

ENERGIA INCORPORADA E EMISSÕES DE CO₂ DE FACHADAS DE *LIGHT STEEL FRAMING* NO BRASIL

*EMBODIED ENERGY AND CO₂ EMISSIONS OF LIGHT STEEL FRAMING
FAÇADES IN BRAZIL | ENERGÍA INCORPORADA Y EMISIONES DE CO₂
DE FACHADAS DE LIGHT STEEL FRAMING EN BRASIL*

ROSA MARIA SPOSTO, LUCAS ROSSE CALDAS, ABDALA CARIM NABUT NETO

RESUMO

Novos sistemas construtivos têm sido utilizados na construção de edificações no Brasil, no entanto, é importante observar que a sua escolha deve ser feita com base em critérios de sustentabilidade energético-ambientais, além dos critérios técnico-econômicos normalmente utilizados. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho consistiu na análise da energia incorporada e das emissões de CO₂ de fachadas de *light steel framing* para edificação, considerando as fases do ciclo de vida referentes à indústria e ao transporte de materiais para cinco regiões do Brasil. Para o levantamento dos dados, tomou-se como base a literatura nacional e internacional e pesquisas junto aos fabricantes e empresas especializadas. Foram selecionados fabricantes classificados nos Programas Setoriais de Qualidade do Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade no Habitat ou aqueles ligados às associações dos materiais e componentes constituintes do *light steel framing*. As distâncias das fábricas até a obra foram calculadas via *Google Maps*. Para isso, foram utilizadas equações desenvolvidas em outros estudos. Os resultados obtidos foram comparados com fachadas convencionais, constituídas por blocos cerâmicos e argamassa de revestimento, e apontaram a influência maior da energia incorporada e das emissões de CO₂ na indústria, comparativamente ao transporte. Além disso, foram observados resultados de percentuais referentes à massa, à energia incorporada e às emissões de CO₂ menores para o *light steel framing*, comparativamente à fachada convencional. Este trabalho contribui com dados para o inventário de ciclo de vida de materiais e componentes nacionais.

PALAVRAS-CHAVE: Emissões de CO₂. Energia incorporada. Fachadas. *Light steel framing*.

ABSTRACT

New construction systems have been used in residential construction due to its growing demand in Brazil, however, energetic-environmental sustainability should be considered when choosing these systems. In this context, the aim of the paper is to present an analysis of the embodied energy and CO₂ emissions of a housing facade model using

light steel frame, considering the industry and the transportation phases in five Brazilian capitals. To collect data, national and international literatures and research with material companies were used as a reference. Manufacturers that were classified in the Brazilian Program of Quality Sector in Quality Programs and Productivity at Habitat, or those connected with associations of materials and constituent components of the light steel framing were selected. The distances from the factories to site were calculated via Google Maps. We used equations that were developed in other studies for the calculations. The results were compared with the conventional covering system in facades, made of ceramic bricks and mortar coating, and pointed to the greater influence of embodied energy and CO₂ emissions in the industry in comparison with the transportation of materials. In addition, the results for mass, embodied energy and CO₂ emissions were lower for light steel frame than the conventional facade. The study contributes to the national database of embodied energy in materials in Brazil and it can be useful for future studies such as life cycle analysis.

KEYWORDS: CO₂ emissions. Embodied energy. Facades. Light Steel Framing.

RESUMEN

Nuevos sistemas de construcción se han utilizado en la edificación de viviendas en Brasil. Sin embargo, la elección de este tipo de sistemas debe basarse en ciertos criterios de sostenibilidad energético-ambientales, además de los criterios técnico-económicos normalmente utilizados. En este contexto, el objetivo de este trabajo ha consistido en el análisis de la energía incorporada y las emisiones de CO₂ de fachadas de light steel framing utilizadas en el sector de la construcción, teniendo en cuenta las fases del ciclo de vida de la industria y el transporte de materiales de las cinco regiones de Brasil. Para recoger los datos se tomó como base literatura nacional e internacional y estudios de fabricantes y empresas especializadas. Se seleccionaron fabricantes clasificados en los Programas Sectoriales de Calidad del Programa Brasileño de Calidad y Productividad en Hábitat o aquellos vinculados con las asociaciones de los materiales y componentes que constituyen la estructura de acero ligero o light steel framing. Las distancias de las fábricas a la obra se calcularon a través de Google Maps, utilizándose para ello ecuaciones desarrolladas en otros estudios. Los resultados se compararon con fachadas convencionales hechas de ladrillo cerámico y argamasa de revestimiento, e indicaron una mayor influencia de energía incorporada y emisiones de CO₂ en la industria en comparación con el transporte. Además, se observaron los resultados de los porcentajes relativos a la masa, la energía incorporada y las emisiones de CO₂ menores para o light steel framing frente a la fachada convencional. Este trabajo contribuye con datos para el inventario del ciclo de vida de los materiales y componentes nacionales.

PALABRAS CLAVE: Emisiones de CO₂. Energía incorporada. Fachadas. Light Steel Framing.

INTRODUÇÃO

ESCOLHA DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO EM FUNÇÃO DA ENERGIA E DAS EMISSÕES DE CO₂

O primeiro passo para a seleção de uma determinada tecnologia para a produção de uma edificação é a análise de sua viabilidade técnico-econômica, a partir de critérios referentes à capacidade da indústria e à disponibilidade de materiais e componentes locais (incluindo distâncias de transporte), mão de obra disponível para a produção, execução ou instalação dos componentes ou sistema e produtividade. Critérios de desempenho em uso também são considerados em função do tipo de edificação, como, por exemplo, segurança estrutural, resistência ao fogo, estanqueidade, térmico, acústico, durabilidade e outros.

No Brasil, o crescimento do uso de novas tecnologias em sistemas de fachadas tem sido observado, sobretudo nas capitais. Isso acontece, principalmente, por questões técnico-econômicas. Esses sistemas, em geral, apresentam maior produtividade, com maior velocidade de execução e menor percentual de homens-hora na fase de execução ou instalação. Além desses critérios, é necessário considerar, também, a sustentabilidade ambiental do futuro empreendimento, a partir do impacto que a tecnologia pode causar durante todo o seu ciclo de vida, incluindo a extração de materiais, a fabricação, a execução, o transporte, o uso e a disposição final de resíduos.

Segundo Agopyan e Jonh (2011), a escolha dos materiais de construção para a produção de edificações deve incluir critérios de sustentabilidade energético-ambientais, como: durabilidade e facilidade de desconstrução, não toxicidade, baixa quantidade de energia incorporada e baixo percentual de emissões gasosas e sólidas (resíduos), entre outros. Com relação às emissões gasosas, pode-se afirmar que o CO₂ é o principal contribuinte do aquecimento por efeito estufa (BERMANN, 2003), emissão que comumente ocorre na fabricação e transporte de materiais de construção. Além disso, um dos maiores desafios ambientais da construção é diminuir a intensidade do uso de materiais ou, em outras palavras, é preciso construir mais utilizando menos (JOHN, 2010). Assim, a seleção correta do material mais adequado para cada solicitação (mecânica, ambiental ou necessidade do usuário) é uma forma eficiente de reduzir o consumo de materiais.

