 2013) é definido o limite máximo de $3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ para as zonas bioclimáticas 3 a 8⁴ e $2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ para as zonas 1 e 2 para o valor de transmitância térmica das fachadas das edificações habitacionais, desde que considerado o procedimento simplificado de análise. Observa-se que o segundo sistema não atende ao critério simplificado dessa norma para nenhuma zona bioclimática, podendo resultar em elevado consumo de energia elétrica para o resfriamento artificial da edificação, considerando apenas a influência da vedação vertical da habitação e desprezando as diretrizes construtivas propostas pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005).

Em um estudo de ACV é necessário definir a unidade funcional (UF). Neste sentido, a UF adotada foi o projeto de uma habitação de interesse social (HIS) que está apresentado na figura 2, com área de piso interna de 46 m^2 e vida útil da habitação de 50 anos, estipulada na NBR 15575-1 (ABNT, 2013).

4 Para valores de absorvância à radiação solar da superfície externa da parede menores ou iguais a 0,6.

Figura 2: Planta baixa do projeto de habitação estudado

A habitação em questão possui dois dormitórios, uma sala, uma cozinha, um sanitário e uma área de serviço na parte exterior. A cobertura possui estrutura de madeira, forro de PVC e telhas cerâmicas. Para a modelagem da habitação foi utilizado o software SimaPro e planilhas eletrônicas Microsoft Excel.

As normas EN 15978 (CEN, 2011) e EN 15804 (CEN, 2013) foram desenvolvidas na Europa com o intuito de padronizar a aplicação da ACV no setor da construção civil. Neste sentido, optou-se por seguir algumas das diretrizes apresentadas nessas normas para o presente estudo, tendo em vista que o Brasil ainda não possui norma ou diretriz similar específica para o setor da construção civil.

Assim, o escopo deste estudo é classificado como do tipo do “berço ao

portão com opções⁵”, sendo considerados os seguintes estágios do ciclo de vida da habitação:

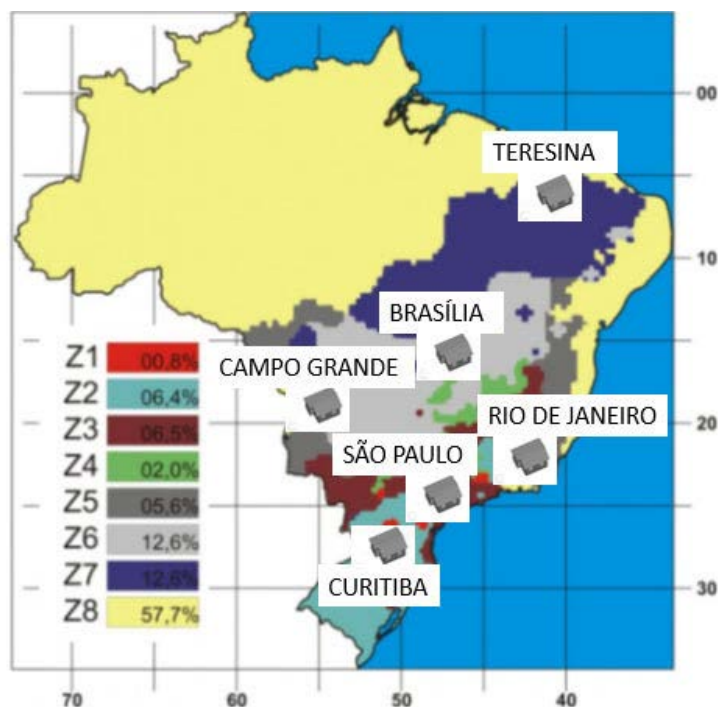
- Produção (A1-A3), que consiste na extração da matéria-prima (A1), transporte (A2) e processamento (A3).
- Substituição (B4), que consiste na reposição dos materiais e componentes utilizados na habitação quando esses últimos atingirem o final da vida útil.
- Uso de energia (B6). Foi considerada somente a energia elétrica para o funcionamento dos equipamentos eletrônicos e refrigeração artificial (utilizando aparelhos de ar condicionado).

Devido à complexidade de um estudo de ACV, principalmente quando o objeto de estudo é uma habitação, buscou-se limitar os estágios do ciclo de vida considerados, de acordo com os dados e recursos disponíveis, e escolhendo aqueles mais impactantes ao longo do ciclo de vida, como observado nos estudos de Cabeza et al. (2014) e Chau et al. (2015).

Foram selecionadas seis cidades, sendo que cada uma está localizada em uma zona bioclimática (ZB), sendo elas: ZB1: Curitiba – PR; ZB3: São Paulo – SP; ZB4: Brasília – DF; ZB6: Campo Grande – MS; ZB7: Teresina – PI; ZB8: Rio de Janeiro – RJ. Dois critérios de escolha foram utilizados para a seleção das cidades: (1) serem capitais; (2) terem dados climáticos disponíveis. O zoneamento bioclimático brasileiro e as cidades avaliadas estão apresentados na figura 3.

5 São abordadas no escopo outros estágios do ciclo de vida da edificação, além da produção dos materiais utilizados, como o uso de energia, substituição dos materiais, entre outros, como pode ser verificado na EN 15804 (CEN, 2013).

Figura 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e identificação das cidades avaliadas.



Fonte: Adaptado da NBR 15220-3 (ABNT, 2005).

