

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO SISTEMA CONSTRUTIVO DE ALVENARIA DE BLOCOS DE SOLO-CIMENTO CONSIDERANDO DIFERENTES ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF SOIL-CEMENT BLOCK MASONRY SYSTEM CONSIDERING DIFFERENT DESIGN SPECIFICATIONS

Lucas Rosse Caldas^{1,2}, Romildo Dias Toledo Filho²

RESUMO:

Este trabalho teve o objetivo de avaliar os potenciais impactos ambientais no ciclo de vida de diferentes especificações de projeto do sistema de alvenaria estrutural de blocos de solo-cimento. As alternativas avaliadas foram comparadas com a alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e de concreto. Foi utilizada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Foram comparados diferentes tipos de processo de produção de blocos de solo-cimento, considerando um processo manual e outro mecanizado. Foram também comparados dois tipos de cimento, CP-II-E-40 e CP-V-ARI e diferentes tipos de revestimento utilizados em uma parede de blocos de solo-cimento. A alternativa de alvenaria com blocos de solo-cimento com processo manual e com cimento CP-II-E-40 foi a mais vantajosa. As alternativas de alvenaria de blocos de solo-cimento apresentaram menores impactos ambientais que a alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e de concreto para a maioria dos casos avaliados principalmente quando o revestimento de resina acrílica é considerado, com diferenças de até 77% para a categoria de Potencial de Aquecimento Global. A pesquisa contribui por mostrar, de forma quantitativa, o desempenho ambiental de diferentes alternativas do sistema de alvenaria de blocos de solo-cimento, para o contexto brasileiro. Os resultados apresentados, especialmente as diretrizes ambientais de projeto, podem auxiliar projetistas e construtores desse sistema construtivo.

PALAVRAS-CHAVE: Construção com terra; Alvenaria estrutural; ACV.

ABSTRACT:

This work aimed to evaluate the potential environmental impacts in the life cycle of different design specifications of the soil-cement block masonry system. The evaluated alternatives were compared with the ceramic and concrete structural masonry. We used the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. Different types of soil-cement block production process were compared, considering manual and mechanized process. We also compared two types of cement, CP-II-E-40 and CP-V-ARI and different types of coatings used in a soil-cement block wall. The data used were collected primarily and from the Ecoinvent database, adapted to the Brazilian context. The modeling was performed in SimaPro software. The alternative with CP-II-E-40 cement and manual process was the most advantageous. The alternatives of soil-cement block masonry presented lower environmental impacts than the ceramic and concrete block masonry for most of the evaluated cases mainly when the acrylic resin coating is considered, with differences reaching 77% for the Global Warming Potential category. The research contributes to show, in a quantitative way, the environmental performance of different alternatives of the soil-cement block masonry system for the Brazilian context. The results presented, especially the environmental design guidelines, can help designers and builders of this building system.

KEYWORDS: Earth construction; Structural masonry; LCA.

How to cite this article:

CALDAS, L. R.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação ambiental do sistema construtivo de alvenaria de blocos de solo-cimento considerando diferentes especificações de projeto. *Gestão & Tecnologia de Projetos*. São Carlos, v16, n2, 2021. <https://doi.org/10.11606/gtp.v16i2.161978>

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura

² Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Engenharia Civil

Fonte de Financiamento:
CNPq, COPPE/UFRJ.

Conflito de Interesse:
Declara não haver.

Ética em Pesquisa:
Não haver necessidade.

Submetido em: 06/09/2019
Aceito em: 14/01/2021



INTRODUÇÃO

A busca pela sustentabilidade tem sido alvo de muitos projetos de edificações nos últimos anos (BUENO et al., 2013; CALDAS; CARVALHO, 2018). Técnicas construtivas à base de terra vêm sendo resgatadas recentemente como uma alternativa aos sistemas construtivos convencionais, que normalmente empregam cerâmica, cimento e concreto, sendo um dos objetivos principais a produção mais sustentável no ambiente construído. Sameh (2014) aponta que essa tendência se deve principalmente ao fato da terra ser um material natural, atóxico, com potencial de elevada disponibilidade local, com boas propriedades higrótérmicas e capaz de ser reciclada no seu fim de vida.

Verifica-se o uso da terra como material de construção desde técnicas vernaculares, utilizadas em tempos muito remotos, até mesmo a.C, no Egito e Mesopotâmia ou técnicas contemporâneas, que empregam conceitos de industrialização e de pré-fabricação, como é verificado em alguns projetos da Suíça e Alemanha (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2011).

No Brasil, o uso de terra como alternativa construtiva teve seu uso predominante no período colonial, com destaque para construções do tipo de adobe, taipa de pilão e taipa de mão (CORDEIRO et al., 2019). Nas últimas décadas, um sistema mais racionalizado, com a utilização de blocos com propriedades estruturais foi desenvolvido, o sistema de alvenaria de blocos de solo-cimento (Figura 1). Esse sistema pode ser considerado uma evolução do sistema de adobe, por também usar blocos, no entanto, são blocos mais leves, permitem que tubulações sejam passadas no seu interior e podem ser pensados em projetos modulares e mais racionalizados.

Figura 1. Montagem da primeira fiada de alvenaria de blocos de solo-cimento.

Fonte:
Autores



Para o caso de países que passaram por catástrofes naturais, uma solução construtiva capaz de ser produzida e construída pela própria população local, com uso de recursos de baixo custo e disponíveis localmente são premissas fundamentais para o sucesso de uma técnica construtiva. No contexto citado, o sistema de blocos de solo-cimento consegue atender bem esses requisitos. Um exemplo que pode ser citado é o projeto Village Marie, que teve seu início na Escola de Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e tem ganhado escala para ser aplicado para construções de habitações no Haiti para população vítima de desastres naturais (VILLAGE MARIE, 2019).

Além das vantagens técnicas, os blocos utilizados nesse sistema são apontados como ecológicos, principalmente por utilizarem terra como material principal e não necessitarem de queima para ganho de resistência mecânica e outras propriedades. Esse sistema é também considerado uma tecnologia racionalizada, pelo fato de permitir um projeto modular e ser

possível de ser utilizado como elemento estrutural, com grande redução do uso de formas de madeira para a execução de estruturas de concreto armado (CUNHA, 2016). Essas características tornam o sistema ainda mais atrativo, principalmente se for pensado na necessidade do setor da construção se tornar mais sustentável e atender os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas (ONU). Dentre esses objetivos, merece destaque o objetivo nº11, que trata sobre Cidades e Comunidades Sustentáveis.

Outra vantagem desse sistema é o fato da unidade principal, o bloco de solo-cimento, e o processo executivo, poder ser realizado de forma manual ou mecânica. A inclusão de maquinário e equipamentos na produção dos blocos e no processo executivo tendem a aumentar a produtividade do processo, no entanto, pode resultar em maiores custos e impactos ambientais. Portanto, é interessante que essa comparação seja avaliada.

No entanto, como qualquer outro sistema construtivo, ele também possui suas desvantagens e algumas barreiras técnicas. Entre elas podem ser citadas: falta de profissionais qualificados e com experiência no mercado; ausência de fábricas/indústrias em algumas regiões; problemas de aceitação pelas pessoas; podem enfrentar maiores problemas de durabilidade já que é um sistema à base de solo natural; pode ter custos mais elevados em algumas regiões. Dessa forma, a escolha para sua utilização no ambiente construído deve ser pautada por outras questões técnicas além de seus potenciais credenciais ambientais, que também precisam ser verificados (TURRI et al., 2011; MOTTA et al., 2014; SILVA et al., 2018).

Para isso, é necessário que os impactos ambientais desse sistema construtivo sejam quantificados de forma objetiva. Para a avaliação de materiais de construção, sistemas construtivos e edificações a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tem sido frequentemente utilizada nos últimos anos, devido a sua abordagem científica e característica de avaliação sistêmica e holística (BUENO et al., 2013; SAADE et al., 2015).

A ACV tem sido extensivamente aplicada para o estudo de diferentes materiais (SAADE et al., 2020), sendo os principais de interesse o concreto (VAN DEN HEEDE; DE BELIE, 2012; CELIK et al., 2015; GÖSWEIN et al., 2018), o aço (XING, et al., 2008; PALACIOS-MUNOZ et al., 2019), a madeira (PAWELZIK et al., 2013; PEÑALOZA et al., 2016), argamassas (CALDAS et al., 2020a), elementos pré-fabricados (LUO; CHEN, 2020). Quando se trata de elementos construtivos os sistemas da envoltória e especialmente a fachada recebe uma grande atenção (CABEZA et al., 2014; ANAND; AMOR, 2017) pois está diretamente relacionada ao desempenho térmico e consumo de energia nas edificações. Dos impactos ambientais avaliados, o potencial de aquecimento global é um dos que recebem maior destaque (ROCK et al., 2020) que está diretamente relacionado à necessidade de se pensar em ações e estratégias para enfrentamento das mudanças climáticas, que é uma das principais prioridades em muitas agendas ambientais dos países.

As pesquisas mostram (PEÑALOZA et al., 2016) que o uso de biomateriais, especialmente aqueles que sequestram CO₂ mais rapidamente (PITTAU et al., 2018), como a palha, o cânhamo, bambu e algumas espécies de madeira são os mais eficientes para reduzir o impacto de aquecimento global. Adicionalmente, materiais naturais como aqueles que utilizam a terra crua como principal matéria prima, também têm despertado interesse.

Assim, a ACV também tem sido aplicada para estudos de materiais e sistemas à base de terra, como: argamassas de terra (MELIÁ et al., 2014; CALDAS et al., 2020b), adobe (CHRISTOFOROU et al., 2016), blocos de solo-cimento (CUNHA, 2016; MARCELINO-SADABAA et al., 2017), terra comprimida (ARRIGONI et al., 2017; SERRANO et al., 2012), taipa de pilão (MIRANDA; YUBA, 2016), compósitos de solo-cimento (MARTINS et al., 2018), concreto de terra auto adensável (OUELLET-PLAMONDON; HABERT, 2016), e Cobⁱ (BEN-ALO et al., 2019). Em todos esses

estudos os materiais à base de terra quando comparados com convencionais, como concreto e cerâmica, se mostraram com melhor competitividade ambiental. Dentre os impactos ambientais desses sistemas o uso dos ligantes químicos, como o cimento e a cal, são apontados como os principais responsáveis. Muitos deles ressaltam a importância de se utilizar terra local para assegurar essas vantagens ambientais.

