

Ambiente Construído



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado. Fonte: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212017000400091&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 16 jan. 2018.

REFERÊNCIA

CALDAS, Lucas Rosse; SPOSTO, Rosa Maria. Emissões de CO2 referentes ao transporte de materiais de construção no Brasil: estudo comparativo entre blocos estruturais cerâmicos e de concreto.

Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 91-108, out./dez. 2017. Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212017000400091&lng=en&nrm=iso)

[86212017000400091&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212017000400091&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 16 jan. 2018. doi:

<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000400187>.

Emissões de CO₂ referentes ao transporte de materiais de construção no Brasil: estudo comparativo entre blocos estruturais cerâmicos e de concreto

CO₂ emissions related to building materials transportation in Brazil: comparative study on structural ceramic and concrete bricks

Lucas Rosse Caldas
Rosa Maria Sposto

Resumo

A avaliação do ciclo de vida de emissões de CO₂ (ACVCO₂) de um produto envolve a quantificação das emissões de CO₂ nas etapas de pré-uso, uso e pós-uso. A etapa de pré-uso envolve as fases de indústria, execução e transporte. O presente trabalho teve como objetivo o estudo das emissões de CO₂ de blocos estruturais cerâmicos e de concreto, a partir do levantamento das emissões na indústria e no transporte, com avaliação do impacto da fase de transporte desses materiais em 26 capitais brasileiras. Para isso foram pesquisadas as empresas fabricantes classificadas nos programas setoriais de qualidade. As distâncias de transporte das fábricas até as capitais foram levantadas via *Google Maps*. Os resultados mostraram que as capitais localizadas na Região Norte e Sudeste foram as que apresentaram maiores e menores valores, respectivamente, de emissões relacionadas ao transporte para ambos os tipos de componentes. A participação da fase de transporte, relacionada às emissões totais, foi maior para os blocos de concreto, para a maioria das capitais. Ao final do trabalho, como forma de minimizar a subjetividade da consideração da fase de transportes nos estudos de ACVCO₂, foram propostos uma matriz e um fluxograma para a gestão da avaliação da fase de transporte nesses tipos de estudos.

Palavras-chaves: Emissões de CO₂. Transportes. Alvenaria estrutural. Brasil.

Abstract

The CO₂ Emission Life Cycle Assessment (CO₂LCA) of a product involves quantifying CO₂ emissions in the pre-use, use and end-of-life stages. The pre-use stage involves industry, execution and transportation stages. The aim of this paper is to study CO₂ emissions of ceramic and concrete bricks, based on data collection of emissions in the industry and transportation stages, evaluating the impact of the transportation stage of these materials in 26 Brazilian capitals. Therefore, research was carried out in manufacturing companies classified in the "Brazilian Sectoral Quality Program". The transportation distances from the industries to the capitals were analysed using Google Maps. The results have shown that the capitals located in the North and Southeast regions presented the highest and lowest emission values related to transportation for both types of bricks, respectively. The contribution of the transportation phase, related to total emissions, was higher for concrete bricks for most of the capitals. At the end of the paper, so as to minimise the subjectivity of considering the transportation stage in the CO₂LCA studies, a matrix and flowchart were proposed to manage the transport phase in this kind of study.

Keywords: CO₂ emissions. Transportation. Structural masonry. Brazil.

Lucas Rosse Caldas
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Rosa Maria Sposto
Universidade de Brasília
Brasília - DF - Brasil

Recebido em 03/10/15
Aceito em 02/04/17

Introdução

Contextualização

Uma das alternativas relacionadas à sustentabilidade das edificações é a adoção de projetos com utilização de coordenação modular. Segundo Tauil e Nesse (2010) a coordenação modular é o processo de organizar peças e componentes, de forma a atender a uma medida de base padronizada. Esse processo propicia a otimização do consumo de matérias-primas e recursos energéticos para a produção dos componentes de uma edificação, o que diminui a quantidade de resíduos gerados (BALDAUF, 2004). Entre os sistemas construtivos existentes no mercado nacional que utilizam os princípios da coordenação modular pode ser apontada a alvenaria estrutural.

Nos últimos anos houve um aumento do número de edificações habitacionais em alvenaria estrutural, com o emprego de blocos de concreto ou cerâmico. Tendo em vista que esses componentes representam cerca de 50% da massa desse tipo de edificação (SPOSTO; PAULSEN, 2014), há necessidade de se definir critérios relacionados à sustentabilidade ambiental, tais como energia incorporada, emissões de CO₂ e outros, objetivando subsidiar a tomada de decisão na escolha de materiais mais sustentáveis.

O impacto ambiental relacionado à construção civil tem sido alvo de amplas discussões em nível global. Atualmente, a busca pela sustentabilidade ambiental tornou-se o objetivo de muitos projetos de edificações. Uma forma de mensurar a sustentabilidade ambiental das edificações e de seus materiais e/ou processos é a avaliação do ciclo de vida (ACV). Por meio da ACV é possível avaliar de forma holística e abrangente o impacto ambiental de um material, sistema e edificação, ao longo do seu ciclo de vida (BASBAGILL *et al.*, 2013).

Uma forma de medir os impactos ambientais do ciclo de vida de um material ou sistema, associando ao efeito do aquecimento global e ao de mudanças climáticas, é realizar a quantificação de emissões de dióxido de carbono (CO₂) ao longo da fabricação e do transporte dos materiais e componentes de construção. O CO₂ é apontado como o principal gás causador do aquecimento global (BERMANN, 2003; GOLDEMBERG; LUCON, 2011), e é um dos problemas ambientais mais discutidos atualmente e, portanto, há uma urgente necessidade da diminuição das emissões desse gás na atmosfera. Chau, Leung e Ng (2015) e Caldas (2016) observam que, na literatura

científica, os estudos que utilizam a ACV com foco na quantificação das emissões de CO₂, que de certa forma pode ser considerada um inventário de ciclo de vida¹ (ICV), têm sido chamados de ACVCO₂. No presente trabalho foi adotada essa nomenclatura.

Muitos estudos de ACV e ACVCO₂, principalmente internacionais, apresentam a fase de transporte de forma subjetiva e frequentemente desconsiderada do escopo avaliado, por afirmarem não ser expressiva quando relacionada ao ciclo total do produto ou processo estudado. No entanto, cabe ressaltar que o Brasil é um país com extensas faixas territoriais e com diferente grau de desenvolvimento tecnológico em suas cinco regiões (Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul), resultando na variação da disponibilidade de diferentes materiais para cada uma dessas regiões. Dessa forma, pergunta-se até que ponto essa característica de nosso país impacta as emissões de CO₂ na fase de transporte.

Relacionada à disponibilidade dos materiais e componentes está a distância percorrida da fábrica até o canteiro de obra; isso impacta diretamente nas emissões de CO₂ ao longo do trajeto realizado, pois quanto maior for essa distância percorrida maior será a quantidade de CO₂ emitido na atmosfera.

Avaliação do ciclo de vida (ACV) e avaliação do ciclo de vida de emissões de CO₂ (ACVCO₂) aplicada à construção civil

A massa de uma alvenaria estrutural é considerável, e varia conforme o tipo de componente utilizado, bloco de concreto ou cerâmico. Tavares (2006) avaliou cinco modelos com sistema convencional de blocos de concreto e cerâmico, apontando valores da participação em massa do sistema de vedação vertical (em alvenaria) em relação à habitação completa, entre 23% e 36,34%. Carminatti Júnior (2012) avaliou três sistemas de vedação vertical, sendo eles de *light steel framing*, blocos cerâmicos estruturais e blocos de concreto estruturais, e chegou à participação em massa do sistema de vedação convencional, em relação à habitação completa de 23,9%, 36,2% e 71%, respectivamente. Paulsen e

¹Consiste na etapa em que os impactos ambientais gerados por um produto ou processo durante o ciclo de vida são identificados e avaliados, quantificando-se as entradas e saídas para o ambiente do sistema do produto investigado (ABNT, 2009). Dependendo do objetivo pretendido do estudo de ACV e do método de avaliação de impactos (AICV) utilizado, diferentes dados de entrada e saída podem ser considerados.

Spoto (2013) avaliaram o sistema estrutural de blocos cerâmicos de uma habitação popular e concluíram que este apresentou participação em massa igual a 63% da habitação. Portanto, é notória a importância da participação das vedações verticais na composição de uma edificação habitacional, principalmente quando é empregado o sistema em alvenaria estrutural; isso justifica a necessidade de avaliação dos potenciais impactos ambientais desse sistema. Tal avaliação pode ser realizada por meio do emprego da ferramenta de ACV ou ACVCO₂.