3.2. Análise de inventário

A quantificação dos materiais da habitação para o estágio de produção (A1-A3) foi realizada a partir dos dados obtidos na Tabela de Composição de Preços Para Orçamentos - Edificações (TCPO, 2012). Para a habitação de painéis de concreto foi utilizado o Documento de Avaliação Técnica deste sistema construtivo (Ministério das Cidades, 2015).

Os quantitativos calculados para os sistemas construtivos estudados estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Quantitativos utilizados no estudo

Alvenaria estrutural de blocos cerâmicos	
Materiais	Quantidade (kg/habitação)
Alvenaria (blocos cerâmicos estruturais de 14 cm x 19 cm x 39 cm) ¹	11485,5
Argamassa de assentamento ¹	1767
Argamassa de revestimento ¹	11092
Barras de aço	47,12
Total (kg/habitação)	24391,62
Painéis estruturais pré-moldados de concreto armado	
Materiais	Quantidade (kg/habitação)
Concreto (25 MPa) ¹	26167,6
Argamassa colante	1102,6
Perfil U	400,9
Barras de aço	50,9
Total (kg/habitação)	27722,0

¹ Foram adotadas perdas de 4%, o mesmo valor adotado por Souza et al. (2016).

Para o sistema de alvenaria cerâmica não foi considerado o grauteamento, tendo em vista que é uma habitação unifamiliar. Para o sistema de painéis de concreto não foram consideradas as formas metálicas e escoramentos, tendo em vista que elas são reutilizadas muitas vezes, e o consumo energético de guias ou guindastes para montagem dos painéis pré-moldados na obra. Lira et al. (2016) estudaram painéis pré-moldados do tipo Casa Express, cujo processo de montagem é similar aos painéis de concreto, e constatou que o consumo energético para execução e montagem do mesmo representou menos de 1% em relação às outras fases analisadas pelos autores, o que justifica a exclusão desse item. A pintura foi desconsiderada por ele ser comum aos dois sistemas construtivos.

Como o Brasil ainda não possui um banco de dados consolidado para a maioria dos materiais de construção, foram utilizados os resultados do estudo de Souza et al. (2016), que compararam os impactos ambientais na construção

de sistemas construtivos de alvenaria estrutural cerâmica, blocos de concreto e paredes de concreto para a realidade brasileira. Os dados que não foram encontrados nesse estudo foram retirados do banco de dados do Ecoinvent (versão 3.2), adequando a matriz elétrica com dados da realidade brasileira, prática já adotada por outros estudos no contexto nacional, como o de Saade et al. (2014). Isso foi feito para a eletricidade e argamassa colante. Na tabela 2 são apresentados os materiais e eletricidade com os datasets utilizados.

Tabela 2: Datasets dos materiais utilizados e eletricidade

Materiais	Dataset	Fonte
Bloco cerâmico ²	Diversos ¹	Souza et al. (2016)
Argamassa assentamento	Diversos ¹	Souza et al. (2016)
Argamassa revestimento	Diversos ¹	Souza et al. (2016)
Argamassa colante	Adhesive mortar {CH} production Alloc Def, U. Com eletricidade adaptada a matriz brasileira	Ecoinvent
Barra de aço	Diversos ¹	Souza et al. (2016)
Concreto	Diversos ¹	Souza et al. (2016)
Aditivo	Diversos ¹	Souza et al. (2016)
Eletricidade	Electricity, medium voltage {BR} market for Alloc Def, U	Ecoinvent

¹ Os pesquisadores do estudo de Souza et al. (2016) utilizaram dados primários coletados da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (Anicer) e dados secundários retirados do Ecoinvent v.2.2.

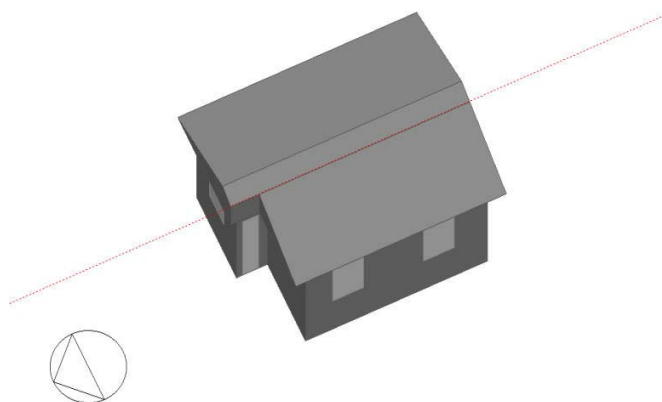
² Foram utilizados resíduos de madeira como combustível para a queima dos blocos cerâmicos, considerando que não é emitido CO₂ nesse processo, já que é um material biogênico (o CO₂ que é emitido é o mesmo que foi absorvido durante a fotossíntese).

Para a quantificação do consumo de energia (B6), foram considerados equipamentos eletrônicos típicos de uma HIS e equipamentos de ar condicionado localizados nos ambientes de longa permanência da habitação, sendo eles a sala de estar e os dois dormitórios. Foi adotada a agenda de ocupação como cheia, ou seja, 24h. Foram realizadas essas escolhas para retratar os casos extremos em termos do impacto dos diferentes desempenhos

térmicos dos sistemas construtivos avaliados, a mesma metodologia adotada por Caldas et al. (2017).

