

CONSTRUÇÃO COM TERRA NO BRASIL: AVALIAÇÃO AMBIENTAL DA TAIPA DE PILÃO

EARTH CONSTRUCTION IN BRAZIL: ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF RAMMED EARTH

 Lucas Rosse Caldas ¹

 Adriana Paiva de Souza Martins²

 Romildo Dias Toledo Filho ³

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, lucas.caldas@fau.ufrj.br

² Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, adrianapsmartins@globocom

³ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, rdt@coc.ufrj.br

Resumo

Este trabalho teve como objetivo avaliar potenciais impactos ambientais no ciclo de vida da técnica construtiva taipa de pilão, considerando diferentes configurações normalmente verificadas no Brasil. Foram avaliados três teores de cimento Portland: 5%, 10% e 15% (em massa). A metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi empregada, sendo consideradas as etapas de produção e transporte dos materiais constituintes, construção e fim de vida da taipa. As diferentes configurações dos sistemas de taipa de pilão foram comparadas com alvenaria de blocos cerâmicos estruturais, de blocos de concreto estruturais e parede de concreto moldada no local. Os resultados mostraram que a taipa de pilão é mais vantajosa principalmente quando os critérios de capacidade térmica e Índice de redução sonora ponderado são utilizados na escolha da unidade funcional. A produção do cimento e da forma de madeira foram os itens que mais influenciaram nos impactos ambientais no ciclo de vida da taipa de pilão. Ao final, foi possível obter os potenciais impactos ambientais do ciclo de vida dessa técnica construtiva parametrizados pela espessura da parede e teor de cimento, sendo apresentadas equações obtidas via regressão. Foram também propostas recomendações para melhoria ambiental da taipa de pilão no Brasil.

Palavras-chave: Construção com terra. ACV. Parametrização...

Contribuição dos autores:

LRC: conceituação, curadoria de dados, análise formal, investigação, metodologia, administração de projetos, validação, visualização, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição. **APSM:** conceituação, investigação, metodologia, validação, visualização, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição. **RDTF:** conceituação, metodologia, supervisão, validação, escrita - revisão e edição.

Fomento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
Declaração de conflito: nada foi declarado.

Editor Responsável:

Vanessa Gomes da Silva 

Abstract

This paper aimed to evaluate potential environmental impacts in the life cycle of the rammed earth construction technique, considering different configurations normally used in Brazil. Three contents of the chemical stabilizer, Portland cement, were evaluated at 5%, 10% and 15% (by mass). We used the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, considering the production and transportation stages of the raw materials, construction, and end-of-life of the rammed earth wall. The rammed earth configurations were compared with ceramic block masonry, concrete block masonry and on-site cast concrete wall. The results showed that the rammed earth is more advantageous, especially when the criteria of thermal capacity and weighted noise reduction index are used in the choice of the functional unit. The production of cement and wood formwork were the items that most influenced the environmental impacts in the rammed earth life cycle. Finally, it was possible to obtain the potential environmental impacts of the rammed earth life cycle parameterized by the wall thickness and cement content. Equations obtained by regression were presented. We also proposed recommendations for environmental improvement of rammed earth in Brazil.

Keywords: : Earth construction. LCA. Parameterization.

How to cite this article:

CALDAS, L. R.; MARTINS, A. P. de S.; TOLEDO FILHO, R. D. Construção com terra no Brasil: avaliação ambiental da taipa de pilão. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 12, p. e021015, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v12i00.8656279>



Introdução

O uso da terra como material de construção pode ser encontrado em diferentes países e povos, como França, Inglaterra, Portugal, Espanha, China, Palestina, Irã, Iraque, Turquia, Peru, México e em vários países da África. No Brasil, o início e difusão das técnicas de construção com terra ocorreu pelos portugueses e africanos, com sua maior difusão durante o período colonial (CORDEIRO *et al.*, 2019).

Atualmente, no Brasil, técnicas construtivas baseadas em terra têm recebido atenção crescente tanto de pesquisadores quanto de profissionais da construção civil, haja vista as entidades, redes de pesquisa e os eventos especializados no tema, tais como rede PROTERRA, Associação Brasileira de Materiais Não Convencionais (ABMTENC), congressos Terra Brasil, dentre outros.

Um dos motivos que tem impulsionado esse aumento de interesse pela construção com terra é a busca por um desenvolvimento ambientalmente mais sustentável. Nesse contexto o uso da terra é vantajoso por ser um material natural, abundante, normalmente disponível localmente, com boas propriedades higrotérmicas, acústicas, de resistência ao fogo, atóxico e reciclável no fim de vida (PACHECO-TORGAL; JALALI, 2011).

Por ser um material natural, seu processamento tende a ser menos poluente e menos intensivo em energia que os materiais normalmente utilizados na construção, como o cimento, cerâmica e aço (CORDEIRO *et al.*, 2019). A maior parte dos países do mundo se comprometeram a mitigar suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) e muitos deles estão alinhados com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU). Nessa ótica, é cada vez mais importante que o setor da construção civil amplie a oferta de materiais de menor impacto ambiental, tendo em vista sua expressiva participação no consumo de recursos não renováveis, emissão de poluentes, geração de resíduos e demanda energética (UNPE, 2017). Dessa forma, sistemas construtivos com terra podem ser uma alternativa bastante vantajosa, quando comparados com os sistemas que são utilizados atualmente, em sua grande maioria compostos por concreto, cerâmica e aço.

Para evidenciar os ganhos ambientais das técnicas alternativas o primeiro passo a ser implementado é a quantificação dos impactos gerados, seguido da comparação com aqueles gerados pelas técnicas usuais, baseadas em materiais industrializados. Neste ponto, a metodologia que mais vem sendo utilizada é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), como é apontado por Anand e Amor (2017) e Caldas e Carvalho (2018), que possui uma estrutura robusta e científica para quantificar e avaliar potenciais impactos ambientais de produtos, processos e serviços, ao longo das etapas do ciclo de vida (ABNT, 2009).

Dentre os sistemas construtivos com terra existentes, os mais utilizados atualmente no Brasil, seja para edificações novas ou obras de restauro, são os blocos de adobe, blocos de solo-cimento comprimidos, taipa de mão (pau-a-pique) e taipa de pilão. A taipa foi bastante empregada no Brasil durante o período colonial (CORDEIRO *et al.*, 2019). Nos tempos mais atuais, tem predominado o uso da taipa de pilão, segundo a pesquisa realizada por Pinheiro *et al.* (2016).

Essa técnica construtiva foi amplamente empregada nos primeiros séculos de colonização, principalmente em regiões onde as pedras eram um recurso escasso. O estado de São Paulo foi o primeiro a utilizá-la, sendo que posteriormente ela se difundiu para a Bahia (como exemplo a cidade de Salvador), Minas Gerais, Paraná, Mato Grosso e Goiás. Enquanto em Goiás a técnica teve êxito, em Minas Gerais ela foi substituída por

outras (taipa de mão e adobe) devido principalmente ao fato de não se adaptar à topografia local (PEIXOTO; SOUZA; REZENDE, 2016)

Tendo em vista a importância histórica da taipa de pilão no Brasil, e o crescente interesse verificado nos últimos anos, o presente trabalho teve como objetivos: (1) avaliar os potenciais impactos ambientais no ciclo de vida da taipa de pilão, considerando diferentes espessuras de parede, processos de compactação e teores de cimento (utilizado para a estabilização química); (2) comparar as configurações de taipa com sistemas construtivos convencionalmente utilizados no Brasil; (3) apresentar recomendações para a melhoria ambiental desse sistema construtivo.