De acordo com a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), ACV 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. Podem ser avaliados impactos ambientais relacionados ao consumo de energia, emissões atmosféricas, eutrofização, acidificação das águas, entre outros (BRIBIÁN; CAPILLA; USÓN, 2011). A ACV deve englobar toda a cadeia de produção e consumo, considerando o consumo de energia, matérias-primas e perdas envolvidas; fases de transporte, uso, manutenção e destinação final (PASSUELLO *et al.*, 2014).

Chau, Leung e Ng (2015) conceituam a ACVCO₂ como uma metodologia de quantificação das emissões de CO₂ geradas nas etapas envolvidas ao longo do ciclo de vida de um material, sistema ou edificação. Essas emissões estão relacionadas ao tipo de combustível utilizado na fabricação e processamento dos materiais, nos processos químicos, como por exemplo a calcinação do carbonato de cálcio para a produção de cimento, as emissões para a geração de eletricidade e a cocção de alimentos.

Kim (2011) divide a ACVCO₂, aplicada às edificações, em três principais etapas: pré-uso, uso e pós-uso. A etapa de pré-uso (Tabela 1) é aquela referente à indústria (extração e fabricação dos materiais), ao transporte dos materiais da fábrica até o canteiro e ao processo executivo da edificação ou sistema. A etapa de uso consiste na operação e na manutenção da edificação. Por fim, a etapa de pós-uso é a referente ao transporte e à

destinação final dos resíduos gerados. Neste trabalho foi estudada somente a etapa de pré-uso de uma habitação, incluindo as fases de fabricação e transporte.

Alguns estudos aplicaram a ACV para comparação entre blocos de concreto e cerâmicos estruturais como o de Mastella, Gleize e Soares (2001), Grigoletti e Sattler (2004) e Carminatti Júnior (2012). O primeiro estudo comparou o consumo de matérias-primas, energia elétrica, emissões gasosas e resíduos sólidos entre os dois tipos de blocos. O segundo discutiu aspectos relevantes relacionados à escolha da unidade funcional e das fronteiras de sistema entre os blocos, indicando quais os principais fluxos que devem ser considerados na aplicação da ACV entre esses dois tipos de blocos. Já o terceiro estudo levantou a energia incorporada de uma habitação de interesse social com diferentes alternativas: blocos de concreto, bloco cerâmico e *light steel framing*. Pedroso (2015) utilizou a ACV com foco no consumo de energia ao longo do ciclo de vida (nas fases de pré-uso, uso e pós-uso) de quatro sistemas construtivos, sendo um deles a alvenaria estrutural de blocos de concreto.

Diversos estudos nacionais e internacionais têm focado na mensuração da quantidade de emissões de CO₂ por meio da aplicação da ACVCO₂ relacionados aos materiais de construção. Soares e Pereira (2004) e Stachera Junior e Casagrande Junior (2007) avaliaram blocos cerâmicos; Bribián, Capilla e Usón (2011) avaliaram diferentes materiais de construção civil do contexto espanhol; Campos, Punhagui e John (2011) quantificaram as emissões de CO₂ no transporte de madeira amazônica; Costa (2012) avaliou diferentes materiais de construção civil no Brasil, como blocos cerâmicos, de concreto, aço, gesso, entre outros; o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) (CONSELHO..., 2014) avaliou blocos de concreto e pisos intertravados de concreto; Passuello *et al.* (2014) estudaram clínquer alternativo, e Santoro e Kripka (2016) agregados utilizados para a produção de concreto.

Tabela 1 - Fases do ciclo de vida na etapa de pré-uso

Fases do ciclo de vida de emissões de CO ₂	Sigla
Indústria ¹	ECO ₂ I
Transporte de materiais da fábrica até o canteiro de obras	ECO ₂ T
Execução da habitação	ECO ₂ E
Total etapa de pré-uso	ECO ₂ TOT

Nota: ¹extração da matéria-prima e fabricação dos componentes.

Outros estudos ainda podem ser apontados, tais como: Nabout Neto (2011), que comparou o sistema de *light steel framing* e a alvenaria estrutural de blocos cerâmicos; Tanborianki e Prado (2012), que compararam as emissões de CO₂ de diferentes sistemas de fachadas de uma edificação comercial; Rakhshan, Friess e Tajerzadeh (2013), que avaliaram o impacto da escolha de diferentes isolantes térmicos relacionados às emissões de CO₂, como forma de atender o desempenho térmico de uma edificação habitacional localizada em Dubai; Wen e Noor (2015), que quantificaram as emissões de CO₂ para dois sistemas de vedação localizados na Malásia, um convencional e outro industrializado, e Atmaca e Atmaca (2015), que compararam as emissões de carbono para duas edificações localizadas na zona urbana e na zona rural, no contexto da Turquia.

Por fim, alguns estudos, como o de Tavares (2006), Rosselló-Batle *et al.* (2010) e o de Peng (2016), avaliaram as emissões de toda a edificação ao longo do seu ciclo de vida. Esses estudos consideraram as fases da indústria e transporte da fábrica até o canteiro de obras.

Em relação às emissões de CO₂ oriundas da fase de indústria (extração e processamento de materiais), para todos os estudos citados no parágrafo anterior, o bloco cerâmico apresentou valores superiores ao bloco de concreto, conforme é apresentado na Tabela 2.

Fase de transporte e emissões de CO₂

O setor de transportes representa em torno de 34% do consumo de energia total dos países em desenvolvimento, principalmente em razão do uso de automóveis particulares (GOLDEMBERG; LUCON, 2011). Segundo os mesmos autores, em relação ao consumo energético e às emissões de

CO₂ oriundas do transporte, e considerando a divisão modal do transporte rodoviário, tem-se que este é o mais impactante quando comparado ao transporte ferroviário e marítimo. Segundo dados da Confederação Nacional de Transportes (CNT) (CONFEDERAÇÃO..., 2015), o transporte rodoviário de carga representa mais de 60% do transporte utilizado no Brasil, e essa carga inclui grande parte dos materiais de construção empregados nas edificações.

A maioria dos estudos de ACV e ACVCO₂ de materiais e componentes ou sistemas de edificações que englobaram em seu escopo a fase de transporte se esbarrou na limitação da localização de uma determinada área ou cidade, realizando estudos de casos locais. Alguns chegaram à conclusão de que as emissões de CO₂ relacionadas ao transporte dos materiais são inferiores às outras fases do ciclo de vida da edificação e por isso muitas vezes essa fase é desconsiderada dos estudos de ACV ou ACVCO₂. Nabout Neto (2011) chegou a valores da participação das emissões de CO₂ do transporte, em relação às emissões totais do escopo avaliado, entre 2,9 e 4%; Palácio (2013) chegou a valores entre 13,4 e 15%; Taborianski e Prado (2012) valores entre 7,1 a 14,8%; e Gong *et al.* (2012) a valores entre 8 a 11%. Alguns estudos internacionais, como o de Cabeza *et al.* (2014), McGrath *et al.* (2013) e Kellenberger e Althaus (2009), concluíram que essa fase pode ser desconsiderada nos estudos de emissões de CO₂. No entanto, como já foi visto em outros estudos, e principalmente para o caso do Brasil, onde as distâncias percorridas para o escoamento e distribuição dos materiais e componentes da edificação são de grandes dimensões, é necessário considerar essa fase nos estudos de ACV e ACVCO₂.

Tabela 2 - Fatores de emissões de CO₂ para bloco de concreto e cerâmico

Autores (ano) - País	Bloco de concreto (kgCO ₂ /kg)	Bloco cerâmico (kgCO ₂ /kg)
Soares e Pereira (2004) - Brasil	-	0,33
Stachera Junior e Casagrande Junior (2007) - Brasil	-	0,38
Bribián, Capilla e Usón (2011) - Espanha	-	0,27
Costa (2012) - Brasil	0,18	0,11
CBCS (CONSELHO..., 2014) - Brasil ¹	0,12	-
Média	0,15	0,27
Desvio padrão	0,04	0,11
Coefficiente de variação	28%	41%

Nota: ¹valor médio.

A discrepância de valores das emissões referidos anteriormente se deve a dois principais fatores: localidade das edificações estudadas e dos materiais que foram empregados e consumo de combustível utilizado, mesmo que todos tenham adotado o diesel. Ressalta-se que todos esses trabalhos se restringiram a estudos de casos. O país onde o estudo foi realizado influencia diretamente nos resultados, pois aqueles com maiores extensões territoriais tendem a apresentar diferentes distâncias, dependendo da cidade e da região e da variação da disponibilidade dos materiais, como é o caso do Brasil. Devido às justificativas já expostas, o presente trabalho teve como objetivo o levantamento da quantidade de emissões de CO₂ relacionada à fase de indústria e de transporte de duas alternativas de blocos utilizados no sistema de alvenaria estrutural, o bloco de concreto e o bloco cerâmico, a partir dos seguintes objetivos específicos:

- (a) levantamento e mapeamento das fábricas classificadas no Programa Setorial da Qualidade (PSQ) de blocos cerâmicos e de concreto estruturais no Brasil;
- (b) quantificação das emissões de CO₂ relacionadas ao transporte de cada material para 26 capitais brasileiras;
- (c) verificação do percentual da fase de transporte relacionada à quantidade de emissões totais para as cidades estudadas;

(d) proposição de uma matriz de mensuração da importância da fase de transporte nos estudos de ACVCO₂; e

(e) proposição de um fluxograma para se chegar à matriz proposta e diminuir a subjetividade da consideração da fase de transporte nos estudos de ACVCO₂.