Na figura 4 é apresentada a habitação estudada modelada no software DesignBuilder com o norte geográfico representado graficamente pela seta. Foi escolhida a orientação solar que representasse as piores condições de desempenho térmico, a partir de pré-simulações, sendo que as aberturas dos dormitórios ficaram voltadas para oeste.

Figura 4: Habitação modelada no DesignBuilder.



Fonte: Autores.

Os dados para modelagem das propriedades térmicas dos materiais foram extraídos de tabelas da NBR 15220-2 (ABNT, 2005). No software entrou-se com os dados de condutividade térmica, calor específico e massa específica dos materiais. Para a superfície exterior considerou-se absorptância de 0,3, valor que representa uma pintura de cor clara, de acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013).

A partir da modelagem termodinâmica no software DesignBuilder foi

possível extrair o consumo de energia dos equipamentos e climatização artificial da habitação, considerando o acionamento do aparelho de condicionamento (split) para atingir a temperatura neutra (TN) de conforto, para cada cidade, obtidas a partir do estudo de Pereira e Assis (2010), como apresentado na tabela 3. Não foi considerada a energia gasta para o aquecimento das habitações. O consumo de energia dos equipamentos eletrônicos (televisão, chuveiro, refrigerador, computador, entre outros) foi considerado o mesmo para ambas as habitações e zonas bioclimáticas, de 2414,17 kWh/ano, retirado de Caldas et al. (2017).

Após a modelagem foram realizadas simulações anuais (de 8.760 horas) para as seis cidades selecionadas, e os valores encontrados estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Resultado do consumo energético total da habitação.

Sistemas construtivos	Curitiba	São Paulo	Brasília	Campo Grande	Teresina	Rio de Janeiro
Zona Bioclimática (ZB)	1	3	4	6	7	8
Temperatura neutra (TN) °C	23,1	23,7	24,3	25,0	26,3	24,9
Painel de concreto (kWh/ano)	4077,3	4604,7	4439,3	6699,7	10716,4	7278,5
Alvenaria cerâmica (kWh/ano)	3488,3	3870,0	3662,2	5046,7	7801,7	5687,9

Como recomendação da EN 15804 (CEN, 2013), foi considerado o estágio de substituição de forma separada no presente estudo. Para estágio de substituição (B4) foram consideradas uma reposição do revestimento argamassado para o sistema de alvenaria estrutural e uma reposição da argamassa colante

utilizada nas juntas do sistema de painéis de concreto, ao longo da vida útil adotada de 50 anos. Foram adotados os mesmos materiais utilizados no estágio de produção (A1-A3).

3.3. Avaliação de impacto ambiental

Como a maior parte dos dados de produção dos materiais foram extraídos do estudo de Souza et al. (2016)⁶, que utilizaram o método de avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV) IMPACT 2002+, também foi utilizado esse método para o restante do estudo.

Nesse sentido foram considerados as seguintes categorias de impactos ambientais no presente estudo: (1) Mudanças Climáticas; (2) Saúde Humana; (3) Qualidade dos Ecossistemas; e (4) Recursos. Espera-se assim, de certa forma, dar continuidade ao estudo de Souza et al. (2016) e evitar trabalhos desnecessários, focando no item de desempenho térmico e consumo de energia no estágio de uso da habitação. Não foram realizadas operações de normalização e ponderação dos impactos.

Na tabela 4 estão indicados os materiais e itens utilizados na modelagem, suas correspondentes categorias de impacto avaliadas e as fontes utilizadas.

⁶ Neste estudo a liberação de poluentes químicos no ambiente externo e a exposição humana nesse ambiente foram considerados para a avaliação dos impactos na saúde humana, enquanto a exposição direta ao ar e poeira interior foram excluídas da análise. Também não foram realizadas ponderação e normalização dos indicadores ambientais (SOUZA et al., 2016).

Tabela 4: Valores utilizados na etapa de AICV

Materiais	Mudanças climáticas	Saúde Humana	Qualidade do Ecossistema	Recursos	Fonte
Unidades	kgCO ₂ e	DALY	PDF.m ² .ano	MJ primária	
Bloco cerâmico	5,60E-02	1,44E-07	1,77E-02	8,45E-01	Souza et al. (2016) ¹
Argamassa assentamento	2,73E-01	8,00E-08	2,20E-02	1,73E+00	
Argamassa revestimento	1,76E-01	6,56E-08	2,08E-02	1,52E+00	
Barra de aço	3,00E+00	3,25E-06	1,25E+00	3,75E+01	
Concreto	1,63E-01	5,33E-08	1,43E-02	1,30E+00	
Aditivo	1,08E+01	6,7E-06	1,4E+00	2,25E+02	SimaPro 7.3 ²
Argamassa colante	1,11E+00	1,27E-06	2,02E-01	1,90E+01	
Eletricidade	1,54E-01	3,36E-07	9,53E-02	2,11E+00	

¹ Foram calculados com base nos valores apresentados nos Apêndices disponibilizados no estudo e convertidos em kg do material.

² Realizados pelos autores.

Esses são os indicadores ambientais calculados para a produção de 1kg dos materiais utilizados nos sistemas construtivos estudados até o ponto A1-A3 e B4 (cradle-to-factory gate).

