

Análise da viabilidade técnica da adaptação de dados internacionais de inventário de ciclo de vida para o contexto brasileiro: um estudo de caso do concreto para paredes moldadas no local

Analysis of the technical feasibility of adapting international life cycle inventory data to the Brazilian context: a case study of concrete for cast-in-place wall

Alessandra L. Castro (1), Fernanda B. Silva (2), Rachel H. Arduin (3), Luciana A. Oliveira (4), Osmar H. Becere (5)

(1) Profa. Dra., alcastro@sc.usp.br – Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC/USP
(2) Me., fbsilva@ipt.br; (3) Me., rachel@ipt.br; (4) Dra., luciana@ipt.br; (5) Me., becere@ipt.br – Pesquisadores do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT)

Resumo

A crescente preocupação com sustentabilidade na construção civil traz à tona a necessidade de métodos confiáveis de avaliação do desempenho ambiental de materiais e componentes, dentre os quais se destaca a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), que permite extrair indicadores ambientais objetivos por meio da compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida. No entanto, este método requer uma grande quantidade de dados de inventário de ciclo de vida para sua realização e, embora existam várias bases de dados no exterior, não há bases de dados sistematizadas com informações coletadas sobre os processos produtivos de materiais de construção no cenário nacional, de forma a embasar a condução da ACV desses produtos. Para suprir essa carência de dados no Brasil, existe a alternativa de se adaptar dados estrangeiros à realidade nacional. O presente trabalho analisa a viabilidade técnica desta adaptação, utilizando-se o produto “concreto aplicado em paredes moldadas no local” como estudo de caso. Foi feita a avaliação parcial do ciclo de vida do concreto, considerando fatores desde a extração das matérias-primas até sua produção na usina (*cradle-to-gate*). O método consistiu em adaptar os dados existentes na base Ecoinvent® para a realidade brasileira, avaliando em detalhes o processo de produção do concreto na usina e ajustando macro indicadores para os processos precedentes. Constatou-se que apenas a adaptação de macro indicadores não é suficiente, sendo necessária uma análise cuidadosa das premissas, das fontes de informação e da adaptabilidade dos dados existentes quando da realização de ACV de produtos da construção no Brasil.

Palavra-Chave: Sustentabilidade; Avaliação do ciclo de vida; Inventário de ciclo de vida; Paredes de concreto.

Abstract

The growing concern about sustainability in construction brings out the need for reliable methods of assessing the environmental performance of materials and components, among which stands out the Life Cycle Assessment (LCA) that allows extracting objective environmental indicators through compilation and evaluation of inputs, outputs and the potential environmental impacts of a product system throughout its life cycle. However, this method requires a great amount of life cycle inventory data for its accomplishment and although there are several databases abroad, there are no systematic databases with information collected about the production processes of building materials in the national scene, in order to support LCA studies of these products. To fill this data gap in Brazil, it is possible to adapt foreign data to the national context. The present paper analyses the technical feasibility of this adaptation, based on a case study of the product “concrete for cast-in-place walls”. A partial life cycle analysis was carried out, considering the extraction of raw materials to concrete production at plant (*cradle-to-gate*). The method consisted of adapting the existing data from Ecoinvent® database to the Brazilian context, investigating in detail the concrete production process in plant and adjusting the upstream processes. It was noticed that the simple adaptation of macro indicators is not sufficient, being necessary a careful analysis of the premises, information sources and data adaptability when conducting LCA of construction products in Brazil.

Keywords: Sustainability; Life cycle assessment; Life cycle inventory; Concrete walls.

1 Introdução

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia de avaliação dos impactos ambientais associados ao ciclo de vida de um produto, isto é, bens ou serviços, desde a extração das matérias-primas até o descarte final.

A metodologia de ACV foi originalmente desenvolvida para criar ferramentas de tomada de decisão para seleção de produtos ou serviços, considerando requisitos ambientais. No entanto, surgiram outras aplicações dessa metodologia, incluindo seu uso como base para comunicar o desempenho ambiental de um produto para os agentes de determinado setor (por exemplo, com rotulagem ambiental tipo III, denominada Declaração Ambiental de Produto – DAP – ou, em inglês, *Environmental Product Declaration* – EPD), e para analisar a eficiência ambiental do processo de produção de um determinado produto (BORGHI, 2013).

O primeiro estudo de ACV foi realizado nos Estados Unidos no final da década de 1960, e considerou apenas o consumo de energia requerido para produzir embalagens (HAUSCHILD; JESWIET; ALTING, 2005). Na década de 1990, após o desenvolvimento de diversos estudos de ACV nas diferentes áreas de produtos e serviços, a metodologia foi normalizada, culminando na série de normas identificadas como ISO 14040. As normas ISO 14040:2006 (ISO, 2006) e ISO 14044:2006 (ISO, 2006) atuais fornecem a estrutura indispensável para a ACV; no entanto, ainda que balizadas por recomendações, certas escolhas metodológicas são realizadas pelo executor do estudo (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Um estudo de ACV é composto de quatro etapas, sendo estas iterativas, ou seja, constantemente reavaliadas durante a realização do estudo, conforme apresentado na Figura 1. De acordo com a NBR ISO 14040:2009 (ABNT, 2009), na primeira etapa da ACV, denominada objetivo e escopo, definem-se a finalidade e a abrangência do estudo, bem como parâmetros decisivos para as demais etapas, tais como unidade funcional (desempenho quantificado de um sistema para utilização como unidade de referência), fronteira do sistema (conjunto de critérios que especificam quais processos elementares fazem parte do sistema de produto) e fluxo de referência (medidas das saídas de um dado sistema de produto, requeridas para realizar a função expressa pela unidade funcional) (ARDUIN, 2013).

A segunda etapa da ACV, denominada Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), compreende a coleta e sistematização dos dados de entrada e saída do sistema em estudo, os quais, na terceira etapa, denominada Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV), são correlacionados às categorias de impacto selecionadas quanto à sua significância ambiental.