Método

Características dos blocos e da unidade funcional adotada

Foram escolhidos blocos de concreto e blocos cerâmicos estruturais com as especificações apresentadas na Figura 1 e na Tabela 3, visto que ambos possuem as mesmas dimensões e funções estruturais.

Segundo a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) a unidade funcional é o desempenho quantificado de um sistema de produto para ser utilizado como unidade de referência em um estudo de avaliação do ciclo de vida. Ela tem o objetivo de proporcionar referências para que as entradas e as saídas estejam relacionadas, além de ser necessária para assegurar a comparabilidade dos resultados entre dois ou mais elementos.

Figura 1 - (a) Bloco de concreto estrutural e (b) bloco cerâmico estrutural

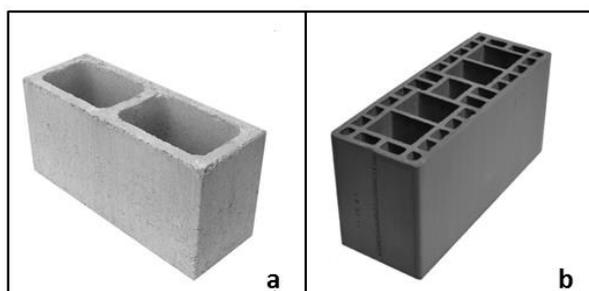


Tabela 3 - Propriedades e dados dos materiais estudados

Propriedades	Bloco de concreto	Bloco cerâmico
Dimensões	14x19x39 cm	14x19x39 cm
Peças/m ² (Fonte)	12,5 ¹ (TCPO, 2012)	12,5 ¹ (PINI, 2012)
kg/peça (Fonte)	11,8 (PINI, 2012)	6,9 (PINI, 2012)
FCO ₂ ²	0,15 kgCO ₂ /kg	0,27 kgCO ₂ /kg
Perdas (Fonte)	3% (PINI, 2012)	5% (PINI, 2012)

Nota: ¹considerou-se a produtividade mínima; e ²foi adotada a média dos valores encontrados na literatura (Tabela 2).

No presente trabalho foi adotada como unidade funcional um metro quadrado (1 m²) de vedação construída. Não foram consideradas as juntas e os revestimentos de argamassa pelo fato de os dois sistemas de blocos apresentarem o mesmo consumo de argamassa (segundo dados coletados do TCPO, 2012), e, portanto, durante a comparação não seria acrescentada nenhuma informação.

Levantamento das fábricas de blocos de concreto e de blocos cerâmicos no Brasil e seleção dos locais nas capitais estudadas

Para o levantamento das fábricas produtoras dos blocos de concreto e dos blocos cerâmicos estruturais foram pesquisados os Programas Setoriais da Qualidade (PSQs), no âmbito do Ministério das Cidades e do Sistema de Qualificação de Materiais, Componentes e Sistemas Construtivos (SiMaC).

Para os blocos cerâmicos estruturais foi utilizado o “PSQ de Blocos Cerâmicos” (BRASIL, 2015a) e para os blocos de concreto o “PSQ de Blocos Vazados de Concreto com Função Estrutural e Peças de Concreto para Pavimentação” (BRASIL, 2015b). Para ambos os materiais foram selecionadas somente as fábricas que produziam blocos estruturais, nas dimensões de 14 cm x 19 cm x 39 cm.

Deve-se ressaltar a limitação desse método, visto que os PSQs são atualizados de tempos em tempos; no entanto, essa é a única forma de comparação de materiais e componentes que apresentam desempenho e qualidade semelhantes, de acordo com os padrões das normas técnicas brasileiras.

Nos PSQs foram identificadas as fábricas com seus respectivos endereços, o que permitiu a tabulação dos dados em planilha eletrônica (Excel), separadas por estado e região, e posteriormente distribuídas em um mapa do Brasil.

Para a escolha dos locais dos canteiros de obras hipotéticos foi adotada a localização das universidades federais de cada estado. Foram escolhidas as localizações das universidades dos câmpus localizados nas capitais dos estados. Nos casos em que foram verificados mais de um campus universitário, foi selecionado aquele com a localização mais próxima da região central das cidades.

A localização adotada da universidade foi a primeira opção fornecida pelo *Google Maps*. A justificativa para escolha das universidades como a

localização dos canteiros de obras foi o fato de já terem sido utilizados em outros trabalhos como o de Nabut Neto (2011) e para servir como um ponto de referência para outras pesquisas. Caso outros estudos sejam feitos utilizando blocos de concreto ou blocos cerâmicos localizados em alguma capital brasileira, sem uma localização específica, pode ser adotada a localização apresentada neste trabalho, o que facilita o desenvolvimento de uma das fases da ACV.

Quantificação das emissões de CO₂ para cada componente nas fases da indústria e do transporte dos blocos

Cálculo das distâncias das fábricas até as cidades estudadas

A partir da planilha produzida foi utilizado o *Google Maps* (GOOGLE, 2015) para o cálculo das distâncias das fábricas até a localização hipotética das capitais. Foi adotada como a cidade da fábrica aquela que apresentou menor distância de transporte. As cidades escolhidas foram as capitais dos estados brasileiros. Inicialmente o estudo seria realizado em todas as capitais brasileiras; no entanto, não foi possível calcular a distância das fábricas até a cidade de Macapá, AP, por motivos de erros do programa, e por isso essa capital foi excluída do estudo. Portanto, ao final foram selecionadas 26 capitais brasileiras, divididas por região:

- (a) Região Norte: Rio Branco, AC; Manaus, AM; Belém, PA; Porto Velho, RO; Boa Vista, RR;
- (b) Região Nordeste: Maceió, AL; Salvador, BA; Fortaleza, CE; São Luís, MA; João Pessoa, PB; Recife, PE; Teresina, PI; Natal, RN; Aracaju, SE;
- (c) Região Centro-Oeste: Brasília, DF; Goiânia, GO; Cuiabá, MT; Campo Grande, MS;
- (d) Região Sudeste: Vitória, ES; Belo Horizonte, BH; São Paulo, SP; Rio de Janeiro, RJ; e
- (e) Região Sul: Curitiba, PR; Porto Alegre, RS; Florianópolis, SC.

Método para o cálculo das emissões de CO₂ nas fases da indústria e do transporte dos componentes

Para o cálculo das emissões de CO₂ da indústria dos componentes (bloco de concreto e bloco cerâmico) foi utilizada a Equação 1. Foi considerada a ECO₂I constante para todas as regiões neste estudo.

$$ECO_2I = \frac{m}{A} \times FCO_2 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

m – massa (kg);

A – área (m²);

FCO₂ – fator de emissões de CO₂ dos materiais na indústria (kgCO₂/kg); e

ECO₂I – emissões de CO₂ na indústria (kgCO₂/m²).

Para as emissões de CO₂ do transporte foi adotada a divisão modal rodoviário como o meio de transporte utilizado. Como o transporte rodoviário de materiais de construção civil no Brasil é feito majoritariamente por caminhões, que utilizam óleo diesel como combustível, primeiramente foi pesquisado na literatura nacional o consumo de diesel (L) por unidade de massa (em toneladas) e a distância percorrida (em quilometragem), obtendo-se um fator de consumo de combustível (em L/t.km), como apresentado na Tabela 4. Os fatores encontrados foram utilizados em estudos de ACV e ACVCO₂ para a avaliação da fase de transporte de diferentes materiais e componentes da construção civil.

A partir dos dados obtidos desses estudos foi calculada a média do fator consumo de combustível, de 0,026 L/t.km. Nota-se certa dispersão dos resultados, com 58% de coeficiente de variação, que se deve a diversos fatores, como apresentado por Kamakaté e Schipper (2009): modelo e tecnologia do veículo utilizado, tipo do combustível, capacidade de carga, massa da carga transportada, idade e manutenção do veículo e características do percurso, como qualidade das vias, condições de deslocamento, topografia do terreno, presença de congestionamentos e hábitos do motorista, entre outros.