4. Resultados e discussão

4.1. Estágios de produção e substituição dos materiais

Nas figuras 5 e 6, são apresentados os impactos ambientais para o estágio de produção (A1-A3) e substituição (B4) dos materiais, divididos pelos materiais que compõem os sistemas construtivos de alvenaria de blocos cerâmicos e painéis de concreto, respectivamente.

Figura 5: Comparação dos impactos ambientais dos materiais utilizados no sistema de alvenaria de blocos cerâmicos. (A) Estágio de produção; (B) Estágio de substituição.

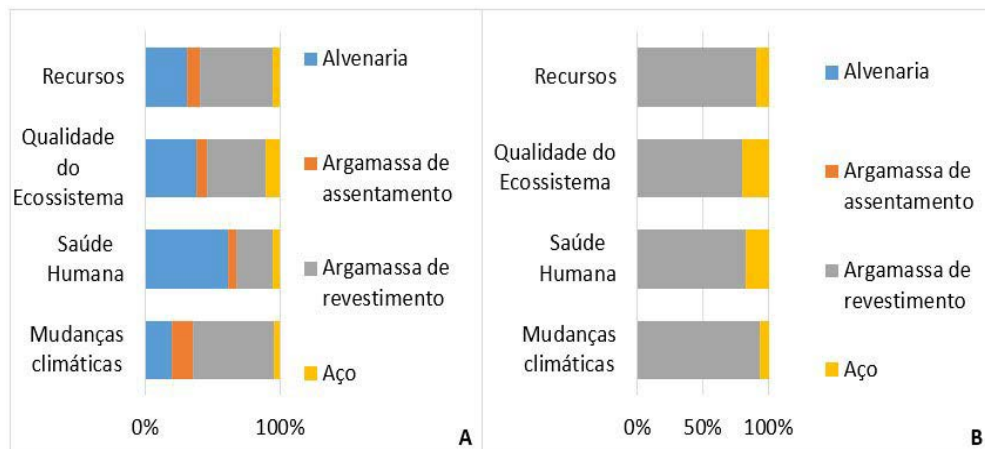
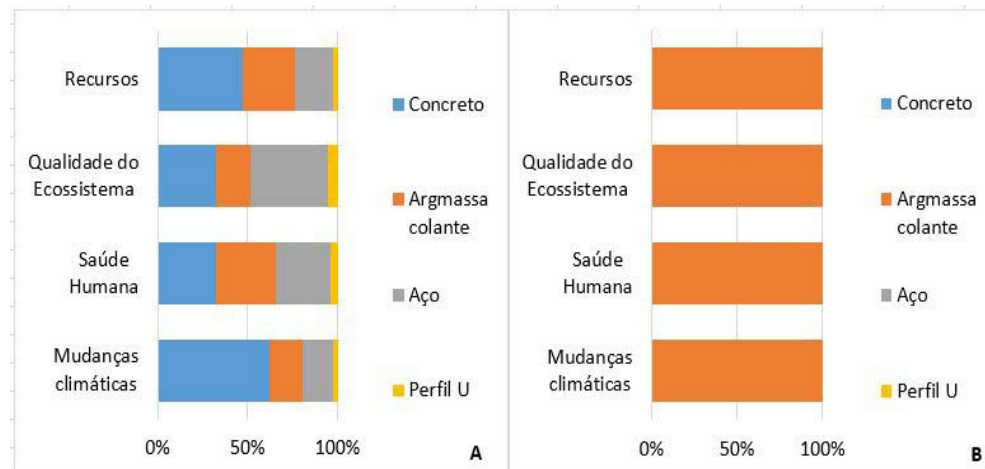


Figura 6: Comparação dos impactos ambientais dos materiais utilizados no sistema de painéis de concreto. (A) Estágio de produção; (B) Estágio de substituição.



Para o sistema de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos, a argamassa, seguida dos blocos cerâmicos foram os materiais que mais contribuíram para os impactos ambientais na etapa de produção, enquanto na substituição foi considerada somente a argamassa utilizada no revestimento.

Portanto, a espessura das camadas de assentamento e revestimento e a composição da argamassa utilizada exercem considerável influência nos impactos ambientais desse sistema construtivo. O cimento foi o material de maior impacto na composição da argamassa, devido ao processo de calcinação e clínquerização, e, assim, argamassas com traços menos ricos em cimento apresentam menores impactos.

A especificação de menores espessuras de argamassa também contribuiu para a redução dos impactos da etapa de produção e substituição. No entanto, deve-se atentar à importância da camada de revestimento na durabilidade e desempenho do sistema como um todo, pois uma redução na espessura do revestimento pode resultar em maior consumo de energia, e consequentemente mais impactos, na etapa de uso da habitação, enquanto a redução do teor de cimento na mistura pode afetar a resistência e durabilidade da camada de revestimento e assentamento. Ressalta-se que no presente trabalho foram adotadas espessuras e a composição da argamassa usualmente utilizadas no mercado.

Os impactos dos blocos cerâmicos são fortemente influenciados pelo tipo de combustível utilizado na queima dos blocos. Como foi utilizado o estudo de Souza et al. (2016), que considerou resíduos de madeira como combustível, esses materiais tiveram os impactos de mudanças climáticas e depleção de recursos minorados, enquanto os impactos na saúde humana e qualidade do ecossistema tiveram aumento, devido à emissão de particulados que ocorre na queima desses resíduos (SOUZA et al., 2016). Se por acaso, tivesse sido considerado algum combustível fóssil, por exemplo o gás natural, que é utilizado em algumas fábricas localizadas em São Paulo, os impactos do bloco

cerâmico, principalmente de mudanças climáticas e depleção de recursos, seriam maiores.