Para tanto, se faz necessário selecionar um dos métodos de AICV internacionalmente reconhecidos e tecnicamente validados (TEIXEIRA *et al.*, 2012). Na última etapa da ACV, interpretação do ciclo de vida, os resultados das etapas da análise de inventário e da

avaliação de impacto são interpretados de acordo com o objetivo e escopo, a fim de obter conclusões, limitações e recomendações.

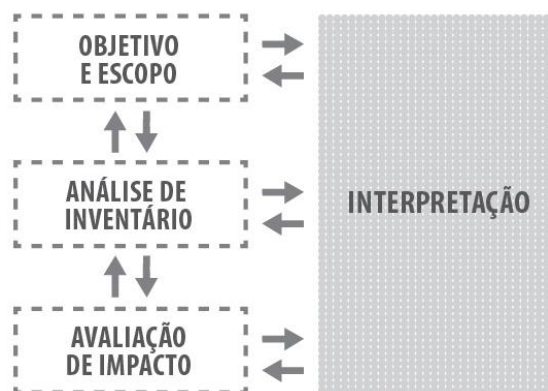


Figura 1 – Etapas da ACV segundo diretrizes da NBR ISO 14040:2009.

Fonte: Elaborado pelos autores com base nas informações da norma.

A realização de estudos de ACV é facilitada pela existência de diversas bases de dados consolidadas com inventários de processos de produção, bem como de diversos softwares, que realizam a compilação dos dados e o cálculo dos indicadores de impacto ambiental de acordo com as metodologias de AICV disponíveis.

Em locais como a Europa e os Estados Unidos, o uso de ACV se encontra em um estágio avançado, o que pode ser comprovado pela quantidade de normas complementares, bases de dados, softwares e certificações existentes. No Brasil, somente a partir de 2000 iniciou-se gradativamente a publicação de estudos de ACV realizados em universidades e institutos de pesquisa, bem como iniciativas em alguns setores, tais como na construção civil.

Em 2010 foi instituído o Programa Brasileiro de ACV pela Resolução CONMETRO nº 04/2010, cujos principais objetivos consistem em sistematizar uma base de dados nacional para inventários de ciclo de vida com metodologia padronizada e disseminar o pensamento de ciclo de vida e aplicação da ACV (CONMETRO, 2010). Porém, até o momento não há uma base de dados de acesso público que sistematize os estudos realizados no país, mas sabe-se que o referido programa vem realizando ações para concretizar esse objetivo. Em 2015 foi publicada a Portaria INMETRO nº 110 (INMETRO, 2015) que disponibilizou para consulta pública os requisitos gerais do programa de avaliação de conformidade de rotulagem ambiental tipo III (DAP). Ou seja, trata-se de um tema ainda em desenvolvimento no âmbito nacional.

No caso da construção civil, a aplicação da ACV também se encontra em um estágio mais avançado na Europa, onde há normas específicas relacionadas à ACV de produtos da construção e edifícios (EN 15804:2014 e EN 15978:2012), elaboradas com base no conceito das normas internacionais ISO 14040:2006 (ISO, 2006) e ISO 14044:2006 (ISO, 2006). Há ainda muitos estudos técnicos e acadêmicos de ACV específicos para a construção civil já publicados, bem como informações disponíveis em bases de dados de ICV.

No cenário nacional, em 2014 o Ministério do Meio Ambiente em parceria com o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS, 2014) publicaram um relatório apresentando um método de avaliação de produtos e sistemas construtivos, denominado ACV modular, que propõe uma abordagem simplificada avaliando apenas alguns aspectos ambientais. No entanto, conforme relatado em grande parte dos estudos nacionais, a grande dificuldade de se realizar estudos de ACV no Brasil é a ausência de dados nacionais de inventário de ciclo de vida.

1.1 ACV do concreto aplicado na construção civil

De acordo com John (2010), não existe material de construção que não cause impacto ambiental. Na prática, para cada situação, deve-se selecionar o material que permita cumprir a função requerida com o mínimo impacto ambiental e que, simultaneamente, garanta o desempenho técnico necessário e seja economicamente viável.

Dentre os materiais empregados na construção civil, o concreto merece destaque por ser o material mais consumido no mundo depois da água. Entre seus impactos ambientais, um dos mais importantes é a emissão de CO₂, sendo que a grande maioria dessas emissões está relacionada com a produção do cimento Portland. A fim de mitigar as emissões de CO₂ de materiais à base de cimento, como o concreto, a indústria cimenteira tem adotado como estratégia mais popular a redução do teor de clínquer no cimento por meio da incorporação de adições minerais.

Como as adições minerais são subprodutos ou resíduos de outras cadeias produtivas, considera-se que elas chegam para a indústria cimenteira com impacto ambiental nulo. Essa metodologia de alocação (denominada *cut-off*) é amplamente aceita atualmente segundo os métodos de ACV, porém ela tem sido questionada e a tendência dos estudos realizados na Europa é a de alocar a esses resíduos parte do CO₂ e outros impactos ambientais dos processos industriais que os originaram (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Dependendo das condições de dosagem, variabilidade do processo de produção e dos materiais constituintes empregados, podem existir variações significativas no teor de cimento de concretos com resistências e trabalhabilidade similares. Assim, muitas das variáveis que influenciam a pegada ambiental de um concreto podem ser controladas por aqueles que especificam e produzem os concretos, enquanto outras são controladas pelos produtores das matérias-primas, especialmente do cimento (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Sabe-se que o impacto ambiental dos concretos aplicados na construção civil depende do impacto do tipo de cimento utilizado e do teor de cimento empregado na sua composição. O patamar atual de mitigação das emissões de CO₂ na produção do cimento Portland nacional situa-se em torno de 20%, podendo chegar a aproximadamente 30% com o uso exclusivo de biomassa como fonte de energia, o que ainda não é possível para o setor. No caso dos concretos, a redução pode chegar a 30% pelo aumento no rigor na produção do material e pela redução do seu desperdício. De acordo com o estudo desenvolvido por Lima (2010), esse patamar de redução das emissões de CO₂ no concreto é tão significativo quanto o da indústria cimenteira.