De acordo com Goldemberg e Lucon (2011), a energia exerce um papel fundamental em qualquer processo industrial, seja na queima de combustíveis fósseis (derivados de petróleo, carvão, gás natural), renováveis (lenha, carvão vegetal, álcool etc.) ou elétrica (gerada a partir dos combustíveis ou da energia hidráulica). Portanto, determinar a energia consumida na fabricação dos materiais de construção implica conhecer os processos nela utilizados.

No Brasil, pode ser observado, ao longo das últimas décadas, o crescimento do consumo energético e de emissão de CO₂, ambos impulsionados pelo aumento do número das indústrias de mineração, manufatura e construção civil. Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2013), 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, percentual maior que o do setor de serviços, 4,5%. Ainda com relação à energia, é importante ressaltar o atual momento de crise energética pelo qual o Brasil está passando, o que justifica pesquisas de levantamento de energia incorporada consumida no ciclo de vida de edificações, bem como a proposição de ações para minimização desse consumo.

Na produção de fachadas, várias novas tecnologias têm sido utilizadas: *Light Steel Framing* (LSF), painéis de alumínio composto, painéis de concreto pré-fabricado, entre outras. Essas inovações requerem, além dos aspectos técnico-econômicos já mencionados, a avaliação da sustentabilidade ambiental.

É cada vez mais notória a necessidade de se desenvolver pesquisas relacionadas à sustentabilidade ambiental, principalmente em relação à energia e às emissões de CO₂ na indústria, no canteiro, no uso, na manutenção e no pós-uso. O transporte também influencia a seleção de materiais, sendo que grandes distâncias podem inviabilizar a seleção de alguns deles do ponto de vista da sustentabilidade energético-ambiental (PEREIRA, 2014). Em um país com dimensões continentais, como é o caso do Brasil, é importante considerar a disponibilidade de materiais e energia local em especificações para a construção de edificações.

Dessa forma, cabe ao projetista a especificação de materiais e componentes mais sustentáveis. Os profissionais da arquitetura e urbanismo têm um papel fundamental nessa etapa, visto que, além das necessidades estéticas e de desempenho técnico-econômico dos materiais, componentes e do sistema, há a necessidade de se pensar em critérios ambientais, como a energia consumida e as emissões atmosféricas. Isso requer, ainda, uma visão sistêmica, em que todo o ciclo de vida da edificação e de seus constituintes sejam considerados.

OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo a análise de fachadas LSF com acabamento de placas cimentícias considerando-se os seguintes aspectos:

- Consumo de materiais em massa;
- Energia Incorporada Total (EITOT), levando em consideração a Energia Consumida na Indústria (EII) ou na fabricação dos materiais e a Energia Consumida no Transporte (EIT) dos materiais; e
- Quantidade de emissões totais de CO₂ (ECO₂TOT), tendo em vista as emissões geradas na indústria (ECO₂I) e as geradas no transporte (ECO₂T).

Neste trabalho, não foram considerados elementos de contraventamento nas fachadas de LSF. Também não foi considerado o desempenho térmico e acústico dessas fachadas, o que poderia implicar na utilização de um maior número de camadas de materiais ou de melhoria da condição padrão de projeto. Além disso, não foram consideradas as demais fases do ciclo de vida das fachadas, como, por exemplo, execução, manutenção, uso e pós-uso.

A análise foi realizada para as cinco principais capitais do Brasil. Os valores encontrados foram comparados com a fachada de blocos cerâmicos com revestimento de argamassa, já que esta é a técnica mais utilizada atualmente no país para habitação. A pintura não foi levada em consideração por ser comum aos dois sistemas.

ENERGIA INCORPORADA E EMISSÕES DE CO₂

A energia incorporada total de um material engloba as fases de: energia de extração de matérias-primas (retirada da mesma em sua forma bruta da natureza), fabricação de materiais (considerando o tipo de material e as técnicas utilizadas em sua fabricação) e o seu transporte (considerando sua origem e o destino de aplicação). Com relação ao transporte, em geral, é considerada a distância média entre dois pontos: fábrica e canteiro de obras. É preciso lembrar que as principais fontes de energia utilizadas no Brasil são os combustíveis a base de óleo diesel e gasolina (TAVARES, 2006; PEREIRA, 2014).

Sobre os combustíveis fósseis, ressalta-se que o petróleo, o gás natural e o carvão mineral podem deixar de ser utilizados mesmo antes do esgotamento de suas reservas, isso pelo fato de serem um dos maiores responsáveis pelo efeito estufa, considerado um problema ambiental relevante. A emissão de CO₂ resultante da queima dessas substâncias contribui com aproximadamente 55% do aquecimento global do planeta (BERMANN, 2003).

No Brasil, alguns estudos merecem destaque, como o de Nabut Neto (2011), Carminatti Júnior (2012), Maciel (2013), Palácio (2013) e Oliveira (2015). Os autores avaliaram energia incorporada e/ou emissões de CO₂ ao longo do ciclo de vida de edificações, com foco principal no sistema de fachadas.

Estudos internacionais, como o de Mithraratne e Vale (2004), pesquisaram a energia incorporada e operacional ao longo do ciclo de vida para três tipos de sistemas construtivos: *light wood framing*, concreto e com isolamento térmico. Thormark (2006) analisou energia incorporada de diversas tipologias de materiais de construção para fachada, considerando a fase operacional e a de manutenção de uma habitação localizada na Suécia. A análise teve como base o projeto original e o projeto modificado.

Huberman e Pearlmutter (2008) avaliaram o consumo de energia e as emissões de CO₂ de um modelo de habitação localizado no deserto de Negev. Os autores compararam cinco sistemas construtivos de vedação externa. Kim (2011) comparou o consumo energético e as emissões de CO₂ entre uma fachada transparente composta e outra com um sistema de cortina de vidro para uma edificação localizada nos Estados Unidos da América.

Rakhshan *et al.* (2013) estudaram a diminuição no consumo energético e emissões de CO₂ como resultado do aumento da espessura de camadas de isolantes térmicos em fachadas de habitações localizadas em Dubai. Wen *et al.* (2015) compararam os impactos ambientais por meio dos indicadores de energia incorporada e emissão de CO₂ entre um sistema construtivo industrializado e um convencional, ambos localizados na Malásia.

A partir dos estudos nacionais e internacionais citados, observa-se que há um foco na energia e nas emissões de CO₂, relacionadas, principalmente, às fachadas das edificações. Espera-se que essas pesquisas sejam mais frequentes, visto que diferentes países do mundo, inclusive o Brasil, estão enfrentando diversas crises, entre elas, a energética. Além disso, é possível verificar a significativa cobrança de organismos internacionais no que se refere à necessidade de atingir metas de redução de emissões de carbono, como, por exemplo, as metas definidas pela *Cement Sustainability Initiative* do *World Business Council for Sustainable Development* (AGOPYAN & JONH, 2011).

