

# Sustentabilidade na construção civil: avaliação do ciclo de vida energético e de emissões de CO<sub>2</sub> de fachadas para habitações sociais

## *Sustainability in construction: an assessment of the energy life cycle and of CO<sub>2</sub> emissions for social housing facades*

Lucas Rosse Caldas<sup>a</sup>

Rosa Maria Sposto<sup>b</sup>

Armando Caldeira-Pires<sup>c</sup>

Jacob Silva Paulsen<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Mestre em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, DF, Brasil  
End. Eletrônico: lrc.ambiental@gmail.com

<sup>b</sup>Professora Doutora, Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília (UnB), Brasília, DF, Brasil  
End. Eletrônico: rmsposto@unb.br

<sup>c</sup>Professor Doutor, Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas da Universidade de Brasília (UnB), Brasília, DF, Brasil  
End. Eletrônico: armandcp@unb.br

<sup>d</sup>Doutor em Engenharia Civil pelo Royal Institute of Technology, Estocolmo, Suécia  
End. Eletrônico: paulsen.jacob@gmail.com

doi:10.18472/SustDeb.v7n2.2016.15913

Recebido em 07.08.2015

Aceito em 30.05.2016

ARTIGO - VARIA

### RESUMO

Como consequência da crescente discussão dos impactos ambientais gerados pela construção civil, as pesquisas atuais têm buscado focar na seleção de materiais e sistemas construtivos incluindo critérios de sustentabilidade. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo a utilização de dois indicadores ambientais: consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>, para avaliação de quatro sistemas de fachadas para habitações de interesse social (HIS) no Brasil: *light steel framing*, parede de concreto moldada no local, blocos de concreto estruturais e blocos cerâmicos estruturais. A metodologia utilizada foi a Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) e a Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões de CO<sub>2</sub> (ACVCO<sub>2</sub>) nas etapas de extração, processamento e manutenção dos sistemas. O sistema de parede de concreto

foi o que apresentou menor consumo de energia, 189,4 MJ/m<sup>2</sup>, e emissões de CO<sub>2</sub>, 28,6 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, sendo, portanto, o sistema mais indicado para HIS com base nos dois indicadores utilizados.

Palavras-chave: Sustentabilidade. ACVE. ACVCO<sub>2</sub>. Fachadas. Habitações de interesse social.

## ABSTRACT

*As a consequence of the debate about the environmental impacts of construction activities, current research has started to focus on the selection of materials and on construction systems using sustainability criteria. In this context, this study aimed at using two environmental indicators, energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions, to evaluate four FACADE systems for social housing in Brazil: light steel framing, on site concrete molded wall, structural concrete blocks and structural ceramic blocks. The methodology included a Energy Life Cycle Assessment (ELCA) and the CO<sub>2</sub> Emissions Life Cycle Assessment (LCCO<sub>2</sub>ELCA) in the phases of extraction, processing and maintenance of the systems. Based on the two selected indicators, the concrete wall system achieved the lowest energy consumption rate, 189,4 MJ/m<sup>2</sup>, and the lowest level of CO<sub>2</sub> emissions, 28,6 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, therefore proving to be the most sustainable system for social housing purposes.*

*Keywords: Sustainability. LCEA. LCCO<sub>2</sub>A. Social housing.*

## INTRODUÇÃO

Sistemas industrializados e racionalizados têm sido utilizados na construção de habitações de interesse social (HIS) com o objetivo de ganho de produtividade, redução de custos e desperdício de materiais. Como exemplo desses sistemas tem-se: *light steel framing*, painéis pré-fabricados de concreto, paredes de concreto moldadas no local, entre outros. Esses sistemas quando comparados com alvenaria convencional de blocos de concreto ou de blocos cerâmicos apresentam vantagens técnicas para uso em HIS considerando-se a sua maior racionalização, significando que poderá ser construído um número maior de unidades em um tempo menor, minimizando, portanto, o grande déficit habitacional existente no País.

Além do aspecto técnico e econômico, torna-se necessária a avaliação da sustentabilidade ambiental por meio de indicadores, como consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub> para materiais e sistemas construtivos utilizados nas HIS.

A energia exerce um papel fundamental em qualquer processo industrial, seja na queima de combustíveis fósseis (derivados de petróleo, carvão mineral e gás natural), renováveis (lenha, hidráulica, eólica, solar e etc.), ou elétrica (gerada tanto de fontes renováveis ou não renováveis).

Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2015, os setores que mais consumiram energia foram o de indústrias (35,1%) e o de transportes (31,3%); as habitações consumiram 9,4% da energia total disponibilizada no País. Além do mais, o setor energético é um dos grandes consumidores de recursos e geração de impactos ambientais (BERMANN, 2003). O atual momento de crise energética enfrentada no Brasil é mais uma justificativa para pesquisas como esta, da mensuração do consumo de energia no ciclo de vida de habitações e sistemas construtivos para a proposição de ações para a minimização desse consumo.

Em relação às emissões gasosas, pode-se afirmar que o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é o principal gás contribuinte ao aquecimento global pelo processo do efeito estufa (BERMANN, 2003; GOLDEMBERG; LUCON, 2011), emissões que também ocorrem nas etapas de extração e fabricação de materiais e componentes de construção.

Na produção do sistema de fachadas de HIS, independentemente da tecnologia utilizada (industrializada, racionalizada ou convencional), qualquer sistema construtivo no Brasil necessita ter seu desempenho avaliado considerando os aspectos de segurança, habitabilidade e sustentabilidade, segundo a ABNT NBR 15575-1: 2013.

Em relação à sustentabilidade ambiental, diversos indicadores podem ser utilizados em uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), tais como consumo de energia, emissões de CO<sub>2</sub>, consumo de água, geração de resíduos e outros.

O objeto de estudo deste trabalho é o consumo de energia e as emissões de CO<sub>2</sub>, tendo em vista serem os indicadores, aplicados à construção civil, mais utilizados atualmente, em escala mundial, como verificado por Cabeza *et al.* (2014).

## OBJETIVOS

Este trabalho teve por objetivo a avaliação comparativa do desempenho ambiental, com base em dois indicadores: consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>. Foram comparados quatro sistemas de fachadas para HIS: *light steel framing*, paredes de concreto moldadas in loco e blocos de concreto estruturais em comparação com fachadas convencionais de blocos de concreto e de blocos cerâmicos estruturais.

E como objetivos específicos:

- Quantificação da massa total dos sistemas de fachada por m<sup>2</sup>;
- Quantificação do consumo de energia nas etapas de extração, processamento e manutenção dos sistemas de fachadas estudados (por m<sup>2</sup>);
- Quantificação das emissões de CO<sub>2</sub> nas etapas de extração, processamento e manutenção dos sistemas de fachadas estudados (por m<sup>2</sup>).

## AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO (ACVE) E DE EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> (ACVCO<sub>2</sub>) APLICADO AO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Ao longo dos últimos anos, houve um aumento significativo no número de publicações relacionadas à sustentabilidade do setor da construção civil, sendo a ACV uma das técnicas mais utilizadas aplicadas às habitações. Ela pode ser definida como a compilação e a avaliação das entradas e saídas e dos potenciais impactos ambientais de um produto ao longo do seu ciclo de vida, como consumo de energia primária, emissões de gases causadores do efeito estufa, eutrofização, acidificação das águas, etc. Uma importante aplicação da ACV é poder subsidiar a escolha do material ou sistema que apresente um melhor desempenho ambiental (ABNT NBR ISO 14040, 2009).

Ainda segundo essa norma, a ACV é dividida em quatro etapas: (1) definição do objetivo e escopo, (2) análise de inventário, (3) avaliação de impacto e (4) interpretação.