A emissão de CO₂ antrópico associado ao processo produtivo do concreto foi avaliada em um contexto mais amplo por Souza (2012a). Neste estudo de ACV, foram identificados os fatores que alteram as emissões, bem como foram determinadas as possíveis ações de redução dessas emissões. O estudo envolveu desde a etapa de extração dos agregados, produção do cimento e transporte desses materiais até a usina de concreto, até a efetiva produção do concreto e seu transporte para o consumidor final (obra), verificando-se quais etapas possuem uma maior contribuição para com as emissões. Verificou-se que as emissões do concreto são provenientes, em sua grande maioria, da obtenção de suas matérias-primas. No caso dos agregados, as emissões são pouco representativas em sua produção, porém expressivas para o transporte. Já para o cimento, a produção impacta mais do que o transporte.

Na literatura nacional constam ainda estudos de ACV sobre os agregados miúdo (SOUZA, 2012b) e graúdo (ROSSI, 2013) utilizados na produção do concreto aplicado na construção civil.

2 Objetivo

Apesar dos estudos realizados e dados disponíveis, não há uma base de dados sistematizada com as informações coletadas sobre os processos produtivos de materiais de construção no cenário nacional, de forma a embasar a condução da ACV desses produtos. Para suprir essa carência de dados nacionais, existe a alternativa de se adaptar dados estrangeiros à realidade nacional, realizando-se as devidas modificações devido às diferenças usualmente existentes entre os processos produtivos dos materiais de construção.

Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica de adaptação de dados internacionais de inventário de ciclo de vida, considerando-se as particularidades do contexto brasileiro nesta adaptação.

3 Metodologia

A metodologia de adaptação de inventários proposta é baseada nos trabalhos de Colodel (2008) e Oliveira *et al.* (2013). Colodel (2008) apresenta uma abordagem sistemática para transferência de dados de inventário de ciclo de vida entre países, baseada nas seguintes premissas: 1) o inventário a ser adaptado é apresentado em termos de processos unitários, ou seja, não apenas em termos de resultados finais do sistema de produto; 2) o sistema de produto de ambos os países é similar; e 3) o produto final tem as mesmas propriedades e qualidade nos dois países. A adaptação é feita a partir de duas abordagens simultâneas sobre o inventário original:

- *top-down* (abordagem macro): adaptação de parâmetros gerais que dizem respeito às condições do país para o qual o inventário está sendo elaborado, tais como: matriz energética, emissões (ex.: uso de combustíveis com limites de emissão distintos), tipos de transporte, entre outros;
- *bottom-up* (abordagem micro): análise detalhada do processo de produção referente ao sistema de produto analisado, de modo a identificar diferenças tais

como: eficiência no consumo de recursos materiais e energéticos, nível de automação do processo, emissões (podem ser diferentes devido às regulamentações ambientais com variados níveis de exigência), entre outros.

Oliveira *et al.* (2013) apresenta uma proposta específica para adaptação de inventários estrangeiros para o Brasil, a partir da base de dados Ecoinvent®, por se tratar de uma base de amplo uso para estudos de ACV e devido à disponibilidade de metadados, ou seja, das informações que subsidiam os inventários. Os autores propõem também uma planilha de adaptação de inventário que foi utilizada como modelo no presente trabalho. Sendo assim, a metodologia deste trabalho consistiu em:

- identificar o sistema de produto: o estudo foi feito considerando, como estudo de caso, a produção de concreto usinado para aplicação em paredes de concreto moldadas no local. A escolha deste material se encaixa em um contexto mais amplo, cujo objetivo é comparar sistemas construtivos para estrutura e vedação de habitações de interesse social. As principais características do concreto estudado são: resistência característica à compressão de projeto (f_{ck}) de 25 MPa, aos 28 dias de idade, e abatimento médio de (160 ± 20) mm;
- identificar a fronteira do sistema: a análise compreendeu desde a extração de matérias-primas até a porta da usina de concreto (*cradle-to-gate*). Não foram consideradas as fases de obra (execução das paredes), de uso e de fim de vida do edifício neste momento. Ou seja, não se trata de uma ACV completa;
- identificar a unidade declarada: adotou-se a unidade declarada “m³ de concreto”;
- definir escopo temporal, tecnológico e geográfico: o estudo foi conduzido no ano de 2015, em usinas de concreto automatizadas na região metropolitana de São Paulo;
- selecionar módulo equivalente na base de dados Ecoinvent®: utilizou-se a versão 2.2 do Ecoinvent®, na qual o módulo mais próximo do sistema de produto em estudo localizado foi o “*concrete, normal, at plant*”;
- estudar o inventário e as premissas do Ecoinvent®: realizou-se uma análise detalhada do inventário selecionado, com relação às entradas, saídas e suas respectivas quantidades. Para isso, fez-se necessária a análise de metadados, disponíveis em Kellenberger *et al.* (2007);
- caracterizar e elaborar um inventário nacional para o sistema de produto: para possibilitar a identificação de diferenças no processo de produção do concreto usinado, adotaram-se duas abordagens simultâneas: revisão de bibliografia nacional e visitas a duas usinas de concreto na região metropolitana de São Paulo, durante o mês de fevereiro de 2015. Preparou-se um questionário para coleta de dados de inventário durante as visitas, realizadas com acompanhamento dos responsáveis pela produção na usina de concreto. Os itens do questionário se basearam no estudo do inventário original do Ecoinvent®;
- fazer a adaptação – abordagem macro: alteração de parâmetros gerais, tanto para o sistema de produto estudado quanto para os sistemas precedentes (produção dos insumos – cimento e agregados). As adaptações realizadas contemplam a adoção da matriz energética brasileira específica para a produção do cimento (baseada no Balanço Energético Nacional de 2014, disponível em EPE, 2014), sendo o consumo de energia para fabricação do cimento baseado nos valores

- médios disponibilizados pelo CBCS (2014); da matriz energética brasileira (módulo disponível no Ecoinvent® 2.2); e do diesel brasileiro (inventário baseado em Borges, 2004 e poder calorífico em CBCS, 2014), empregados nas operações de produção e transporte dos insumos do concreto;
- fazer a adaptação – abordagem micro: com base nas informações coletadas nas visitas e na revisão bibliográfica de dados nacionais, foram feitos ajustes nas entradas, saídas e nas quantidades de insumos presentes no inventário. Apenas os insumos representativos foram adaptados, ou seja, aqueles que compunham 95% das entradas ou saídas, em massa, do sistema de produto;
 - inserir o inventário adaptado no software Simapro (versão 7.3.3) e cálculo de indicador ambiental (kg CO₂ equivalente), conforme método IPCC considerando horizonte de 100 anos (IPCC, 2007).