Especificamente sobre blocos de solo-cimento, verificou-se que não existe um estudo de ACV que avalie de diferentes processos (manual e mecânico) e diferentes tipos de cimento para a sua produção, de forma mais adaptada ao contexto brasileiro. Quando se pensa em todo o sistema construtivo, considerando a parede de blocos de solo-cimento revestida, também não foram encontrados estudos que avaliam diferentes tipos de revestimento.

Grande parte dos estudos existentes sobre o sistema de alvenaria de blocos de solo-cimento estão voltados para avaliação de sua fabricação (TURRI, 2011; SILVA et al., 2018) das propriedades do blocos, como resistência à compressão (MOTTA et al., 2014), desempenho térmico e acústico (GIORGI et al., 2018) e alguns interessados em utilizar resíduos para a produção dos blocos (DALLACORT et al., 2002; SOUZA et al., 2008). Pouca ênfase tem disso dada a avaliação ambiental desse sistema construtivo. Nessa ótica, o presente estudo avança na fronteira do conhecimento por apresentar essa avaliação, com base na ACV, considerando diferentes especificações de projeto (materiais constituintes e processos de produção dos blocos e tipos de revestimento).

Com base no que foi apresentado, a presente pesquisa teve os seguintes objetivos: (1) avaliação ambiental da produção dos blocos de solo-cimento (considerando uma produção manual e outra mecanizada) e diferentes tipos de cimento Portland e revestimentos utilizados na parede de blocos solo-cimento; (2) avaliação ambiental no ciclo de vida da alvenaria de blocos solo-cimento em comparação com outros sistemas construtivos convencionalmente utilizados no Brasil (alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e de concreto); e (3) proposição de melhorias e oportunidades ambientais para o sistema de blocos de solo-cimento, considerando a realidade brasileira.

METODOLOGIA

No presente estudo foi utilizada a metodologia de ACV. De acordo com NBR ISO 14040 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura (ABNT, 2009) ela é dividida em quatro etapas: (1) definição de objetivo e escopo, (2) inventário do ciclo de vida, (3) avaliação do impacto do ciclo de vida e (4) interpretação dos resultados. Essas etapas serão apresentadas a seguir. O presente estudo foi realizado conforme a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009) e EN 15804 - *Sustainability of Construction Works - Environmental Product Declarations* (CEN, 2012), sendo que essa última traz diretrizes e recomendação para a ACV de produtos da construção civil.

CARACTERIZAÇÃO DA ALVENARIA DE SOLO-CIMENTO

O traço dos blocos de solo-cimento foi desenvolvido em laboratório com resistência à compressão de 4 MPa. Na Tabela 1 é apresentado o consumo de materiais utilizados para a produção de uma unidade e uma parede de bloco de solo-cimento (em m²) com revestimento de resina acrílica.

| Materiais e Insumos | Quantidade |
|--|-------------------|
| 1 bloco de solo-cimento (unidade) | |
| Solo (kg) | 2,20 |
| Areia (kg) | 0,66 |
| Cimento (kg) | 0,30 |
| Cal (kg) | 0,05 |
| Água (kg) | 0,6 |
| 1 parede de blocos solo-cimento (m²) | |
| Blocos solo-cimento (unidades) | 64 |
| Argamassa assentamento solo-cimento (kg) | 6,0 |
| Resina acrílica (kg) | 0,86 |
| Graute (m ³) | 0,04 |
| Aço (kg) | 0,4 |

Tabela 1. Consumo de materiais para a produção do sistema de alvenaria de blocos solo-cimento

Fonte: Autores

O processo de produção dos blocos de solo-cimento pode ser manual ou mecanizado. De acordo com Turri (2011) e Motta (2014) normalmente, os seguintes processos são seguidos durante a produção desses blocos: (1) escolha da matéria prima, (2) extração da matéria prima, (3) Cominuição (Trituração), (4) peneiramento, (5) homogeneização e (6) conformação (sendo considerado o método de prensagem). As etapas 2 a 5 podem ser manuais ou mecanizadas, o que vai depender das características do local de produção e objetivos de produção. O processo manual é mais indicado para casos onde a questão de logística e disponibilidade de infraestrutura é de difícil acesso, enquanto a segunda para regiões onde existe essa infraestrutura. O segundo processo tem uma maior produtividade e tende a produzir blocos de melhor qualidade e desempenho e com propriedades mais homogêneas. Dependendo onde esses blocos serão aplicados e qual o objetivo do projeto um dos tipos de processo será mais indicado. O processo manual tende a ser mais interessante para casos de construção do tipo mutirão, normalmente comum em situação de desastres e reconstrução, em que a própria população pode produzir os blocos (SILVA et al., 2018).

Para a produção mecanizada do bloco de solo-cimento foram consideradas as seguintes etapas: (1) extração mecanizada do solo com escavadeira, (2) preparação do solo com pulverizador de solo, (3) peneiramento com peneirador elétrico e (4) conformação com prensa hidráulica. O consumo energético desses equipamentos foi contabilizado com base na potência e tempo utilizado para a produção dos blocos, resultando em 0,07 MJ de diesel/bloco e 0,11 kWh de energia elétrica/bloco.

DEFINIÇÃO DO ESCOPO E UNIDADE FUNCIONAL

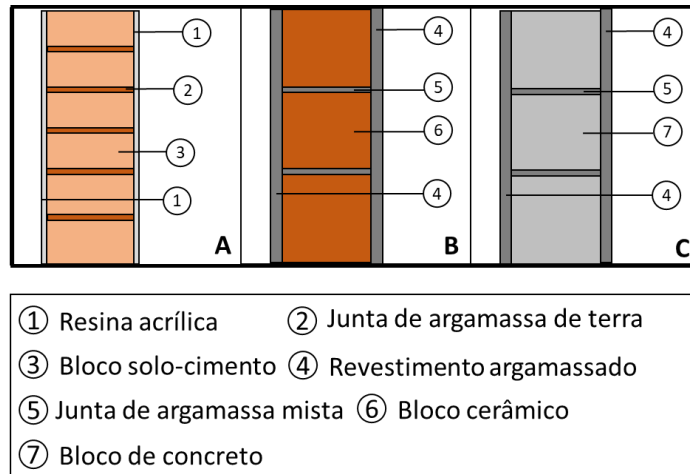
Foram avaliados dois produtos nesta pesquisa. Primeiramente o bloco de solo-cimento, cuja a unidade funcional foi “uma unidade do bloco com 4 MPa de resistência característica à compressão”. O segundo produto foi o sistema de alvenaria estrutural de blocos de solo-cimento com revestimento com resina acrílica, sendo utilizada como unidade funcional “a área da parede construída (em m²)” com vida útil de 40 anos, a mesma utilizada por Souza et al. (2016) e o valor mínimo definido pela NBR 15575 – Desempenho das Edificações (ABNT, 2013). Posteriormente, a parede de blocos de solo-cimento foi comparada com paredes estruturais de alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto revestidas de argamassa. O detalhamento das alternativas construtivas avaliadas neste estudo está apresentado no Tabela 2 e Figura 2.

Tabela 2. Dados das alternativas construtivas avaliadas.

| Alternativas | Descrição |
|-------------------------------------|---|
| Alvenaria de blocos de solo-cimento | Blocos de solo-cimento 12,5x6,2x25 cm, juntas de assentamento (1 cm), grauteamento, barras de aço utilizadas no grauteamento e proteção com resina acrílica de ambos os lados. |
| Alvenaria de blocos cerâmicos | Blocos estruturais de 14x19x39 cm (cerâmico ou concreto), juntas de assentamento (1cm), grauteamento, barras de aço utilizadas no grauteamento, argamassa de revestimento (2,5 cm de cada lado) e pintura com fundo preparador, massa e tinta acrílica de ambos os lados. |
| Alvenaria de blocos de concreto | |

Fonte:
Autores

Figura 2. Seção das alternativas avaliadas (sem escala). (A) Alvenaria de blocos de solo-cimento. (B) Alvenaria de blocos cerâmicos. (C) Alvenaria de blocos de concreto.



Fonte:
Autores

É importante ressaltar que os sistemas comparados possuem critérios de desempenho térmico, acústico, etc. diferentes. No entanto, a comparação é válida por ser a forma que eles são usualmente construídos no Brasil, que é comum de se fazer em estudos de ACV quando diferentes sistemas não possuem o mesmo desempenho, como pode ser verificado nos estudos de Souza et al. (2016), Caldas e Carvalho (2018), Pittau et al. (2018), entre outros. Dessa forma, foi considerada a função de servir como uma parede de fechamento externo de uma edificação, sendo que todos atendem os critérios mínimos de desempenho térmico, transmitância térmica - U e capacidade térmica - Ct, e acústico, Índice de redução sonora ponderado - Rw, da parte 4 (Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas) da Norma de Desempenho, a NBR 15575-4 (ABNT, 2013), como é apresentado na Tabela 3. Para o cálculo da U e Ct foi utilizada as equações presentes na NBR 15220-2 - Desempenho térmico de edificações - Parte 2 (ABNT, 2005) e a Lei das Massas para o cálculo do Rw, mesma abordagem empregada por Caldas e Carvalho (2018).

| Alternativas | Transmitância térmica (W/m ² .K) | Capacidade térmica (kJ/m ² .K) | Índice de redução sonora ponderado (dB) |
|-------------------------------------|---|---|---|
| Alvenaria de blocos de solo-cimento | 2,3 | 175 | 39 |
| Alvenaria de blocos cerâmicos | 2,2 | 194 | 42 |
| Alvenaria de blocos de concreto | 2,7 | 272 | 46 |
| ABNT NBR 15575-4:2013 | Máximo - 3,7 ¹ | Mínimo - 130 ² | Mínimo - 35 ³ |

¹ Considerando as zonas bioclimáticas 3, 4, 5, 6, 7 e 8.

² Considerando as zonas bioclimáticas 1,2, 3, 4, 5, 6 e 7.

³ Considerando o atendimento do requisito nível de desempenho Mínimo (M) e Classe de Ruído III - Habitação sujeita a ruído intenso.

Tabela 3. Critérios de desempenho térmico e acústico para os sistemas construtivos avaliados.