O fator consumo de combustível foi multiplicado pelas emissões de CO₂ por litro de diesel, de 2,603 kgCO₂/L, obtido do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (MINISTÉRIO..., 2013), a partir do

ano-calendário de 2005 a 2012. Embora outros valores de emissões de CO₂ por litro de diesel possam ser utilizadas, tais como os adotados pelo Painél Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2,972 e 3,063 kgCO₂/L e pelo GHG Protocol de 2,676 kgCO₂/L (CAMPOS; PUNHAGUI; JOHN, 2011), optou-se por utilizar o valor do MMA (MINISTÉRIO..., 2013) por ser um inventário realizado para o Brasil e específico para o setor de transportes. Ao final foi encontrado um fator inicial de emissões de CO₂ do transporte de 0,068 kgCO₂/t.km.

Em relação à volta dos caminhões, podem ser estabelecidas as seguintes alternativas: (1) o caminhão voltar vazio; (2) o caminhão voltar com alguma fração da carga; (3) o caminhão voltar com toda a carga. Por uma medida conservadora, foi considerada a alternativa 2, em que o caminhão volta com alguma fração da carga, e foi adotado um valor de 50% da carga total, que representa metade da massa inicial. Dessa forma, o fator inicial de emissões de CO₂ do transporte de 0,068 kgCO₂/t.km foi multiplicado por 1,5, que equivale à massa inicial somada a 50%, o que resultou em um fator final de emissões de CO₂ do transporte (F) de 0,102 kgCO₂/t.km, como apresentado na Equação 2.

$$ECO_2T = Fx \frac{m}{A} x D \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

F – fator final de emissões de CO₂: 0,102 kgCO₂/t.km;

m – massa (t);

A – área (m²);

D – distância da fábrica até o canteiro de obras (km).

ECO₂T – emissões de CO₂ no transporte dos componentes (kgCO₂/m²).

Tabela 4 - Consumo de diesel em diferentes estudos

Autores	Fator consumo de combustível (L/t.km)
Tavares (2006)	0,046
Nabut Neto (2011)	0,014
Campos <i>et al.</i> (2011)	0,005 - 0,017
Costa (2012)	0,019
Godinho <i>et al.</i> (2015)	0,014 - 0,024
Santoro e Kripka (2016)	0,043 - 0,048
Sposto, Caldas e Nabut Neto (2016)	0,030
Média	0,026
Desvio padrão	0,015
Coeficiente de variação	58%

Verificação do percentual da fase de transporte relacionada à quantidade de emissões totais

Para o cálculo das emissões totais de CO₂ e a participação da fase de transporte foram utilizadas as Equações 3 e 4, respectivamente.

$$ECO_2TOT = ECO_2I + ECO_2T \quad \text{Eq. 3}$$

Onde ECO₂TOT – emissões totais de CO₂ (kgCO₂/m²).

$$P_{transporte} = \frac{ECO_2T}{ECO_2TOT} \times 100 \quad \text{Eq. 4}$$

4

Onde P_{transporte} – participação da fase de transporte nas emissões totais de CO₂ (%).

Elaboração de matriz de mensuração da importância da fase de transporte nos estudos de ACVCO₂

Para a elaboração da matriz foram utilizadas três variáveis: quantidade de emissões de CO₂ da indústria (ECO₂I), distância do transporte percorrida pelo material e massa do material. Foram atribuídos valores de 1, 2 e 3 para cada variável. O critério de escolha desses valores foi realizado de forma a ser o mais simples possível, somente a título de exemplo.

(a) valor de ECO₂I: valor alto: 1, valor intermediário: 2, valor baixo: 3;

(b) distância: menor: 1, intermediária: 2, maior: 3; e

(c) massa: menor: 1, intermediária: 2, maior: 3.

A matriz elaborada apresentou 9 células, e os valores presentes em cada uma foi o resultado da multiplicação de cada variável, nas respectivas linhas e colunas.

Resultados e discussão

Levantamento das fábricas de blocos de concreto e cerâmicos no Brasil

A seleção e a quantidade das fábricas em conformidade com o PSQ localizadas nos seus respectivos estados estão apresentadas na Figura 2.

A partir da análise da Figura 2 é possível observar:

(a) maior quantidade de fábricas de blocos de concreto;

(b) maior concentração de fábricas para ambos os materiais na região Sul e Sudeste, com destaque para o estado de São Paulo;

(c) a ausência de fábricas na região Norte e pequenas quantidades na região Centro-Oeste e Nordeste; e

(d) embora as fábricas de blocos cerâmicos se apresentem em menor quantidade, existe uma melhor distribuição ao longo do território brasileiro, principalmente pelas fábricas localizadas na região Nordeste.

Figura 2 - Distribuição das fábricas de blocos de concreto e de blocos cerâmicos no território brasileiro



Fonte: elaborada pelos autores a partir do mapa disponível no MMA (MINISTÉRIO..., 2015).

É importante destacar que do ponto de vista da sustentabilidade no transporte de materiais é mais importante ter fábricas distribuídas em vários estados do país do que grandes quantidades concentradas em locais próximos entre si. Deve-se ressaltar que tal afirmativa somente é válida caso as fábricas mais próximas de uma dada localidade consigam atender certa demanda. No presente estudo essa análise não foi realizada, podendo ser explorada em pesquisas futuras.

A partir da localização das fábricas e das universidades das capitais pesquisadas foram levantadas as distâncias conforme apresentado na Figura 3.

As capitais dos estados de Roraima, do Amazonas, do Acre e de Rondônia foram as que apresentaram as maiores distâncias e isso ocorreu para ambos os componentes. Nota-se que essas capitais estão localizadas na região Norte do país e as diferenças entre esses componentes não foram grandes. Já as capitais dos estados de Minas Gerais e de São Paulo foram as que apresentaram menores distâncias, também para ambos os componentes. As maiores diferenças nas distâncias entre os blocos cerâmicos e de concreto ocorreram nas capitais dos estados do Ceará, do Maranhão, do Distrito Federal, do Espírito Santo, do Rio Grande do Sul, do Goiás e de Santa Catarina. A distância de transporte dos blocos de concreto foi maior em onze capitais, enquanto a dos blocos cerâmicos nas quinze capitais restantes.

Quantificação das emissões de CO₂ na indústria e no transporte dos componentes (ECO₂I e ECO₂T)

A partir da unidade funcional adotada e das propriedades dos blocos, incluindo as perdas, foram encontrados os seguintes valores para o consumo de materiais: 151,93 kg/m² (blocos de concreto) e 90,56 kg/m² (blocos cerâmicos). Nota-se que a vedação de blocos de concreto apresenta um consumo de materiais aproximadamente duas vezes superior que a vedação de blocos cerâmicos. Esses valores influenciaram os resultados de emissões de CO₂, visto que quanto maior for a massa dos materiais, maiores são os valores de ECO₂I e ECO₂T.

Após aplicação da Equação 1 foram encontrados os seguintes valores de ECO₂I: 22,8 kgCO₂/m² (blocos de concreto) e 24,5 kgCO₂/m² (blocos cerâmicos). Observa-se que o valor das emissões da indústria para o bloco de concreto foi pouco inferior aos blocos cerâmicos, com uma diferença de 7%, de acordo com os dados adotados neste trabalho. Embora os blocos de concreto apresentem uma massa superior aos blocos cerâmicos, o fator médio de emissão de CO₂ (FCO₂) dos blocos cerâmicos foi aproximadamente duas vezes superior, o que resultou nos valores próximos de ECO₂I para ambos os componentes.

As emissões de CO₂ relacionadas ao transporte para os dois tipos de vedação estão apresentadas nas Figuras 4 e 5.