Cabeza *et al.* (2014) e Chau *et al.* (2015) apontam que no contexto da construção civil muitos estudos têm tido como foco aspectos relacionados ao consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>, o que gerou metodologias adaptadas da ACV, denominadas de Avaliação de Ciclo de Vida Energético (ACVE) e Avaliação do Ciclo de Vida de Emissões de CO<sub>2</sub> (ACVCO<sub>2</sub>).

Tavares (2006) define a ACVE como uma abordagem em que os consumos energéticos mais importantes (em forma de energia elétrica, térmica, combustíveis, etc.) de um produto ou processo são contabilizados, resultante dos insumos energéticos necessários para as etapas referentes ao processo de extração e fabricação, transporte dos materiais e componentes, além das etapas de execução, operação, manutenção, demolição/desconstrução e destinação final de resíduos.

A ACVCO<sub>2</sub> pode ser definida como uma metodologia de quantificação e avaliação das emissões de CO<sub>2</sub> geradas nas principais etapas envolvidas ao longo do ciclo de vida de um produto ou processo (desde a extração e processamento até a destinação final dos resíduos), envolvendo as emissões relativas às reações químicas, como a que ocorre na indústria de cimento<sup>1</sup>, queima de combustíveis e geração de eletricidade (BESSA, 2010; ATMACA. A; ATMACA, N., 2015).

Dessa forma, a ACVE e ACVCO<sub>2</sub> aplicadas a habitações diferem da ACV por apresentarem somente os aspectos de energia e emissões de carbono, portanto, sendo considerada uma metodologia mais simplificada, sem uma etapa de avaliação de impactos. Podem ser divididas nas seguintes etapas: (1) definição do objetivo e escopo, (2) análise de inventário de energia e ou emissões de CO<sub>2</sub> e (3) interpretação dos resultados.

Na Tabela 1 são apresentadas as principais etapas normalmente consideradas nos estudos de ACVE e ACVCO<sub>2</sub> aplicadas às habitações.

Tabela 1 – Etapas do ciclo de vida na ACVE e ACVCO<sub>2</sub> aplicado a habitações.

Etapas	Sigla
Pré-uso	
Consumo de energia incorporada no processamento dos materiais e construção	EI
Emissões de CO <sub>2</sub> incorporadas no processamento dos materiais e construção	ECO <sub>2</sub> I
Consumo de energia no transporte dos materiais e componentes	ET
Emissões de CO <sub>2</sub> no transporte dos materiais e componentes	ECO <sub>2</sub> T
Consumo de energia na execução da habitação	EE
Emissões de CO <sub>2</sub> na execução da habitação	ECO <sub>2</sub> E
Uso	
Consumo de energia na operação da habitação	EO
Emissões de CO <sub>2</sub> na operação da habitação	ECO <sub>2</sub> O
Consumo de energia na manutenção da habitação	EM
Emissões de CO <sub>2</sub> na manutenção da habitação	ECO <sub>2</sub> M
Pós-uso	
Consumo de energia na demolição/desconstrução da habitação	ED
Emissões de CO <sub>2</sub> na demolição/desconstrução da habitação	ECO <sub>2</sub> D
Consumo de energia no transporte dos resíduos	ETr
Emissões de CO <sub>2</sub> no transporte dos resíduos	ECO <sub>2</sub> Tr

Fonte: Adaptado de TAVARES (2006), PAULSEN; SPOSTO (2013), CABEZA *et al.* (2014), ATMACA, A.; ATMACA, N. (2015).

A justificativa para a aplicação da ACVE e ACVCO<sub>2</sub> para a realidade brasileira é discutida por Saade *et al.* (2014) e Silva e Silva (2015), tendo em vista que o País ainda se encontra no estágio embrionário da ACV, principalmente no setor da construção civil; além disso, a utilização de banco de dados internacionais sem a devida adaptação ao contexto brasileiro pode gerar resultados não verdadeiros.

Nesse contexto, o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) criou a ACV modular (ACV-m) que tem como intuito a criação de uma plataforma de informações com indicadores de sustentabilidade de materiais, produtos e componentes para auxiliar profissionais e consumidores na tomada de decisão. O projeto propõe o levantamento de cinco aspectos ambientais, entre eles o consumo de energia, de água, de matérias-primas, geração de resíduos e emissões de CO<sub>2</sub> (CBCS, 2014).

Saade *et al.* (2014) apresentaram um estudo também com essa abordagem. Levantaram indicadores ambientais, entre eles consumo de energia, emissões de CO<sub>2</sub>, consumo de água e emissões de compostos orgânicos voláteis (COVs) para os principais materiais e componentes de uma habitação no contexto do Brasil. Os autores utilizaram o banco de dados do *Ecoinvent* de forma adaptada à realidade

brasileira. A lista de materiais e componentes com os respectivos indicadores ambientais foi uma importante contribuição para os estudos de ACV, ACVE e ACVCO<sub>2</sub> realizados no Brasil.

Com base no que foi discutido, optou-se por empregar a ACVE e ACVCO<sub>2</sub> em detrimento da ACV no presente trabalho. A utilização da ACVE é normalmente aplicada para a avaliação de sistemas da edificação, principalmente no sistema de fachada, devido à importância da função que ela desempenha nas habitações, relacionada principalmente aos requisitos de segurança física, estrutural, estanqueidade, desempenho acústico, lumínico e térmico (IWARO; MWASHA, 2013).

Outra característica importante das fachadas é a sua participação na massa e no volume de uma habitação, que em muitos casos é o maior entre todos os sistemas. Paulsen e Sposto (2013) concluíram para uma HIS, localizada em Brasília-DF, que o sistema de fachadas foi o que apresentou maior participação da massa total construída, com o valor aproximado de 57%, o que pode representar um maior consumo de energia e/ou emissões de CO<sub>2</sub>.

No Brasil, alguns trabalhos de ACVE em habitações e fachadas merecem destaque como os de Tavares (2006), Nabut Neto (2011), Paulsen e Sposto (2013) e Pedrosa (2015). Tavares (2006) aplicou a ACVE para diferentes habitações brasileiras, apresentando uma metodologia inicial que serviu de embasamento teórico e metodológico para os estudos posteriores.

Nabut Neto (2011) comparou um sistema convencional de blocos cerâmicos com o *light steel framing*, mostrando que, embora este seja mais leve, seu consumo de energia dos materiais e componentes, principalmente do aço, contribuem para o maior consumo de energia final.

Paulsen e Sposto (2013) levantaram dados e apresentaram resultados do consumo de energia de uma HIS de blocos cerâmicos estruturais, típica para a realidade de Brasília, concluindo que o sistema de fachadas foi o que apresentou maior participação em massa e consumo de energia. Além disso, verificaram a importância da etapa de manutenção no ciclo de vida da HIS, enquanto que as etapas de transporte e pós-uso se mostraram desprezíveis.

Em relação aos estudos de ACVCO<sub>2</sub>, estes têm tido como foco a aplicação em materiais de construção como o de Passuelo *et al.* (2014) e Santoro e Kripka (2016). O primeiro avaliou as emissões de CO<sub>2</sub> comparando um cimento inovador com um convencional, mostrando a diminuição das emissões no inovador. O segundo quantificou as emissões de carbono dos agregados utilizados em concretos produzidos na região do Rio Grande do Sul.

Bessa (2010) desenvolveu uma metodologia de ACVCO<sub>2</sub> para a avaliação de fachadas voltadas para edificações comerciais, servindo como uma importante referência metodológica. Costa (2012) quantificou emissões de CO<sub>2</sub> para os principais materiais e componentes utilizados no País, como concreto, blocos cerâmicos, gesso, etc., o que serviu também como uma importante fonte para o inventário de estudos brasileiros de ACVCO<sub>2</sub>.