Nos últimos anos, surgiram inúmeros *softwares* voltados para a realização de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), entre os quais podem ser citados o SimaPro, o GaBi, o Umberto e o *Open LCA* (INSTITUTO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2015). No entanto, o que ainda se observa na maioria dos estudos é a aplicação de equações e utilização de dados secundários dos materiais. Isso ocorre devido ao fato de muitos desses *softwares* possuírem bancos de dados específicos para os países onde foram desenvolvidos e por não terem acesso gratuito. De acordo com Rodrigues *et al.* (2008), não adianta empregar *softwares* específicos com dados europeus para a avaliação de impacto ambiental de casos brasileiros, mas sim investir mais no desenvolvimento de um inventário de dados nacional. Este será obtido, principalmente, por meio de pesquisas acadêmicas, como esta que está sendo apresentada.

No presente trabalho, foram analisados apenas dois impactos ambientais, a energia incorporada e as emissões de CO₂. Isso diminuiu a complexidade do processo, não tendo sido necessário o uso de *softwares*. Além disso, a maioria dos dados foram coletados a partir da literatura nacional. Dessa maneira, na Tabela 1, são apresentados dados (fatores) de diversos autores sobre a Energia Incorporada (FEI), bem como as emissões de CO₂ (FECO₂) para os principais materiais e componentes de uma edificação.

METODOLOGIA

VARIÁVEIS DO ESTUDO

As variáveis de estudo deste trabalho foram a energia incorporada e as emissões de CO₂. No que diz respeito à primeira, foram consideradas: a Energia da Indústria (EII), a Energia do Transporte (EIT) e a soma das duas, a Energia Total (EITOT). Já com relação às emissões de CO₂, foram consideradas as emissões da indústria (ECO₂I), as emissões de transporte (ECO₂T) e as emissões totais (ECO₂TOT). A justificativa para esse método é justamente o fato de já ter sido usado em outros trabalhos realizados no Brasil, como o de Tavares (2006), Graf (2011), Nabut Neto (2011), Maciel (2013), Palácio (2013) e Oliveira (2015).

TABELA 1 – Valores dos fatores de energia e emissões de CO₂ para alguns materiais e componentes.

Materiais e componentes	FEI (MJ/kg)	Fonte	FECO ₂ (kgCO ₂ /kg)	Fonte
Aço	30,49	Tavares (2006)	0,52	Gonzalez e Navarro (2005)
	32,00	Alcorn e Baird (1996)	1,45	Stachera Jr. e Casagrande Jr. (2007)
	32,00	Gonzalez e Navarro (2005)	1,52	Zabalza <i>et al.</i> (2010)
	33,70	Lee <i>et al.</i> (2011)	3,8	Monahan e Powell (2010)
	42,70	Monahan e Powell (2010)		
Blocos cerâmicos	2,50	Alcorn e Baird (1996)	0,33	Soares <i>et al.</i> (2002)
	3,56	Zabalza <i>et al.</i> (2010)	0,38	Stachera Jr. e Casagrande Jr. (2007)
			0,52	Monahan e Powell (2010)
	4,88	Sposto e Do Ó (2006)		
Cimento Portland Comum (CP II — F)	4,62	Tavares (2006)	0,39	Monahan e Powell (2010)
	4,23	Zabalza <i>et al.</i> (2010)	0,57	Carvalho (2002)
	2,46	Carvalho (2002)	0,82	Zabalza <i>et al.</i> (2010)
		0,97	Stachera Jr. e Casagrande Jr. (2007)	
Cal	3,00	Tavares (2006)	0,78	Stachera Jr. e Casagrande Jr. (2007)
Areia natural	0,05	Tavares (2006)	0,02	Stachera Jr. e Casagrande Jr. (2007)

Fonte: Elaborada pelos autores (2015).

Notas: FECO₂ (kgCO₂/kg): Fator de Emissões de CO₂; FEI (MJ/kg): Fator de Consumo de Energia.

DESCRIÇÃO DAS FACHADAS ANALISADAS

A fachada típica analisada para o LSF é constituída por duas guias (202x38x2mm), quatro montantes (200x40x2mm), 48 parafusos e duas placas cimentícias (1,00x1,00m, espessura de 10mm). Considerou-se, como parâmetro de comparação, a Fachada Convencional (FC) com blocos cerâmicos estruturais (14x19x39cm), juntas de argamassa de assentamento de 10mm, chapisco e reboco paulista de 20mm nas faces externas e internas.

ENERGIA INCORPORADA NA INDÚSTRIA E EMISSÕES DE CO₂ NA INDÚSTRIA

Os dados de FEI e FECO₂ utilizados no presente trabalho para o cálculo dos valores de EI e ECO₂I foram obtidos por meio da análise de artigos, principalmente de fontes nacionais, embora também tenham sido utilizadas fontes internacionais (Tabela 2).

ENERGIA INCORPORADA NO TRANSPORTE E EMISSÕES DE CO₂ NO TRANSPORTE

A coleta destes dados foi feita por meio de pesquisa de campo junto aos fabricantes de caminhões de transporte nacionais. Foi considerado para os cálculos que 1L de diesel equivale a 35,58MJ (GOLDEMBERG & VILLANUEVA, 2003) e a 3,15kg CO₂ (BERMANN, 2003). Quanto ao consumo médio de diesel requerido para o transporte dos materiais, foi utilizado o valor de 0,0302L/t.km apresentado por Nabut Neto (2011). Foram considerados caminhões cheios na trajetória de ida (da indústria à cidade considerada) e vazios na trajetória de volta (da cidade à indústria).

No cálculo das distâncias de transporte das fábricas dos materiais, foi considerado, como destino final, o centro das principais capitais consideradas no trabalho: Brasília, São Paulo, Porto Alegre, Salvador e Manaus. As distâncias foram traçadas utilizando informações de fornecedores locais dos diversos materiais constituintes do LSF. Adotou-se a distância de transporte como aquela que considera a partida na fábrica, indo diretamente à obra situada, hipoteticamente, no centro das capitais. O centro de cada uma das cidades foi fixado no mapa por meio do *Google Maps*, juntamente com os pontos de latitude e longitude de cada localidade. A seleção das fábricas dos materiais utilizados no LSF foi realizada de diferentes formas para os materiais em aço (montantes, guias e parafusos) e para as placas cimentícias.

TABELA 2 – Valores da energia incorporada e emissões de CO₂ dos materiais adotados no trabalho.

Materiais	FEI (MJ/kg)	Fonte	FECO ₂ (kg CO ₂ /kg)	Fonte
Aço	30,49	Tavares (2006)	1,630	Zabalza <i>et al.</i> (2010)
Cimento Portland (CP II — F)	2,46	Carvalho (2002)	0,570	Carvalho (2002)
Areia natural	0,05	Tavares (2006)	0,016	Tavares (2006)
Cal	3,09	Tavares (2006)	0,790	Stachera Jr. e Casagrande Jr. (2007)
Bloco cerâmico furado	4,88	Sposto e Do Ó (2006)	0,330	Soares <i>et al.</i> (2002)

Fonte: Elaborada pelos autores (2015).