Figura 3 - (a) Distâncias percorridas dos blocos de concreto e (b) distâncias percorridas dos blocos cerâmicos

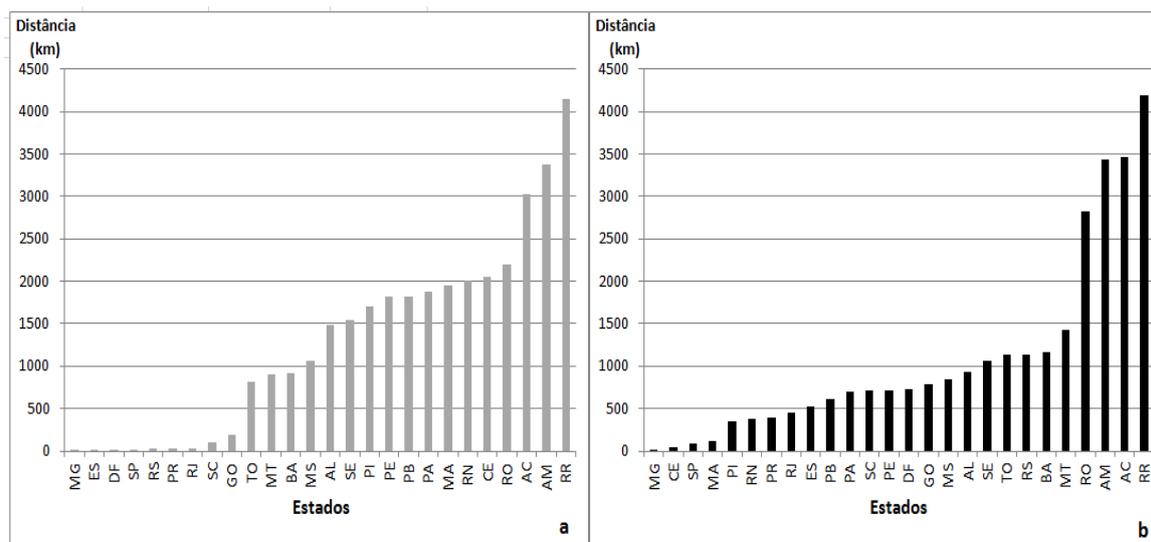


Figura 4 - Emissões de CO₂ no transporte dos blocos de concreto

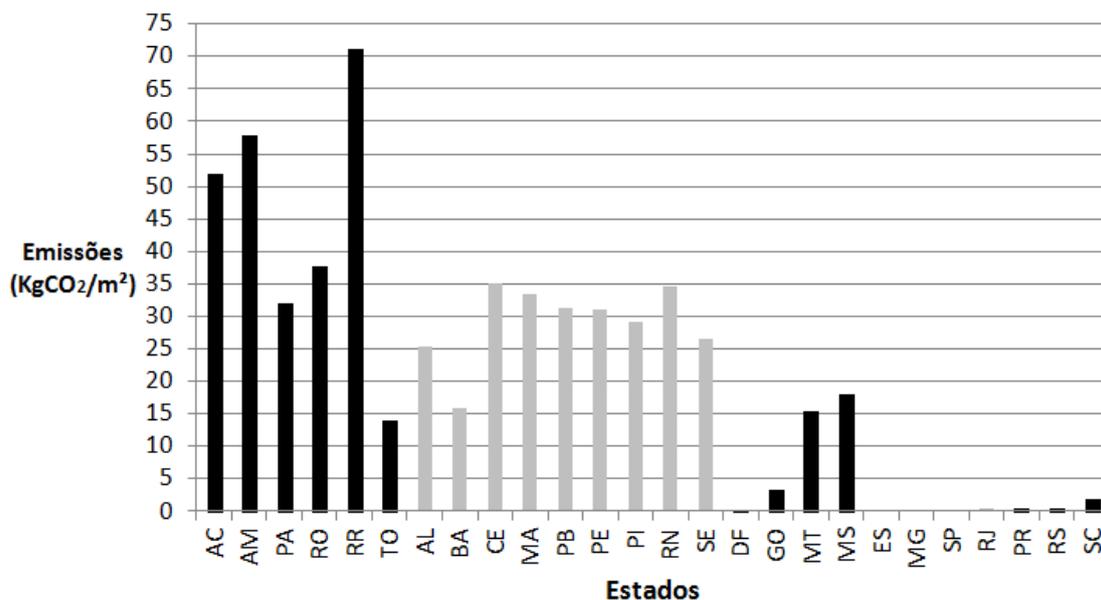
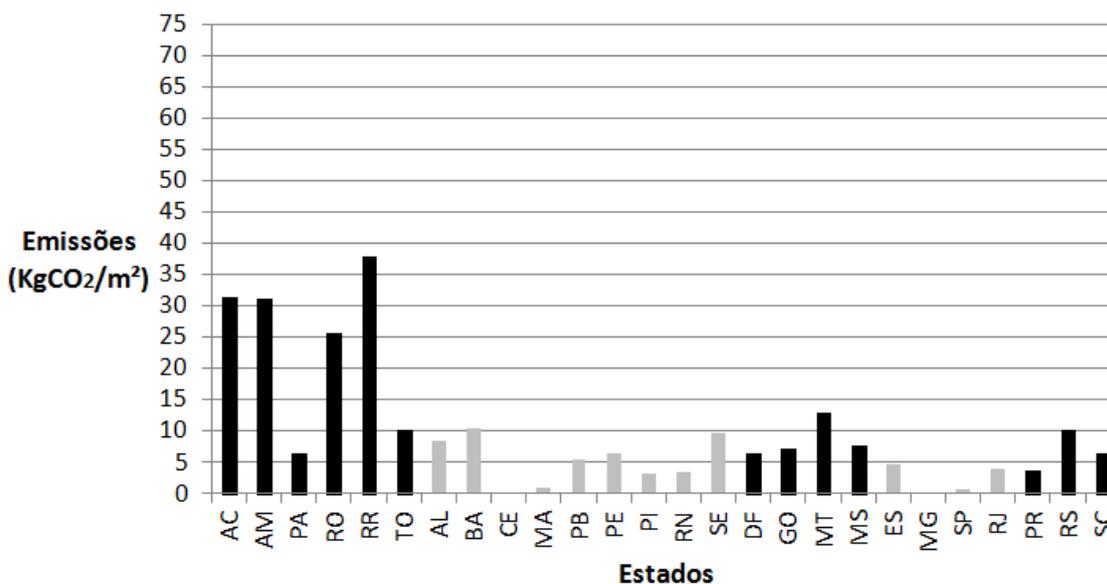


Figura 5 - Emissões de CO₂ no transporte dos blocos cerâmicos



A partir da análise dos resultados é possível observar que a região Norte foi a que apresentou os maiores valores de emissões e isso ocorreu devido às maiores distâncias verificadas. Já a região Sudeste foi a que apresentou menores valores de emissões relacionadas ao transporte, para a maioria das capitais. Comparando os dois sistemas de vedação, o de blocos de concreto apresentou maiores emissões relacionadas ao transporte do que a de blocos cerâmicos para as regiões Norte e Nordeste, enquanto o oposto ocorreu para as regiões Sudeste e Sul. Para a região Centro-Oeste, as emissões dos blocos de concreto foram maiores para as capitais dos

estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. O bloco de concreto apresentou maiores valores de emissões em 19 capitais, enquanto os blocos cerâmicos para as 7 capitais restantes.

A causa disso foram as maiores distâncias percorridas pelos blocos de concreto na região Norte e Nordeste, visto que não existem fábricas qualificadas no PSQ nas proximidades. No caso dos blocos cerâmicos há diminuição dessas distâncias devido à presença de uma fábrica no estado do Maranhão e duas no Ceará, o que facilita o abastecimento dos outros estados do Nordeste e Norte.

Nas regiões Sudeste e Sul o cenário se mostrou melhor para os blocos de concreto devido à localização das fábricas, principalmente as duas localizadas na região Centro-Oeste e as onze fábricas distribuídas na região Sul. Com relação às emissões totais de CO₂ os valores encontrados foram resumidos na Tabela 5.

Observa-se que os valores médios e máximos de emissões totais de CO₂ para os blocos cerâmicos são superiores aos de bloco de concreto para as regiões Sudeste e Sul. Já para os blocos de concreto, os valores mínimos, médios e máximos de emissões de CO₂ nas regiões Norte e Nordeste e valores médios e máximos da região Centro-Oeste são superiores aos valores dos blocos cerâmicos. Isto ocorreu devido a maior participação do transporte (ECO₂T) em relação à indústria nessas regiões. Portanto, com base nos fatores de emissões de CO₂ adotados neste estudo, a localização considerada das fábricas qualificadas nos PSQs, e considerando a disponibilidade de atendimento da demanda das construtoras pelas fábricas, os blocos de concreto se mostraram

menos impactantes do ponto de vista das emissões de CO₂ nas regiões Sul e Sudeste, enquanto que os blocos cerâmicos nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste.

Analisando cada região de forma separada, para os blocos de concreto as regiões Centro-Oeste e Norte foram as que apresentaram maior dispersão dos valores, enquanto para os blocos cerâmicos apenas a região Norte apresentou valor diferenciado das demais. A região Sudeste foi a que apresentou menor dispersão de valores para os dois tipos de componentes, devido à maior disponibilidade de fábricas qualificadas na região Sudeste.