Taipa de pilão e terra compactada

A taipa de pilão pode ser caracterizada como um elemento estrutural moldado no local com elevada resistência à compressão e baixa resistência à tração (Figura 1). Os materiais utilizados são: solo, areia (caso se precise fazer alguma correção), água, estabilizante químico, sendo o cimento e a cal hidratada os mais comuns (NEVES, FARIA, 2011). O processo executivo da taipa de pilão envolve o uso de formas, sendo que no Brasil as mais comuns são as de madeira compensada, empregando-se também tirantes para o travamento. A compactação pode ser manual, com o uso de um pilão, ou mecanizada. De acordo com Lopes *et al.* (2016) são cada vez mais comuns os métodos mecanizados, pois além de melhorar a produtividade, resultam em uma melhor qualidade visual, acabamento e uniformidade da mistura (NEVES, FARIA, 2011). A espessura das paredes varia de projeto para projeto, de acordo com a altura e composição do material, podendo chegar a 120 cm (PISANI, 2004).

Figura 1 – Protótipo de taipa de pilão executado no congresso Terra Brasil (2018), Rio de Janeiro-RJ, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU/UFRJ)



Fonte: os autores.

Algumas especificações técnicas da taipa de pilão são importantes, entre elas: massa específica seca, granulometria do solo, durabilidade, vida útil, resistência a sismos e propriedades higrotérmicas como permeabilidade ao vapor, condutividade térmica e calor específico. Por exemplo, Milani (2008) encontrou valores variando de 1550 kg/m³ a 2000 kg/m³ para a massa específica seca, enquanto Maniatidis e Walker (2003) citam valores chegando a 2200 kg/m³. Jiang *et al.* (2020) encontraram valores de 1730 kg/m³ a 2200 kg/m³.

Em relação à granulometria há uma grande variação de solo para solo, que normalmente é corrigido com areia. Essa característica vai influenciar no consumo de ligante químico, na reologia da mistura e nas propriedades mecânicas (MANIATIDIS; WALKER, 2003;

MILANI, 2008). Em termos de durabilidade, quando a taipa é bem protegida, ela pode ultrapassar uma vida útil de 300 anos, como é possível encontrar em algumas casas construídas em São Paulo (PISANI, 2004). A chuva e as geadas são os principais agentes que afetam a durabilidade dos sistemas de terra comprimida (MANIATIDIS; WALKER, 2003).

Em relação às propriedades térmicas também foi possível verificar uma variação significativa nos dados encontrados na literatura. Milani (2008) observou valores de 0,71 W/m·K a 0,96 W/m·K para a condutividade térmica e 840 J/kg·K para o calor específico. Jiang et al. (2020) encontraram valores de 0,6 W/m·K a 1,0 W/m·K para a condutividade térmica e 648 J/kg·K a 997 J/kg·K para o calor específico.

A partir dessa pesquisa bibliográfica sobre algumas características para especificação técnica da taipa de pilão percebe-se uma variação considerável que tem relação direta com o fato do solo ser um material não homogêneo, com algumas características próprias que vai variar de local para local.

Em países como a Austrália, segundo Rocha e Oliveira (2016), o uso da terra compactada (similar a taipa de pilão brasileira) faz uso de fôrmas metálicas travadas por guias verticais externas, fixas ou móveis, preenchidas com uma mistura de solo com estabilizante, normalmente o cimento. Uma possível explicação para o grande número de obras com o uso de terra compactada na Austrália está no fato de que, diferentemente dos países que utilizaram a terra como matéria prima na construção civil no passado, na Austrália, esse uso é mais recente, estimado há poucas centenas de anos.

Embora o uso dominante da taipa no pilão tenha sido observado em edificações históricas, principalmente nos estados de Minas Gerais (PEIXOTO; SOUZA; REZENDE, 2016), Bahia e Goiás (Figura 2), existem casos atuais, como o evento CASACOR Rio de Janeiro 2018, que usou essa tecnologia como elemento estético para ambientes de relaxamento (Figura 3). Atualmente, alguns escritórios e empresas de construção, tanto no Brasil (Taipal) quanto nos Estados Unidos (arquitetos Hotson Bakker e Boniface Haden), são especialistas no desenvolvimento e execução de projetos que utilizam o sistema construtivo de terra compactada. Um projeto interessante desses arquitetos com o uso de taipa de pilão pode ser visto no Centro Cultural do Deserto Nk'Mip, na Colúmbia Britânica, Canadá. A parede de terra compactada tem 80 m de comprimento, 5,5 m de altura e 60 cm de espessura, sendo considerada a maior parede com esse sistema construtivo na América do Norte (JODIDIO, 2015).

Figura 2 – Igreja Matriz de Nossa Senhora do Rosário (a esquerda), paredes de taipa de pilão (ao centro) e cidade de Pirenópolis-GO, 2018 (a direita)



Fonte: os autores.

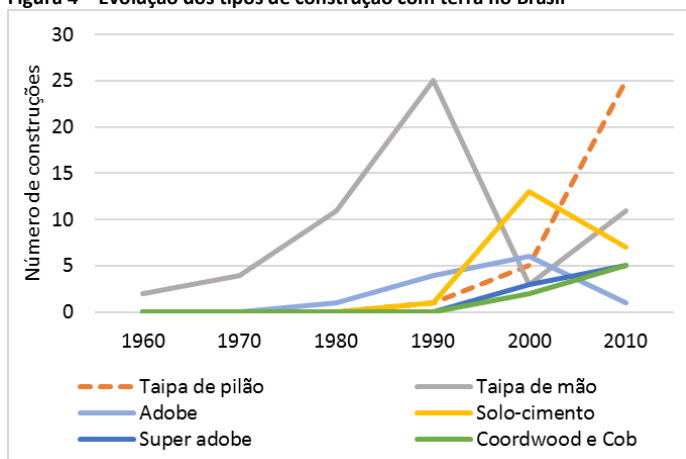
Figura 3 – Uso contemporâneo da taipa de pilão em ambiente da CASACOR Rio de Janeiro-RJ 2018



Fonte: os autores.

Na Figura 4 são apresentadas as tecnologias de construção com terra utilizadas no Brasil nos últimos anos. Pode-se observar que a taipa de pilão teve um crescimento bastante expressivo no ano de 2010, sendo que o estado de São Paulo apresentou maior número de construções (PINHEIRO et al., 2016). De acordo com esses autores, esse fato pode ter duas justificativas: (i) o estado de São Paulo concentra duas empresas construtoras especializadas em taipa de pilão, com início em 1990 e 2000, respectivamente e (ii) maior interesse por parte de arquitetos e urbanistas e clientes.

Figura 4 – Evolução dos tipos de construção com terra no Brasil



Fonte: os autores com base nos dados de Pinheiro et al. (2016).