Fonte: Autores

O escopo avaliado neste estudo se enquadra como “do berço ao portão com opções”, sendo consideradas as seguintes etapas, de acordo com a EN 15878 (CEN, 2011): (A1) extração e produção dos insumos básicos (solo, cimento Portland, cal hidratada, areia, etc.), (A2) transporte dos insumos, (A3) mistura e processamento, (A4) construção (B4) reposição camadas de revestimento, (C1) demolição, (C2) transporte resíduos, (C4) disposição em aterro de resíduos inertes. As Figuras 3, 4 e 5 estão apresentados o escopo avaliado para o bloco de solo-cimento e cada sistema construtivo.

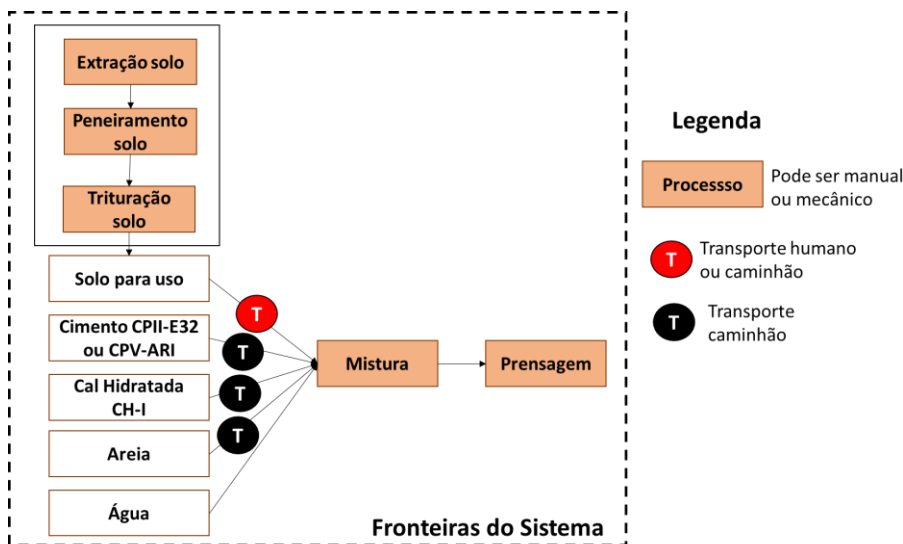


Figura 3. Escopo avaliado para a produção do bloco de solo-cimento.

Fonte: Autores

Figura 4. Escopo avaliado para a parede de alvenaria de blocos solo-cimento.

Fonte: Autores

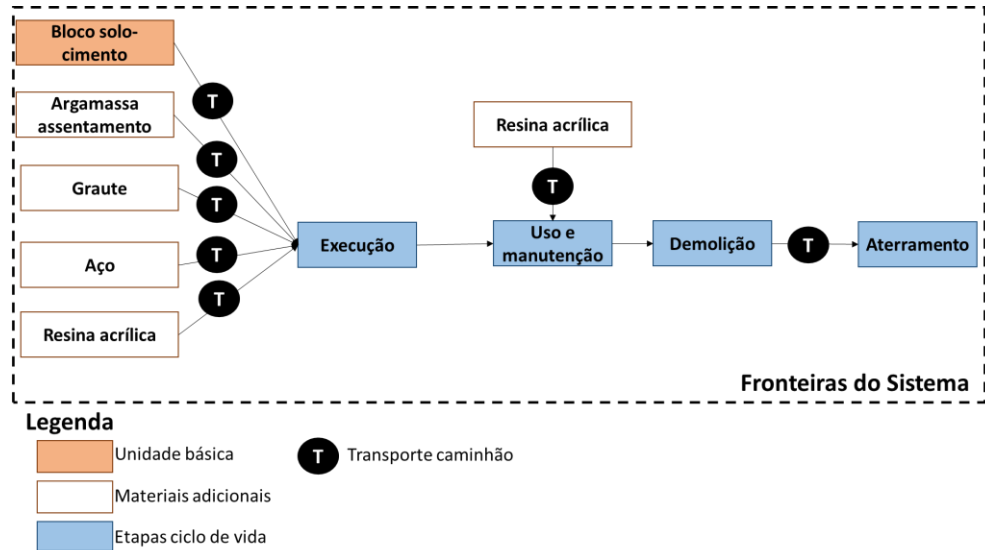
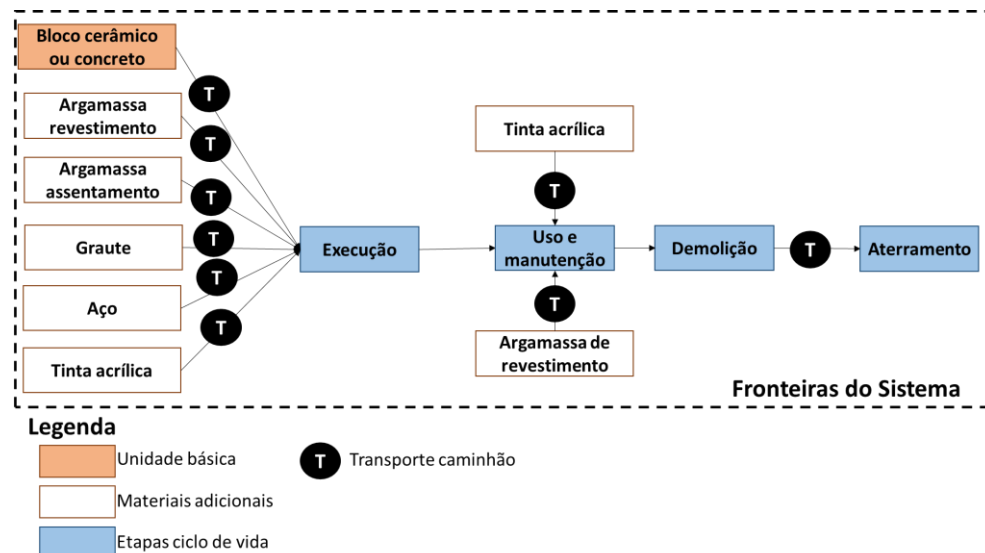


Figura 5. Escopo avaliado para a parede de alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto..

Fonte: Autores



ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Como o processo de produção dos blocos solo-cimento pode ser realizado todo de forma manual ou mecânico, foram avaliados esses dois casos. Como o cimento é quase sempre apontado na literatura (ARRIGONI et al., 2017; MARTINS et al., 2018; CALDAS et al., 2020b) como o insumo mais impactante para produção de materiais à base de terra, foram avaliados também dois tipos de cimento Portland, o CP-II-E-40 e CPV-ARI, os mais utilizados no Brasil para a produção desse material, de acordo com dados de produtores. Ao final, quatro tipos de sistema de solo-cimento foram avaliados (tanto em termos de blocos como sistemas de alvenaria):

- Manual – CP-II-E
- Manual – CP-V-ARI
- Mecânico – CP-II-E
- Mecânico – CPV-ARI

Para o processo manual foi considerado que o solo é coletado com equipamentos como pás, misturado e prensados manualmente, ou seja, sem uso de nenhum insumo energético. Portanto, para esse cenário não foram considerados impactos ambientais. Embora saiba-se que questões relacionadas à saúde humana, devido ao esforço do trabalho possam existir, essas entradas não foram consideradas no estudo.

Para o cimento Portland foram utilizadas as Declarações Ambientais de Produto (DAP) publicadas pela Votorantim Cimentos (THE INTERNATIONAL..., 2017), que possuem dados e informações ambientais para os diferentes tipos de cimento produzidas pela empresa.

Para a composição das argamassas de cimento e cal (utilizadas no assentamento e revestimento do sistema de alvenaria de blocos cerâmicos e concreto) e graute foram retirados do estudo de Caldas e Toledo Filho (2019), que avaliaram os impactos ambientais com o uso da ACV dos principais materiais cimentícios utilizados no Brasil.

Para os blocos estruturais cerâmicos e de concreto foi utilizado como base o estudo de Souza et al. (2016) que aplicaram a ACV para quantificar os impactos ambientais desses produtos para a realidade brasileira. Como análise de incertezas, foram também utilizados dados do Ecoinvent v. 3.3, a fim de aumentar a robustez da comparação.

Para a tinta e resina foi utilizado o banco de dados disponível no Ecoinvent v. 3.3, com adaptação da matriz de energia elétrica e transporte dos insumos.

Para o transporte dos insumos foram considerados diferentes distâncias de transporte (Tabela 4), conforme Souza et al. (2016), Caldas e Toledo Filho (2019), e disponibilidade de fábricas, encontradas com o uso do Google Maps.

| Insumos | Distância mínima (km) | Distância intermediária (km) | Distância máxima (km) |
|--|-----------------------|------------------------------|-----------------------|
| Solo – transporte humano | 0,5 | 1 | 2 |
| Solo – transporte caminhão | 5 | 25 | 50 |
| Cimento e cal hidratada | 100 | 200 | 500 |
| Areia | 25 | 50 | 100 |
| Aço | 100 | 200 | 500 |
| Resina e tinta | 500 | 1000 | 1500 |
| Transporte resíduos aterro de resíduos inertes | 20 | 40 | 60 |

Tabela 4. Distâncias de transporte utilizadas na modelagem.

Fonte: Autores

Na etapa de manutenção foi considerada a reposição dos revestimentos, sendo que para a alvenaria de blocos de solo-cimento se adotou a reposição da resina de cinco em cinco anos, o que resultou em oito reposições na vida útil da parede (40 anos). Enquanto que para a alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto se adotou a reposição do revestimento argamassado com 20 anos, resultando em apenas uma reposição e da tinta acrílica também de cinco em cinco anos. Nas reposições dos materiais considerou os mesmos dados utilizados na produção acrescidos do transporte. Para o revestimento argamassado reposto foi contabilizado o seu envio para a destinação final.

Finalmente, na etapa de fim de vida foi considerada a demolição da parede e transporte dos resíduos gerados para um aterro de resíduos inertes.

Na Tabela 5 são apresentadas as atividades e insumos com seus respectivos conjuntos de dados (do Ecoinvent) e fontes utilizadas na modelagem.

Tabela 5. Dados utilizados na modelagem de ACV.