Para os painéis de concreto, o concreto e a argamassa colante foram os materiais mais impactantes. O concreto é influenciado pelos impactos ambientais do cimento e a argamassa colante principalmente pelo dispersante acrílico utilizado na composição desse material. Embora o aço seja um material com elevados impactos ambientais, devido ao seu processo produtivo, sua contribuição nos impactos não é expressivo devido à sua baixa participação em massa.

Uma alternativa para a redução dos impactos de produção desse sistema construtivo é a redução do teor de cimento na mistura, sem que seja comprometida a resistência e durabilidade do material, que pode ser realizada a partir de adições minerais, como cinzas agroindustriais, como verificado no estudo de Silva (2015). A procura de um material similar à argamassa colante, com menores impactos, para ser aplicado nas juntas, também se apresenta uma alternativa interessante para a redução dos impactos ambientais, ainda mais se for considerado que esse material é o que sofrerá substituição durante a vida útil desse sistema construtivo.

4.2. Avaliação global

Nas figuras 7, 8, 9, 10, a comparação das habitações por categoria de impacto ambiental é apresentada, nas seis zonas bioclimáticas, incluindo a participação dos três estágios do ciclo de vida considerados neste estudo.

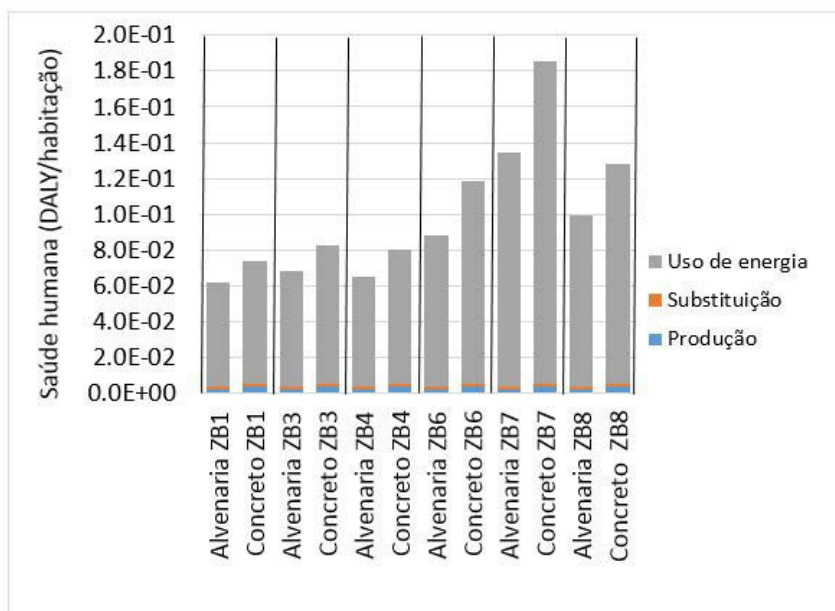
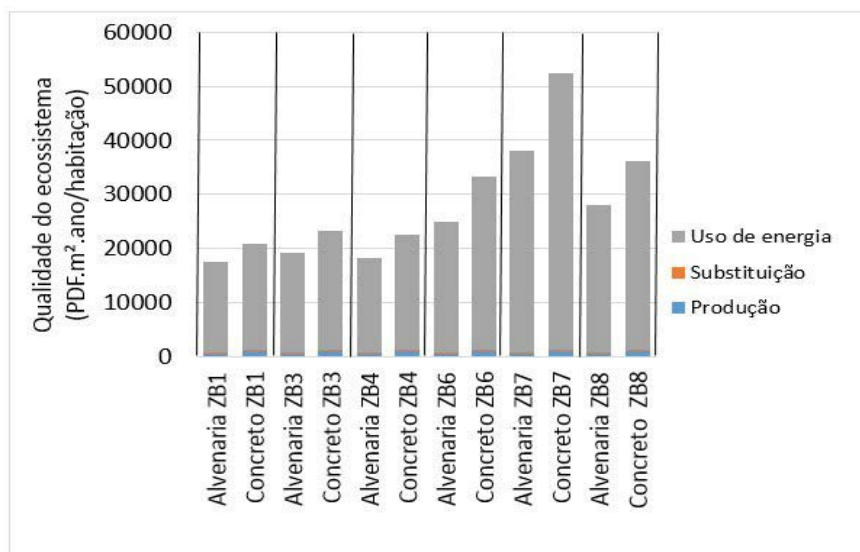
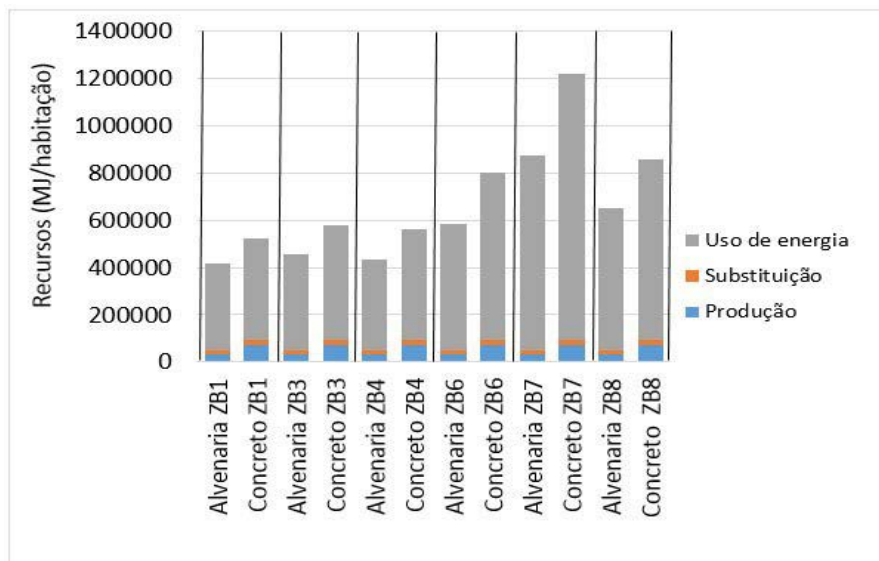
Figura 7: Mudanças climáticas**Figura 9: Qualidade do ecossistema**