Caldas *et al.* (2015) quantificaram as emissões de CO<sub>2</sub> ao longo do ciclo de vida de uma HIS. Os autores concluíram a importância da etapa de extração, processamento e manutenção dos materiais e componentes utilizados e da operação da habitação. Verificaram que a etapa de transporte e pós-uso também são desprezíveis, concordando com os resultados de Paulsen e Sposto (2013) e mostrando certa relação entre o consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub> ao longo do ciclo de vida das habitações.

Em trabalhos internacionais tem sido verificada a aplicação em conjunto da ACVE e ACVCO<sub>2</sub> relacionando com o desempenho térmico das fachadas. Huberman e Pearlmutter (2008) avaliaram o consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub> para cinco sistemas de fachada de um modelo de habitação localizado no deserto de Negev, em Israel. Os autores concluíram que o sistema de fachada com o melhor desempenho térmico foi o que apresentou menor consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub> totais ao longo do ciclo de vida, como consequência do menor consumo por aparelhos de climatização artificial.

Rakhshan *et al.* (2013) concluíram a diminuição no consumo energético e emissão de CO<sub>2</sub> como consequência do aumento da espessura de camadas de isolantes térmicos em fachadas de habitações localizadas em Dubai, Emirados Árabes.

Wen *et al.* (2015) aplicaram a ACVE e a ACVCO<sub>2</sub> comparando um sistema construtivo industrializado com um convencional, ambos localizados na Malásia, e concluíram que o menor consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub> ocorreu no sistema industrializado, atribuindo esses resultados ao menor consumo de materiais e componentes desse tipo de sistema.

Cabeza *et al.* (2014) e Chau *et al.* (2015) realizaram um extenso estado da arte internacional sobre ACV, ACVE e ACVCO<sub>2</sub> aplicados ao setor da construção civil, levantando os principais estudos publicados, definições e aspectos metodológicos.

Com base nos trabalhos citados, nota-se o crescente interesse da aplicação da ACVE e ACVCO<sub>2</sub> a fim de avaliar o desempenho ambiental de sistemas de fachadas, tanto no contexto nacional como internacional. Além disso, o consumo de energia e as emissões de CO<sub>2</sub> têm sido considerados em conjunto com o desempenho térmico de fachadas. No entanto, o consumo de energia para climatização artificial em países europeus, norte-americanos e localizados em climas desérticos é diferente do Brasil.

Grande parte desse consumo, para os dois primeiros continentes, ocorre para o aquecimento das habitações durante a estação de inverno. Em climas desérticos as intensas condições climáticas resultam em um maior consumo de energia para a refrigeração dos ambientes. A situação do Brasil é peculiar, pois além de existir diferenças climáticas nas cinco regiões brasileiras, o que aumentaria a utilização da climatização artificial em algumas regiões, por exemplo, no Nordeste, a utilização de climatização artificial nas HIS é pouco frequente devido aos custos associados à aquisição e uso dos aparelhos de climatização. Levando isso em consideração, optou-se por não levar em conta aspectos relacionados ao desempenho térmico dos sistemas de fachadas e climatização artificial no presente estudo.

## METODOLOGIA

Neste item foram considerados a definição do objetivo e escopo, de acordo com o que tem sido observado na literatura nacional e internacional, a caracterização dos sistemas de fachada em estudo, as fontes consideradas no inventário, o método e as equações empregadas no cálculo dos indicadores escolhidos, consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>.

## DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO

Os quatro sistemas de fachadas selecionados<sup>2</sup> para serem estudados no presente trabalho foram:

- Sistema de *light steel framing*;
- Sistema de parede de concreto moldada no local;
- Sistema convencional de blocos de concreto estruturais;
- Sistema convencional de blocos cerâmicos estruturais.

Na Figura 1 é apresentada uma ilustração das fachadas estudadas.

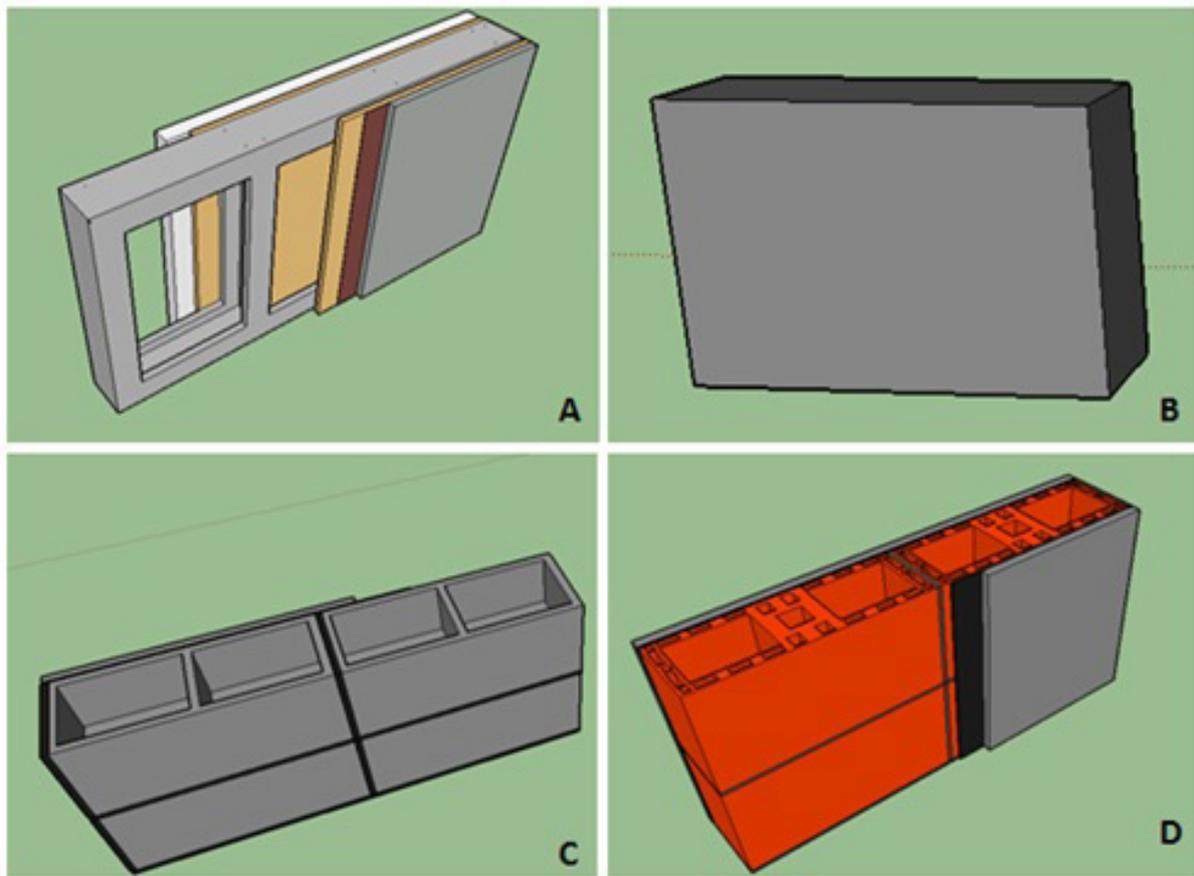


Figura 1 - Caracterização das fachadas. (A) Sistema Light steel framing; (B) Sistema de parede de concreto moldada no local; (C) Sistema de blocos de concreto estruturais; (D) Sistema de blocos cerâmicos estruturais.  
Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

Para a especificação dos diferentes sistemas de fachadas, foi utilizado o critério de desempenho térmico, com base nos requisitos descritos na ABNT NBR 15575 – 4: 2013. Os critérios adotados foram os valores de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (C) para cada sistema. O valor de U foi fixado no máximo em 2,5 W/m<sup>2</sup>.k e o C mínimo de 130 kJ/m<sup>2</sup>.k. Com esses dois parâmetros foi possível definir as espessuras dos elementos de fachada.