Notas: FECO₂ (kgCO₂/kg): Fator de Emissões de CO₂; FEI (MJ/kg): Fator de Consumo de Energia.

Para os materiais em aço, foram coletados dados da página do Centro Brasileiro da Construção em Aço (2015) relacionadas aos produtores e fornecedores de materiais e sistemas em aço de todo o país. Esses dados referem-se a todos os fabricantes brasileiros formais de perfis de aço (guias e montantes) e parafusos por estado e foram tabulados em planilha eletrônica (Excel). Através do *Google Maps* (GOOGLE, 2015), foram calculadas as distâncias até a localização hipotética das capitais, sendo que a cidade com a menor distância de transporte foi considerada como sendo a cidade da fábrica. O consumo de energia e as emissões de CO₂ foram calculados com base nas distâncias entre as cidades das fábricas selecionadas e as cidades de Brasília, São Paulo, Porto Alegre, Salvador e Manaus.

No caso das placas cimentícias, foram selecionadas as fábricas de uma empresa específica; esta foi escolhida por ser uma das mais atuantes no mercado brasileiro e por ter sido estudada em outras pesquisas, como a de Nabut Neto (2011) e Palácio (2013). A partir da escolha da empresa, a página de produtos foi visitada e as fábricas as quais produziam placas cimentícias foram pesquisadas. Os dados referentes às fábricas encontradas também foram tabulados em planilha eletrônica e o mesmo processo descrito para os materiais em aço foi aplicado. As cidades das fábricas e das obras pesquisadas, juntamente com suas distâncias de transporte para o LSF, estão listadas na Tabela 3.

Para a fachada convencional, o critério de escolha foi similar aos materiais do LSF. No caso dos blocos cerâmicos estruturais, foram selecionados os fabricantes formais da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (2015), em conformidade com o Programa Setorial da Qualidade (PSQ) (BRASIL, 2015a). Já para as argamassas industrializadas, pelo fato de não possuírem um PSQ próprio, foram consideradas as fábricas de cimento em conformidade com o PSQ (BRASIL, 2015b); desta forma, foram selecionadas as fábricas e, entre elas, uma empresa que produz argamassa industrializada. Os dados das fábricas foram tabulados em planilha eletrônica e o mesmo processo utilizado para os materiais de LSF foi empregado para o cálculo das distâncias, sendo que também foram escolhidas as fábricas as quais apresentaram a menor distância até a cidade da obra. As cidades das fábricas e das obras pesquisadas, juntamente com suas distâncias de transporte para a fachada convencional, estão listadas na Tabela 4.

ENERGIA INCORPORADA TOTAL EITOT E EMISSÕES DE CO₂ TOTAIS ECO₂TOT

O cálculo de EITOT e ECO₂TOT foi realizado considerando as equações de 1 a 7. Estas foram retiradas de Tavares (2006) e Nabut Neto (2011).

$$\frac{m}{A} \times \frac{FEI}{m} = \frac{EII}{A} \quad (1)$$

TABELA 3 – Distâncias de Transporte dos materiais para fachada de Light Steel Framing.

Região	Cidade da fábrica (Latitude, Longitude)	Cidade da obra (Latitude, Longitude)	Distância (km)
Guias e montantes			
Centro-Oeste	Brasília-DF (-15,81°, -47,96°)	Brasília-DF (-30,07°, -51,20°)	9,9
Sudeste	São Paulo-SP (-23,57°, -46,59°)	São Paulo-SP (-23,55°, -46,63°)	5,1
Sul	Porto Alegre-RS (-29,99°, -51,13°)	Porto Alegre-RS (-30,07°, -51,20°)	15,0
Nordeste	Linhares-ES (-19, 22°, -40,08°)	Salvador-BA (-12,97°, -38,50°)	916,0
Norte	Anápolis-GO (-16,24°, -48,77°)	Manaus-AM (-3,03°, -59,98°)	3258,0
Parafusos			
Centro-Oeste	Campinas-SP (-22,94°, -47,12°)	Brasília-DF (-30,07°, -51,20°)	918,0
Sudeste	São Paulo-SP (-23,51°, -46,60°)	São Paulo-SP (-23,55°, -46,63°)	8,3
Sul	Caxias do Sul-RS (-29,17°, -51,18°)	Porto Alegre-RS (-30,07°, -51,20°)	134,0
Nordeste	Petrolina-PE (-9,31°, -40,53°)	Salvador-BA (-12,97°, -38,50°)	535,0
Norte	Monte Mor-SP (-22,95°, -47,31°)	Manaus-AM (-3,03°, -59,98°)	3792,0
Placas cimentícias			
Centro-Oeste	Goiânia-GO (-16,51°, -49,25°)	Brasília-DF (-30,07°, -51,20°)	213,0
Sudeste	Rio de Janeiro-RJ (-22,85°, -43,31°)	São Paulo-SP (-23,55°, -46,63°)	442,0
Sul	Colombo-PR (-25,35°, -49,19°)	Porto Alegre-RS (-30,07°, -51,20°)	718,0
Nordeste	Simões Filho-BA (-12,79°, -38,38°)	Salvador-BA (-12,97°, -38,50°)	32,0
Norte	Goiânia-GO (-16,51°, -49,25°)	Manaus-AM (-3,03°, -59,98°)	3186,0

Fonte: Elaborada pelos autores (2015).

TABELA 4 – Distância de Transporte dos materiais para fachada convencional.

Região	Cidade da fábrica (Latitude, Longitude)	Cidade da obra (Latitude, Longitude)	Distância (km)
Blocos cerâmicos estruturais			
Centro- Oeste	Justinópolis-MG (-19,79°, -44,08°)	Brasília-DF (-30,07°, -51,20°)	721,0
Sudeste	Sorocaba-SP (-23,49°, -47,46°)	São Paulo-SP (-23,55°, -46,63°)	101,0
Sul	Sorocaba-SP (-23,49°, -47,45°)	Porto Alegre-RS (-30,07°, -51,20°)	1133,0
Nordeste	Cascavel-CE (-4,16°, -38,29°)	Salvador-BA (-12,97°, -38,50°)	1167,0
Norte	Itapecuru Mirim-MA (-3,41°, -44,13°)	Manaus-AM (-3,03°, -59,98°)	3453,0
Argamassa industrializada			
Centro- Oeste	Sobradinho-DF (-15,58°, -47,87°)	Brasília-DF (-30,07°, -51,20°)	30,8
Sudeste	Santa Helena-SP (-20,79°, -47,89°)	São Paulo-SP (-23,55°, -46,63°)	358,0
Sul	Esteio-RS (-29,85°, -51,18°)	Porto Alegre-RS (-30,07°, -51,20°)	38,2
Nordeste	Laranjeiras-SE (-10,82°, -37,16°)	Salvador-BA (-12,97°, -38,50°)	330,0
Norte	Rondônia-RO (-8,79°, -63,78°)	Manaus-AM (-3,03°, -59,98°)	900,0