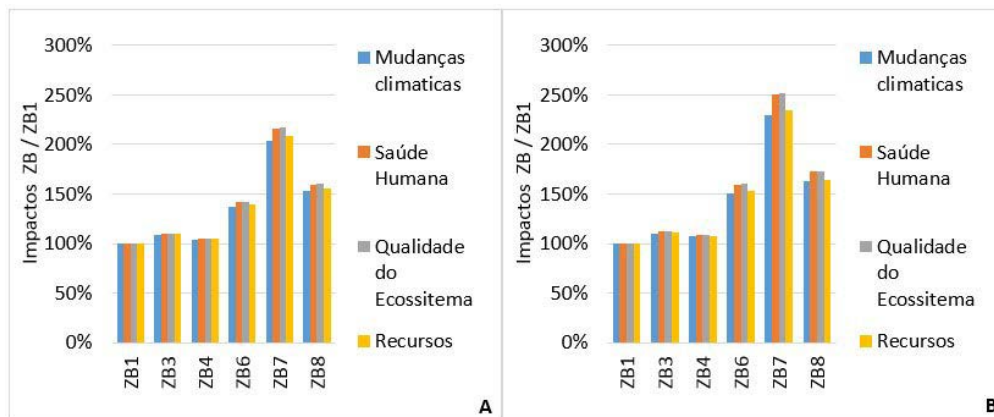
Figura 10: Depleção de recursos



A partir dos dados e premissas adotadas neste estudo, a habitação de alvenaria cerâmica apresentou melhores resultados finais para todas as categorias de impacto ambientais e zonas bioclimáticas avaliadas. As diferenças observadas entre a relação habitação de painéis de concreto/alvenaria cerâmica variaram de 19% (cidade de Curitiba nas categorias de Saúde humana e Qualidade do ecossistema) a 40% (cidade de Teresina nas categorias de Recursos e Mudanças Climáticas).

Já a relação entre diferentes zonas bioclimáticas, tomando a cidade de Curitiba como a referência (a que apresentou menores impactos ambientais) e considerando o mesmo sistema construtivo, chegou as diferenças apresentadas na figura 11.

Figura 11: Comparação dos impactos ambientais normalizados pelos impactos da habitação na cidade de Curitiba. (A) Alvenaria cerâmica. (B) Painel de concreto.



A maior diferença ocorreu entre a cidade de Teresina (ZB7) e Curitiba (ZB1), para ambos os sistemas construtivos. No entanto, essa diferença é maior para o sistema de painel de concreto, chegando a 250% para as categorias de Saúde humana e Qualidade do ecossistema. Lembrando que não foi considerado o consumo de energia para o aquecimento das habitações, tendo em vista que é mais comum os usuários utilizarem vestimentas para se aquecerem. Se fosse considerada a energia para aquecimento, essa diferença teria tendência de diminuir.

Esses resultados mostram que a mudança somente na zona bioclimática, considerando o mesmo sistema construtivo, pode levar a diferenças consideráveis, principalmente para sistemas construtivos de desempenho térmico inferior, como foi o caso dos painéis de concreto, que possuem elevada transmitância térmica ($4,4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). Portanto, é notável a importância de se considerar o impacto de diferentes desempenhos térmicos de sistemas construtivos e avaliação para diferentes cidades para que estudos de ACV para o setor de edificações se aproximem mais da realidade.

Como os impactos dos estágios de produção e substituição foram considerados

constantes entre as seis cidades, a única variável foi o desempenho térmico dos sistemas construtivos, e consequentemente o consumo de energia para a refrigeração das habitações.

Os impactos dos estágios de produção e substituição tiveram menor participação na somatória dos impactos totais considerados neste estudo, principalmente nas categorias de Saúde humana e Qualidade do ecossistema. Cabe ressaltar que só foi considerado o sistema de vedação vertical da habitação, e o estágio de transporte da fábrica ao canteiro não foi considerado, o que aumentaria a participação dos estágios de produção e substituição dos materiais, e que provavelmente variaria de região para região, dependendo da disponibilidade de materiais em cada localidade. Outra limitação é que o estágio de substituição foi considerado como somente uma premissa, em que a argamassa do revestimento para o sistema de alvenaria e a argamassa das juntas para o sistema de painéis de concreto são substituídos. É interessante que uma análise de sensibilidade seja realizada para verificar como os dados se alteram mediante alterações nas premissas de vida útil, tendo em vista a dificuldade de se obterem dados reais relativos a isso e as incertezas relativas ao comportamento dos usuários ante as intervenções de manutenção na habitação.