Foi empregada a metodologia de ACVE e ACVCO<sub>2</sub> para o cálculo do consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>, sendo que foi considerado somente a energia (EI) e emissões (ECO<sub>2</sub>I) da etapa de extração e processamento dos materiais e componentes, e energia (EM) e emissões (ECO<sub>2</sub>M) da etapa de manutenção. Na Figura 2 são apresentadas as etapas do ciclo de vida da habitação, sendo que somente as etapas marcadas em azul foram consideradas.

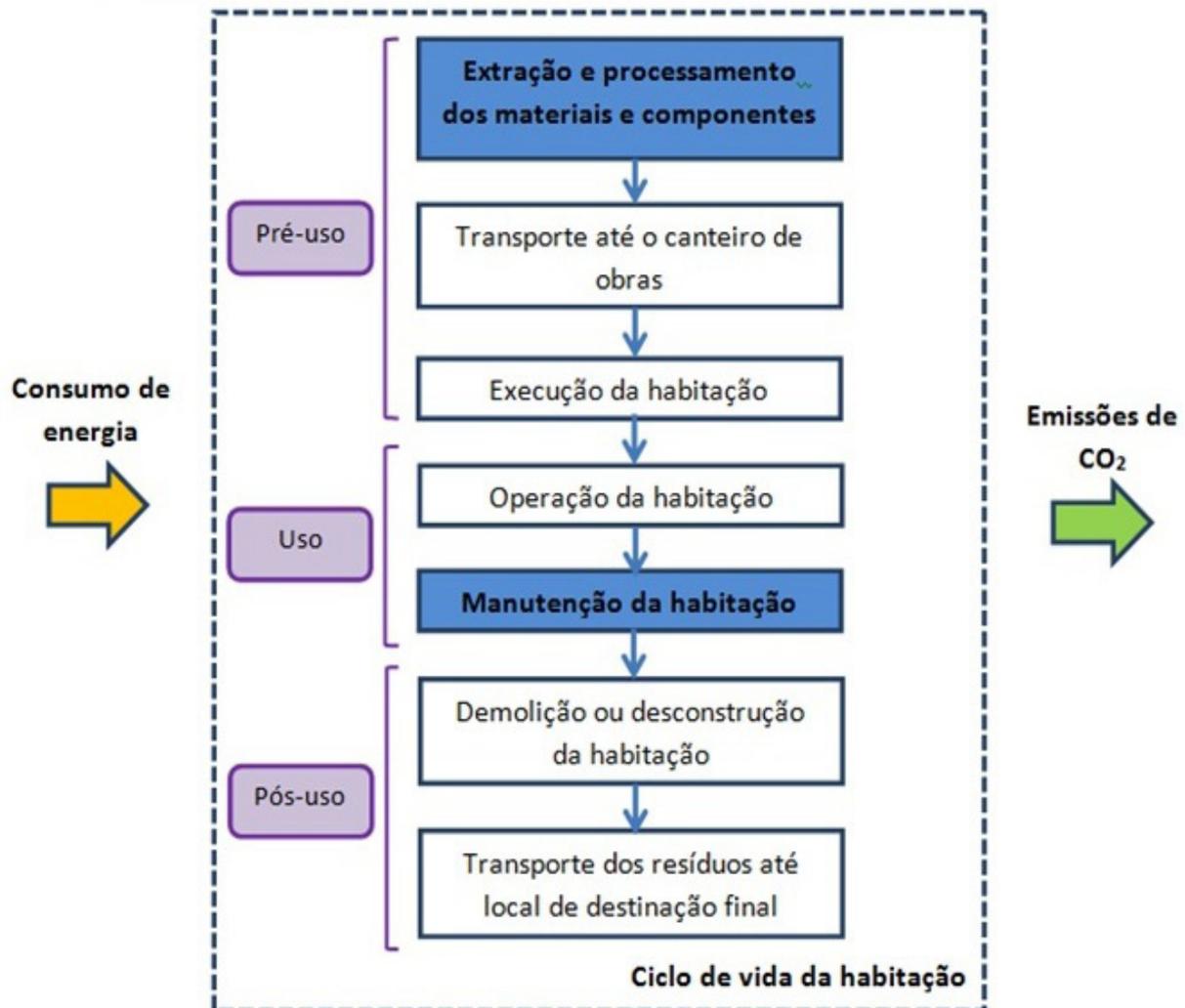


Figura 2 – Etapas e aspectos ambientais avaliados no estudo.

Fonte: Elaborado pelos autores (2016).

Foi utilizada uma regra de corte de 5% da participação da massa, ou consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>, o mesmo critério adotado por Saade *et al.* (2014), Silva e Silva (2015). As etapas de transporte dos materiais e componentes, demolição e transporte dos resíduos não foram consideradas neste escopo pelo fato da sua pequena participação no ciclo de vida da habitação; de acordo com Tavares (2006), Paulsen e Sposto (2013) e Caldas *et al.* (2015), possuem participação inferior a 2%.

A etapa de operação não foi contabilizada por ser igual entre os quatro sistemas de fachadas. O que geraria diferenças entre os quatro sistemas de fachadas seria a climatização artificial, pois mesmo os quatro sistemas atendendo aos critérios mínimos presentes na norma, poderia haver alguma diferença relacionada ao conforto do usuário. No entanto, como foi discutido anteriormente, não foi considerada a climatização artificial tendo em vista que a utilização de aparelhos de climatização é pouco frequente nas HIS.

Foi adotada como unidade funcional<sup>3</sup> 1 m<sup>2</sup> de área de fachada, e a vida útil da habitação de 50 anos. Foi escolhida essa vida útil por ser a mais empregada internacionalmente, como verificado por Cabeza *et al.* (2014) e no Brasil (ABNT NBR 15575-1, 2013).

## CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE FACHADAS

Na fachada de *light steel framing* foi considerada a quantidade (incluindo as perdas) dos seguintes materiais e componentes: guias e montantes de aço, chapa de oriented strand board (OSB), placa cimentícia (externamente), placa de gesso (internamente) e miolo de lã mineral.

Para a fachada em parede de concreto moldado no local, foi considerada a quantidade (incluindo as perdas) dos seguintes materiais e componentes: concreto com resistência de 30 MPa (cimento CII-E) e aço. A forma de alumínio foi desconsiderada visto que ela não é incorporada ao final da fachada, ela é utilizada na execução e pode ser reaproveitada diversas vezes.

Para a fachada de blocos de concreto foi considerada a quantidade (incluindo as perdas) dos seguintes materiais e componentes: blocos de concreto estruturais (14x19x39 cm) e argamassa de revestimento.

Para a fachada de blocos cerâmicos foi considerada a quantidade (incluindo as perdas) dos seguintes materiais e componentes: blocos cerâmicos estruturais (14x19x39 cm) e argamassa de revestimento.

Não foi considerado o sistema de pintura, visto que em todos os sistemas podem ser utilizados o mesmo tipo de pintura. Em relação às perdas dos materiais, foram consideradas apenas as referentes à execução dos sistemas, retiradas da literatura. O *light steel framing*, por ser um sistema industrializado, que necessita apenas da montagem das peças, foram consideradas perdas de 5%.