Inicialmente, previu-se a aplicação da metodologia apenas para o processo de produção do concreto usinado. No entanto, expandiu-se esta abordagem também para os agregados miúdo e graúdo, uma vez que se identificou no inventário do concreto do Ecoinvent® que o módulo de agregado utilizado – “*gravel, round, at mine*” – não correspondia aos tipos de agregados utilizados no Brasil. A caracterização do processo de produção nacional de agregados foi feita por meio de revisão bibliográfica e visitas a uma mineradora de areia (extração em cava submersa) e uma pedreira (brita), ambas localizadas no estado de São Paulo.

A Figura 2 representa a fronteira do sistema estudado e os processos para os quais a metodologia de adaptação foi aplicada tanto no nível macro quanto no nível micro (destacados em cinza).

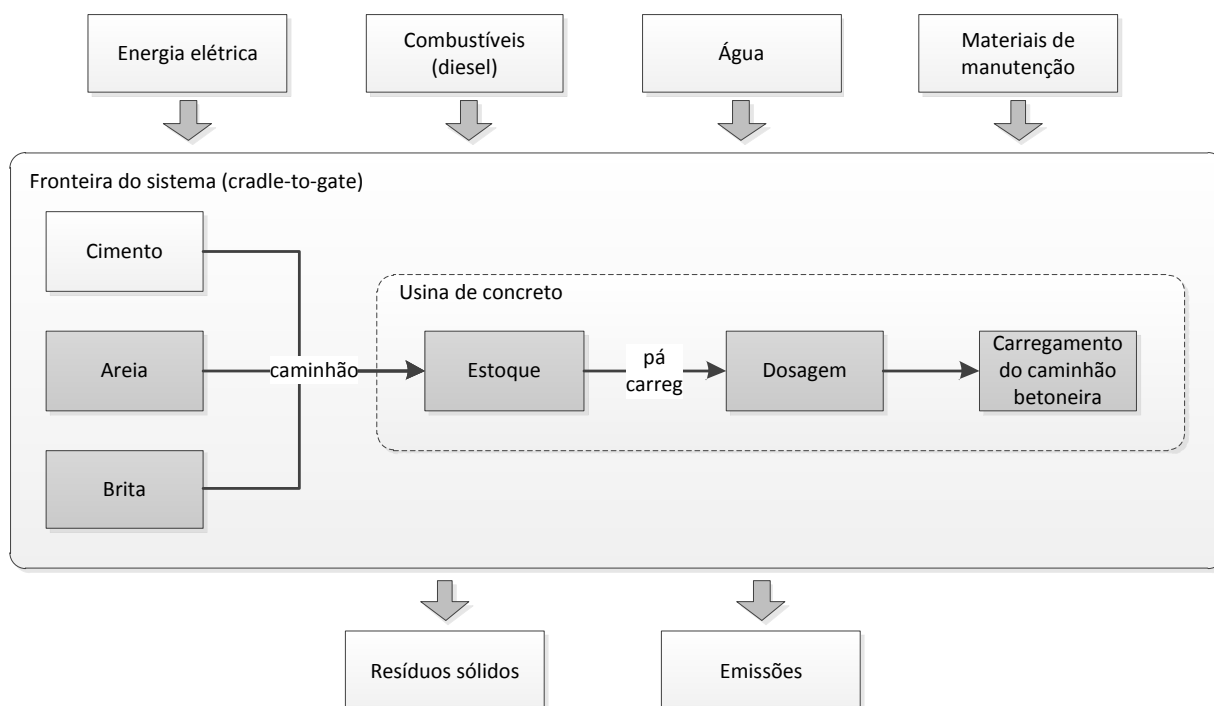


Figura 2 – Fronteira do sistema em estudo (*cradle-to-gate*), com sistemas de produto analisados em detalhe destacados em cinza.

4 Resultados e discussões

A Tabela 1 apresenta a adaptação do inventário referente à produção do concreto usinado. É feita apenas a identificação dos módulos de entrada e saída, sem as quantidades originais do Ecoinvent®, devido às cláusulas de sigilo da base de dados. Os nomes dos módulos foram mantidos em inglês para serem fidedignos à denominação na base de dados original.

Tabela 1 – Inventário adaptado para produção de 1m³ de concreto.