Verificação do percentual da fase de transporte relacionada à quantidade de emissões totais

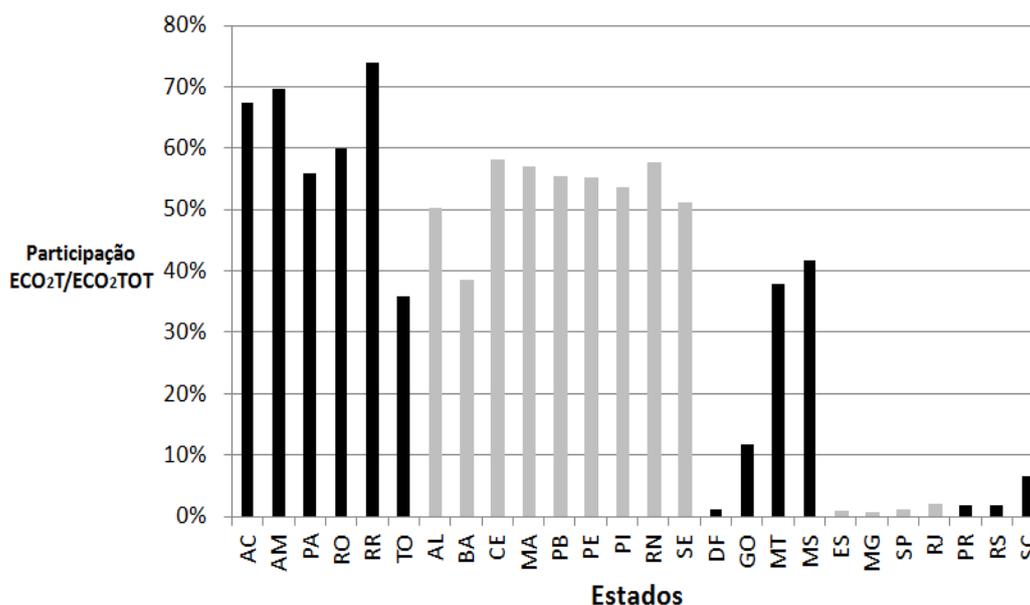
A partir das Equações 3 e 4 foram calculados os percentuais da fase de transporte em relação à quantidade de emissões de CO₂ totais para os blocos de concreto (Figura 6) e blocos cerâmicos (Figura 7).

Tabela 5 - Emissões totais de CO₂ por região, com base nos valores mínimos, médios e máximos

Regiões	Bloco de Concreto					Bloco Cerâmico				
	Mín	Média	Máx	DesvPad ¹	CV ²	Mín	Média	Máx	DesvPad ¹	CV ²
Norte	39,3	69,3	96,3	20,3	29%	30,57	50,94	62,21	10,8	19%
Nordeste	41,0	54,4	60,4	6,0	11%	24,54	29,61	34,78	3,7	8%
Centro - Oeste	25,5	34,5	43,3	8,8	25%	30,74	32,78	37,13	2,9	6%
Sudeste	25,4	25,5	25,7	0,2	1%	24,22	26,60	28,92	2,3	5%
Sul	25,7	26,1	27,0	0,8	3%	27,83	30,98	34,47	3,3	7%

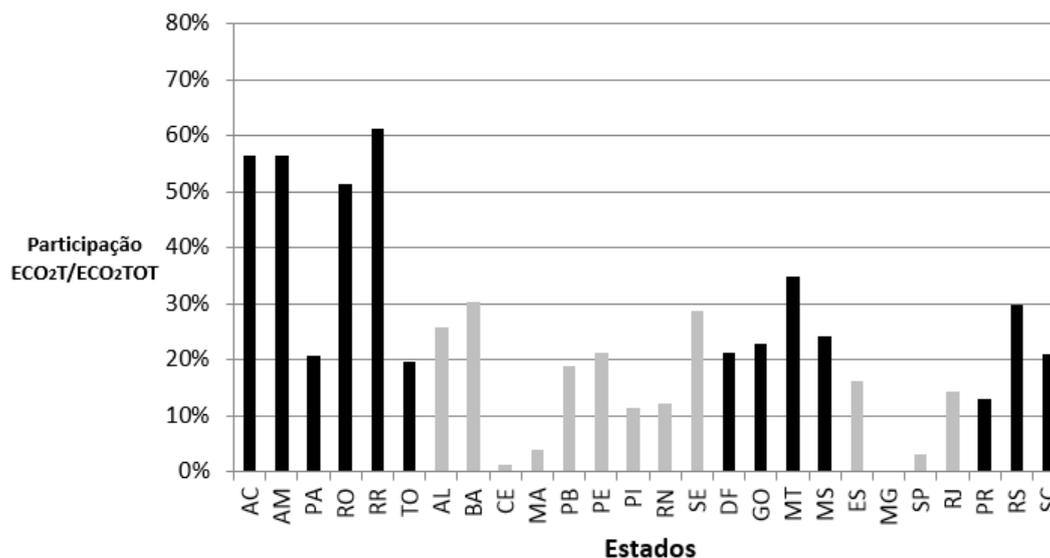
Nota: Legenda: ¹desvio padrão; e ²coeficiente de variação.

Figura 6 - Percentual do transporte em relação às emissões totais para o bloco de concreto



Nota: ECO₂T - Emissões de CO₂ do transporte; e ECO₂TOT - Emissões de CO₂ totais.

Figura 7 - Percentual do transporte em relação às emissões totais para o bloco cerâmico



Nota: ECO₂T - Emissões de CO₂ do transporte; e ECO₂TOT - Emissões de CO₂ totais.

A partir da análise das Figuras 6 e 7 percebe-se que para ambos os componentes a região Norte é a que apresenta maior participação da fase de transporte, enquanto a região Sudeste a menor. Tal resultado já era esperado, no entanto o que chama atenção é a quantidade dessa participação. Para os blocos de concreto essa participação alcança valores até maiores que 70% para a capital do estado de Roraima, enquanto para os blocos cerâmicos fica em torno de 60% para a mesma localização.

Analisando o bloco de concreto individualmente, nota-se que a região Nordeste também apresentou uma grande participação da fase de transporte, atingindo valores próximos a 60% para as capitais dos estados do Ceará e do Rio Grande do Norte. A região Centro-Oeste apresentou variações, chegando a menos de 10% para a capital do Distrito Federal, e em torno de 40% para as capitais dos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Portanto, conclui-se, com base nas premissas adotadas no estudo, que as capitais e outras cidades localizadas nas regiões Norte e Nordeste são as mais críticas em relação à fase de transporte para os estudos de ACVCO₂.

Dessa forma, cabe ressaltar os limites da análise realizada, em que foram consideradas somente fábricas classificadas nos PSQs; sabe-se que na prática no Brasil ainda muitas empresas construtoras compradoras não estão preocupadas com essa qualificação. Outra limitação deve-se ao fato da necessidade de se pensar na capacidade dessas fábricas de atenderem uma grande demanda (isso não foi avaliado no presente estudo). Dessa forma, aqui abre mais uma discussão sobre os

custos ambientais de se investir em produtos de qualidade, e até que ponto uma fábrica qualificada no PSQ produz materiais de maior qualidade quando comparada às fábricas não qualificadas. Por outro lado, sabe-se que o desenvolvimento tecnológico de regiões do Nordeste e Norte tende a ser menor, com instalações mais precárias, somadas aos maiores problemas sociais nessas regiões, que geram produtos de menor qualidade e fora dos padrões normativos.

Caso a edificação, constituída em sua maior parte por blocos de concreto, se localize em uma dessas capitais da região Norte e Nordeste, a fase de transporte não pode ser desconsiderada. Para os blocos cerâmicos, as capitais de alguns estados na região Norte (Acre, Amazonas, Roraima e Rondônia) também foram as mais críticas, apresentando participação do transporte entre 20 e 60%. Portanto, a partir desses resultados tem-se uma visão da variação das emissões de CO₂ relacionadas à fase de transporte para os dois tipos de blocos estudados, com uma abrangência nacional, diferentemente de outros trabalhos já desenvolvidos, que focam somente em estudos de caso locais.

O panorama apresentado neste estudo pode servir de subsídio para a escolha do material mais adequado do ponto de vista da menor distância entre a fábrica e o canteiro, principalmente quando se tem interesse na obtenção de alguma certificação ambiental, como a Alta Qualidade Ambiental (AQUA) e o *Leadership in Energy & Environmental Design* (LEED), que possuem pontuação para a seleção de materiais locais, com

um raio de distância máximo entre o canteiro e as fábricas dos materiais.

Proposição da matriz de mensuração da importância da fase de transporte nos estudos de ACV

A partir dos resultados encontrados, buscou-se criar uma forma de mensurar a importância da fase de transporte nos estudos de ACVCO₂ aplicados ao setor da construção civil. Utilizando as variáveis descritas no item de metodologia, foi elaborada uma matriz (Figura 8), que tem por objetivo auxiliar os estudos de ACVCO₂ no país, a fim de criar um padrão, mostrando se a fase de transporte deve ou não ser considerada.