## ANÁLISE DE INVENTÁRIO DE ENERGIA E EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> DOS MATERIAIS E COMPONENTES

Para o inventário do consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub> foram utilizados os dados encontrados na literatura nacional. Somente para a chapa oriented strand board (OSB) foi utilizada uma referência norte-americana, por não ter sido encontrada nenhuma referência nacional. O valor relativo ao consumo de energia foi chamado de fator de energia (FE) e o de emissões de (FCO<sub>2</sub>). Optou-se pela utilização desses dados por serem adaptados à realidade brasileira e por serem os mais recentes encontrados na literatura.

O método para o levantamento do inventário utilizado considerou uma análise híbrida; foram listados os insumos (em massa ou volume) considerados em cada sistema e para o FE e FCO<sub>2</sub> foram consideradas as fontes consultadas. A maioria das pesquisas nessa temática tem considerado esse método, tais como Tavares (2006), Sposto e Paulsen (2014), Atmaca e Atmaca (2015) e Wen *et al.* (2015).

Na Tabela 2 são apresentados os valores de quantidade (em massa ou volume), perdas, FE e FCO<sub>2</sub> empregados no presente trabalho.

Tabela 2 – Quantidades, perdas e valores dos fatores de energia e de emissões de CO<sub>2</sub> adotados no estudo.

Materiais e componentes	Quantidade	Perdas <sup>1</sup> (%)	Fator de energia (MJ/UM <sup>2</sup> )	Fonte	Fator de emissões de CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /UM <sup>2</sup> )	Fonte
Light steel framing						
Guias e montantes de aço (kg)	5,09	5	10,27	Saade <i>et al.</i> (2014)	1,55	Saade <i>et al.</i> (2014)
Chapa de OSB (kg)	36,01	5	13,34	American Wood Council (2013)	0,39	American Wood Council (2013)
Placa cimentícia (kg)	29,25	5	6,00	Graf (2011)	0,16	Costa (2012)
Placa de gesso (kg)	10,94	5	4,57	Graf (2011)	0,43	Bessa (2010)
Lã mineral (kg)	2,52	5	19,00	Graf (2011)	0,69	Bessa (2010)

continuação

Parede de concreto moldada no local						
Concreto (m <sup>3</sup> )	0,16	9	1002,40	Saade et al. (2014)	151,08	Saade et al. (2014)
Aço (kg)	1,77	10	10,27	Saade et al. (2014)	1,55	Saade et al. (2014)
Blocos de concreto estruturais						
Blocos de concreto (kg)	147,50	3	1,02	CBCS (2014)	0,21	CBCS (2014)
Argamassa (kg)	109,50	15	2,10	Nabut Neto (2011)	0,16	Nabut Neto (2011)
Blocos cerâmicos estruturais						
Blocos cerâmicos (kg)	86,25	5	2,52	Saade et al. (2014)	0,23	Saade et al. (2014)
Argamassa (kg)	109,5	15	2,10	Nabut Neto (2011)	0,16	Nabut Neto (2011)

\* Obtidas de Agopyan et al. (1998)

\* Unidade de medida

Fonte: Elaborado pelos autores (2016).

## CÁLCULO DA ENERGIA INCORPORADA DE EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO (EI) E DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> INCORPORADAS DE EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO (ECO<sub>2</sub>I)

O cálculo de EI e ECO<sub>2</sub>I para os sistemas de fachadas foi realizado a partir da utilização das equações 1 e 2 adaptadas de Tavares (2006), Nabut Neto (2011), Pedroso (2015), Cabeza et al. (2014) e Atmaca e Atmaca (2015).

$$EI = \frac{\sum_{i=1}^n mx(1 + \frac{p}{100})}{A} x FE \quad (1)$$

$$ECO_2I = \frac{\sum_{i=1}^n mx(1 + \frac{p}{100})}{A} x FCO_2 \quad (2)$$

Onde:

n – Número de materiais;

i – Material considerado;

p – Perdas (%);

m – Massa (kg) ou volume (m<sup>3</sup>);A – Área (m<sup>2</sup>);FE – Fator de energia incorporada (MJ/kg) ou (MJ/m<sup>3</sup>);FCO<sub>2</sub> – Fator de emissões de CO<sub>2</sub> (kgCO<sub>2</sub>/kg) ou (kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>);EI – Energia incorporada na extração e processamento (MJ/m<sup>2</sup>);ECO<sub>2</sub>I – Emissões de CO<sub>2</sub> incorporadas na extração e processamento (kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>).

## CÁLCULO DA ENERGIA DE MANUTENÇÃO (EM) E DAS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> DA MANUTENÇÃO (ECO<sub>2</sub>M)

O cálculo de EM e ECO<sub>2</sub>M para os sistemas de fachadas foi realizado a partir da utilização das equações 3 e 4, também adaptadas de Tavares (2006), Nabut Neto (2011), Pedroso (2015), Cabeza *et al.* (2014), Atmaca e Atmaca (2015).

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^n mx(1 + \frac{p}{100})}{A} x FE x (FR - 1) \quad (3)$$

$$ECO_2M = \frac{\sum_{i=1}^n mx(1 + \frac{p}{100})}{A} x FCO_2 x (FR - 1) \quad (4)$$

Onde:

n – Número de materiais;

i – Material considerado;

p – Perdas (%);

m – Massa (kg) ou volume (m<sup>3</sup>);

A – Área (m<sup>2</sup>);

FE – Fator de energia incorporada (MJ/kg) ou (MJ/m<sup>3</sup>);

FCO<sub>2</sub> – Fator de emissões de CO<sub>2</sub> (kgCO<sub>2</sub>/kg) ou (kgCO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>);

FR – Fator de reposição (-);

EM – Energia incorporada na manutenção (MJ/m<sup>2</sup>);

ECO<sub>2</sub>M – Emissões de CO<sub>2</sub> na manutenção (kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>).

O fator de reposição (FR) representa a quantidade de vezes que um material ou componente é substituído durante a etapa de manutenção, o que leva a um novo consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>. Foram considerados os mesmos valores de FE e FCO<sub>2</sub>, adotados no cálculo da EI e ECO<sub>2</sub>I, para os materiais e componentes que são substituídos. O FR foi encontrado pela divisão da vida útil adotada da habitação, 50 anos, pela vida útil dos materiais e componentes, adotada de acordo com a literatura, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Cálculo do fator de reposição (FR) dos materiais e componentes utilizados nas fachadas.

Materiais e componentes	Vida útil edificação (anos)	Vida útil material/componente (anos)	Fonte	Fator de reposição (FR)
<b>Light steel framing</b>				
Guias e montantes de aço	50	50		1,00
Chapa de OSB	50	30	Palácio (2013)	1,67
Placa cimentícia	50	40		1,25
Placa de gesso	50	30		1,67
Lã mineral	50	30		1,67

Parede de concreto moldada no local				
Concreto armado (concreto e aço)	50	50	NBR 15575-1 (ABNT, 2013)	1,00
Blocos de concreto estruturais				
Blocos de concreto	50	50	NBR 15575-1 (ABNT, 2013)	1,00
Argamassa de revestimento	50	40		1,25
Blocos cerâmicos estruturais				
Blocos cerâmicos	50	50	NBR 15575-1 (ABNT, 2013)	1,00
Argamassa de revestimento	50	40		1,25

Fonte: Elaborado pelos autores.

O emprego do FR no cálculo da etapa de manutenção já foi utilizado em outros estudos nacionais como o de Tavares (2006), Maciel (2013) e Caldas *et al.* (2015) e estudos internacionais como o de Scheuer *et al.* (2003), Chau *et al.* (2007) e Atmaca e Atmaca (2015), sendo, portanto, uma metodologia aceita e difundida.