Fonte: Elaborada pelos autores (2015).

$$\frac{m}{A} \times \frac{FE_{CO_2}}{m} = \frac{ECO_2 I}{A} \quad (2)$$

Onde:

m — massa (kg)

A — área (m²)

FEI — fator de consumo de energia (MJ/kg)

FE_{CO₂} — fator de emissões de CO₂ (kgCO₂/kg)

EII — energia incorporada na indústria (MJ/m²)

ECO₂I — emissões de CO₂ na indústria (kg CO₂/m²)

$$0,0302xDxm = C \quad (3)$$

Onde:

D — distância de material transportado na trajetória de ida ou volta (km)

m — massa de material transportado na ida ou volta (ton/m²)

C — consumo aproximado de combustível relacionado ao transporte (litros/m²)

$$35,58xC = EIT \quad (4)$$

Onde:

EIT — energia incorporada no transporte (MJ/m²)

$$3,15xC = ECO_2T \quad (5)$$

Onde:

ECO₂T — emissões de CO₂ no transporte (kg CO₂/m²)

$$EI_{TOT} = EII + EIT \quad (6)$$

Onde:

EITOT — energia incorporada total (MJ/m²)

$$ECO_2TOT = ECO_2I + ECO_2T \quad (7)$$

Onde:

ECO₂TOT — emissões de CO₂ totais (kg CO₂/m²)

ANÁLISES E RESULTADOS

Foram obtidos os valores de massa, EII e ECO₂I, para a fachada em LSF, os quais foram comparados com a fachada FC (Figura 1). Em relação à FC, é possível observar que a fachada em LSF representa 17% da massa, 54% da EII e 60% da ECO₂I.

Para o caso do LSF, as guias e os montantes representam 79,0% da EII, o que era esperado, já que a energia incorporada do aço é maior que a do cimento. No caso da fachada convencional, os blocos cerâmicos estruturais representam 94,0% da EII, percentual elevado, principalmente devido à consideração da queima dos blocos à base de lenha. Para as ECO₂I, observou-se uma contribuição de 53,3% das placas cimentícias no sistema de fachada em LSF e 81,5% dos blocos cerâmicos na fachada convencional.

No caso do LSF, as placas cimentícias totalizaram 75% da massa total da fachada e os blocos cerâmicos estruturais representaram 58% da massa total da FC. Os valores

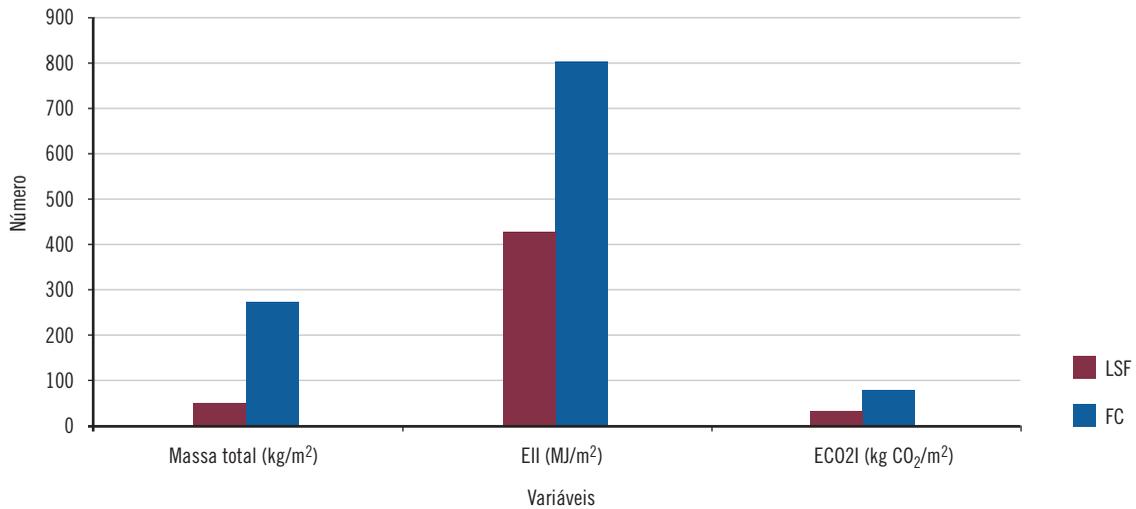


FIGURA 1 – Energia e emissões da indústria para fachada em *Light Steel Framing* (LSF) e fachada convencional.

Fonte: Elaborada pelos autores (2015).

Notas: ECO2I: Emissões de CO₂ Iniciais; EII: Energia Incorporada Inicial; FC: Fachada Convencional.

obtidos para EIT, ECO₂T, EITOT e ECO₂TOT para LSF e FC são apresentados nas Figuras 2, 3, 4 e 5.

Com relação à energia incorporada e emissões de CO₂ relacionados ao transporte dos materiais, viu-se que as mesmas foram menores no sistema LSF em todas as regiões estudadas. A região Norte foi a que apresentou maiores valores de consumo de energia (EIT) e emissões de CO₂ (ECO₂T) e também maior diferença quando os dois sistemas construtivos foram comparados; já a região Sudeste foi a que apresentou os menores valores de EIT e ECO₂T.

De maneira geral, quanto maior a distância percorrida e a massa transportada, maior o consumo de combustível, impactando diretamente na EIT e ECO₂T. Desta forma, as grandes diferenças verificadas nos valores de energia e emissões do LSF e fachada convencional foram resultados, principalmente, da massa do sistema de fachada convencional, que é aproximadamente seis vezes maior que a do LSF. Isso também aconteceu devido às longas distâncias do bloco cerâmico estrutural, uma vez que foi verificado serem poucas as empresas no país que estão classificadas no PSQ para esse tipo de bloco.

Outro ponto a ser destacado é que, no presente estudo, foram consideradas somente as empresas em conformidade nos seus respectivos PSQ ou associações, o que pode ter aumentado as distâncias entre as fábricas e as obras. No entanto, é importante realizar a limitação de empresas a fim de comparar produtos certificados que apresentem desempenho e qualidade semelhantes.