Na literatura científica brasileira a taipa de pilão tem sido estudada do ponto de vista de suas manifestações patológicas e perdas de processo, como foi observado no estudo de Lopes et al. (2016). Peixoto, Souza e Rezende (2016) apresentaram o acervo em taipa de pilão existente no estado de Minas Gerais e verificaram a raridade do emprego dessa técnica nas edificações do período colonial, ressaltando a importância de sua preservação. Pisani (2004) descreveu diferentes técnicas construtivas à base de terra, com destaque para as taipas de mão e de pilão, mostrando que são técnicas que foram

muito utilizadas durante a arquitetura colonial brasileira e que ainda podem ser encontradas em algumas regiões.

Neste contexto, tendo em vista o patrimônio existente no Brasil em taipa de pilão e o crescimento do interesse por essa técnica tanto por projetistas quanto por usuários, é interessante que além dos aspectos estéticos e tecnológicos, estejam também disponíveis para os envolvidos algumas informações ambientais. Para isso, a metodologia de ACV pode ser utilizada para mensurar os potenciais impactos ambientais no ciclo de vida de diferentes sistemas construtivos, inclusive nos de terra. Esse tema será explorado no próximo tópico.

Avaliação do Ciclo de Vida de técnicas de construção com terra

Na literatura, alguns estudos que aplicaram a ACV para estudar materiais e sistemas construtivos à base de terra merecem atenção. Serrano *et al.* (2013) estudaram uma parede de terra estabilizada com material de mudança de fase (MMF) microencapsulado, obtendo melhoria de propriedades térmicas. Os desempenhos térmico e ambiental foram avaliados por ensaios experimentais e ACV, respectivamente. Eles descobriram que uma melhoria das propriedades térmicas leva a um aumento dos impactos ambientais devido à incorporação de material de mudança de fase (MMF) microencapsulado. Melià *et al.* (2014) compararam os impactos ambientais de argamassas de revestimento à base de terra com convencionais (à base de cimento e cal hidráulica), tendo obtido melhor desempenho para as primeiras. Christoforou *et al.* (2016) aplicaram a ACV para avaliar os impactos ambientais de tijolos de adobe e outros materiais convencionais em sistemas de alvenaria. Os tijolos de adobe demonstraram melhor desempenho que os materiais industrializados.

Ouellet-Plamondon e Habert (2016) desenvolveram um concreto de argila autoadensável e verificaram, utilizando a metodologia de pegada de carbono, que o impacto Mudanças Climáticas pode ser comparado à tecnologia de blocos de concreto.

Marcelino-Sadaba *et al.* (2017) usaram a ACV para avaliar tijolos cerâmicos queimados e não queimados e verificaram que o processo de queima é uma das etapas mais impactantes devido ao consumo de combustíveis, sendo assim, os tijolos não queimados possuem menores impactos ambientais. Por outro lado, possuem um desempenho mecânico muito inferior. Neste sentido, os autores ressaltaram a necessidade de definir muito bem onde cada tipo de tijolo pode ser utilizado, para se aproveitar o melhor de cada um.

Arrigoni *et al.* (2017) aplicaram a ACV para o estudo de terra compactada estabilizada com cimento e outros estabilizantes ambientalmente mais amigáveis (cinza volante, carbureto de cálcio e resíduos de concreto reciclado), mostrando que o cimento é o insumo mais impactante. A substituição por cinza volante, além de melhorar o desempenho do material, resulta em menores impactos ambientais.

Miranda e Yuba (2016) avaliaram as emissões de CO₂ e energia incorporada, utilizando a ACV modular (ACV-m), de paredes de taipa de pilão, blocos cerâmicos, blocos de concreto e concreto moldado *in loco*. Quando as microfibras de polipropileno não são consideradas, a taipa de pilão se mostrou mais vantajosa. Martins *et al.* (2018) avaliaram um compósito de solo-cimento reforçado com fibras de sisal e concluíram que o cimento é o material mais impactante e que as distâncias de transporte do solo exerceram grande influência nos resultados. Caldas *et al.* (2020) avaliaram diferentes formulações de argamassa de terra no Brasil e também verificaram que os ligantes químicos (cimento ou cal hidratada) são os insumos mais impactantes.

A partir da pesquisa na literatura é possível concluir que os materiais e sistemas construtivos à base de terra (argamassas, blocos, tijolos e paredes monolíticas) tendem a ser mais vantajosos ambientalmente do que os sistemas convencionais, principalmente aqueles que usam cimento e ou concreto como matéria prima. Nos materiais à base de terra estabilizados quimicamente, a maior parte usa cimento Portland como estabilizante, e esse insumo demonstrou ser o mais impactante. O impacto do cimento pode ser diminuído com o uso de pozolanas, como cinza volante.

Método

Caracterização das configurações da taipa de pilão

Foram avaliadas dezoito configurações da taipa de pilão, adotando uma vida útil de 40 anos (valor mínimo adotado para vedações verticais externas de acordo com a ABNT (2013a), apresentadas a seguir:

- Espessura 10 cm – compactação manual (5%, 10% e 15% de cimento);
- Espessura 10 cm– compactação mecanizada (5%, 10% e 15% de cimento);
- Espessura 20 cm – compactação manual (5%, 10% e 15% de cimento);
- Espessura 20 cm compactação mecanizada (5%, 10% e 15% de cimento);
- Espessura 60 cm - compactação manual (5%, 10% e 15% de cimento);
- Espessura 60 cm - compactação mecanizada (5%, 10% e 15% de cimento);

Foi considerado que o solo tem granulação grosseira e quase adequado para ser usado como taipa no pilão (com cerca de 70% de areia e 30% de argila). Foi adotada uma correção com 10% de areia (em massa), de acordo com informação de um construtor. A partir de entrevistas com construtores e com base no estudo de Miranda e Yuba (2016), foi adotado o cimento Portland CII-Z-32 como estabilizante químico, nos teores de 5%, 10% e 15% (em relação à massa de solo). Foi também considerado microfibras de polipropileno para o combate da retração por secagem, com o consumo de 1,4% em relação à massa de cimento (MIRANDA; YUBA ,2016).

Caracterização dos sistemas construtivos convencionais

As diferentes configurações do sistema de taipa foram comparadas com três sistemas construtivos convencionalmente utilizados no Brasil: (1) alvenaria de blocos cerâmicos estruturais; (2) alvenaria de blocos de concreto estruturais; (3) parede de concreto moldada no local, todas com base no estudo de Souza *et al.* (2016). O sistema de taipa foi comparado com sistemas de vedação estrutural pelo fato de a taipa de pilão ter um potencial de uso como elemento estrutural e ser comumente utilizada para esta função no Brasil (PEIXOTO *et al.*, 2016). Souza *et al.* (2016) também adotaram o referido escopo (apresentado na Figura 2), de onde foi retirado parte dos dados para a modelagem dos sistemas construtivos convencionais que estão apresentados no Quadro 1.

Definição do objetivo, da unidade funcional e do escopo do estudo

A ACV realizada neste estudo tem dois objetivos:

- Objetivo 1: Avaliar potenciais impactos ambientais de diferentes espessuras de taipa de pilão e propor uma curva para estimativa desses impactos com base na espessura da parede de taipa de pilão e no teor de cimento Portland.

- Objetivo 2: Comparar a taipa de pilão com vedações verticais de alvenaria estrutural e parede de concreto moldada no local, com base em critérios de desempenho térmico e acústico, segundo a NBR 15575-4 (ABNT, 2013b).