Ao final foram somados os valores de energia e emissões de CO<sub>2</sub> da etapa de extração e processamento com os da etapa de manutenção, resultando no consumo de energia total e emissões de CO<sub>2</sub> totais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos objetivos definidos inicialmente e na metodologia utilizada foram obtidos os resultados apresentados a seguir.

### a. Quantificação da Massa dos Sistemas de Fachadas

As massas de cada sistema de fachada estão apresentadas na Figura 3.

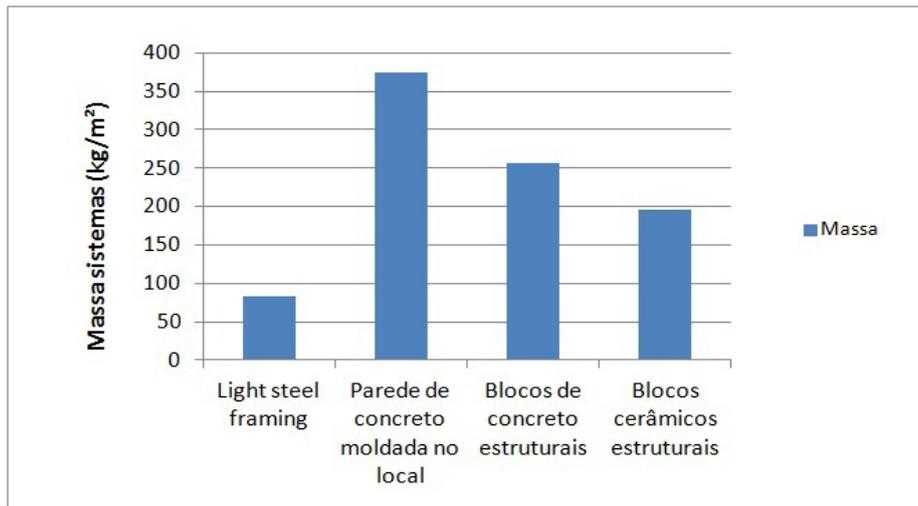


Figura 3 – Massa total dos sistemas de fachadas.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A massa é um indicador que pode ser utilizado para analisar o impacto do transporte dos materiais e componentes, bem como do consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>. O sistema de parede de concreto foi o que apresentou maior massa, com 373,8 kg/m<sup>2</sup>, seguido do sistema de blocos de concreto, com 257,1 kg/m<sup>2</sup>, de blocos cerâmicos, com 195,8 kg/m<sup>2</sup>, e do *light steel framing* com 83,8 kg/m<sup>2</sup>.

Espera-se que quanto maior o consumo de material e, portanto, maior massa, maior será o consumo de recursos e emissões relacionadas, no entanto, apenas essa análise não é suficiente do ponto de vista ambiental, pois é necessário saber quais os materiais e componentes que foram consumidos, tendo em vista que os processos produtivos e durabilidade dos materiais e componentes existentes na construção civil não são homogêneos.

#### b. Avaliação do Consumo de Energia das Fachadas

A partir dos valores do fator de energia incorporada nos materiais (FE) e do quantitativo de materiais apresentados anteriormente, foram obtidos os valores da energia de extração e processamento (EI) e da manutenção (EM) para os sistemas de fachadas estudadas (Figura 4).

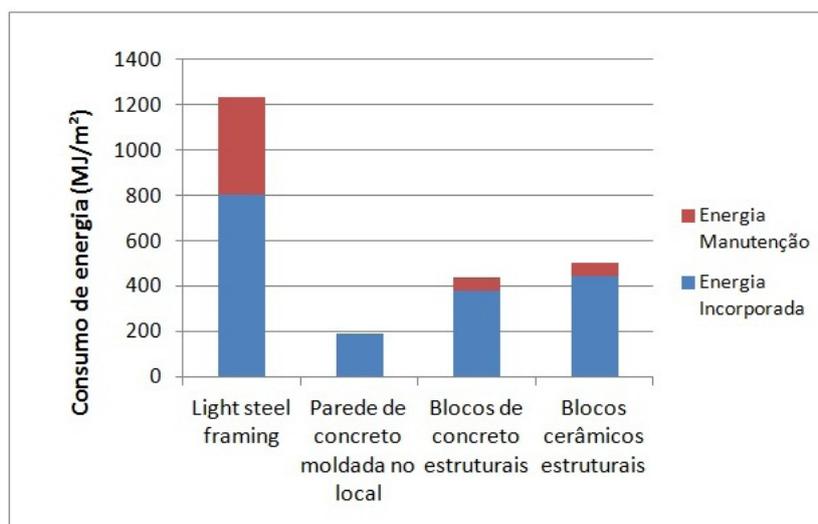


Figura 4 - Energia incorporada de extração e processamento e energia da manutenção para as fachadas estudadas.

Fonte: Elaborado pelos autores.

É possível observar que a fachada de *light steel framing* apresentou maior consumo de energia, tanto nas etapas de extração e processamento (EI) quanto na de manutenção (EM), com 1.234,5 MJ/m<sup>2</sup>, em uma quantidade consideravelmente superior aos outros sistemas de fachadas, com uma diferença variando entre 60% e 85% entre esse sistema e os outros. Esse resultado vai ao encontro do apresentado por Carminatti Júnior (2012) e Pedrosa (2015), que verificaram o maior consumo de energia para sistemas de *light steel framing* em comparação ao sistema convencional de blocos cerâmicos.

O sistema de blocos cerâmicos apresentou um consumo de energia total de 504,8 MJ/m<sup>2</sup>, seguido do sistema de blocos de concreto, com 437,4 MJ/m<sup>2</sup>, e do sistema de parede de concreto com 189,4 MJ/m<sup>2</sup>.

Esse resultado foi consequência do elevado fator energético dos materiais e componentes (FE) empregados no *light steel framing*. Dessa forma, embora o *light steel framing* tenha apresentado uma massa menor entre todos os sistemas, os FEs dos materiais e componentes foram mais impactantes.

Em relação à etapa de manutenção, a menor vida útil das chapas de Oriented Strand Board (OSB), lã mineral e placa de gesso foram responsáveis pelo aumento do consumo de energia nessa etapa. Nota-se uma participação de 35% da etapa de manutenção em relação ao consumo de energia total.

Nos sistemas de blocos de concreto e cerâmicos só foi considerada a reposição da camada de argamassa de revestimento, que apresenta um baixo valor de FE, igual a 2,10 MJ/kg, que não resultou em elevado consumo de energia da etapa de manutenção, representando aproximadamente 12% para ambos os sistemas. Por fim, o sistema de parede de concreto, por ser um sistema sem a necessidade de revestimento, não apresentou consumo de energia durante a etapa de manutenção.

Os resultados relativos ao consumo de energia indicam potenciais impactos ambientais relacionados ao consumo de recursos naturais. O consumo de forma não controlada dos recursos disponíveis no planeta impactam significativamente a sustentabilidade tanto do ponto de vista ambiental, como econômico e social.

A escassez de recursos resulta em uma maior competição para a sua obtenção, o que leva ao aumento dos custos, tendo em vista a diminuição da disponibilidade e aumento de disputas políticas e territoriais. Portanto, comparando os quatro sistemas avaliados, o sistema de fachadas de *light steel framing* é o menos indicado enquanto o de parede de concreto é o mais indicado.