A etapa de uso, como era de se esperar, foi responsável pela maior parcela dos impactos ambientais avaliados, indo ao encontro de resultados observados na literatura internacional, como Cabeza et al. (2014) e Chau et al. (2015). Como consequência, na cidade de Teresina, localizada na ZB7, foi verificado o pior desempenho térmico para ambos os sistemas construtivos, o que levou a maior consumo de energia para resfriamento artificial nesta cidade, resultando em maiores valores de impactos ambientais para todas as categorias e sistemas construtivos avaliados.

Avaliando as categorias de impactos ambientais, observa-se que os impactos ambientais para a geração de eletricidade foram um dos mais significativos, tendo em vista que o estágio de uso de uma habitação perdura

por toda a sua vida útil, sendo maior para a categoria de Recursos e Mudanças climáticas. Neste sentido, a escolha do dado de eletricidade na etapa de análise de inventário, em estudos de ACV e edificações, possui grande influência nos resultados finais.

Como pesquisa futura, os autores estão trabalhando na análise de sensibilidade das variáveis que podem influenciar no consumo de eletricidade e como ela é gerada. Por exemplo, considerando o impacto de diferentes orientações solares, a variação da participação de fontes renováveis (como a hidráulica) na matriz elétrica brasileira, como essa variação influencia nos impactos ambientais finais das edificações e as incertezas no cálculo do consumo energético para recomposição do desempenho mínimo da edificação.

Embora esta pesquisa se trate de um primeiro estudo, espera-se dar-lhe continuidade incluindo outros sistemas construtivos, outras cidades, outras tipologias arquitetônicas e considerando mais estágios do ciclo de vida. Para isso, é fundamental que sejam considerados dados brasileiros para a produção dos materiais de construção utilizados. A partir de iniciativas e esforços do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) e do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV), espera-se que a disponibilidade desses dados seja facilitada e que o setor da construção civil passe a utilizar esses dados nos projetos de edificações.

A partir do que foi discutido e com base na revisão da literatura científica, nacional e internacional, os resultados aqui apresentados são difíceis de serem comparados com estudos prévios. Isso ocorre devido a diversos fatores, podendo ser citados a falta de padronização nos estudos de ACV para edificações, entre eles os escopos avaliados (diferentes estágios considerados), tipologias da edificação (comercial, residencial, etc.), sistemas construtivos, categorias e metodologias de avaliação de impactos avaliados, vida útil da edificação e de seus sistemas, entre outros. A única comparação que pode ser feita, em relação a outros estudos, é a constatação dos maiores impactos ambientais

do estágio operacional, devido ao consumo de energia e ao pior desempenho térmico de um dado sistema construtivo, como pode ser observado no estudo de Cabeza et al. (2014) e Anand e Amor (2017).

5. Conclusões

A habitação de painéis pré-moldados de concreto apresentou maiores impactos ambientais nas seis zonas bioclimáticas estudadas, sendo que a cidade de Teresina foi a maior e Curitiba a menor, isso considerando os dados utilizados e as premissas adotadas neste estudo. Uma análise de incertezas seria necessária para que uma conclusão geral pudesse ser feita.

As maiores diferenças entre os sistemas construtivos ocorreram para a cidade de Teresina (zona bioclimática 7), principalmente nas categorias de Recursos e Mudanças climáticas, e as menores para cidade de Curitiba (zona bioclimática 1) nas categorias de Qualidade do ecossistema e Saúde humana.

No estágio de produção e substituição das vedações do sistema de alvenaria cerâmica, a argamassa de revestimento e os blocos cerâmicos se mostraram os mais significativos para todas as categorias de impacto ambiental avaliadas, enquanto para o sistema e painéis de concreto, o concreto e o aço foram os mais importantes.

Comparando os três estágios, o uso de energia para refrigeração foi o mais significativo para todas as categorias de impacto ambiental avaliadas. O consumo de energia teve considerável influência do sistema construtivo utilizado e a localização da zona bioclimática.

Nesse sentido, o estudo preenche uma lacuna do conhecimento, mostrando a importância de se avaliarem os impactos ambientais no ciclo de vida de edificações em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras. Para trabalhos futuros, os autores pretendem avaliar outros sistemas construtivos, como também outras cidades e zonas bioclimáticas, com o objetivo de propor um

mapeamento brasileiro para habitações de interesse social (HIS), relacionando desempenho térmico e seus impactos ambientais.

Referências

ANAND, Chirjiv K. and AMOR, Ben. Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, January 2017, vol. 67, n°1, p. 408-416.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 15575-1. Edificações Habitacionais – Desempenho. Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2013.

_____. NBR 15575-4. Edificações Habitacionais – Desempenho. Sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro, 2013.

BUENO, Cristiane, HAUSCHILD, Michael Z., ROSSIGNOLO João A., OMETTO, Aldo R. and MENDES, Natália C. Sensitivity analysis of the use of Life Cycle Impact Assessment methods: a case study on building materials. *Journal of Cleaner Production*, January 2016, vol. 112, n° 20, p. 2208-2220.