Quadro 1 – Dados dos sistemas construtivos convencionais – alvenaria de blocos cerâmicos, de concreto e parede de concreto. Com base em Souza et al. (2016)

| Características e materiais utilizados nas paredes | Alvenaria de blocos cerâmicos estruturais | Alvenaria de blocos de concreto estruturais | Parede de concreto moldada no local |
|--|---|--|--|
| Espessura da parede (m) | 0,19 | 0,19 | 0,12 |
| Massa dos blocos - 14 x 29 x 39 cm (kg) | 7,5 | 12 | - |
| Construção da parede (quantidade por 1 m ²) | 97,5 kg de blocos cerâmicos, 15 kg junta de argamassa, e 0,4 kg barras de aço | 156 kg de blocos de concreto, 15 kg junta de argamassa, e 0,4 kg barras de aço | 300 kg de concreto 9,48 kg de barras de aço 22,8 L de água 0,24 L de aditivos |
| Revestimento de argamassa - 2,5 cm de cada lado (quantidade por 1 m ²) | 62,5 kg argamassa de revestimento seca, 5,75 L de água | 62,5 kg argamassa de revestimento seca, 5,75 L de água | - |
| Formas para estrutura (kg/m ²) | - | - | 0,063 kg de Alumínio |
| Vida útil (anos) | 40 | 40 | 40 |

Fonte: os autores.

Com base nos objetivos do estudo de ACV foram utilizadas duas unidades funcionais. Para o objetivo 1 foi utilizada a área de parede de taipa de 1 m², considerando a vida útil de 40 anos, e considerando diferentes espessuras. Para o objetivo 2 foi utilizada a área de parede de taipa e dos outros sistemas construtivos, com 1 m², considerando a vida útil de 40 anos.

No entanto, foi realizado o dimensionamento das espessuras que os sistemas de taipa precisariam ter quando comparadas aos sistemas de alvenaria de blocos cerâmicos estruturais, alvenaria de blocos de concreto estruturais e parede de concreto, com base nos critérios de: transmitância térmica (U) (Eq. 1), capacidade térmica (Ct) (Eq. 2) e Índice de redução sonora ponderado (Rw) (Eq. 3).

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{e_i} + \left(\frac{1}{R_{si} + R_{se}} \right) \quad (1)$$

$$Ct = \sum_{i=1}^n \rho_i \times c_i \times e_i \quad (2)$$

$$R_w = 12 + 5.3 \times M^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

Onde,

- λ_i é a condutividade térmica do material utilizado em cada camada (W/(m.K)).
- e_i é a espessura de cada camada (m).
- R_{si} é resistência superficial interna (m².K)/W
- R_{se} é resistência superficial externa (m².K)/W
- ρ_i é a massa específica do material utilizado em cada camada (kg/m³)
- c_i é o calor específico do material utilizado em cada camada (kJ/(kg.K))
- M é massa por metro quadrado de cada sistema construtivo (kg/m²)

Para o cálculo da espessura foi utilizado o método prescritivo da NBR 15575-4 (ABNT, 2013b) para o U e Ct. Para o Rw foi utilizada a lei das massas, mesma abordagem realizada por Caldas e Carvalho (2018). Para o cálculo das espessuras da taipa foram empregadas as equações 1, 2 e 3. Foram adotados para taipa de pilão os seguintes dados

de condutividade térmica: 0,77 W/m.K, calor específico: 830 J/kg.K e massa específica seca: 1910 kg/m³, com base na média dos valores levantados por Milani (2008) e Jiang et al. (2020). No Quadro 2 são apresentadas as espessuras encontradas de acordo com cada um dos critérios de desempenho e sistema construtivo.

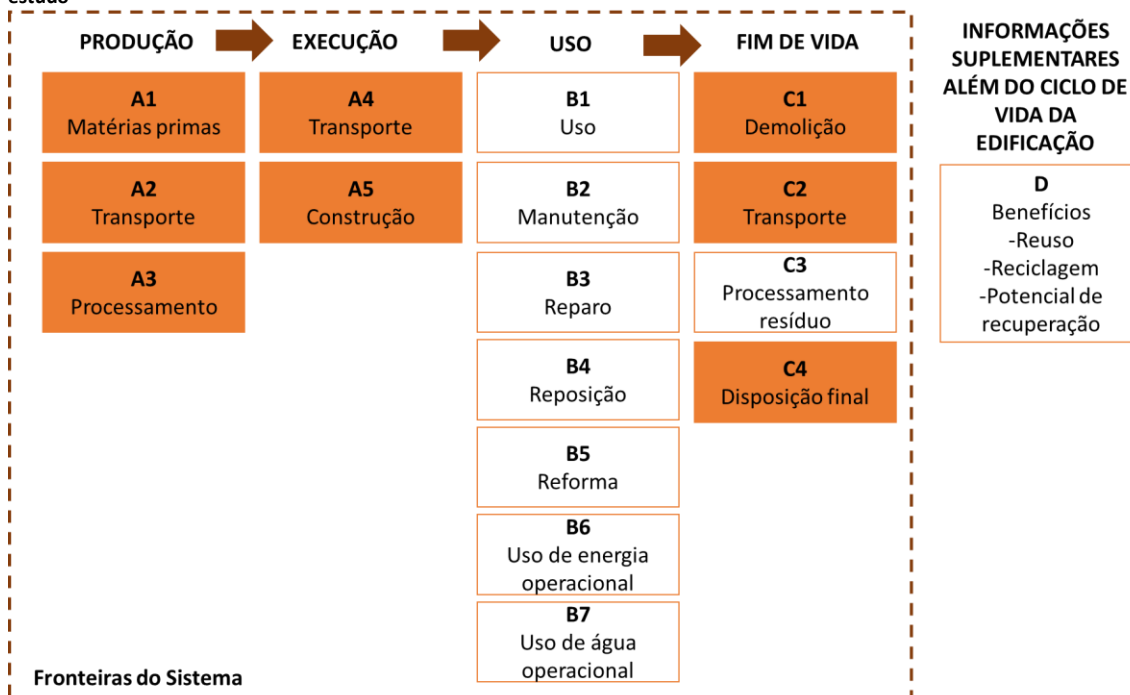
Quadro 2 – Cálculo das espessuras da parede de taipa com base nos critérios de desempenho dos sistemas construtivos convencionais

| Critério de Desempenho | Sistema Construtivo | Valor do critério ¹ | Espessuras parede de taipa (cm) |
|---|---------------------------------|---|---------------------------------|
| Transmitância térmica (U) | Alvenaria de Blocos Cerâmicos | ¹ U de 2,2 W/m ² .K | 22,0 |
| | Alvenaria de Blocos de Concreto | ² U de 2,7 W/m ² .K | 15,5 |
| | Parede de Concreto | ² U de 4,2 W/m ² .K | 5,3 |
| Capacidade térmica (Ct) | Alvenaria de Blocos Cerâmicos | ¹ Ct de 194 kJ/m ² .K | 12,2 |
| | Alvenaria de Blocos de Concreto | ² Ct de 272 kJ/m ² .K | 17,2 |
| | Parede de Concreto | ² Ct de 288 kJ/m ² .K | 18,2 |
| Índice de redução sonora ponderado (Rw) | Alvenaria de Blocos Cerâmicos | ¹ Rw de 41 dB | 6,3 |
| | Alvenaria de Blocos de Concreto | ² Rw de 46 dB | 13,9 |
| | Parede de Concreto | ² Rw de 48 dB | 16,2 |

Notas: ¹Calculado com base nas equações 1, 2 e 3 utilizando dados da NBR 15220-2 (ABNT,2005a); ²retirado de Caldas e Carvalho (2018). Fonte: os autores.