### c. Avaliação das Emissões de CO<sub>2</sub> das Fachadas

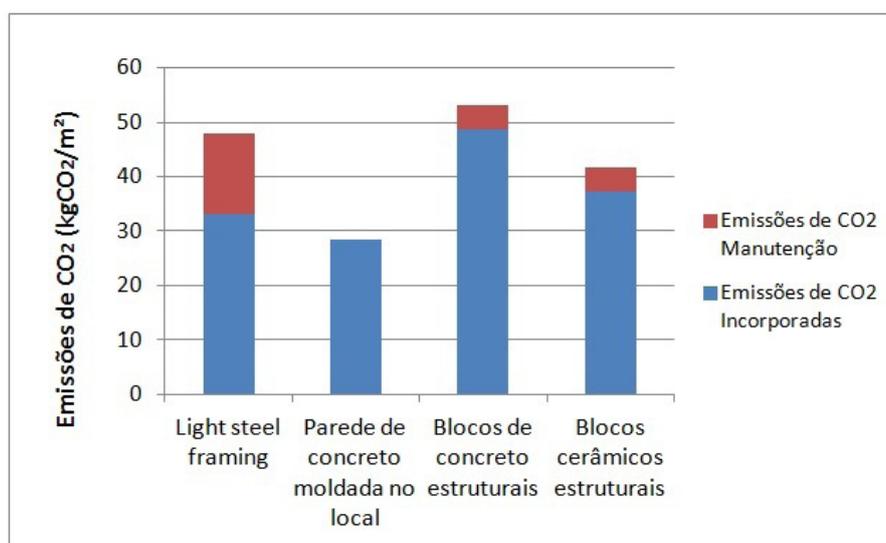


Figura 5 - valores das emissões de extração e processamento (ECO<sub>2</sub>I) e manutenção (ECO<sub>2</sub>M) das fachadas estudadas.

Fonte: Elaborado pelos autores.

A fachada com blocos de concreto estruturais foi a que apresentou maior valor de emissões totais, com 53,2 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, seguida da de *light steel framing*, com 47,9 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, da de blocos cerâmicos, com 41,7 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, e da parede de concreto com 28,6 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>. Observa-se que a fachada de parede de concreto foi a que apresentou melhor resultado para este indicador.

Para a etapa de manutenção, o sistema de *light steel framing* apresentou o maior valor, representando 31% em relação às emissões de CO<sub>2</sub> totais. Enquanto que para os sistemas de blocos de concreto e blocos cerâmicos, a etapa de manutenção correspondeu em 8% e 10%, respectivamente.

Era esperado que a fachada de *light steel framing* apresentasse o maior valor de emissões totais já que apresentou o maior valor de energia. No entanto, os resultados não se confirmaram. O motivo para essa diferença foram as maiores emissões de CO<sub>2</sub> da argamassa, do concreto e dos blocos (tanto de concreto como cerâmico). No concreto, na argamassa e nos blocos de concretos é utilizado cimento, que emite considerável quantidade de emissões, principalmente pelo processo da calcinação que ocorre durante sua produção. No bloco cerâmico normalmente é utilizada lenha para queima no Brasil, um combustível pouco eficiente que também emite quantidade considerável de CO<sub>2</sub>.

O menor valor de emissões de CO<sub>2</sub> do *light steel framing* foi resultado dos processos para a produção dos materiais e componentes utilizados nesse sistema, que são mais limpos em termos de emissões, provavelmente pelo maior uso de eletricidade e gás no processo produtivo.

Dessa forma, é possível concluir que a situação ideal, do ponto de vista da sustentabilidade ambiental, seria a utilização de sistemas de fachada que utilizassem materiais e componentes com baixo consumo de fontes energéticas em conjunto com fontes energéticas mais limpas e renováveis. A utilização de eletricidade em detrimento de outros combustíveis seria vantajosa em termos de emissões, pois grande parte da matriz elétrica brasileira, em torno de 70%, de acordo com dados do BEN (2015), é proveniente da fonte hidráulica, que pode ser considerada uma fonte renovável que emite menor quantidade de CO<sub>2</sub> quando comparada a outras fontes, por exemplo, a térmica.

O emprego de fontes como a solar e eólica também seriam interessantes do ponto de vista ambiental, pois, além de serem renováveis, geram poucas emissões de CO<sub>2</sub> durante a produção de energia, no entanto, é necessário avaliar a viabilidade técnica e econômica dessas fontes para essas indústrias.

Os resultados relativos às emissões de CO<sub>2</sub> são importantes, pois indicam potenciais impactos ambientais relacionados ao aquecimento global, que pode trazer consequências negativas aos ecossistemas e à saúde humana.

Com base em previsões do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e autores como Agopyan e John (2011), Goldemberg e Lucon (2011), o aquecimento global poderá ser responsável por uma série de impactos, indo desde a elevação do nível do mar, causando enchentes, mudança do ciclo hidrológico, da distribuição de temperatura no planeta, desertificação de áreas que, caso venha a se concretizar, afetará de forma significativa o equilíbrio dos ecossistemas, contribuindo para a destruição de *habitats* e para a extinção das espécies.

Do ponto de vista da saúde humana, o resultado das catástrofes poderá levar à destruição de cidades, e a distribuição diferenciada das temperaturas acarretará em drásticas mudanças climáticas, como aumento excessivo das temperaturas em algumas regiões e o inverso em outras. Roaf *et al.* (2010) atentam que o próprio setor da construção civil será diretamente afetado, pois os projetistas necessitarão adaptar seus modelos para a construção de edificações e obras de acordo com as mudanças ocorridas no meio ambiente.

Os resultados do trabalho mostraram, a partir da comparação desses quatro sistemas, que a fachada com parede de concreto também foi a que apresentou maior vantagem referente às emissões de CO<sub>2</sub>, enquanto a de blocos de concreto estruturais o pior resultado.

Dessa forma, pode-se concluir que a fachada de parede de concreto moldada no local é o sistema mais vantajoso tanto do ponto de vista energético quanto de emissões de CO<sub>2</sub>.

Essa limitação pode ser explorada em futuros estudos, onde pode ser previsto o consumo de energia e as emissões de CO<sub>2</sub> para diferentes cidades brasileiras relativas à climatização artificial dessas habitações com base nos diferentes desempenhos térmicos dos quatro sistemas avaliados. Essa previsão pode ser realizada por meio da simulação computacional, utilizando softwares de simulação termoeenergética já existentes no mercado.

## CONCLUSÕES

No presente trabalho foi avaliado o desempenho ambiental dos quatro sistemas de fachadas mais utilizados no Brasil para habitações de interesse social (HIS), por meio das metodologias de ACVE e ACVCO<sub>2</sub>.

Foram avaliados os seguintes sistemas de fachadas: light steel framing, parede de concreto moldada no local, parede de blocos de concreto e parede de blocos cerâmicos estruturais. Os sistemas foram especificados com base no desempenho térmico mínimo exigido na ABNT NBR 15575-4:2013.

A partir da avaliação foi possível concluir que a fachada de parede de concreto moldada no local, embora seja a que apresente maior massa, foi a que apresentou menores valores de consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>, 189,4 MJ/m<sup>2</sup> e 28,6 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, respectivamente, sendo, portanto, o sistema de fachada mais indicado para a execução de HIS, com base nesses dois indicadores, o que poderá subsidiar a escolha do sistema de fachada durante a etapa de projeto pelos construtores.

A fachada de light steel framing apresentou 1.234,5 MJ/m<sup>2</sup> e 47,9 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, enquanto as fachadas de blocos de concreto 437,4 MJ/m<sup>2</sup> e 53,2 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> e as de blocos cerâmicos 504,8 MJ/m<sup>2</sup> e 41,7 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>. Dessa forma, não foi possível concluir qual sistema de fachada é o menos vantajoso, necessitando de outros indicadores ambientais ou questões relacionadas aos custos e produtividade.