A partir da matriz é possível observar que quanto maior a massa e a distância do material a ser transportado e menor o valor de ECO₂I do material, maior será a participação do transporte no ciclo de vida, e, portanto, essa fase não pode ser desprezada. Isso ocorre na célula com número 27, onde é a situação de participação máxima do transporte. Exemplificando para este estudo, essa situação adequar-se-ia aos blocos de concreto localizados na Região Norte, que apresentam um valor elevado de massa e um baixo valor de ECO₂I, quando comparada ao bloco cerâmico e a grandes distâncias de transporte.

O caso oposto é a célula de número 1, onde ocorre a participação mínima da fase de transporte e, portanto, pode ser desprezada nos estudos de ACV, resultando em uma economia de tempo e recursos nesses estudos. Os blocos cerâmicos localizados na região Sudeste adequar-se-iam nesse caso.

Por fim, é importante ressaltar que a matriz elaborada é apenas uma ideia inicial, cujo objetivo é a facilitação dos estudos de ACVCO₂, a partir da

avaliação da disponibilidade de diferentes componentes e materiais para todos os estados brasileiros e criação de um banco de dados, em que cada material e estado estariam localizados em uma célula da matriz. Em cada célula poderia ser verificada a participação em percentual, por exemplo:

(a) todos os materiais e/ou componentes com suas respectivas localizações enquadrados na célula 1 apresentariam uma participação menor que 5%; e

(b) todos os materiais e/ou componentes com suas respectivas localizações enquadrados na célula 27 apresentariam uma participação maior que 50%.

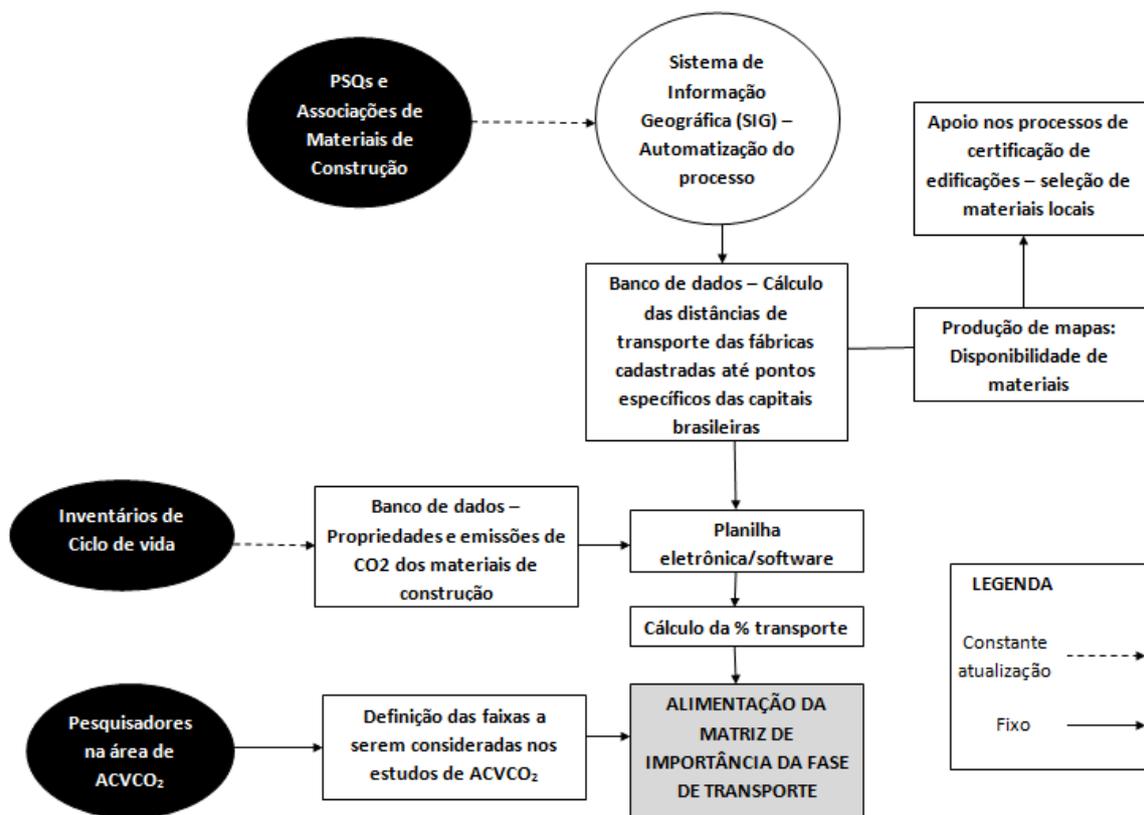
Por fim, com base em um consenso entre pesquisadores e especialistas na área de ACV/ACVCO₂ poderia ser definido a partir de qual célula a fase de transporte poderia ser desprezada e quais seriam obrigatórias para ser consideradas nesses estudos. Portanto, o principal resultado da matriz é propor uma forma de diminuir a subjetividade nos estudos de ACVCO₂ e facilitar o processo de avaliação.

A ideia é criar um zoneamento brasileiro para os principais materiais e componentes de construção, relacionado ao seu impacto do transporte, similarmente ao zoneamento bioclimático brasileiro. Cabe ressaltar que a disponibilidade e a localização das fábricas de materiais de construção não é algo estático, como o clima, por exemplo. No entanto, pode ser elaborado um processo de gestão dinâmico do SiMac e dos PSQs, que avalie em tempos determinados quais as fábricas que estão qualificadas e assim retroalimentar a matriz.

Na Figura 9 é apresentado o processo para a avaliação da fase de transporte nos estudos de ACVCO₂, que mostra como atingir a matriz proposta.

Figura 8 - Matriz de mensuração da importância da fase de transporte nos estudos de ACV

Menor Distância	Alto ECO ₂ I		Baixo ECO ₂ I
	1	2	3
1	1	4	9
2	2	8	18
3	3	12	27
Maior Distância	1	2	3
	Menor Massa		Maior Massa

Figura 9 - Fluxograma para avaliação da fase de transportes nos estudos de ACVCO₂

É possível observar que os PSQs e inventários de ciclo de vida deverão estar em constante atualização e para que a proposta metodológica funcione há a necessidade de um processo contínuo de retroalimentação dos dados das empresas fabricantes e das pesquisas realizadas ao inventário dos impactos ambientais dos materiais. Além disto, é interessante definir um intervalo de tempo fixo que os dados seriam atualizados, por exemplo, o período utilizado nos PSQs.

O mapeamento em tempo real, originado a partir do sistema de informação geográfica (SIG), pode facilitar processos de certificação ambiental, como o LEED, AQUA e Selo Azul da Caixa. Por fim, o processo apresentado pode servir de incentivo para que mais fabricantes de materiais e componentes de construção se adéquem aos requisitos dos PSQs, aumentando a disponibilidade de materiais e componentes que atendam as normas brasileiras, resultando provavelmente na redução das distâncias de transporte.

Conclusões

No presente trabalho primeiramente foram levantadas as fábricas de blocos de concreto e cerâmicos estruturais nas dimensões 14 cm x 19 cm x 39 cm, qualificadas nos seus respectivos PSQs. Foi verificada a maior quantidade de

fábricas de blocos de concreto em relação aos blocos cerâmicos.

A partir da localização das fábricas foram quantificadas as emissões de CO₂ oriundas da indústria (extração e fabricação) e do transporte dos dois tipos de blocos, considerando como localização dos canteiros de obra 26 capitais brasileiras. As emissões referentes à indústria dos componentes foram: 22,8 kgCO₂/m² para os blocos de concreto e 24,5 kgCO₂/m² para os blocos cerâmicos.

Em relação ao transporte, a região Norte foi a que apresentou maiores valores de emissões, enquanto a região Sudeste foi a que apresentou menores valores. Comparando os dois componentes, o bloco de concreto apresentou maiores emissões relacionadas ao transporte do que o bloco cerâmico para as regiões Norte e Nordeste, enquanto o oposto ocorreu para as regiões Sudeste e Sul. Quando se avaliaram as emissões totais de CO₂, foi verificado que os valores de emissões dos blocos cerâmicos são superiores aos de bloco de concreto para as regiões Sudeste e Sul, sendo assim, menos indicados para essas localidades.

Outro item avaliado neste trabalho foi a participação da fase de transporte em relação às emissões totais de CO₂ para os dois componentes em cada capital estudada. Os blocos de concreto

apresentaram maior percentual em relação aos blocos cerâmicos para a maioria das regiões brasileiras. A região Norte foi a que apresentou maior percentual, enquanto a região Sudeste o menor.

Por fim, foi proposta uma matriz de mensuração da importância do transporte em estudos de ACVCO₂. Espera-se que outros materiais e componentes de construção sejam levantados para as capitais brasileiras, podendo criar uma espécie de zoneamento dos materiais e capitais prioritárias em relação à fase de transporte.