O escopo considerado no estudo está apresentado na Figura 5: produção materiais, transporte até o canteiro de obras, construção, fim de vida (demolição, transporte e aterramento).

Figura 5 – Escopo e fronteiras do estudo com divisão conforme EN 15978 (CEN, 2011). Etapas marcadas em laranja foram as consideradas no estudo



Fonte: os autores.

Análise de inventário

Para a etapa de produção (A1-A4) foram avaliadas as misturas em volume (m³) para posterior avaliação na unidade funcional adotada, em m². Para o inventário do ciclo de vida foram utilizados dados do banco de dados Ecoinvent v. 3.3, com adaptação à realidade brasileira para o consumo de energia elétrica, distâncias de transporte e para o tipo de cimento utilizado. Para o solo foi considerado a produção de argila, com extração mecanizada do material. No caso da areia foram levadas em conta as operações para sua obtenção. Foi utilizado o cimento Portland CP II-Z-32, adotando

parte do banco de dados Ecoinvent, considerando 5% de fíler, 10% de cinza volante, 5% de gesso e o restante de clínquer. O *dataset* do clínquer foi adaptado em termos do consumo de energia elétrica e térmica, e as fontes de energia para a sua produção conforme dados do Balanço Energético Nacional de 2017 (MME, 2018). Para as formas de madeira compensada foi utilizado o dado disponível no Ecoinvent v.3.3, considerando o *dataset plywood*. Como as formas podem ser reutilizadas, os impactos foram divididos pelo número de reutilizações, mesmo procedimento realizado por Souza *et al.* (2016) e Castro *et al.* (2016). O inventário da água de mistura utilizada foi retirado do estudo tendo em vista que sua contribuição foi menor que 1% dos impactos ambientais avaliados.

Para etapa de transporte (A4) foi considerado transporte rodoviário com caminhões de carga de 10-32 toneladas, do tipo EURO 3, disponibilizados no Ecoinvent v.3.3. Para as distâncias de transporte foi calculada a média de três valores prevendo-se uma variação dependendo dos insumos. Os valores definidos foram de 5, 50 e 200 km; 50, 200 e 500 km; 20, 50 e 300 km, 200, 400, 1000 km, para a terra, o cimento, a areia e a forma de madeira, respectivamente. Para as microfibras de polipropileno foi considerado a produção na China, com o transporte marítimo transoceânico, com uma distância de 19.027 km até o Porto de Santos-SP, conforme dados de Miranda e Yuba (2016) e a partir do porto adotou a média de três distâncias de transporte terrestre pelo modal rodoviário, de 200, 400 e 1000 km.

Para o processo mecanizado (A5) foi quantificado o consumo de energia elétrica utilizado pelos equipamentos, sendo considerada a betoneira, compactador pneumático e compressor pneumático, o que resultou em um total de 139,27 kwh para um consumo de solo de 56.712 kg (MIRANDA; YUBA, 2016). Com base nesses dados foi encontrada a relação 0,0025 kWh/kg de solo, que foi adotada para o processo mecanizado.

Para a demolição (C1) foi utilizado dado de Silva (2008) que quantificou 14,4 MJ/t de construção, sendo adotada a atividade de consumo de diesel para máquinas utilizadas em edificações do Ecoinvent v. 3.3.

Para o transporte dos resíduos (C2) foram consideradas a média de três distâncias de transporte (20, 40 e 60 km) e destinação em aterro de resíduos inertes. Para a destinação final (C4) foi considerado que as formas de madeira compensada são enviadas para um aterro sanitário e os resíduos de taipa para um aterro de resíduos inertes, sendo também utilizado o banco de dados do Ecoinvent v. 3.3. No Quadro 3 é apresentado o resumo dos dados utilizados no inventário do ciclo de vida dos sistemas estudados.

Avaliação do impacto do ciclo de vida

Foi utilizado o método de Avaliação de impactos do Ciclo de Vida (AICV) IMPACT 2002+ v. 2.14. Nesse sentido foram considerados as seguintes categorias de danos ambientais: (1) Mudanças Climáticas; (2) Saúde Humana; (3) Qualidade dos Ecossistemas; e (4) Depleção de Recursos. A modelagem foi realizada no software SimaPro v.8.5.

Parametrização dos impactos ambientais

De posse dos impactos ambientais das diferentes configurações da taipa de pilão pesquisadas, os resultados foram parametrizados com base nas espessuras avaliadas, sendo utilizada a regressão, calculadas na planilha eletrônica Microsoft Excel elaborada. Foram obtidas curvas de primeiro grau, dependentes da espessura da parede de taipa (em centímetros). A parametrização pela espessura é importante, especialmente para

o sistema de taipa de pilão, pelo fato de ser um sistema construtivo que na prática projetual é passível de apresentar diferentes espessuras (PISANI, 2004).

Quadro 3 – Inventário utilizado, conjunto de dados e fontes

| Insumos e atividades | Conjunto de dados (<i>datasets</i>) | Fontes |
|--|--|-------------------------------|
| Produção A1-A3 | | |
| Taipa de Pilão | | |
| Extração solo | Clay {RoW} clay pit operation Cut-off, U | Ecoinvent v. 3.3 |
| Obtenção da areia | Sand {RoW} gravel and quarry operation Cut-off, U | Ecoinvent v. 3.3 |
| Produção forma de madeira | Plywood, for outdoor use {RoW} production Cut-off, U | Ecoinvent v. 3.3 |
| Produção cimento | Cement, pozzolana and fly ash 11-35%, non-US {RoW} production Cut-off, U, Clinker {RoW} production Cut-off, U, Electricity, medium voltage {BR} market for Cut-off, U | Ecoinvent v. 3.3 e MME (2018) |
| Produção fibras de polipropileno | Polypropylene, granulate {RoW} production Cut-off, U | Ecoinvent v. 3.3 |
| Sistemas Construtivos Convencionais | | |
| Produção de argamassa (utilizada no revestimento e assentamento de blocos) | Com base em Souza et al. (2016) | |
| Produção concreto usinado | Com base em Souza et al. (2016) | |
| Produção blocos de concreto | Com base em Souza et al. (2016) | |
| Produção blocos de concreto | Com base em Souza et al. (2016) | |
| Transporte até o canteiro de obras (A4) | | |
| Transporte terrestre rodoviário | Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {GLO} market for Cut-off, U | Ecoinvent v. 3.3 |
| Transporte marítimo transoceânico | Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO} market for Cut-off, U | Ecoinvent v. 3.3 |
| Construção (A5) | | |
| Processo de compactação taipa e mistura betoneira | Electricity, medium voltage {BR} market for Cut-off, U | Ecoinvent v. 3.3 |
| Fim de Vida (C, C2 e C4) | | |
| Demolição e aterramento | Diesel, burned in building machine {GLO} market for Cut-off, U | Ecoinvent v. 3.3 |
| Transporte resíduos | Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 {GLO} market for Cut-off, U | Ecoinvent v. 3.3 |

Fonte: os autores.