O consumo de energia pode indicar a exaustão de recursos naturais enquanto as emissões de CO<sub>2</sub> o potencial de aquecimento global, sendo que este impacto pode influenciar nos ecossistemas e na saúde humana.

Sabe-se que sistemas industrializados e racionalizados, como o light steel framing e as paredes de concreto, apresentam maiores custos, no entanto, são mais eficientes já que apresentam maior produtividade e menor desperdício, considerando a minimização no consumo de recursos; levando em conta que o presente trabalho teve como foco as HIS, que normalmente são construídas em série (em grandes quantidades), haverá vantagem econômica.

Sugere-se para futuros estudos: (1) utilização de outros indicadores ambientais, por exemplo, consumo de água e emissões de compostos orgânicos voláteis; (2) inclusão de indicadores econômicos e de produtividade; (3) simulação computacional para a previsão das diferenças no consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub> ante os diferentes desempenhos térmicos dos sistemas de fachadas.

## NOTAS

<sup>1</sup> Nas indústrias de cimento ocorre a calcinação do calcário natural, o carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), submetido à ação do calor, decompõe-se em óxido de cálcio (CaO) e CO<sub>2</sub> (BAUER, 2003).

<sup>2</sup> Foram selecionados esses sistemas de fachadas por serem os mais empregados nas HIS do Brasil.

<sup>3</sup> Segundo a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), a unidade funcional pode ser definida como a unidade de referência em um estudo de ACV. O principal objetivo da UF é proporcionar referências para relacionar as entradas e saídas do sistema adotado e possibilitar a comparação entre diferentes produtos, processos e estudos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOPYAN, V. et al. Alternativas para a redução de desperdício de materiais nos canteiros de obras. Relatório Final. PCC-USP/FINEP/ITQC, 5 vol. 1.355 p. Setembro de 1998.

AGOPYAN, V.; JONH, V. M. O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil. Série Sustentabilidade, v. 5. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2011.

AMERICAN WOOD COUNCIL. Environmental Product Declaration. North American Oriented Strand Board. 2013.

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

\_\_\_\_\_. NBR 15575-1: Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. NBR 15575-4: Edificações Habitacionais – Desempenho – Parte 4: Sistema de Vedações Verticais. Rio de Janeiro, 2013.

ATMACA, A.; ATMACA, N. Life cycle energy (LCEA) and carbon dioxide emissions (LCCO2A) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey. Elsevier, Energy and Buildings, v. 102, p. 417-431, 2015.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN) 2015: Relatório Síntese ano-base 2014. Brasília, 2015.

BAUER, L. A. F. Materiais de Construção 1. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003.

BERMANN, C. Energia no Brasil: para quê e para quem? Crise e Alternativas para um país sustentável. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003.

BESSA, V. M. T. Contribuição à Metodologia de Avaliação das Emissões de Dióxido de Carbono no Ciclo de Vida das Fachadas de Edifícios de Escritórios. Tese (Doutorado de Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

CABEZA, L. F. et al. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, v. 29, p. 394-416. 2014.

CALDAS, L. R. et al. Emissões de CO<sub>2</sub> no Ciclo de Vida de Habitações de Interesse Social: Estudo de Caso para o DF, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO – INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE, 9., 2015, São Carlos, Anais ... São Carlos: ANTAC, 2015.

CARMINATTI JÚNIOR, R. Análise do Ciclo de Vida Energético de projeto de Habitações de Interesse Social concebido em Light Steel Framing. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de São Carlos, São Carlos, 2012.

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. Elsevier, Applied Energy, v. 143, p. 395-413, 2015.

CHAU, C. K. et al. Environmental impacts of building materials and buildings services components for commercial buildings in Hong Kong. Elsevier, Journal of Cleaner Production, v. 15, n. 18, p. 1840-1851, 2007.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (CBCS). Projeto Avaliação de Ciclo de Vida Modular de Blocos e Pisos de Concreto. 2014. Disponível em: <<http://www.acv.net.br/website/acvs/show.asp?ppgCode=DE-0D28E8-7BDE-4495-9405-8604588186C5>>. Acesso em: 19 abr. 2015.

COSTA, B. L. C. Quantificação das Emissões de CO<sub>2</sub> geradas na produção de materiais utilizados na Construção Civil no Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento. 3. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2011.

GRAF, H. F. Transmitância Térmica e Energia Incorporada na Arquitetura: sua relação nas superfícies do invólucro de uma Edificação Residencial Unifamiliar conforme a Norma NBR 12721. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

HUBERMAN, N.; PEARLMUTTER, D. A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 40, p. 837-848, 2008.

IWARO, J.; MWASHA, A. The impact of sustainable building envelope design on building sustainability using Integrated Performance Model. *Elsevier, International Journal of Sustainable Built Environment*. v. 2, p. 153-171. 2013.

MACIEL, A. C. F. Energia incorporada de fachadas ventiladas. Estudo de caso para edificação habitacional em Brasília. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

NABUT NETO, A. C. Energia Incorporada e Emissões de CO<sub>2</sub> de fachadas. Estudo de Caso do Steel Frame para utilização em Brasília. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2011.

PALACIO, C. D. U. Energia Incorporada de Vedações para Habitação de Interesse Social considerando-se o Desempenho Térmico. Estudo de Caso com utilização do Light Steel Frame no Entorno do DF. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2013.

PASSUELLO, A. C. B. et al. Aplicação da avaliação de ciclo de vida na análise de impactos ambientais de materiais de construção inovadores: estudo de caso da pegada de carbono de clínqueres alternativos. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 4, p. 7-20, 2014.

PAULSEN, J. S.; SPOSTO, R. M. A life cycle energy analysis of social housing in Brazil: Case Study for the program "My house my life". *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 57, p. 95-102, 2013.

PEDROSO, G. M. Tese (Doutorado em Estruturas e Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

RAKHSAN, K.; FRIESS, W. A.; TAJERZADEH, S. Evaluating the sustainability impact of improved building insulation: a case study in the Dubai residential built environment. *Building and Environment*, Elsevier, v. 67, p. 105-110. 2013.

ROAF, S.; CRICHTON, D.; NICOL, F. Adaptação de Edificações e Cidades às Mudanças Climáticas. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

SAADE, M. R. M. et al. Material eco-efficiency indicator for Brazilian buildings. *Smart and Sustainable Built Environment*, Emerald, v. 3, n. 1, p. 54-71, 2014.

SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias-primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 35-49, abr./jun., 2016.

SCHEUER, C.; KEOLEIAN, G. A.; REPPE, P. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modelling challenges and design implications. *Energy and Building*, Elsevier, v. 35, p. 1049-1064, 2003.

SILVA, V. G.; SILVA, M. G. Seleção de materiais e edifícios de alto desempenho ambiental. In: GONÇALVES, J. C. S.; BODE, K. Edifício Ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Cap. 5. p. 129-151.

SPOSTO, R. M.; PAULSEN, J. S. Energia Incorporada em Habitações de Interesse Social na Fase de Pré-Uso: o caso do programa minha casa minha vida no Brasil. *Oculum Ensaios*, Campinas, v. 11, n. 1, p. 40-49. jan./jun., 2014.

TAVARES, S. F. Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

WEN, T. J.; SIONG, H. C.; NOOR, Z. Z. Assessment of embodied energy and global warming potential of building construction using life cycle analysis approach: case studies of residential buildings in Iskandar Malaysia. *Elsevier, Energy and Buildings*, v. 93, p. 295-302, 2015.