Fonte: Autores

| Atividades e insumos | Conjunto de dados |
|---|---|
| Solo manual | - |
| Solo mecânico | <i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i> |
| Cimento CP-II-E-40 | EPD Votorantim Cement CP-II-E40 |
| Cimento CPV-ARI | EPD Votorantim Cement CPV-ARI |
| Água | <i>Tap water {GLO}</i> |
| Cal hidratada | <i>Lime, hydrated, packed {RoW}</i> |
| Areia | Sand {RoW} gravel and quarry operation |
| Bloco cerâmico | Modelado pelos autores com base em Souza et al. (2016) e (2) <i>Clay brick {RoW}</i> |
| Argamassa de terra e cal para assentamento | Modelado pelos autores com base em dados primários |
| Bloco de concreto | Modelado pelos autores com base em Souza et al. (2016) Caldas e Toledo Filho (2019) e (2) <i>Concrete block {GLO}</i> |
| Argamassa de cimento e cal para revestimento e assentamento | Modelos pelos autores com base em Caldas e Toledo Filho (2019) |
| Graute | Modelado pelos autores com base em Caldas e Toledo Filho (2019) |
| Aço | <i>Reinforcing steel {GLO}</i> |
| Resina acrílica | <i>Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state {GLO}</i> |
| Transporte | <i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {GLO}</i> |
| Eletricidade Brasil | <i>Electricity, medium voltage {BR}</i> |
| Demolição parede | <i>Diesel, burned in building machine {GLO}</i> |
| Aterro de resíduos inertes | <i>Waste concrete, not reinforced {RoW} treatment of waste concrete, not reinforced, collection for final disposal</i> |

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA

Foi escolhido para este estudo o método de avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) CML (do Instituto de Ciências Ambientais da Universidade de Leiden, Países Baixos), linha de base IA, versão 3.03 que é o método recomendado pela EN 15804 (2012). As seguintes categorias de impacto ambiental foram avaliadas: Potencial de Aquecimento Global (GWP100), Redução da Camada de Ozônio (ODP), Acidificação (AP), Eutrofização (EP), Potencial de Oxidação Fotoquímica (POCP), Depleção Abiótica de Elementos (ADP-e) e Combustíveis Fósseis (ADP-ff).

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Como uma análise de sensibilidade foi avaliado como seriam os impactos ambientais do sistema de alvenaria de blocos de solo-cimento caso fosse empregado o revestimento argamassado com tinta acrílica ao invés do revestimento somente com a resina. Para esse caso, assumiu-se as mesmas premissas adotadas para a alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

AVALIAÇÃO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DOS BLOCOS DE SOLO-CIMENTO

Nas Figuras 6 e 7 são apresentados os resultados encontrados para a produção dos blocos de solo-cimento, considerando a produção manual e mecânica.

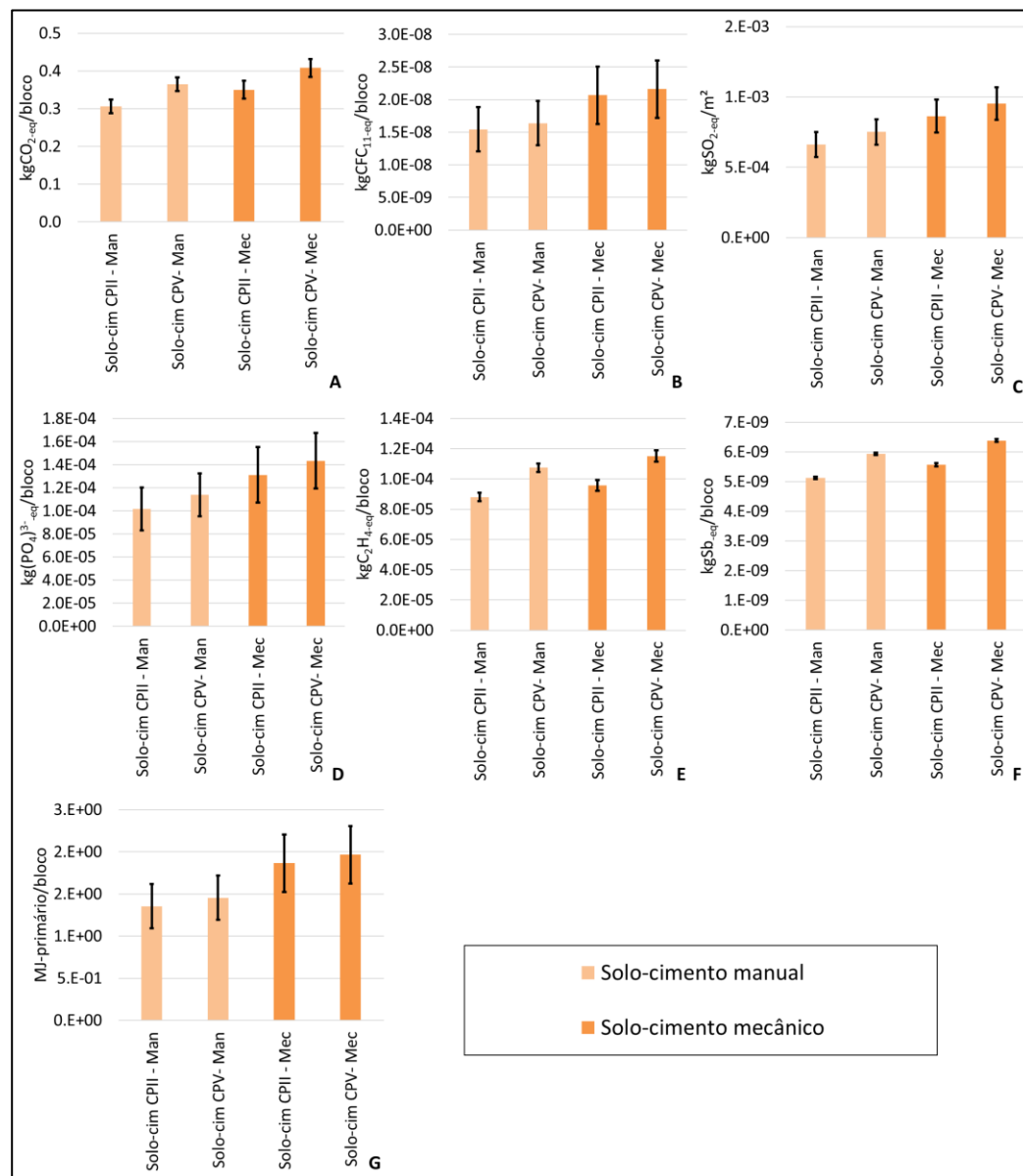


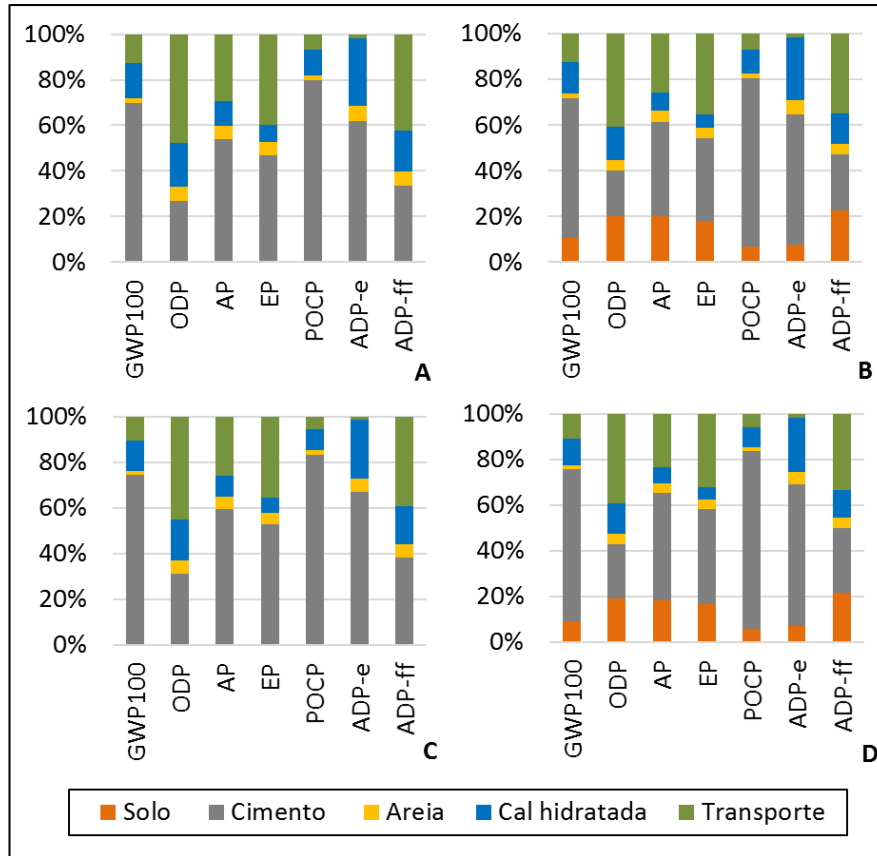
Figura 6. Potenciais impactos ambientais dos blocos de solo-cimento avaliados. (A) Potencial de aquecimento global – GWP100. (B) Potencial de depleção da camada de ozônio – ODP. (C) Acidificação – AP. (D) Eutrofização – EP. (E) Formação de fotooxidantes – POCP. (F) Depleção abiótica de elementos – ADP-e. (G) Depleção abiótica de combustíveis fósseis – ADP-ff.

Fonte: Autores

Man – Manual. Mec – Mecânico.

Figura 7. Perfil ambiental das opções de blocos de solo-cimento avaliados. (A) CP-II-E manual. (B) CP-II-E mecânico. (C) CPV-manual. (D) CPV-mecânico.

Fonte:
Autores



O cimento se mostrou o insumo mais impactante para a maioria das categorias de impacto ambiental avaliadas, indo ao encontro das pesquisas encontradas na literatura sendo que a diferença do tipo de cimento, entre CP-II-E-40 e CPV-ARI foi mais significativo para as categorias de GWP100 e POCP com diferença superior a 20%. Outros estudos, como o de Arrigoni et al. (2017), Martins et al. (2018), Caldas et al. (2020b), que avaliaram o desempenho ambiental de materiais de terra também chegaram a conclusão que o uso do ligante químico, cimento ou cal, é um dos principais responsáveis pelos impactos ambientais, principalmente para a categoria de GWP100.

A cal hidratada também apresentou contribuição importante, já que também passa por um processo de calcinação, mesmo que seja em uma temperatura inferior a do cimento Portland. Caldas e Toledo Filho (2019) também já verificaram a contribuição importante da cal hidratada para a produção de argamassas mistas.