Resultados e discussão

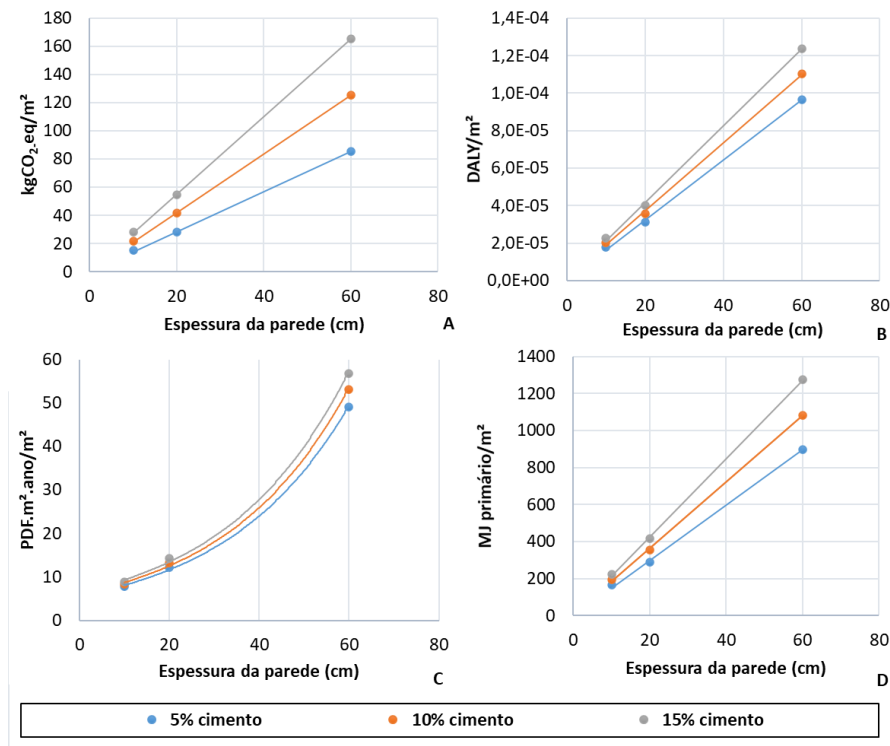
Avaliação ambiental do sistema de taipa de pilão

Na Figura 6 são apresentadas as curvas de potenciais impactos ambientais das configurações de taipa de pilão avaliadas e no Quadro 4 as equações com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) retirados das curvas.

As equações das curvas de impacto apresentadas podem ser utilizadas tanto em projetos de edificações novas como obras de restauro, sendo, portanto, uma das principais contribuições desse trabalho. No entanto, uma limitação é o fato de as curvas terem sido construídas somente com base em três pontos. A tendência mostrada pelas curvas e equações devem ser entendidas como uma primeira aproximação para sistemas de taipas com características similares às apresentadas como dados de entrada e considerando o limite das espessuras adotadas de 10 a 60 cm. De qualquer forma, elas servem como um valor indicativo de potenciais impactos que uma parede de taipa com uma dada espessura e um dado teor de cimento pode ter, facilitando o trabalho de projetistas que querem valorizar os requisitos ambientais em seus projetos.

Na Figura 7, 8 e 9 são apresentadas a contribuição das etapas do ciclo de vida consideradas e os materiais utilizados na produção da taipa de pilão.

Figura 6 – Curvas de potenciais impactos ambientais da taipa de pilão: (A) Mudanças Climáticas. (B) Saúde Humana. (C) Qualidade do Ecossistema. (D) Depleção de Recursos



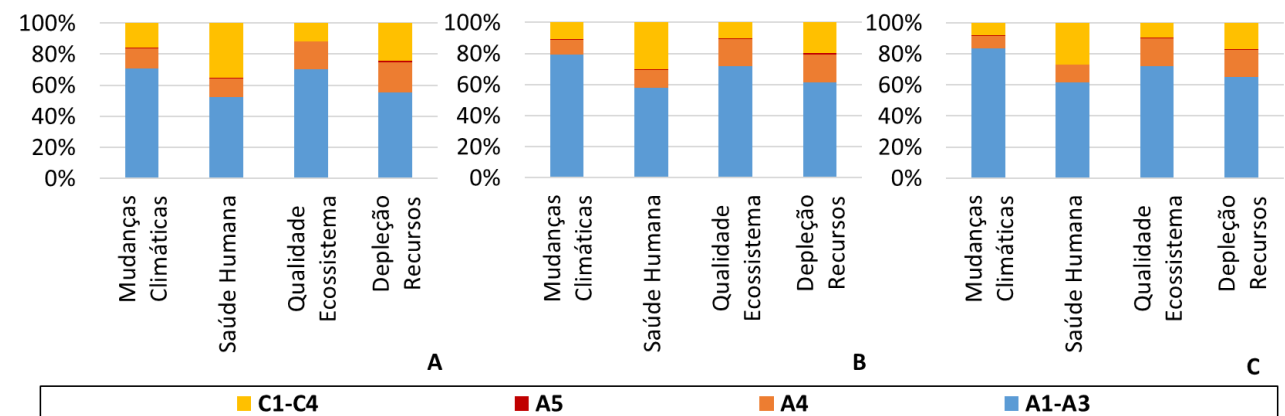
Fonte: os autores.

Quadro 4 – Equações e coeficientes de determinação (R²)

| Mudanças Climáticas | | | Saúde Humana | | |
|--------------------------|------------------------|--------|----------------------|-------------------------|--------|
| Teor de cimento | Equação | R² | Teor de cimento | Equação | R² |
| 5% | $y = 1,4265x$ | 0,9996 | 5% | $y = 2,00E-06x$ | 0,9996 |
| 10% | $y = 2,0807x + 0,4993$ | 0,9999 | 10% | $y = 2,06E-06x + 8E-07$ | 0,9991 |
| 15% | $y = 2,7465x + 0,4006$ | 0,9999 | 15% | $y = 2,20E-06x + 8E-07$ | 0,9993 |
| Qualidade do Ecossistema | | | Depleção de Recursos | | |
| Teor de cimento | Equação | R² | Teor de cimento | Equação | R² |
| 5% | $y = 5,6235e0,0363x$ | 0,9985 | 5% | $y = 14,951x$ | 0,999 |
| 10% | $y = 6,052e0,0364x$ | 0,9977 | 10% | $y = 17,888x + 8,2716$ | 0,9995 |
| 15% | $y = 6,4924e0,0363x$ | 0,9971 | 15% | $y = 21,098x + 5,6653$ | 0,9997 |

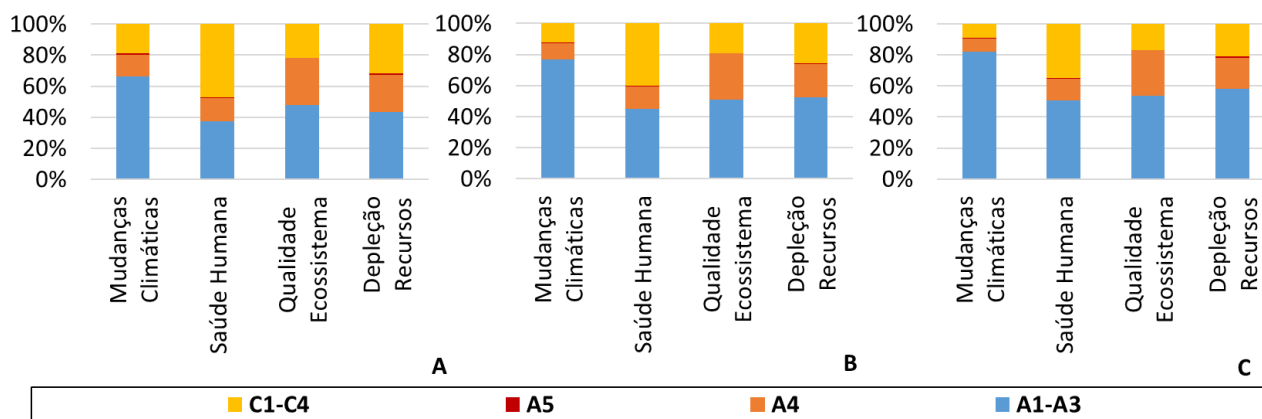
Nota: x = espessura da parede (em cm). Fonte: os autores.