Na análise de EITOT e ECO₂TOT, é possível verificar que o LSF apresentou menores valores, quando comparado à fachada convencional. Embora o aço tenha uma

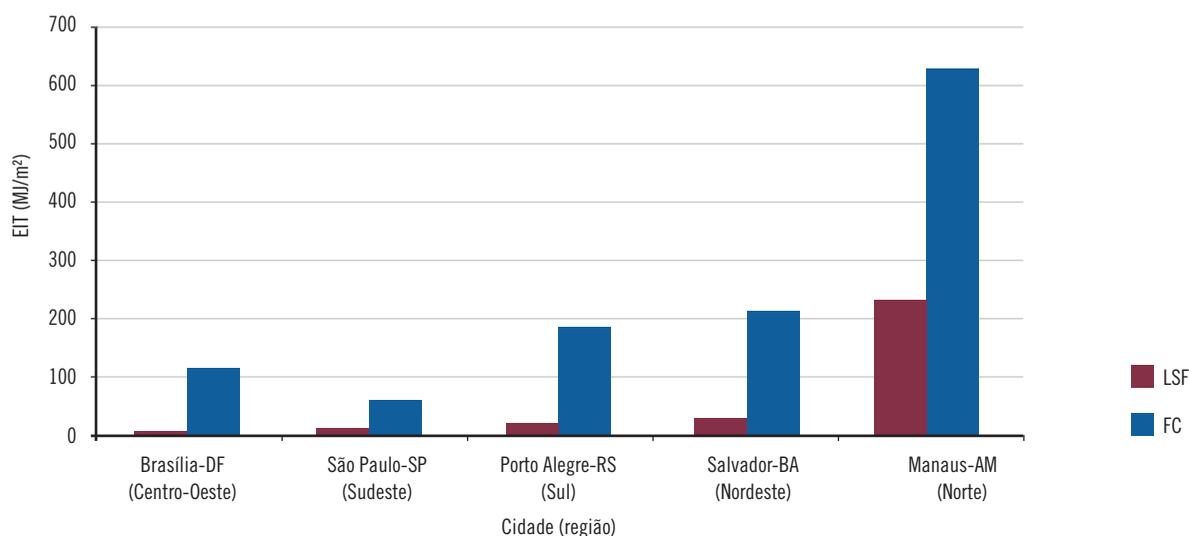


FIGURA 2 – Energia consumida no transporte dos materiais para fachada de *Light Steel Framing* (LSF) e fachada convencional.

Fonte: Elaborada pelos autores (2015).

Notas: EIT: Energia Incorporada de Transporte; FC: Fachada Convencional.

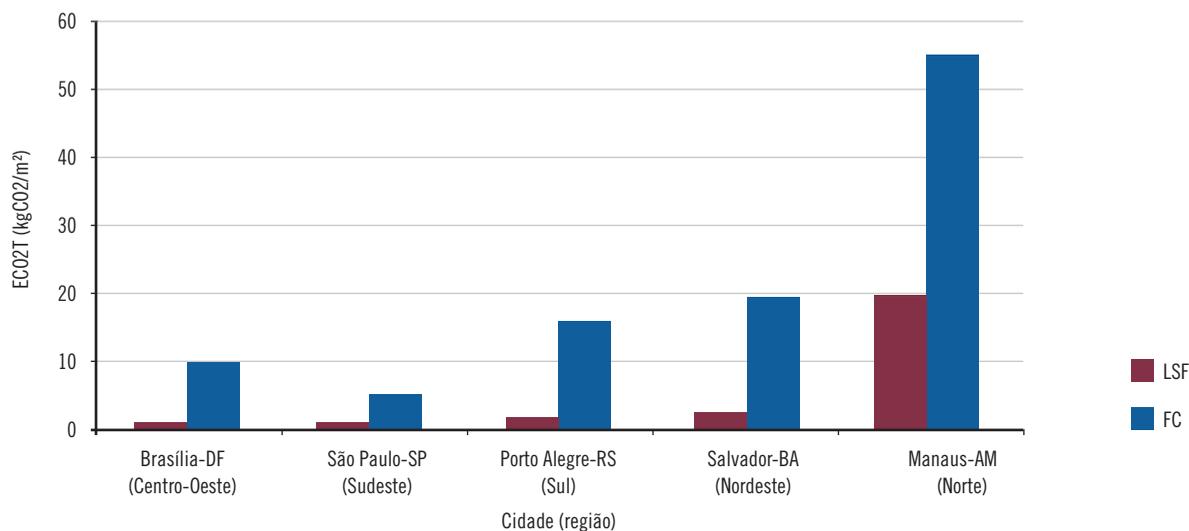


FIGURA 3 – Emissões de CO₂ geradas no transporte para fachada de *Light Steel Framing* (LSF) e fachada convencional.

Fonte: Elaborada pelos autores (2015).

Notas: ECO2TOT: Emissões de CO₂ de Transporte; FC: Fachada Convencional.

energia incorporada superior à do cimento e à dos blocos cerâmicos, a massa do sistema em LSF é inferior à da fachada convencional, resultando em valores finais mais baixos. Outro fator, foi a questão dos transportes, pois, como foi visto, o LSF apresenta menores valores de energia e emissões relacionadas ao transporte para todas as regiões estudadas.

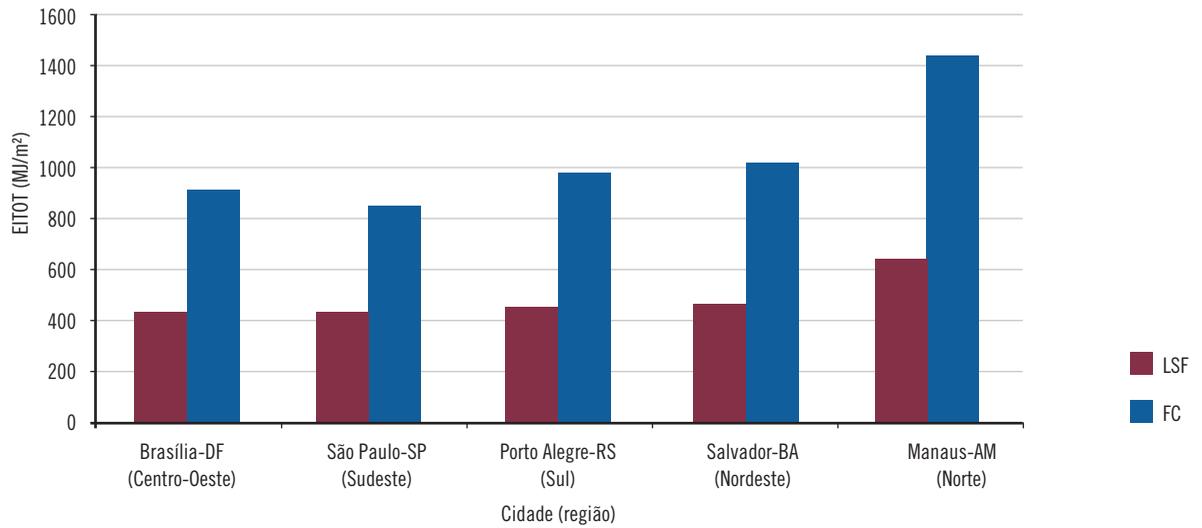


FIGURA 4 – Consumo de energia total para fachada de *Light Steel Framing* (LSF) e fachada convencional.

Fonte: Elaborada pelos autores (2015).

Notas: EITOT: Energia Incorporada Total; FC: Fachada Convencional.