Para o processo mecanizado, o solo apresentou uma contribuição considerável, que se deu devido ao processo de extração com máquinas, como retroescavadeiras que consomem diesel e as maiores distâncias de transporte consideradas. A diferença do processo foi mais expressiva para algumas categorias como ODP, AP, EP e ADP-ff com valores superiores a 30%.

AVALIAÇÃO AMBIENTAL NO CICLO DE VIDA DA ALVENARIA DE BLOCOS SOLO-CIMENTO EM COMPARAÇÃO COM OUTROS SISTEMAS CONSTRUTIVOS

Nas Figuras 8 a 12 são apresentados os resultados encontrados quando o sistema de alvenaria em solo-cimento é considerado, em comparação com os sistemas de alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto.

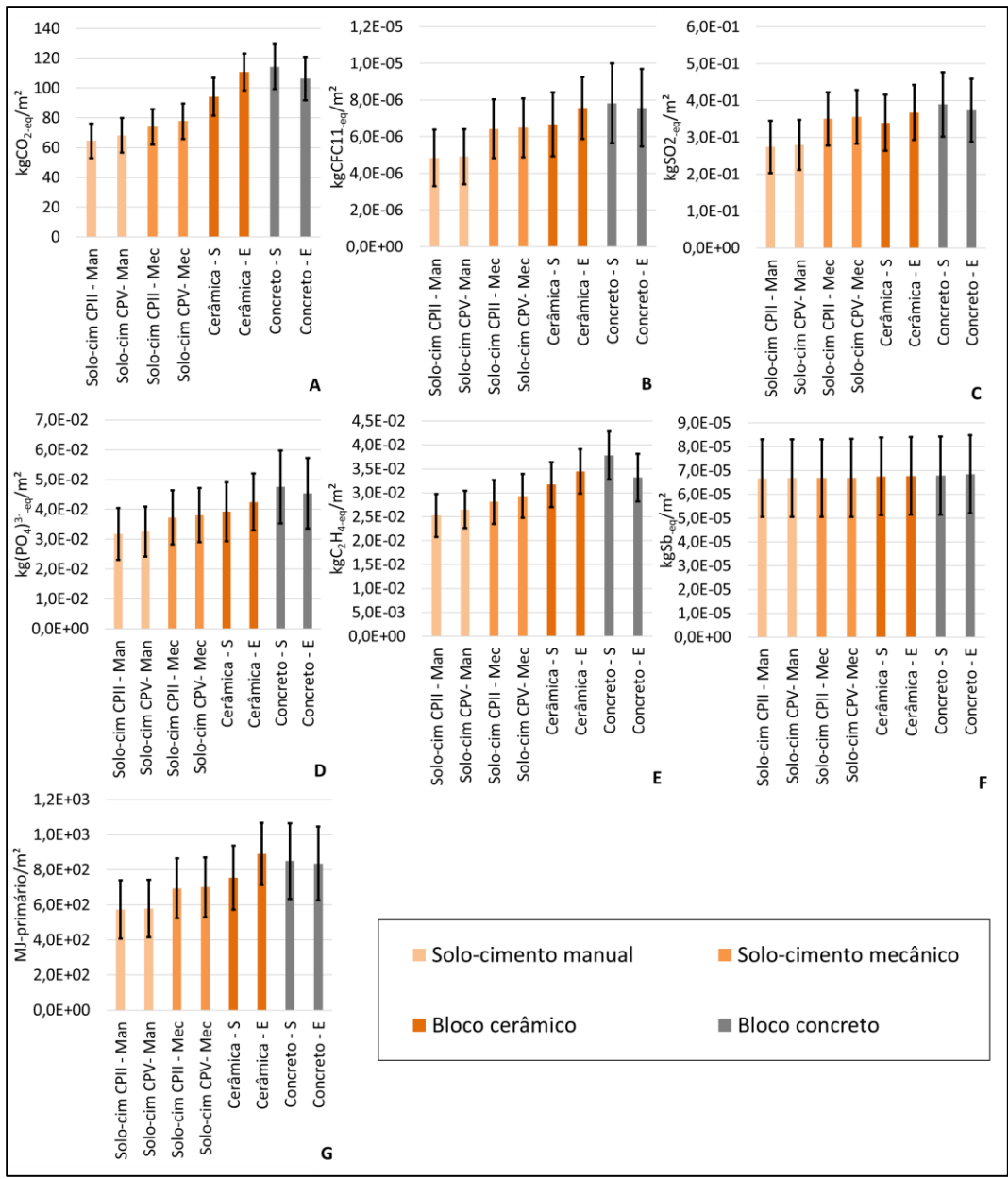


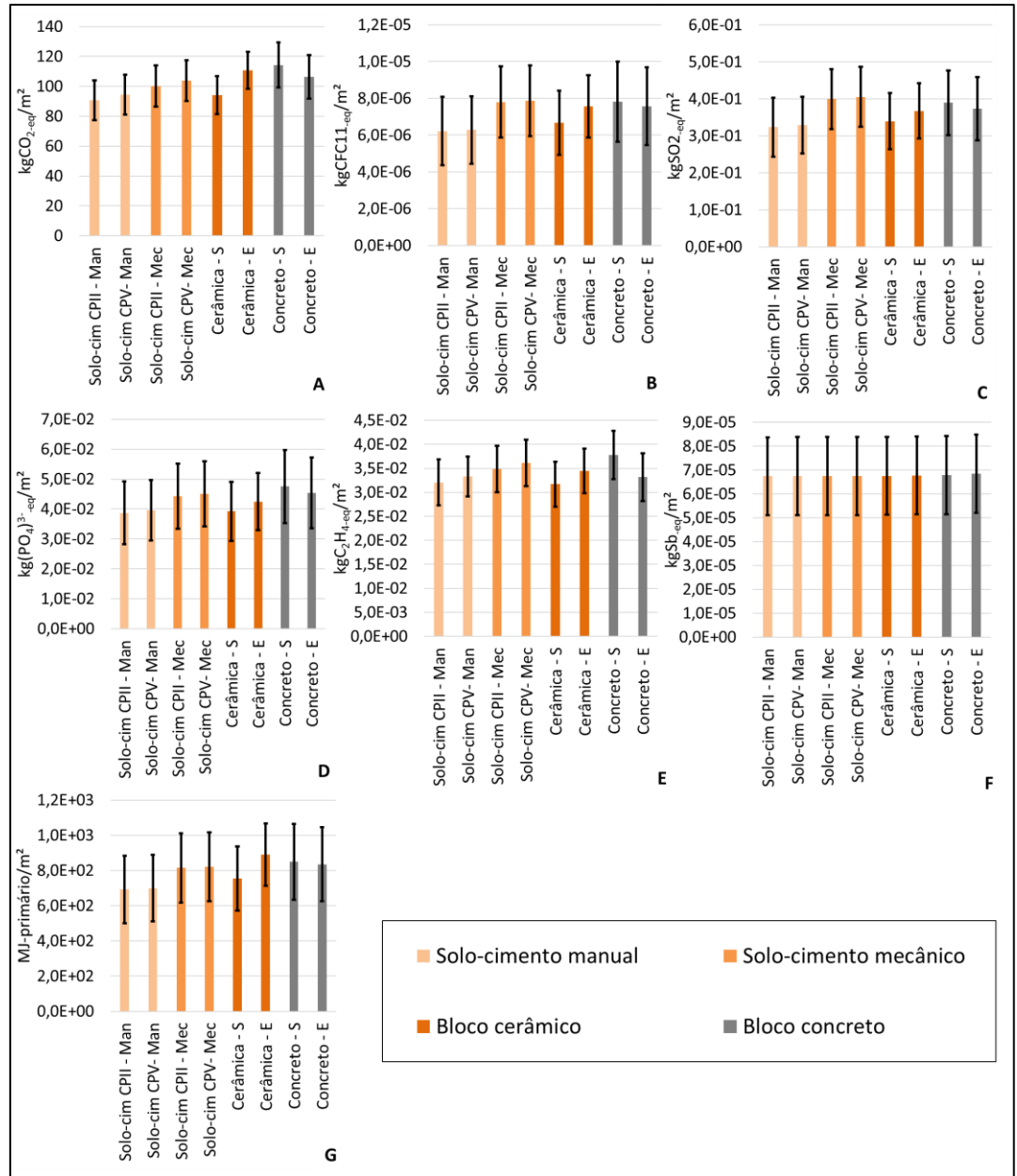
Figura 8. Potenciais impactos ambientais dos sistemas construtivos avaliados considerando o revestimento de resina na alvenaria de blocos de solo-cimento. (A) Potencial de aquecimento global – GWP100. (B) Potencial de depleção da camada de ozônio – ODP. (C) Acidificação – AP. (D) Eutrofização – EP. (E) Formação de fotooxidantes - POCP. (F) Depleção abiótica de elementos – ADP-e. (G) Depleção abiótica de combustíveis fósseis – ADP-ff.

Fonte: Autores

Man – Manual. Mec – Mecânico.

Figura 9. Potenciais impactos ambientais dos sistemas construtivos avaliados considerando o revestimento de argamassa e tinta na alvenaria de blocos de solo-cimento. (A) Potencial de aquecimento global – GWP100. (B) Potencial de depleção da camada de ozônio – ODP. (C) Acidificação – AP. (D) Eutrofização – EP. (E) Formação de fotooxidantes - POCP. (F) Depleção abiótica de elementos – ADP-e. (G) Depleção abiótica de combustíveis fósseis – ADP-ff.

Fonte: Autores



Man – Manual. Mec – Mecânico.