Figura 7 – Contribuição das etapas do ciclo de vida da taipa de pilão de 10 cm: (A) Teor de cimento de 5%. (B) Teor de cimento de 10%. (C) Teor de cimento de 15%



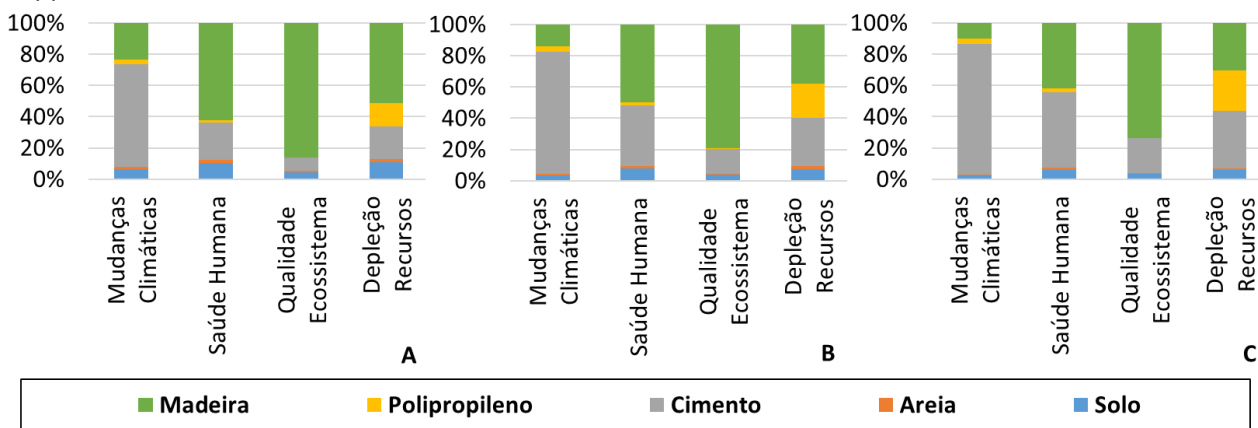
Fonte: os autores.

Figura 8 – Contribuição das etapas do ciclo de vida da taipa de pilão de 60 cm: (A) Teor de cimento de 5%. (B) Teor de cimento de 10%. (C) Teor de cimento de 15%



Fonte: os autores.

Figura 9 – Contribuição dos materiais na etapa de produção (A1-A3) da taipa de pilão de 10 cm: (A) Teor de cimento de 5%. (B) Teor de cimento de 10%. (C) Teor de cimento de 15%



Fonte: os autores.

Observações importantes

Comparando os resultados de Mudanças Climáticas com o estudo de Miranda e Yuba (2016), verificou-se que a maior diferença está no impacto do transporte das microfibras da China até o Brasil. Embora tenha sido utilizado a mesma distância de transporte nos dois estudos, o que provavelmente causou a diferença entre eles foi o inventário utilizado para o transporte marítimo. Enquanto as autoras utilizaram dados da literatura, no presente trabalho foi utilizado dados do Ecoinvent. O transporte marítimo quando comparado ao terrestre pelo modal rodoviário tem impactos muito inferiores, com diferenças de até uma ordem de grandeza, de acordo com o banco de dados do Ecoinvent v.3.3, o que faz distâncias maiores (entre dois países) resultarem em menores impactos. Somado a isso, a participação da massa das microfibras na massa total da taipa é muito menor que a dos demais constituintes. Esses fatos explicam a pequena contribuição do transporte das microfibras entre a China e o Brasil.

O tipo de compactação tem influência insignificante nos impactos ambientais avaliados. Fato que pode ser explicado pelo baixo consumo de energia empregado na atividade de compactação e em função da matriz de energia elétrica brasileira possuir grande participação de fontes renováveis (superior a 70%).

O aumento do teor de cimento produziu aumento principalmente no impacto de mudanças climáticas, corroborando com os resultados encontrados na literatura para materiais de terra (ARRIGONI *et al.*, 2017; MARTINS *et al.*, 2018; MIRANDA, YUBA, 2016).

O cimento é um material que possui elevadas emissões, principalmente devido à calcinação do CaCO_3 e o processo de produção do clínquer (AGOPYAN; JONH, 2011). O aumento de cimento na composição faz elevar também o teor de microfibras de polipropileno. O aumento do teor de fibras é relevante para a o impacto de Depleção de Recursos, devido ao elevado consumo de combustíveis fósseis, principalmente petróleo, para sua produção.

Os impactos do solo e areia foram baixos, por não requererem processamento intensivo.

A forma de madeira utilizada tem importante influência nos impactos avaliados, principalmente na categoria de Qualidade dos Ecossistemas, e essa influência é devida ao uso do gás natural e à extração de madeira.

Quando a espessura da parede aumenta os impactos crescem consideravelmente e de forma proporcional.

Por fim, é importante ressaltar algumas limitações, como o uso de alguns dados do banco de dados do Ecoinvent v. 3.3, que é uma dificuldade comum e recorrente nos estudos de ACV para materiais à base de terra (MARCELINO-SADABA et al., 2017). No Brasil, a formação do primeiro banco de dados nacional se encontra em desenvolvimento. No entanto, para materiais não convencionais, como é o caso daqueles à base de terra, há a necessidade de mais tempo para serem levantados e documentados. Portanto, o uso de banco de dados internacional de forma adaptada pode ser considerado a maneira mais viável de realizar o estudo desses materiais.

Recomendações para melhoria ambiental da taipa de pilão

A seguir são apresentadas algumas recomendações para melhoria ambiental da produção de taipa de pilão, com base nos resultados obtidos na ACV e na revisão da literatura.

Usar solo local

Em locais mais densamente ocupados, essa alternativa pode ser comprometida, como aponta Sameh (2014). Uma solução pode ser o reaproveitamento do “bota fora” de escavações (caso esse tenha propriedades adequadas) que ocorrem na etapa de movimentação de terra em edificações e obras de infraestrutura. O aproveitamento dos resíduos de operações de corte e terraplanagem além de diminuir as distâncias de transporte proporciona uma destinação para um passivo ambiental, evitando os impactos econômicos e ambientais de seu descarte.