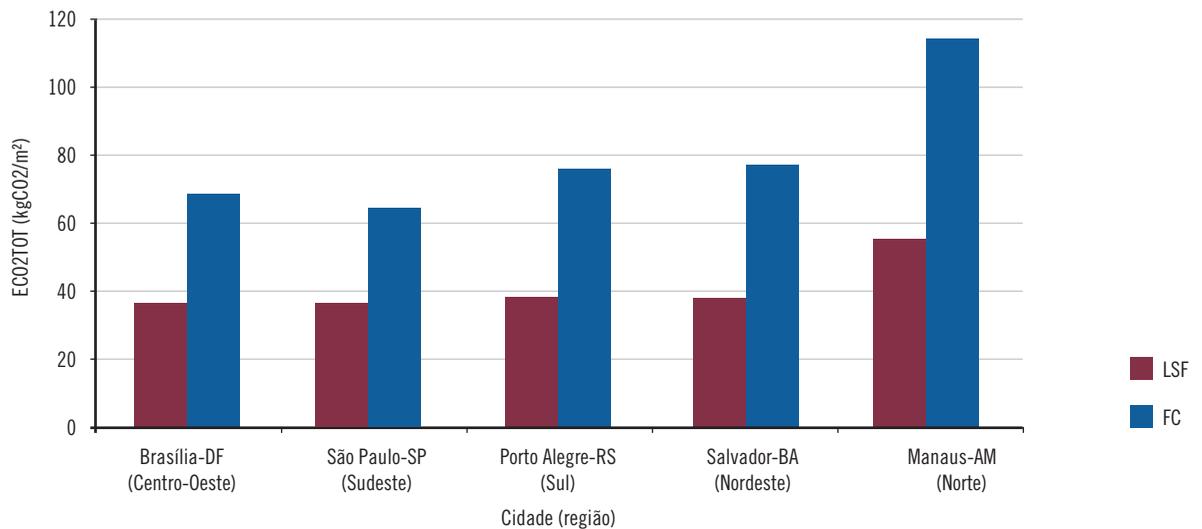


FIGURA 5 – Emissões de CO₂ totais para fachada de *Light Steel Framing* (LSF) e fachada convencional.

Fonte: Elaborada pelos autores (2015).

Notas: ECO2TOT: Emissões de CO₂ Totais; FC: Fachada Convencional.

Por fim, vale destacar a grande influência da EII e ECO₂I considerada constante para todas as regiões neste estudo.

Foram calculados os percentuais da participação do consumo de energia e emissões de CO₂ referentes ao transporte em relação à energia e emissões totais para cada sistema de fachada. Foram encontrados os valores listados na Tabela 5.

TABELA 5 – Percentual do transporte em relação ao total de energia e emissões de CO₂.

Cidade e Região	Relação EIT/EITOT LSF (%)	Relação EIT/EITOT FC (%)	Relação CO2T/CO2TOT LSF (%)	Relação CO2T/CO2TOT FC (%)
Brasília-DF (Região Centro-Oeste)	2	13	2	15
São Paulo-SP (Região Sudeste)	3	6	4	8
Porto Alegre-RS (Região Sul)	6	19	6	21
Salvador-BA (Região Nordeste)	8	21	8	25
Manaus-AM (Região Norte)	35	44	36	49

Fonte: Elaborada pelos autores (2015).

Notas: CO2T: Emissões de CO₂ de Transporte; CO2TOT: Emissões de CO₂ Totais; EIT: Energia Incorporada de Transporte; EITOT: Energia Incorporada Total; FC: Fachada Convencional; LSF: *Light Steel Framing*.

A partir dos valores encontrados, é possível verificar que a etapa de transporte impacta as regiões estudadas de diferentes formas, sendo menos representativa na região Sudeste e mais representativa na região Norte. Nota-se que para esta última o percentual do transporte chega próximo de 50% no caso da fachada convencional. Portanto, esses resultados chamam a atenção para a consideração das etapas de transporte nas avaliações do consumo de energia e emissões de CO₂ relacionado ao ciclo de vida desses sistemas construtivos que, em muitos estudos, é desconsiderada.

A constatação da importância da etapa de transporte verificada no presente estudo vai de encontro a alguns estudos internacionais, como o de Kellenberger e Althaus (2009), McGrath *et al.* (2013) e Cabeza *et al.* (2014), os quais defendem que a mesma pode ser desconsiderada nos estudos de energia e emissões de CO₂. Vale ressaltar que esses pesquisadores avaliaram a realidade de diversos países ao redor do mundo, sem incluir, no entanto, casos brasileiros.

O Brasil é um país com extensas faixas territoriais, apresentando regiões muito distintas umas das outras. Essa distinção vai desde as condições climáticas até o desenvolvimento tecnológico, o que impacta diretamente no setor da construção civil e nas consequências ambientais relacionadas ao setor. Portanto, a partir desses valores e para os sistemas de fachadas avaliados na presente pesquisa, a etapa de transporte não pode ser desconsiderada, principalmente se o estudo em questão estiver localizado na região Norte do país.

CONCLUSÃO

Com relação ao consumo de materiais em massa e em volume, observou-se que sua determinação impacta diretamente os resultados de EITOT e ECO₂TOT dos elementos de fachada estudados. Dessa forma, esses valores foram maiores para o sistema de fachada convencional, sendo que o mesmo apresentou uma massa cerca de seis vezes maior quando comparada ao LSF. Portanto, a massa de cada material utilizado nos sistemas LSF e fachada convencional serve como ponto de partida para a análise da energia incorporada e emissões de CO₂ associadas aos sistemas.

Destaca-se novamente a importância de estudar cada material constituinte de sistemas de fachada para poder medir sua influência no produto final. Além disso, foi possível observar que a variação nos processos de fabricação dos materiais impacta diretamente na EII e ECO₂I dos materiais, gerando dispersões nos valores encontrados na literatura nacional e internacional. Com relação à energia e emissões iniciais dos materiais, a FC apresentou valores de EII e ECO₂I cerca de duas vezes maior que o LSF.

Na etapa de transporte, observou-se que a energia incorporada e as emissões foram menores para o LSF em todas as regiões estudadas. A região Norte foi a que apresentou maiores valores de EIT e ECO₂T, enquanto a Sudeste apresentou os menores. Constatou-se que quanto maior for a distância percorrida e a massa transportada maior será o consumo de combustível, impactando diretamente nos valores de EIT e ECO₂T. Outra conclusão importante deste estudo foi a constatação da importância da etapa de transporte no consumo de energia e emissões de CO₂ para os sistemas construtivos estudados, podendo chegar a, aproximadamente, 50% para a região Norte.