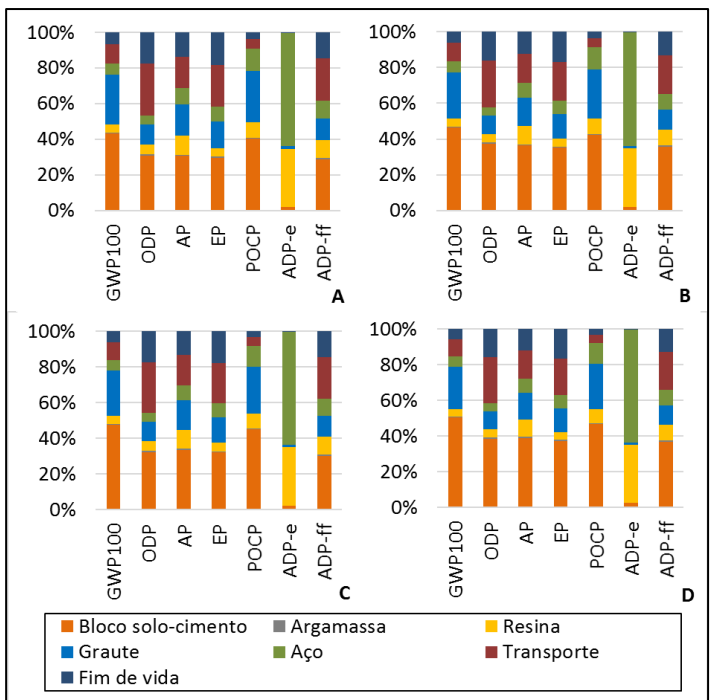


Figura 10. Perfil ambiental das opções de paredes de bloco de solo-cimento com revestimento de resina. (A) CP-II-E manual. (B) CP-II-E mecânico. (C) CPV-manual. (D) CPV-mecânico.

Fonte: Autores

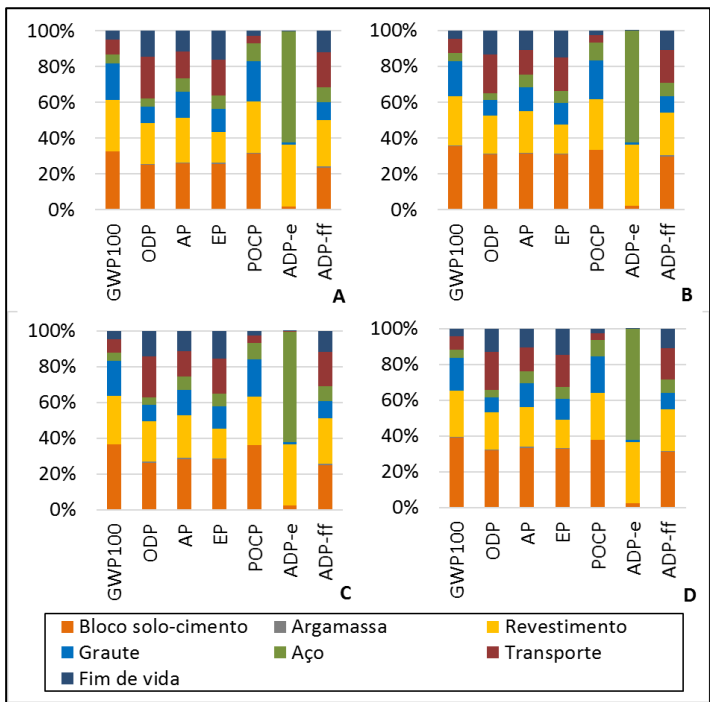
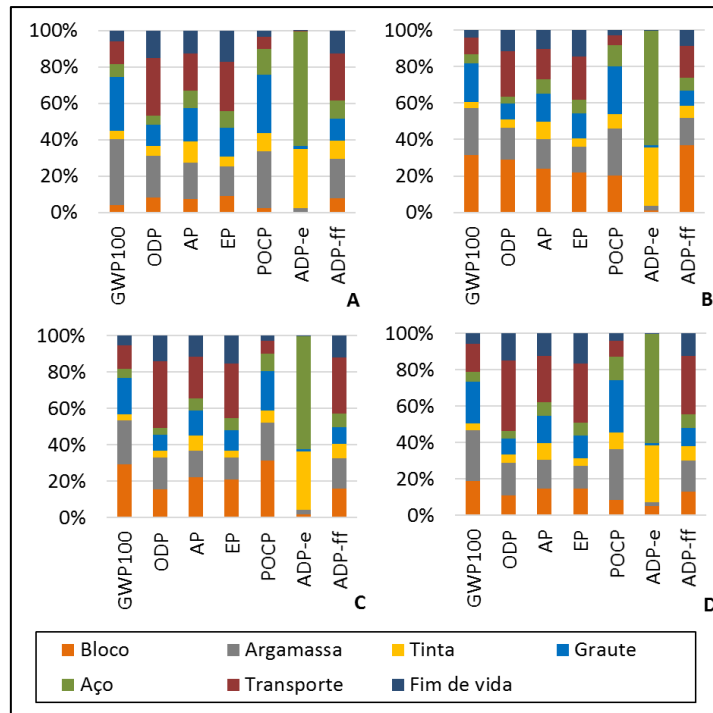


Figura 11. Perfil ambiental das opções de paredes de bloco de solo-cimento com revestimento de argamassa e tinta. (A) CP-II-E manual. (B) CP-II-E mecânico. (C) CPV-manual. (D) CPV-mecânico.

Fonte: Autores

Figura 12. Perfil ambiental das opções de paredes de alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto.
 (A) Cerâmico - Souza et al.
 (B) Cerâmico - Ecoinvent.
 (C) Concreto - Souza et al.
 (D) Concreto - Ecoinvent.

Fonte: Autores



Quando a parede é avaliada, a resina acrílica utilizada tem sua participação nos impactos variando de acordo com o tipo de bloco. Para o caso dos blocos de produção manual e com cimento Portland CP-II-E, a resina aumenta sua participação nos impactos, enquanto que para os blocos de produção mecânica e com cimento CP-V-ARI, a participação é minimizada. A quantidade de reposição da resina pode ter uma grande influência, portanto, para diminuir esse número, deve-se pensar em um projeto consciente que priorize principalmente coberturas com beirais maiores e elevação do piso ou proteção da base. O impacto da resina foi bastante expressivo para categoria de ADP-e devido ao consumo de dióxido de titânio utilizado no processo de produção da resina (de acordo com o inventário utilizado), que consome ácido sulfúrico e, conseqüentemente o elemento zinco, que é considerado um elemento raro.

Quando é utilizada argamassa e tinta como revestimento a contribuição aumenta substancialmente para todas as categorias de impacto, mostrando que a escolha do tipo de revestimento para a alvenaria de blocos solo-cimento é um item crítico e que, portanto, merece uma atenção especial durante a especificação de projeto.

O fato do sistema de blocos solo-cimento não precisar de revestimento de argamassa contribui para a diminuição dos impactos ambientais, conclusão também apontada por Cunha (2016). O revestimento de argamassa tem uma contribuição importante para maioria dos impactos, devido principalmente a cal e o cimento utilizados na formulação, como também apontam Caldas e Toledo Filho (2019). Para o de blocos de concreto, o cimento é o material que mais impacta para a maioria das categorias.

A argamassa de terra utilizada nas juntas entre os blocos apresentou participação mínima, já que é composta em sua maior parte por terra e tem um baixo consumo em comparação aos outros materiais do sistema construtivo.

A maior parte dos estudos da literatura que comparam algum sistema construtivo de terra com sistemas convencionais (normalmente à base de concreto, cerâmica e aço) concluíram que o

primeiro é mais vantajoso. Cunha (2016) também comparou o sistema de alvenaria de blocos solo-cimento com alvenaria de blocos cerâmicos e de concreto, e também verificou que o primeiro sistema é o de menor emissões de CO₂. No entanto, naquele estudo foi utilizado como unidade funcional a edificação, considerando outros elementos como fundações, estrutura, esquadrias e etc., além de considerar somente as emissões de CO₂, sem contabilizar outros GEE e sem utilizar algum método de AICV. Esses fatos impossibilitam uma comparação direta com o presente estudo.

Meliá et al. (2014) concluíram que argamassas de terra são significativamente menos impactantes que argamassas de cimento e cal. Caldas et al. (2020b) também chegaram a mesma conclusão, no entanto, verificaram que a vida útil do revestimento de terra pode influenciar significativamente os impactos ambientais do ciclo de vida do revestimento. Martins et al. (2018) mostraram que uma parede monolítica de solo-cimento é mais vantajosa que uma de alvenaria de blocos cerâmicos estruturais. Ben-Alo et al. (2019) verificaram que o sistema de Cob é mais vantajoso que paredes de concreto e wood frame, com diferenças chegando a 80% para o impacto de mudanças climáticas. Dessa forma, os resultados do presente estudo vão ao encontro das pesquisas encontradas na literatura, mostrando que um sistema construtivo de terra, como o de blocos solo-cimento tem vantagens ambientais.

A comparação entre dois tipos de dados utilizados no inventário dos blocos (cerâmico e de concreto) contribui para uma maior robustez dos resultados, mostrando que a alvenaria de blocos solo-cimento tende a apresentar um melhor desempenho ambiental para a maioria das categorias avaliadas (principalmente quando é utilizado revestimento de resina acrílica). Para os blocos cerâmicos modelados de acordo com dados de Souza et al. (2016) a fonte energética utilizada são cavacos de madeira, que é normalmente a fonte mais utilizada nas olarias brasileiras, de acordo com dados do MME (2018). Enquanto que as disponíveis no banco de dados do Ecoinvent são consideradas o gás natural e o óleo diesel como fontes energéticas principais, que também estão presentes em algumas olarias do país. A diferença das fontes energéticas é um dos principais fatores que leva as diferenças nos impactos dos blocos cerâmicos, sendo que o uso de combustíveis fósseis leva, na maior parte dos casos, a um aumento dos impactos ambientais (principalmente aqueles ligados ao consumo de combustíveis fósseis), como foi verificado no presente estudo.

Para os blocos de concreto, a principal diferença está nos materiais utilizados para a confecção do bloco. Enquanto no primeiro foi considerado o cimento CP-V-ARI, argila, areia e cal hidratada, no do Ecoinvent é utilizado um dado de produção de concreto. O segundo ponto é o consumo de eletricidade utilizado na produção dos blocos, que para o dado do Ecoinvent é superior. Ao final, o dado de bloco de concreto do Ecoinvent leva a menores impactos ambientais.

A etapa de fim de vida apresentou maior participação, próxima a 20% para alguns casos, para as categorias de ODP, AP e ADP-ff, que se deve ao consumo de diesel no processo de demolição, transporte e aterramento dos resíduos.