Dessa forma, a principal contribuição deste estudo foi o levantamento das emissões de CO₂ relacionadas ao transporte de dois tipos de blocos bastante utilizados nos sistemas de alvenaria estrutural, por meio da ACVCO₂, em 26 capitais brasileiras, diferentemente de outros estudos que ficam restritos a casos locais. Os resultados aqui apresentados chamam a atenção para o transporte, que muitas vezes é ignorado nos estudos de ACV e ACVCO₂; conclui-se que isso deve ser considerado em alguns casos, principalmente em países de extensa faixa territorial como o Brasil, ainda mais se a edificação estiver localizada em regiões mais afastadas dos principais centros tecnológicos e de desenvolvimento, como a região Norte.

Para estudos futuros recomenda-se a tentativa de obtenção de informações diretas das fábricas classificadas nos PSQs a fim de melhorar a qualidade dos dados; a comparação de outros materiais ou componentes; e o desenvolvimento de *softwares* para facilitar essa avaliação.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
- ATMACA, A.; ATMACA, N. Life Cycle Energy (LCEA) and Carbon Dioxide Emissions (LCCO₂A) Assessment of Two Residential Buildings in Gaziantep, Turkey. **Energy and Buildings**. v. 102, p. 417-431, 2015.
- BALDAUF, A. S. F. **Contribuição à Implementação da Coordenação Modular da Construção no Brasil**. 2004. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- BASBAGILL, J. *et al.* Application of Life-Cycle Assessment to Early Stage Building Design for reduced embodied environmental impacts. **Building and Environment**, v. 60, p. 81-92, 2013.
- BERMANN, C. **Energia no Brasil: para quê? Para quem?** 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2003.
- 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: 27 jul. 2015.
- BRASIL. Ministério das Cidades. Programa Setorial da Qualidade. **PSQ de Blocos Vazados de Concreto com Função Estrutural e Peças de Concreto para Pavimentação**. 2015 b. Disponível em: <http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos_simac_psq2.php?id_psq=60>. Acesso em: 22 jul. 2015.
- BRIBIÁN, I. Z.; 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, 2011.
- 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.
- CALDAS, L. R. **Avaliação do Ciclo de Vida Energético e de Emissões de CO₂ de Uma Edificação Habitacional Unifamiliar de Light Steel Framing**. 2016. 173 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- CAMPOS, E. F.; PUNHAGUI, K. R. G.; JOHN, V. M. Emissão de CO₂ do Transporte da Madeira Nativa da Amazônia. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 157-172, abr./jun. 2011.
- CARMINATTI JÚNIOR, R. **Análise do Ciclo de Vida Energético de Projeto de Habitações de Interesse Social Concebido em Light Steel Framing**. 2012. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Centro de Ciências Exatas de Tecnologia, 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. **Applied Energy**, v. 143, p. 395-413, 2015.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. **Sondagem CNT de Eficiência Energética no Transporte Rodoviário de Cargas**. Brasília, 2015. Disponível em: <file:///C:/Users/Lucas/Downloads/Sondagem_2015_web%20(2).pdf>. Acesso em: 15 abr. 2017.
- CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL. **Projeto Avaliação de Ciclo de Vida Modular de Blocos e Pisos de Concreto**. 2014. Disponível em: <http://www.blocobrasil.com.br/projetos/cbcs-ciclo-de-vida-modular>. Acesso em: 25 jul. 2015.
- COSTA, B. L. C. **Quantificação das Emissões De CO₂ Geradas na Produção de Materiais Utilizados na Construção Civil no Brasil**. 2012. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2012.
- GODINHO, M. M. V. *et al.* Impacto da Distância e Tipo de Transporte de Materiais nas Emissões de CO₂ na Construção de um Empreendimento Habitacional de Interesse Social. In: LATIN-AMERICAN AND EUROPEAN CONFERENCE ON SUSTAINABLE BUILDINGS AND COMMUNITIES, 28., Lisboa, 2015. **Anais...** Lisboa, 2015.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. 3. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2011.
- GONG, X. *et al.* Life Cycle Energy Consumption and Carbon Dioxide Emission of Residential Building Designs in Beijing. **Journal of Industrial Ecology**, v. 16, n. 4, p. 576-587, 2012.
- GOOGLE. Google Maps. [Mapa]. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps?source=tldsi&hl=en>. Acesso em: 12 ago. 2015.
- GRIGOLETTI, G. C.; SATTTLER, M. A. Definição da Unidade Funcional e das Fronteiras do Sistema para Vedações em Blocos de Concreto e Blocos Cerâmicos para a Análise do Ciclo de Vida. In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 1.; ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10., São Paulo, 2004. **Anais...** São Paulo, 2004.
- KAMAKATÉ, F.; SCHIPPER, L. Trends in Truck Freight Energy Use and Carbon Emissions in Selected OECD Countries From 1973 to 2005. **Energy Policy**, v. 37, n. 10, p. 3743-3751, 2009.
- KELLENBERGER, D.; ALTHAUS, H. J. Relevance of Simplifications in LCA Building Components. **Building and Environment**, v. 44, n. 4, p. 818-826, 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.
- MASTELLA, D. V.; GLEIZE, P.; SOARES, R. Comparação Entre os Processos de Produção de Blocos Cerâmicos e de Concreto para Alvenaria Estrutural, Através da Análise do Ciclo de Vida de Produtos. In: ENCONTRO NACIONAL, 6.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., São Pedro, 2001. **Anais ...** São Pedro, 2001.
- MCGRATH, T. *et al.* A Retrofit Versus New-Build House Using Life-Cycle Assessment. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, v. 166, n. 3, p. 122-137, 2013.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Zoneamento Ecológico-Econômico nos Estados**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/gestao-territorial/zoneamento-territorial/zee-nos-estados>. Acesso em: 17 jun. 2015.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviário**. 2013. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/inventario/inventario_Ar/2014-05-27%20inventrio%202013.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2016.
- NABUT NETO, A.C. **Energia Incorporada e Emissões de CO₂ de Fachadas: estudo de caso do steel frame para utilização em Brasília**. 2011. 155 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.
- 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. 123 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

- PASSUELLO, A. C. B. *et al.* Aplicação da Avaliação do 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**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 7-20, out./dez. 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**, v. 57, p. 95-102, 2013.
- PEDROSO, G. M. P. **Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) de Sistemas de Vedação de Habitações**. 2015. 209 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- PENG, C. Calculation of a Building's Life Cycle Carbon Emissions Based on Ecotect and Building Information Modeling. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 453-465, 2016.
- PINI. **Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos**. 14. ed. São Paulo: PINI, 2012.
- RAKHSHAN, 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.
- ROSSELLÓ-BATLE, B. *et al.* Energy Use, CO₂ Emissions and Waste Throughout the Life Cycle of a Sample of a Sample of Hotels in the Balearic Islands. **Energy and Buildings**, v. 42, p. 547-558, 2010.
- 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.
- SOARES, S. R.; PEREIRA, S. W. Inventário da Produção de Pisos e Tijolos Cerâmicos no Contexto da Análise do Ciclo de Vida. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 83-94, abr./jun. 2004.
- SPOSTO, R. M.; CALDAS, L. R.; NABUT NETO, A. C. Energia Incorporada e Emissões de CO₂ de Fachadas de Light Steel Framing (LSF) no Brasil. **Oculum Ensaios. Revista de Arquitetura e Urbanismo**, v. 13, n. 1, p. 40-49. 2016.
- 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. Revista de Arquitetura e Urbanismo**, v. 11, n.1, p. 40-49. 2014.
- STACHERA JUNIOR, T.; CASAGRANDE JUNIOR, 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., Curitiba, 2007. **Anais...** Curitiba: UFPR, 2007.
- TABORIANSKI, V. M.; PRADO, R. T. A. Methodology of CO₂ Emission in the Life Cycle of Office Building Façades. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 33, p. 41-47, 2012.
- TAUIL, C. A.; NESE, F. J. M. **Alvenaria Estrutural**. São Paulo: PINI, 2010.
- TAVARES, S. F. **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energética de Edificações Residenciais Brasileiras**. 2006. 226 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- WEN, T. J.; NOOR, H. C. S. 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, p. 295-302, 2015.

Lucas Rosse Caldas

Programa de Engenharia Civil | Universidade Federal do Rio de Janeiro | Cidade Universitária, Centro de Tecnologia, Bloco B, Ilha do Fundão | Rio de Janeiro - RJ - Brasil | CEP 21945-970 | Tel.: (62) 99672-7202 | E-mail: lrc.ambiental@gmail.com

Rosa Maria Sposto

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia | Universidade de Brasília | SG-12- Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Campus Universitário | Asa Norte | Brasília - DF - Brasil | CEP 70900-000 | Tel.: (61) 3274-1517 Ramal 211 | E-mail: rmsposto@unb.br

Revista Ambiente Construído

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

Fax: +55 (51) 3308-4054

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br