Por fim, este trabalho contribui com dados para inventário de ciclo de vida de materiais e componentes nacionais. Observa-se que outros estudos de levantamento de energia incorporada de fachadas são necessários a fim de levar em consideração os desempenhos térmico e acústico, o que, provavelmente, vai requerer maior quantidade de material ou de camadas no sistema LSF para o atendimento das diversas zonas bioclimáticas brasileiras. Além disso, outros estudos considerando o sistema convencional, com estrutura de concreto armado e blocos cerâmicos de vedação, também são importantes de serem realizados, além da análise de outros estados do Brasil.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília por disponibilizar oportunidade para discussão do tema em suas linhas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AGOPYAN, V.; JONH, V.M. *O desafio da sustentabilidade na construção civil*. São Paulo: Blucher, v.5, 2011. (Série Sustentabilidade).
- ALCORN, J.; BAIRD, G. *Use of hybrid energy analysis method for evaluating the embodied energy of building materials*. New Zealand: WREC, 1996.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA. *Cerâmicas associadas*. 2015. Disponível em: <<http://portal.anicer.com.br/psq/>>. Acesso em: 22 jul. 2015.
- BERMANN, C. *Energia no Brasil: para quê e para quem. Crise e alternativas para um país sustentável*. 2.ed. São Paulo: Livraria da Física, 2003.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Balanco Energético Nacional 2013: relatório síntese ano base 2012*. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2013.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Programa Setorial da Qualidade. *PSQ blocos cerâmicos*. 2015a. Disponível em: <http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos_simac_psq2.php?id_psq=72>. Acesso em 22 jul. 2015.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Programa Setorial da Qualidade. *PSQ Cimento Portland*. 2015b. Disponível em: <http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos_simac_psq2.php?id_psq=72>. Acesso em: 24 jul. 2015.
- 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*, v.29, p.394-416, 2014.
- CARMINATTI JÚNIOR, R. *Análise do ciclo de vida energético de projeto de habitações de interesse social concebido em Light Steel Framing*. 2012. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2012.
- CARVALHO, J. *Análise de ciclo de vida ambiental aplicada à construção civil: estudo de caso: comparação entre cimentos Portland com adição de resíduos*. 2002. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- CENTRO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO EMAÇO. *Fabricantes de aço*. 2015. Disponível em: <<http://www.cbca-iabr.org.br/guia-brasil-da-construcao-em-aco/busca-imprimir.php?bsc=ativar>>. Acesso em: 21 jul. 2015.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. *Energia, meio ambiente e desenvolvimento*. 3.ed. São Paulo: USP, 2011.
- GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L.D. *Energia, Meio ambiente e Desenvolvimento*. 2.ed. São Paulo: USP, 2003.
- GONZÁLEZ, M.; NAVARRO, J. Assessment of the decrease of CO₂ emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact. *Building and Environment*, v.41, n.7, p.902-909, 2005.
- GOOGLE. *Google Maps*. 2015. Available from: <<https://www.google.com.br/maps?source=tldsi&hl=en>>. Cited: Jul. 23, 2015.
- GRAF, G.F. *Transmitância térmica e energia incorporada na arquitetura: sua relação nas superfícies do invólucro de uma edificação residencial unifamiliar conforme a Norma NBR 12721*. 2011. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação 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*, v.40, p.837-848, 2008.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. *Diálogos setoriais no Brasil e União Europeia desafios e soluções para o fortalecimento da ACV no Brasil*. Brasília: IBICT, 2015.
- JOHN, V.M. Materiais de construção e o meio ambiente. In: ISAIA, G. *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*. São Paulo: Ibracon, 2010. p.97-121.
- KELLENBERGER, D.; ALTHAUS, H.J. *Relevance of simplifications in LCA Building components*. *Building and Environment*, v.44, n.4, p.818-825, 2009.
- KIM, K.H. *A comparative life cycle assessment of a transparent composite façade system and a glass curtain wall system*. *Energy and Buildings*, v.43, n.12, p.3436-3445, 2011.

- LEE, B.; TRCKA, M.; HENSEN, J. L. M. *Embodied energy of building materials and green building rating systems: A case study for industrial halls. Sustainable Cities and Society*, v.1, n.2, p.67-71, 2011.
- MACIEL, A.C.F. *Energia incorporada de fachadas ventiladas: estudo de caso para edificação habitacional em Brasília-DF*. 2013. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- MCGRATH, T. *et al.* Retrofit versus new-build house using life-cycle assessment. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Engineering Sustainability*, v.166, n.3, p.122-137, 2013.
- MITHRATNE, N.; VALE, B. Life cycle analysis model for New Zeland's houses. *Building and Environment*, v.39, p.483-492, 2004.
- MONAHAN, J.; POWELL, J. An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. *Energy and Buildings*, v.43, n.1, p.179-188, 2010.
- NABUT NETO, A.C. *Energia incorporada e emissões de CO₂ de fachadas: estudo de caso do steel frame para utilização em Brasília*. 2011. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.
- OLIVEIRA, L.B. *A influência do sistema de fachada viva em manta no ciclo de vida energético de uma residência unifamiliar em clima tropical*. 2015. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- PALÁCIO, 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*. 2013. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- PEREIRA, M.F. *Conteúdo energético e emissões de CO₂ em coberturas verdes, de telha cerâmica e de fibrocimento: estudo de caso*. 2014. Dissertação (Mestrado) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.
- RAKSHAN, K.; FRIESS, W. A.; TAJERZADEH, S. *Evaluating the sustainability of improved building insulation: A case study in the Dubai residential environment. Building and Environment*, v.67, p.105-110, 2013.
- RODRIGUES, C.R.B. *et al.* Sistemas computacionais de apoio a ferramenta Análise de Ciclo de Vida do Produto (ACV). In: Encontro nacional de Engenharia de Produção, 28., 2008, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2008. p.1-15.
- SOARES, S.R.; PEREIRA, S.W.; BREITENBACH, F.E. *Análise do ciclo de vida de produtos cerâmicos da indústria de construção civil*. 2002. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- SPOSTO, R.M.; DO Ó, S.W. *Management and technology for quality and sustainability of masonry components in Brasilia's market*. In: CIB W107 Construction in Developing Countries International Symposium "Construction in Developing Economies: New Issues and Challenges" 18-20. Santiago, Chile: 2006.
- STACHERA JR, T.; CASAGRANDE JR, E.F. Avaliação de emissões de CO₂ na construção civil: um estudo de caso da habitação de interesse social no Paraná. In: Encontro Nacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, 9., 2007, Curitiba. *Anais...* Curitiba: UFPR, 2007. p.1-13.
- TAVARES, S.F. *Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras*. 2006. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- THORMARK, C. The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building. *Energy and Buildings*, v.41, p.1019-1026, 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. *Energy and Buildings*, v.93, n.15, p.295-302, 2015.
- ZABALZA, I.; CAPILLA, A.V.; USÓN, A.A. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, v.46, n.5, p.1133-1140, 2010.

Recebido em
23/3/2015,
reapresentado
em 26/10/2015
e aprovado em
9/12/2015.

ROSA MARIA SPOSTO | Universidade de Brasília | Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil | Departamento de Engenharia Civil e Ambiental | Asa Norte, 70900-000, Brasília, DF, Brasil | Correspondência para/*Correspondence to*: R.M. SPOSTO | *E-mail*: <rmsposto@unb.br>.

LUCAS ROSSE CALDAS | Universidade de Brasília | Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil | Departamento de Engenharia Civil e Ambiental | Brasília, DF, Brasil.

ABDALA CARIM NABUT NETO | Universidade de Brasília | Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil | Departamento de Engenharia Civil e Ambiental | Brasília, DF, Brasil.