CABEZA, Luiza. F., RINCÓN, Lúdia, VILARIÑO, Virgínia., PÉREZ, Gabriel and CASTELL, Albert. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, January 2014, vol. 29, n°1, p. 394-416.

CALDAS, Lucas R., SPOSTO, Rosa M., CALDEIRA-PIRES, A. C. e PAUSEN, Jacob S. Sustentabilidade na construção civil: avaliação do ciclo de vida energético e de emissões de CO2 de fachadas para habitações sociais. *Sustentabilidade em Debate*, Maio/Agosto 2016, vol. 7, n° 2, p. 238-256.

CALDAS, Lucas R., LIRA, Júlia S., MELO, Pedro C. and SPOSTO, Rosa M. Life cycle carbon emissions inventory of brick masonry and light steel framing houses in Brasilia - Proposal of design guidelines for low-carbon social housing. *Ambiente Construído*, Junho 2017, vol. 17, n° 3.

CARVALHO, Michele T. M e SPOSTO, Rosa M. Metodologia para avaliação da sustentabilidade de habitações de interesse social com foco no projeto. *Ambiente Construído*, Janeiro/Março 2012, vol. 12, n° 1, p. 207-225.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO (CBIC). Relatório FGV. A produtividade da Construção Civil brasileira. Brasília, 2016. 64 p.

CHAU, C. K.; LEUNG, T. M.; NG, W. Y. A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. *Applied Energy*, April 2015, vol. 143, nº1, p. 395-413.

CONDEIXA, Karina, HADDAD, Assed, BOER, Dieter. Life cycle impact assessment of masonry system as inner walls: a case study in Brazil. *Construction and Building Materials*, November 2014, vol. 70, nº15, p. 141-147.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. CEN EN 15804: sustainability of construction works: environmental product declarations: core rules for the product category of construction products. Brussels, 2013.

_____. CEN EN 15978: sustainability of construction works: assessment of environmental performance of buildings – calculation method. Brussels, 2011.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO (FJP). Déficit Habitacional no Brasil | 2013-2014. Belo Horizonte, Brazil, 2016.

KOVACIC, Iva, WALTEBEREGGER, Linus and GOURLIS, G. Tool for life cycle analysis of façade-systems for industrial buildings. *Journal of Cleaner Production*, September 2016, vol.130, nº1, p. 260-272.

LIRA, Júlia, CALDAS, Lucas, SILVEIRA, Ana, SPOSTO, Rosa. Avaliação do ciclo de vida de emissões de CO₂ e desempenho térmico de habitações: estudo de caso do sistema construtivo Casa Express na cidade de Teresina – PI. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2016

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade no Habitat (PBQP-h). Datec003-B. Painéis maciços pré-moldados de concreto armado para paredes da VIVER. 2015.

MORAGA, Gustavo, BALDAUF, Juliana, KIRCHHEIM, Ana Paula e PASSUELLO, Ana. Avaliação do ciclo de vida de paredes de blocos de concreto para empreendimentos habitacionais do Programa Minha Casa Minha Vida. Anais do V Congresso Brasileiro de Gestão do Ciclo de Vida. Fortaleza, 2015.

PAULSEN, Jacob S. and SPOSTO, Rosa M. A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case Study for the program “MY HOUSE MY LIFE”. *Energy and Buildings*, February 2013, vol. 57, p. 95-102.

PEREIRA, Iraci. M.; ASSIS, Eleonora. S. Avaliação de Modelos de Índices

Adaptativos Para Uso no Projeto Arquitetônico Bioclimático. Ambiente Construído, Porto Alegre, vol. 10, n. 1, p. 31-51, jan./mar. 2010.

ROH, Seungjun, TAE, Sungho, SUK, Sung J., FORD, George. Evaluating the embodied environmental impacts of major building tasks and materials of apartment buildings in Korea. Renewable And Sustainable Energy Reviews, June 2017, vol. 73, p.135-144.

SAADE, Marcela. R. M., SILVA, Maristela. G. and GOMES, Vanessa. Methodological discussion and piloting of lca-based environmental indicators for product stage assessment of brazilian buildings. Gestão e Tecnologia de Projetos, São Paulo, Janeiro/Junho 2014, vol. 9, n° 1, p. 43-62.

SOUZA, Danielle M., LAFONTAINE Mia, CHARRON-DOUCET, François, CHAPPERT, Benoit, KICAK, Karine, DUARTE, Fernanda and LIMA, Luis. Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls. Journal of Cleaner Production, November 2016, vol.137, n° 20, p. 70-82.

TABELA DE COMPOSIÇÃO DE PREÇOS PARA ORÇAMENTOS (TCPO). TCPO 14. 14^a ed. São Paulo: Pini. 2012.

TABORIANSKI, Vanessa. M., PRADO, Racine. T. A. Methodology of CO2 emission in the life cycle of office building façades. Environmental Impact Assessment Review, vol. 33. p, 41-47, 2012.

TECHNE. Blocos cerâmicos deixam de ser opção apenas para vedação e ganham espaço na alvenaria estrutural. <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/239/artigo377436-1.aspx>. Tecnologia. Edição 239 - Fevereiro/2017.