Finalmente, é importante ressaltar que existem outros métodos de AICV que poderiam ser utilizados neste estudo, como por exemplo o ReCiPe que possui indicadores relativos ao uso do solo agrícola, uso do solo urbano e transformação de terra natural (GOEDKOOPE et al., 2009), os quais estariam mais relacionados ao estudo dos blocos de solo-cimento. Por outro lado, essas categorias de impacto são de escopo local e com fatores de caracterização regionalizados com aplicação válida para Europa (MENDES et al., 2016), o que podem não retratar o contexto brasileiro, podendo levar a conclusões não verdadeiras. Nessa ótica, recomenda-se que esse método seja utilizado em futuros estudos relacionados a materiais de construção com terra,

mas com a devida adaptação dos fatores de caracterização, dessas categorias de impacto, à realidade onde o estudo será realizado.

PROPOSIÇÃO DE MELHORIAS AMBIENTAIS PARA O SISTEMA DE ALVENARIA DE BLOCOS DE SOLO-CIMENTO

A partir dos resultados apresentados na seção anterior é possível destacar alguns pontos para melhoria ambiental do processo de produção do sistema construtivo de blocos de solo-cimento.

Como o cimento Portland se mostrou o insumo mais impactante, portanto, a primeira alternativa para redução dos impactos ambientais seria a diminuição da quantidade de cimento na mistura, isso é, sem que a resistência e durabilidade dos blocos sejam comprometidas. Possíveis alternativas podem ser o uso de pozolanas, como cinza volante e escória de alto forno (fonte), em conjunto com filer calcário ou outros resíduos.

Dallacort et al. (2002) verificaram que é possível substituir de 25 e 57% do teor de cimento por resíduos cerâmicos para a produção de blocos de solo-cimento com resistências adequadas. Pinheiro et al. (2013) concluíram que é viável utilizar o resíduo grits (oriundo de indústrias de celulose e papel) para produzir blocos de solo-cimento adequados para construção. Por outro lado, do ponto de vista ambiental, o uso de resíduos pode ser comprometido caso a disponibilidade seja limitada, o que pode levar a um aumento da distância de transporte, resultando em maiores impactos ambientais, como apontam Göswein et al. (2018).

Caso não seja possível essa redução, uma alternativa é a opção por cimentos com menor teor de clínquer na composição, como CP-III e CP-IV. Vale ressaltar que a disponibilidade desses últimos e de suas pozolanas, escória de alto forno e cinza volante, podem comprometer sua aplicação (OLIVEIRA et al., 2014) e questões de alocação dos impactos destes materiais devem ser analisadas. A diferença entre os cimentos CP-IIIE- e CP-V-ARI não foram significativas, chegando a um valor máximo de 6% para a categoria de GWP100. Neste sentido, dependendo da aplicação e condições de obra, o cimento CP-V-ARI pode ser mais vantajoso já que apresenta uma elevada resistência inicial.

O graute mostrou uma participação significativa, sendo que a maior parte dos impactos desse material vem do cimento. A primeira opção é pensar em um projeto racional, com atenção nos locais que realmente necessitarão de grauteamento e a possibilidade de especificar grautes com um menor teor de cimento, isto é, também sem comprometer o desempenho estrutural e a durabilidade do sistema.

O tipo de revestimento tem uma influência importante nos impactos ambientais da alvenaria de blocos de solo-cimento. O revestimento com resina acrílica se mostrou mais vantajoso que o de argamassa (adotando uma espessura de 2,5 cm de cada lado), mesmo considerando a reposição da resina de 5 em 5 anos. Dessa forma, ele deve ser incentivado e observa-se que na prática de mercado é bastante utilizado. Contudo, deve-se ressaltar que a escolha do revestimento tem influência direta no desempenho de dado sistema construtivo. A camada de argamassa tende a trazer melhor desempenho, principalmente do ponto de vista térmico, acústico e estanqueidade. Uma forma de diminuir a importância do revestimento no desempenho global da parede é fazer uma cobertura com uma maior área de proteção, por exemplo, com um beiral mais largo. Sendo, assim, uma recomendação importante de projeto.

O uso de um processo mecanizado ao invés do processo manual apresentou diferenças significativas para algumas das categorias de impacto avaliadas, chegando a 34% para a

categoria ODP e 30% para AP. Para as outras categorias a diferença foi inferior a 25%. Sendo assim, sugere-se que o primeiro seja utilizado, para os casos que precisem de maior produtividade do processo e um controle de qualidade mais preciso. Com a atenção para as condições de energia e logística necessárias e disponibilidade de solo local. Por outro lado, para casos emergenciais, como o do Haiti, para reconstrução de vilas que sofreram catástrofes, o uso de um processo manual, utilizando construção por mutirões, e, tende a ser o mais adequado e uma solução bastante promissora. O consumo de energia para extração e processamento do solo e as distâncias de transporte consideradas foram os principais responsáveis pelas diferenças entre os dois processos.

Embora o uso intensivo de mão de obra humana (processo manual) possa gerar uma maior quantidade de empregos, pode resultar em impactos negativos relacionados a problemas de ergonomia e saúde do trabalhador. Para entender esses impactos sociais uma ACV-Social deve ser realizada, como pode ser vista em Liu e Qian et al. (2019), que demonstraram que questões relacionadas a saúde e segurança do trabalhador são críticas para esse tipo de avaliação.

A etapa de transporte mostrou ser importante, que está relacionada, principalmente, ao transporte dos insumos mais industrializados como o cimento e cal hidratada. O solo tende a ser mais fácil de ser encontrado, o que vai depender da localização da obra, densidade urbana, qualidade e disponibilidade do solo. Esse último fator pode ser comprometido, principalmente em locais muito adensados (CORDEIRO et al., 2019), e nessa ótica, haverá a necessidade de transportar solos de locais mais distantes, necessitando de veículos especializados, normalmente caminhões. Caldas et al. (2020b) verificaram que em alguns casos e para algumas categorias de impacto, como Mudanças Climáticas, é mais vantajoso utilizar solos de melhor qualidade de locais mais distantes do que usar um maior teor de estabilizante químico (cimento Portland ou cal hidratada) para a melhoria das propriedades de solos locais de pior qualidade.

Uma alternativa para uso de solos locais é o aproveitamento de “bota-foras” que são gerados durante a etapa de movimentação de terra de construções, como apontam Santos et al. (2014). Essa estratégia tem dois benefícios: (1) o aproveitamento de um solo que já está escavado e pronto para ser entregue (impactos evitados pela economia com essas etapas) e (2) uma destinação adequada e mais nobre para esse solo, que em muitos dos casos é destinado para locais impróprios, como lotes baldios ou corpos hídricos (impactos evitados de uma destinação final inadequada).

A etapa de fim de vida, considerada nesse estudo como aterramento sanitário, não apresentou impactos significativos. No entanto, sabendo que sistemas construtivos à base de terra têm o potencial de serem reciclados em seu fim de vida, a alvenaria de blocos de solo-cimento pode apresentar outras credenciais ambientais, como os impactos evitados para a extração e produção de materiais virgens. Portanto, a reciclagem como fim de vida deve ser pensada como uma alternativa.

CONCLUSÕES

O sistema de blocos solo-cimento, de forma geral, apresentou menores impactos ambientais em seu ciclo de vida do que a alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e de concreto, mesmo considerando diferentes dados de inventário para os últimos sistemas construtivos. Essa vantagem foi maior principalmente quando é utilizado revestimento com resina acrílica ao invés do revestimento argamassado.

A diferença entre o processo de produção manual e mecanizado dos blocos de solo-cimento foi mais significativa para as categorias de Depleção da Camada de Ozônio e Acidificação. Nessa

ótica, sugere-se que o primeiro processo é indicado para locais de difícil acesso de equipamentos e energia e o segundo pode ser utilizado para aumentar a produtividade e qualidade da construção, caso existam as condições necessárias.

O cimento Portland foi o insumo que mais contribuiu para a maioria dos impactos ambientais do sistema de alvenaria de blocos solo-cimento, no entanto, a diferença entre cimentos CP-II-E e CPV-ARI não foi significativa. Dessa forma, para casos em que sejam necessários blocos com resistências iniciais mais elevadas, recomenda-se o uso do último tipo de cimento.

O estudo contribuiu para difusão de informações ambientais sobre o sistema de alvenaria de blocos solo-cimento no Brasil, por mostrar quantitativamente suas credenciais ambientais, além de apresentar diretrizes ambientais para o projeto e especificação desta tecnologia. Para futuros estudos, pretende-se avaliar como o uso de resíduos, em substituição ao cimento Portland, podem contribuir para a redução dos impactos ambientais para a produção de blocos solo-cimento. Pretende-se saber também como diferentes critérios de desempenho (ex. térmico e acústico) e alternativas de fim de vida (ex. reciclagem) podem influenciar na modelagem da ACV e comparação com outros sistemas construtivos e outros métodos de AICV, como por exemplo o ReCiPe.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer Jac-sone Alertte por fornecer alguns dos dados utilizados nesta pesquisa e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de pesquisa.

Referências Bibliográficas

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

ANAND, Chirjiv K.; AMOR, Ben. Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, n. 1, p. 408-416, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.058>

ARRIGONI, A.; BECKETT, C.; CIANCIO, D., DOTELLI, G. Life cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilized rammed earth. **Construction and Building Materials**, v. 142, p.128 – 136, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.066>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15575**: Edificações Habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

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

BEN-ALON, A.; LOFTNESS, V.; HARRIES, V. K.; DIPIETRO, G.; HAMEEN, E. C. Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of natural vs conventional building materials: A case study on cob earthen material. **Building and Environment**, v. 160, p. 1-10, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.05.028>

BRASIL. Ministério. **Site oficial**. Disponível em: <<http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/politica-externa/desenvolvimento-sustentavel-e-meio-ambiente/134-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-ods>> Acesso em 06 de jun. 2019.

BUENO, C., ROSSIGNOLO, J., & OMETTO, A. Life Cycle Assessment and the Environmental Certification Systems of Buildings. **Gestão & Tecnologia De Projetos**, v.1(8), 7, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4237/gtp.v1i8.255>

CABEZA, L. RINCÓN, L.; VILARIÑO, V.; PÉREZ, G.; CASTELL, A. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>

CALDAS, L. R.; CARVALHO, M. T. M. Avaliação do desempenho de vedações verticais utilizando o Processo de Análise Hierárquica na tomada de decisão. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 9, n. 2, p. 109-121, 2018. DOI:<https://doi.org/10.20396/parc.v9i2.8651552>.