| Entrada / saída original | Entrada / saída adaptada | Quantidade adaptada | Unid. | Comentários |
|--|---|---------------------|-------|---|
| ENTRADAS | | | | |
| <i>Portland cement, strength class Z 42.5, at plant/CH U</i> | <i>Portland cement, CP-II-E-40, at plant/BR U</i> | 3,63E+02 | kg | O cimento original era equivalente ao CPV. Criou-se um módulo para o CPII E 40 a partir do módulo “ <i>Portland slag sand cement, at plant</i> ”, ajustando-se apenas a matriz energética do cimento para a do Brasil. Quantidade conforme traço informado pelas usinas. Considera perdas. |
| <i>Gravel, round, at mine/CH U</i> | Excluído | - | - | Como o processo de extração de agregados considerado no Ecoinvent® (suíço) é muito diferente do brasileiro, foram criados os inventários da brita (<i>gravel, crushed, at mine/BR U</i>) e da areia (<i>sand, at mine/BR U</i>) para o Brasil, os quais substituíram o módulo original. |
| - | <i>Gravel, crushed, at mine/BR U</i> | 1,32E+03 | kg | Quantidade conforme traço informado pelas usinas. Considera perdas. |
| - | <i>Sand, at mine/BR U</i> | 5,17E+02 | kg | Quantidade conforme traço informado pelas usinas. Considera perdas. |
| <i>Tap water, at user/CH U</i> | Mantido | 3,86E+01 | kg | Quantidade alterada conforme informações da usina. Considera água do traço, de lavagem dos caminhões e molhagem do pátio. |
| - | <i>Water, groundwater consumption</i> | 2,55E+02 | kg | Há consumo de água de poço no Brasil, tanto em poço localizado na usina, quanto abastecimento por caminhão pipa. Adotado o módulo de água de poço disponível no Ecoinvent®. Quantidade alterada conforme informações da usina. Considera água do traço, de lavagem dos caminhões e molhagem do pátio. |
| <i>Diesel, burned in building machine/GLO U</i> | <i>Diesel, burned in building machine/BR U</i> | 5,27E+00 | MJ | Adoção do diesel brasileiro. Quantidade informada pelas usinas (abastecimento de pá carregadeira e varredeira de pátio). |
| <i>Electricity, medium voltage, at grid/CH U</i> | <i>Electricity, medium voltage, at grid/BR U</i> | 3,76E+00 | kWh | Adoção da matriz energética brasileira. Quantidade informada pelas usinas. |

Tabela 1 – Inventário adaptado para produção de 1m³ de concreto (continuação).

| Entrada / saída original | Entrada / saída adaptada | Quantidade adaptada | Unid. | Comentários |
|---|---|---------------------|-------|--|
| <i>Natural gas, burned in industrial furnace low Nox > 100 kW/RER U</i> | Excluído | - | - | Combustíveis utilizados no aquecimento de centrais de concreto na Europa. No Brasil não há esta entrada, pois não há aquecimento. |
| <i>Light fuel oil, burned in industrial furnace 1 MW, non-modulating/CH U</i> | Excluído | - | - | |
| <i>Heavy fuel oil, burned in industrial furnace 1 MW, non-modulating/CH U</i> | Excluído | - | - | |
| <i>Lubricating oil, at plant/RER U</i> | Mantido | Mantido | kg | Admitiu-se que a manutenção será equivalente. |
| <i>Transport, lorry, 3.5-20t, fleet average/CH U</i> | <i>Transport, lorry 3.5-7.5t, EURO3/ BR U</i> | 2,56E+00 | tkm | Foram elaborados módulos de transporte considerando-se o diesel brasileiro como combustível e um caminhão padrão “EURO 3” em termos de emissões. O caminhão menor se refere ao caminhão pipa de 15.000 L para transporte de água, e o maior (> 32t) aos caminhões caçamba de transporte de agregados e de resíduos de concreto. Distâncias de transporte e cargas de rodagem dos veículos baseadas em dados primários coletados junto às usinas. |
| <i>Transport, lorry, 20-28t, fleet average/CH U</i> | <i>Transport, lorry >32t, EURO3/ BR U</i> | 7,28E+01 | tkm | |
| <i>Transport, barge/RER U</i> | Excluído | - | - | Não há estes modais (barcaça e trem) no sistema de produto considerado no Brasil. |
| <i>Transport, freight, rail/RER U</i> | Excluído | - | - | |
| <i>Steel, low-alloyed, at plant/RER U</i> | Mantido | Mantido | kg | Admitiu-se que a manutenção será equivalente. |
| <i>Synthetic rubber, at plant/RER U</i> | Mantido | Mantido | kg | |
| <i>Concrete mixing plant/CH/I U</i> | Excluído | - | - | Não foram contabilizados itens de infraestrutura (critério de corte). |
| SAÍDAS | | | | |
| <i>Heat, waste</i> | Excluído | - | - | Não há dados brasileiros e esta categoria de saída foi excluída da versão atualizada do Ecoinvent®. |
| <i>Disposal, concrete, 5% water, to inert material landfill/CH U</i> | Mantido | 9,12E+01 | kg | Estimativa com base no índice de perdas informado pelas usinas (perdas nas usinas e devoluções de concreto). |
| <i>Disposal, municipal solid waste, 22,9% water, to municipal incineration/CH U</i> | Mantido | 1,57E-01 | kg | Índice informado pelas usinas, material de consumo (ex.: papel, papelão, orgânico classe II). |

Tabela 1 – Inventário adaptado para produção de 1m³ de concreto (continuação).

| Entrada / saída original | Entrada / saída adaptada | Quantidade adaptada | Unid. | Comentários |
|---|---|---|-------|--|
| - | <i>Disposal, hazardous waste, 25% water, to hazardous waste incineration/CH U</i> | 3,13E-03 | kg | Adotado módulo de descarte de resíduo contaminado disponível no Ecoinvent®. Índice informado pelas usinas, material contaminado (ex.: estopa, trapos, etc.). |
| - | <i>Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration/CH S ÓLEO USADO</i> | Mantido (quantidade do item “lubricating oil”). | kg | Adotado módulo de descarte de óleo disponível no Ecoinvent®. Índice de descarte de óleo (lubrificante) adotado igual ao de uso. |
| <i>Treatment, concrete production effluent, to wastewater treatment, class 3/CH U</i> | Excluído | - | - | Usinas informaram que realizam reuso de água para lavagem de caminhões betoneira e, portanto, não há lançamento de efluentes. |
| Nota: Legenda de cores da tabela: AZUL – dado modificado (ou o tipo de <i>input/output</i> , ou a categoria, ou ambos); VERMELHO – dado excluído; VERDE – dado mantido; BRANCO – dado inserido. | | | | |

Além dos comentários apresentados na Tabela 1, são válidas as seguintes observações sobre a adaptação de inventário do concreto:

- não foram considerados os aditivos, devido à sua baixa proporção em massa;
- além da água proveniente da rede de abastecimento e da água de poço, utiliza-se água de reuso da própria usina (que não deixa a fronteira do sistema, portanto, não deve ser contabilizada) e água de chuva. A rigor, é necessário declarar a quantidade de água de chuva em inventários de ciclo de vida; no entanto, não há medição deste volume pela usina como parte de sua rotina de controle de produção;
- foi informado o índice de perdas de uma das usinas, o qual foi usado para cálculo da quantidade das entradas (a partir do traço do concreto) e da quantidade de resíduo de concreto a ser encaminhada para aterro de inerte. Este índice é composto pelas perdas que ocorrem na própria usina e pela devolução de concreto das obras, o que coincide com o que é adotado pelo Ecoinvent®.

Um processo semelhante de adaptação foi conduzido para os agregados, utilizando-se como referência os módulos “*gravel, crushed, at mine*” para brita e “*mining of gravel/sand*” para a areia. Isto se deu porque o processo de produção dos agregados apresenta diferenças significativas nos dois países: na Suíça os agregados miúdo e graúdo são normalmente extraídos em condições úmidas a céu aberto, a partir de cavas submersas ou leito de rio (Figura 3); no Brasil o agregado miúdo (areia) pode ser extraído a partir do leito do rio, de cava submersa ou de cava seca, enquanto o agregado graúdo amplamente utilizado (brita) é extraído de pedreiras por processo de desmonte com explosivos e posterior britagem.

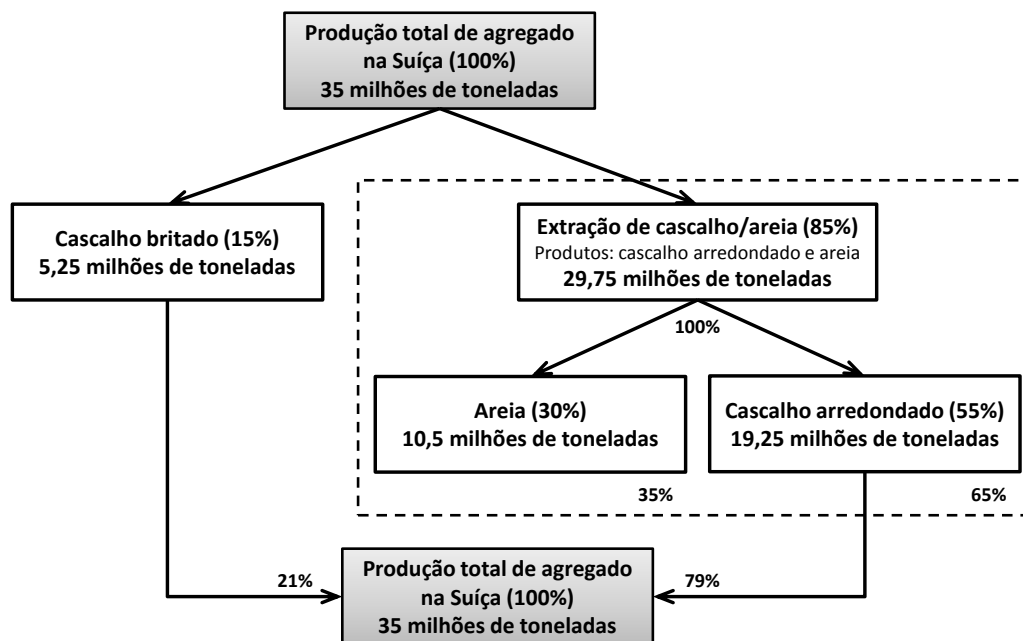


Figura 3 – Características da produção de agregados na Suíça.
Fonte: Adaptado de Kellenberger *et al.* (2007).

As adaptações realizadas para os agregados miúdo (areia) e graúdo (brita) são apresentadas de forma mais sintética (apenas inventário final, suprimindo itens excluídos) nas Tabelas 2 e 3, respectivamente, uma vez que a Tabela 1 já demonstra a aplicação da metodologia.

Para a areia, com base nas informações obtidas na visita à mineradora e no trabalho de Souza (2012a), as principais adaptações são:

- alteração da entrada de recurso natural de “*gravel, in ground*” para “*sand, quartz, in ground*”. A quantidade original de recurso mineral prevê perdas, que não ocorrem no processo de produção brasileiro, uma vez que o material remanescente é comercializado como cascalho, de acordo com informações obtidas da mineradora (distribuição da produção: 95% areia, 5% cascalho);
- adoção de índices de consumo de diesel e de energia elétrica conforme levantamento na mineradora, uma vez que a configuração de equipamentos é diferente do utilizado na Suíça (país dos dados de referência);
- exclusão da água, uma vez que no processo de produção da mineradora brasileira, há a recirculação de toda água, sem que ela deixe a fronteira do sistema;
- exclusão de itens de infraestrutura (esteiras, maquinário, infraestrutura e galpões) devido ao critério de corte, bem como do combustível utilizado para aquecer estas instalações;
- exclusão dos módulos relativos à ocupação e transformação do solo, devido à falta de dados precisos sobre o início e o término da operação das cavas (por exemplo, quais operações fazem parte da recomposição da vegetação após esgotamento da extração de areia). Realizou-se uma simulação com os dados originais, com e sem

estes módulos, e constatou-se que sua exclusão não gera alterações significativas em termos do indicador de CO_{2,equiv}.