CALDAS, L. R.; CARVALHO, M. T. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação de estratégias para mitigação dos impactos ambientais de revestimentos argamassados no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 20, n.3, p. 343-362, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300433>

CALDAS, L. R.; PAIVA, R.; MARTINS, A.; TOLEDO FILHO, R. D. Argamassas de terra versus convencionais: avaliação do desempenho ambiental considerando o ciclo de vida. **MIX Sustentável**, v. 6, n. 4, p. 115-128, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n4.115-128>

CALDAS, L. R.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação do Ciclo de Vida de materiais cimentícios utilizados no Brasil: estudo para argamassas, graute e bloco de concreto. **R. Latino-amer. em Aval. do Ciclo de Vida**, Brasília, v. 2, n. 2, p. 34-61, 2019. doi: <https://doi.org/10.18225/lalca.v2i2.4143>.

CARVALHO, R. N. F. M.; MIRANDA, C. S. A taipa como patrimônio cultural: a preservação do saber fazer. **RCT – Revista de Ciência e Tecnologia**, Roraima, RR, v. 1, n. 1, p. 1-18, 2015.

CELIK, K.; MERAL, C.; GURSEL, A. P.; MEHTA, P. K.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. Mechanical properties, durability, and life-cycle assessment of self consolidating concrete mixtures made with blended Portland cements containing fly ash and limestone powder. **Cement and Concrete Composites**, v. 56, p. 59–72, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.003>

CHRISTOFOROU, E.; KYLILI, A.; FOKAIDES, P.A.; IOANNOU, I. Cradle to site life cycle assessment (LCA) of adobe bricks. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p.443-452, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.016>

CORDEIRO, Carol Cardoso Moura et al. Construções vernáculas em terra: perspectiva histórica, técnica e contemporânea da taipa de mão. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 10, p. e01906, 2019. doi:<https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8651212>.

CUNHA, I. B. **Quantificação das Emissões de CO2 na Construção de Unidades Residenciais Unifamiliares com Diferentes Materiais**. 2016. 136f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://repositorio.pucrs.br/dspace/handle/10923/8797?mode=simple> Acesso em: 18 jun. 2019

DALLACORT, R.; LIMA JÚNIOR, H. C.; WILLRICH, F. L. W.; BARBOSA, N. P. Resistência à compressão do solo-cimento com substituição parcial do cimento Portland por resíduo cerâmico moído. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.3, p.511-518, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662002000300022>

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **CEN EN 15804**: sustainability of construction works: environmental product declarations: core rules for the product category of construction products. Brussels: CEN, 2012.

GIORGI, Priscila et al. Avaliação de sustentabilidade e habitabilidade de blocos de solo-cimento segundo a norma ABNT NBR 15575. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro , v. 23, n. 3, e12177, 2018 . DOI: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180003.0511>.

GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; SCHRYVER, A.; STRUIJS, J.; VAN ZELM, R. **ReCiPe 2008**: a life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level. Ministerie van Volkshuisvesting. (Report, 1), 2009.

GÖSWEIN, V.; GONÇALVES, A. B.; SILVESTRE, J. D.; FREIRE, F.; HABERT, G.; KURDA, R. Transportation matters – Does it? GIS-based comparative environmental assessment of concrete mixes with cement, fly ash, natural and recycled aggregates. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 137, p. 1-10, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.021>

JODIDIO, Philip. **Green Architecture**. Taschen: Bibliotheca Universalis, 2015.

LIU, S.; QIAN, S. Evaluation of social life-cycle performance of buildings: Theoretical framework and impact assessment approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 213, p. 792-807, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.200>

LUO, L.; CHEN, Y. Carbon emission energy management analysis of LCA-Based fabricated building construction. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 27, 100405, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2020.100405>

MARCELINO-SADABAA, et al. 2017. Challenges in Life Cycle Assessment (LCA) of stabilised clay-based construction materials. **Applied Clay Science** v. 144, p. 121–130. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.05.012>

MARTINS, A.; CALDAS, L. R.; PAIVA, R. M.; TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação do ciclo de vida de compósitos solo cimento-fibras de sisal considerando diferentes distâncias de transporte. In: Congresso de arquitetura e construção com terra no Brasil, 7, 2018. **Anais ...** Rio de Janeiro: Terra Brasil, 2018.

MELIÀ, P.; RUGGIERI, G.; SABBADINI, S.; DOTELLI, D. Environmental impacts of natural and conventional building materials: a case study on earth plasters. **Journal of Cleaner Production**, v. 80, p. 179 – 186, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.073>.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, p. 160-175, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.153213>

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Balanco Energético Nacional**. Ano base 2017. Empresa de Pesquisa Energética: Rio de Janeiro, 2018.

MIRANDA, A.; YUBA, A. N. Comparação de impactos ambientais de sistemas construtivos de paredes utilizando avaliação do ciclo de vida modular. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

MOTTA, et al. Tijolo de Solo-Cimento: Análise das Características Físicas e Viabilidade Econômica de Técnicas Construtivas Sustentáveis. **E-xacta**, v. 7, n. 1, p. 13-26. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.18674/exacta.v7i1.1038>

NEVES, C.; FARIA, O. B. **Técnicas de construção com terra**. Bauru, SP: FEB-UNESP/PROTERRA: 197 p. 2011. Disponível em: <https://www.promemoria.indaiatuba.sp.gov.br/arquivos/proterra-tecnicas_construcao_com_terra.pdf> Acesso em 07 de jan. 2019.

OLIVEIRA, V. C. H. C.; DAMINELI, B. L.; AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 167-181, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000400012>

OUELLET-PLAMONDON, C. M.; HABERT, G. Self-Compacted Clay based Concrete (SCCC): proof-of-concept. **Journal of Cleaner Production**, v. 117, p. 160 – 168, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.048>

PACHECO-TORGAL, F.; JALALI, Said. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. **Construction and building materials**, v. 29, p. 512-519, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>

PALACIOS-MUNOZ, B.; PEUPORTIER, B.; GRACIA-VILLA, L.; LÓPEZ-MESA., B Sustainability assessment of refurbishment vs. new constructions by means of LCA and durability-based estimations of buildings lifespans: A new approach. **Building and Environment**, v. 160, p. 106203, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106203>

PAWELZIK, P., et al, Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials – Reviewing methodologies and deriving recommendations. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 73, p. 211-228, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.006>

PEÑALOZA, D.; ERLANDSSON, M.; FALK, A. Exploring the climate impact effects of increases use of bio-based materials in buildings. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 219-226, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.041>

PINHEIRO, L.; RANGEL, B.; GUIMARÃES, A., SILVA, A. Panorama da produção de obras em terra crua com design contemporâneo nos últimos 60 anos no Brasil. In: Congresso Internacional de História da Construção Luso-Brasileira, 2, 2016, Porto. **Anais ...** Porto: CEAU-FAUP, 2016.

PINHEIRO, M. L.; ALVARENGA, R. C. S. S.; RIBEIRO, B. C.; SILVA JÚNIOR, P. R.; SARMET, M. S. Avaliação experimental de blocos prensados de solo-cimento com adição de grits. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 29-46, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212013000200004>

PITTAU et al. Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls. **Building and Environment**, v. 129, n. 1, p. 117-129, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.006>.

ROCK, M. et al. Embodied GHG emissions of buildings -The hidden challenge for effective climate change mitigation **Applied Energy**, v. 258, p. 114107, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>

SAADE, M. R. M.; GUEST, G.; AMOR, B. Comparative whole building LCAs: How far are our expectations from the documented evidence? **Building and Environment**, v. 167, 106449, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106449>

SAADE, M., SILVA, M., & SILVA, V. Methodological discussion and piloting of LCA-based environmental indicators for product stage assessment of Brazilian buildings. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 9, n. 1, p. 43-62, 2015. DOI: <https://doi.org/10.11606/gtp.v9i1.89987>

SAMEH, Sherin H. Promoting earth architecture as a sustainable construction technique in Egypt. **Journal of cleaner production**, v. 65, p. 362-373, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.046>.

SANTOS, T.; SILVA, V.; FARIA, P. Caracterização de Argamassa Pré-Doseada de Terra, Anais...In: Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento, **Anais...Portugal**, 2014

SERRANO, S., et al. Stabilized rammed earth incorporating PCM: optimization and improvement of thermal properties and LCA. **Energy Procedia**, v. 30, p. 461-470, 2012. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.11.055

SILVA, L.; SANTOS, G. N.; SAVARIS, W. K. Tijolo solo-cimento: Fabricação e Utilização em Construções que Visam o Equilíbrio Ambiental. **Rev. Conexão Eletrônica – Três Lagoas**, MS. v. 15, n. 1, 2018.

SILVA, M. J. J. **Avaliação do consumo energético no processo de demolição de construções**. 2017. 237 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Portugal, 2008. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/60019/1/000129579.pdf> Acesso em: 07 jun. 2019

SOUZA, Danielle Maia, et al. Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls. **Journal of Cleaner Production**, v.137, n. 20, p. 70-82, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.069>

SOUZA, M. I. B.; SEGANTINI, A. A. S.; PEREIRA, J. A. Tijolos prensados de solo-cimento confeccionados com resíduos de concreto. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** [online]. v.12, n.2, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000200014>.

THE INTERNATIONAL EPD SYSTEM, 2017. **Site oficial**. Cement. Environdec. 2017. Disponível em: <<http://bit.ly/2IW91IL>>. Acesso em 03 de mai. 2019.

TURRI, D. F. G. **Estudo exploratório de bloco estabilizado conformado por extrusão**. 2011. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <<http://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/111-msc-pt-2011/1489-diego-fernando-grau-turri>> Acesso em 12 jul. 2019.

UN Environment and International Energy Agency (2017): **Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector**. Global Status Report. United Nations, 2017.

VAN DEN HEEDE, P.; DE BELIE, N. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: Literature review and theoretical calculations". **Cement and Concrete Research**. v. 34, n. 4, p. 431–442, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004>

VILLAGE MARIE, 2019. **Site oficial**. Disponível em: <<https://villagemarie.com/>> Acesso em 05 de ago. 2019.

XING, S.; XU, Z.; JUN, G. Inventory analysis of LCA on steel- and concrete-construction office buildings. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 7, p. 1188-1193, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.10.016>

Lucas Rosse Caldas, Dr
lucas.caldas@fau.ufrj

Romildo Dias Toledo Filho, Dr
toledo@coc.ufrj.br

Notas

ⁱ O Cob é um material de construção que é normalmente composto de solo rico em argila misturado com areia, palha e água (BEN-ALO et al., 2019).