Tabela 2 – Inventário adaptado para produção de 1 kg de areia.

| Entrada / saída adaptada | Quantidade | Unidade | Comentários |
|--|------------|---------|--|
| ENTRADAS | | | |
| <i>Sand, quartz, in ground</i> | 1,00E+00 | kg | Não foram consideradas perdas. |
| <i>Diesel, burned in building machine/BR U</i> | 7,41E-02 | MJ | Quantidade informada pela mineradora, para todos os equipamentos, inclusive transporte interno. |
| <i>Lubricating oil, at plant/RER U</i> | 1,46E-05 | kg | Quantidade informada pela mineradora. |
| <i>Electricity, medium voltage, at grid/BR U</i> | 1,30E-04 | kWh | Quantidade informada pela mineradora. |
| <i>Steel, low-alloyed, at plant/RER U</i> | Mantido | kg | Admitiu-se que a manutenção será equivalente. |
| <i>Synthetic rubber, at plant/RER U</i> | Mantido | kg | Admitiu-se que a manutenção será equivalente. |
| <i>Transport, lorry 7.5-16t, EURO 3/BR U</i> | 3,00E-06 | tkm | Transporte dos resíduos de borracha e aço (material de manutenção) para a destinação final (distância assumida: 100 km). |
| <i>Transport, lorry 3.5-7.5t, EURO 3/BR U</i> | 2,92E-06 | tkm | Transporte do resíduo de óleo para a destinação final (distância assumida: 100 km). |
| SAÍDAS | | | |
| <i>Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration</i> | 1,46E-05 | kg | Quantidade informada pela mineradora. |
| <i>Disposal, rubber, unspecified, 0% water, to municipal incineration/CH U</i> | Mantido | kg | Descarte da borracha usada para manutenção. Quantidade equivalente à entrada do item “ <i>synthetic rubber, at plant</i> ” |
| <i>Disposal, steel, 0% water, to municipal incineration/CH U</i> | Mantido | kg | Descarte do aço usado na manutenção. Quantidade equivalente à entrada do item “ <i>steel, low-alloyed, at plant</i> ” |

Para a brita, com base nas informações obtidas na visita à pedreira e no trabalho de Rossi (2013), são conduzidas as seguintes alterações:

- alteração da entrada de recurso natural de “*gravel, in ground*” para “*basalt, in ground*”, para melhor representar o recurso mineral utilizado no Brasil (há jazidas de granito e basalto, mas o Ecoinvent® só tem um módulo para basalto);
- inclusão da operação de explosão, por meio do módulo “*blasting/RER U*”, presente no módulo de exploração de basalto do Ecoinvent®, para representar o desmonte com explosivos;
- alteração no índice de consumo de água, uma vez que o processo suíço é úmido (e envolve a lavagem dos agregados), enquanto o brasileiro consiste em um desmonte de rocha a seco, utilizando-se água apenas para controle de materiais particulados durante o transporte entre britagens sucessivas;
- adoção dos índices de consumo de diesel e energia elétrica brasileiros, ambos inferiores aos índices originais, uma vez que a operação de britagem no Brasil envolve menos equipamentos, por ser um processo mais simples;
- adoção das emissões de materiais particulados da exploração de basalto, com desmonte explosivo, por representar uma situação mais próxima da realidade da pedreira no Brasil;

- exclusão de itens de infraestrutura, do aquecimento e dos módulos relativos à ocupação e transformação do solo, pelos mesmos motivos apresentados para a areia.

Tabela 3 – Inventário adaptado para produção de 1 kg de agregado britado.

| Entrada / saída adaptada | Quantidade | Unidade | Comentários |
|---|------------|----------------|---|
| ENTRADAS | | | |
| <i>Basalt, in ground</i> | 1,00E+00 | kg | Alterado recurso mineral. |
| <i>Water, lake</i> | 3,17E-05 | m ³ | Água de lago localizado na pedreira, para controle de particulados. |
| <i>Diesel, burned in building machine/BR U</i> | 1,01E-02 | MJ | Consumo de diesel para todos os equipamentos, inclusive transporte interno. |
| <i>Lubricating oil, at plant/RER U</i> | 2,50E-06 | kg | Admitiu-se que a manutenção será equivalente. |
| <i>Electricity, medium voltage, at grid/BR U</i> | 7,20E-03 | kWh | Consumo de energia elétrica para equipamentos de produção. |
| <i>Steel, low-alloyed, at plant/RER U</i> | Mantido | kg | Admitiu-se que a manutenção será equivalente. |
| <i>Synthetic rubber, at plant/RER U</i> | Mantido | kg | Admitiu-se que a manutenção será equivalente. |
| <i>Blasting/RER U</i> | 7,73E-05 | kg | Operação de desmonte com explosivo. |
| SAÍDAS | | | |
| <i>Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration/CH U</i> | Mantido | kg | Admitiu-se que a manutenção será equivalente. |
| <i>Particulates, < 2.5 um</i> | 1,60E-03 | kg | Aproximação pelas emissões do basalto. |
| <i>Particulates, > 10 um</i> | 8,00E-03 | kg | |
| <i>Particulates, > 2.5 um, and < 10 um</i> | 6,40E-03 | kg | |
| Obs.: 1 kg de agregado britado resulta em 0,20 kg de pó de pedra; 0,35 kg de brita 0; 0,28 kg de brita 1; e 0,17 kg de bica graduada. | | | |

Em todos os inventários adaptados, estão inclusos escritórios e outras instalações administrativas que se encontram no mesmo terreno das centrais de produção, pois não foi possível separá-las (entradas únicas de energia e água, por exemplo) e, além disso, elas são necessárias para a produção dos insumos estudados.

Foram comparadas as emissões de CO₂ equivalente do concreto original do Ecoinvent® e do concreto adaptado para o Brasil, para avaliar o impacto das adaptações realizadas. Obtiveram-se os seguintes resultados:

- Ecoinvent®: 256 kg CO_{2,eq}/m³ de concreto;
- adaptação para o Brasil: 277 kg CO_{2,eq}/m³ de concreto (8% acima das emissões do inventário de referência).

Com relação às emissões de CO₂ equivalente, as principais contribuições do concreto brasileiro são: 93% se referem à produção de cimento, 3,3% ao transporte das matérias-primas até a usina, 1,5% à produção de areia e 1,4% à produção de brita. No caso do inventário original (de origem suíça), a distribuição é a seguinte: 96% cimento, 1,4% agregados, e 1,4% transporte das matérias-primas até a usina.

Observa-se que, para o concreto brasileiro, as emissões relacionadas com a produção do cimento têm menor representatividade em termos percentuais; contudo, as emissões absolutas são maiores do que as do concreto suíço devido ao consumo de cimento ser 21% maior no traço brasileiro. Esta menor representatividade do cimento nas emissões do

concreto se deve à existência de outras operações com um alto consumo de diesel envolvidas (ex.: transporte de agregados a uma distância média de 60 km, produção de areia), que também resultam em altas taxas de emissões de CO₂. Comparando-se as emissões do diesel considerado no Ecoinvent® e o brasileiro, constata-se que no Brasil as emissões são 21% superiores, sendo que esta diferença pode estar relacionada com a regulamentação mais exigente quanto à emissão de poluentes para o diesel na Europa.

A distribuição das emissões de CO₂ do inventário adaptado para os agregados miúdo e graúdo estão condizentes com as conclusões de Souza (2012a), que observa que o transporte dos agregados tem maior impacto do que a sua produção. No entanto, no presente estudo, a diferença observada não foi tão expressiva: a produção responde por 7,8 kg CO_{2,eq}/m³ de concreto, enquanto o transporte representa 9,3 kg CO_{2,eq}/m³.

5 Conclusões

A partir do inventário realizado para o concreto aplicado em paredes moldadas no local, verificou-se que há diferenças significativas entre os processos de produção das matérias-primas no Brasil e no exterior que podem interferir significativamente na análise de ciclo de vida do material, especialmente quanto à matriz energética empregada. Dessa forma, a utilização de base de dados internacionais, sem adaptação para a realidade brasileira, pode levar a estudos inadequados de ACV de produtos da construção civil.

Porém, ao avaliar em detalhe o processo de produção dos materiais e ajustar os macro indicadores para os processos precedentes, analisando cuidadosamente as premissas e as fontes de informação, verificou-se que é viável a adaptação de inventários internacionais como forma de otimizar a elaboração de inventários nacionais. A análise dos metadados é uma etapa importante para avaliação do processo produtivo a que se refere o inventário original e possibilita, em conjunto com o conhecimento da realidade nacional, a definição dos dados primários a serem coletados.

Com relação à metodologia proposta, verificou-se uma oportunidade de melhoria após os procedimentos de adaptação. Sugere-se iniciar o processo pelo cálculo de indicadores de impacto ambiental e análise da contribuição de cada um dos itens do inventário original, de modo a concentrar esforços na adaptação daqueles itens mais relevantes para o resultado final.

Observou-se ainda a necessidade de disponibilização de inventários nacionais validados para itens comuns a diversos sistemas de produto, tais como combustíveis e cenários de disposição de resíduos. Este pode ser um ponto de partida para construção da base de dados de inventários nacionais de ACV.

6 Referências

ARDUIN, R H. **Avaliação do ciclo de vida de produtos têxteis: implicações da alocação**. 2013. 101p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009. 21p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009. 46p.

BORGES, F. J. **Inventário do ciclo de vida do PVC produzido no Brasil**. 2004. 174p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2004.

BORGHI, A. D. LCA and communication: Environmental Product Declaration. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 2, p. 293-295, 2013.

COLODEL, C. M. T. Systematic approach for the transferability of life cycle inventory data between countries. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ECOBALANCE, 2008. **Proceedings...** Tokyo, 2008. p. 10-12.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (CBCS). **Projeto de avaliação de ciclo de vida modular de blocos e pisos de concreto**. 2014. 93p.

CONSELHO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (CONMETRO). **Resolução nº 04/2010**: Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV). Brasília, 2010. 6p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço energético nacional 2014**: ano base 2013. Rio de Janeiro: EPE, 2014. 288p.

EUROPEAN COMMISSION. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook**: General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance. Luxembourg: Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability, 2010. 417p.

EUROPEAN STANDARD (EN). **EN 15804**: Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. 2014. 67p.

EUROPEAN STANDARD (EN). **EN 15978**: Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method. 2012. 62p.

HAUSCHILD, M.; JESWIET, J.; ALTING, L. From life cycle assessment to sustainable production: status and perspectives. **CIRP Annals: Manufacturing Technology**, v. 54, n. 2, p. 1-21, 2005.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Portaria nº 110**: Requisitos gerais do Programa de Rotulagem Ambiental Tipo III – Declaração Ambiental de Produto (DAP). Brasília, 2015. 37p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007 – The Physical Science Basis**: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. 996p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14040**: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Geneva, Switzerland, 2006. 20p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14044**: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. Geneva, Switzerland, 2006. 46p.

JOHN, V. M. Materiais de construção e o meio ambiente. In: ISAIA, G.C. (editor). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 97-121.

KELLENBERGER, D. *et al.* **Life cycle inventories of building products**. 2007. 914p.

LIMA, J. A. R. **Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas**. 2010. 129p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2010.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Aspectos da construção sustentável no Brasil e promoção de políticas públicas**: subsídios para promoção da construção civil sustentável. 2014. 133p.

OLIVEIRA, L. A. *et al.* Adapting existing life cycle inventory of building products for the Brazilian context. In: SUSTAINABLE BUILDING CONFERENCE, 2013. **Proceedings...** Graz, Austria, 2013. p. 25-28.

OLIVEIRA, V. C. H. C. *et al.* Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 167-181, 2014.

ROSSI, E. **Avaliação do ciclo de vida da brita para a construção civil: estudo de caso**. 2013. 131p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP, 2013.

SOUZA, A. **Avaliação do ciclo de vida da areia em mineradora de pequeno porte, na região de São José do Rio Preto/SP**. 2012. 118p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP, 2012b.

SOUZA, M. P. R. **Avaliação das emissões de CO₂ antrópico associadas ao processo de produção do concreto, durante a construção de um edifício comercial, na Região Metropolitana de São Paulo**. 2012. 113p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo/SP, 2012a.

TEIXEIRA, C. E. *et al.* Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) aplicada a remediação de áreas contaminadas. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 6, p. 3-18, 2012.