Maximizar a reutilização das formas de madeira

Uma alternativa pode ser o uso de formas metálicas, que embora tendem a ter impactos ambientais de produção superiores às de madeira, conseguem ter um número de reutilizações muito superior, como aponta Castro et al. (2016). No entanto, para o caso de projetos de taipa de pilão, onde a repetição não é tão fácil de ser conseguida, talvez seja uma alternativa mais difícil. Talvez no futuro, com a maior difusão dessa técnica construtiva no Brasil, processos similares ao que acontece na Austrália, apresentado por Rocha e Oliveira (2016), possa se tornar uma realidade.

Minimizar o uso de estabilizantes químicos

Atualmente, o estabilizante mais utilizado é o cimento Portland, por ser um ligante hidráulico, de fácil aquisição e capaz de proporcionar boas propriedades mecânicas. Sua quantidade pode ser minimizada com o uso de adições minerais pozolânicas, como por

exemplo cinza volante, metacaulim ou cinzas agroindustriais, como cinza de casca de arroz e de bagaço de cana (PMBC, 2018). O uso de cinzas de outros processos industriais é ainda mais vantajoso do ponto de vista ambiental (caso seja disponível), pois reintroduz na cadeia produtiva um material que até então seria descartado, contribuindo para a circularidade da economia. Como foi mostrado por Arrigoni *et al.* (2017), pode-se dessa forma conseguir resultados satisfatórios de desempenho mecânico e durabilidade associados a menores impactos ambientais.

Minimizar a espessura da parede

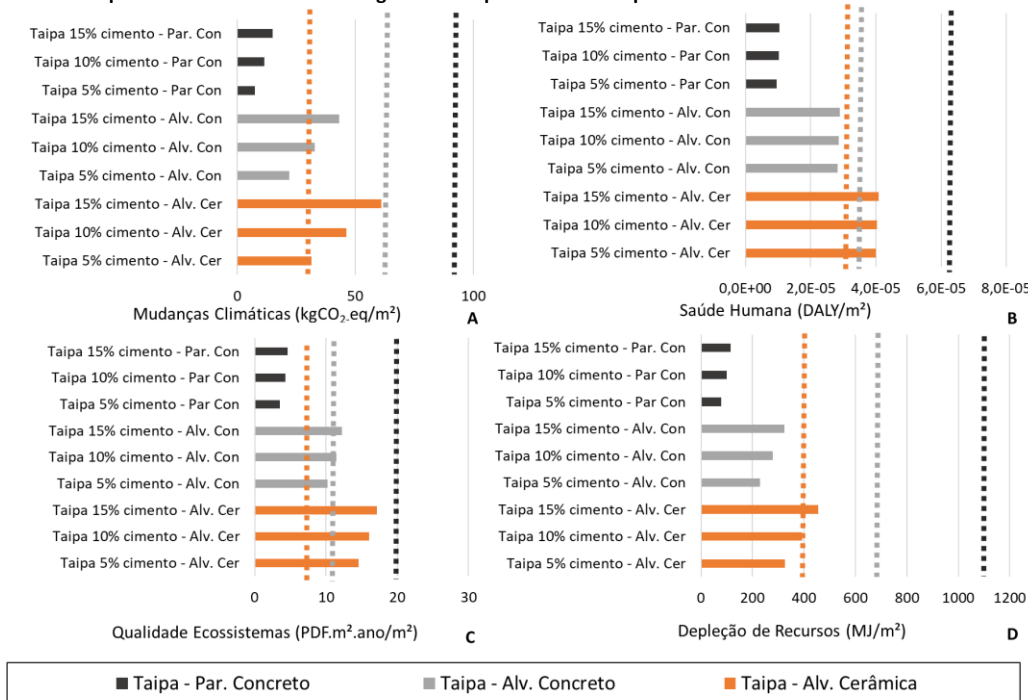
A espessura está relacionada principalmente à estabilidade estrutural, desempenho higratérmico e acústico. Os projetos devem ser pensados para serem otimizados em relação aos requisitos de desempenho, para se conseguir a menor espessura de forma satisfatória.

O processo mecanizado deve ser incentivado pois aumenta a produtividade e a qualidade do acabamento sem aumentar significativamente os impactos ambientais. A qualidade do acabamento pode estar indiretamente relacionada aos impactos ambientais: serviços mal executados tendem a passar por reparos e manutenções mais frequentes. Consequentemente implicam em maior consumo de materiais e geração de maior número de impactos negativos.

Comparação da taipa de pilão com outros sistemas construtivos com base em critérios de desempenho térmico e acústico

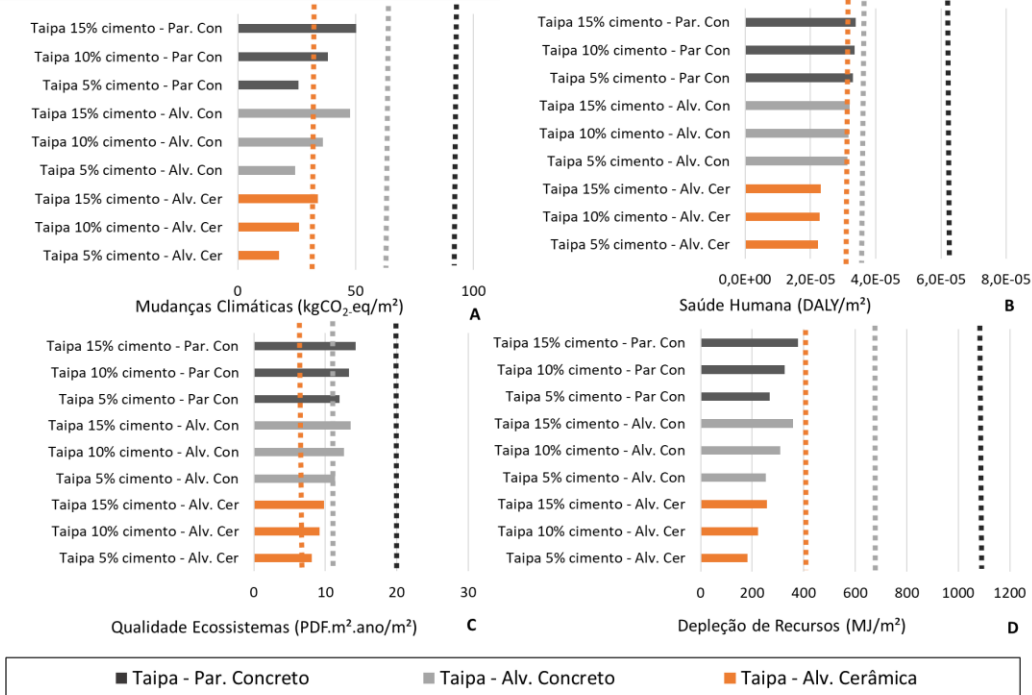
Na Figuras 10, 11 e 12 são apresentadas as configurações estudadas de taipa (com base nas diferentes espessuras da parede) comparadas com os sistemas de alvenaria de blocos cerâmicos, blocos de concreto e parede de concreto quando os critérios de desempenho, U, Ct e Rw, são utilizados, respectivamente.

Figura 10 – Comparação das paredes de taipa de pilão (valores médios) com sistemas construtivos convencionais considerando o critério de transmitância térmica – U: (A) Mudanças Climáticas. (B) Saúde Humana. (C) Qualidade do Ecossistema. (D) Depleção de Recursos. As linhas pontilhadas representam os valores das categorias de impacto ambiental para os sistemas construtivos convencionais



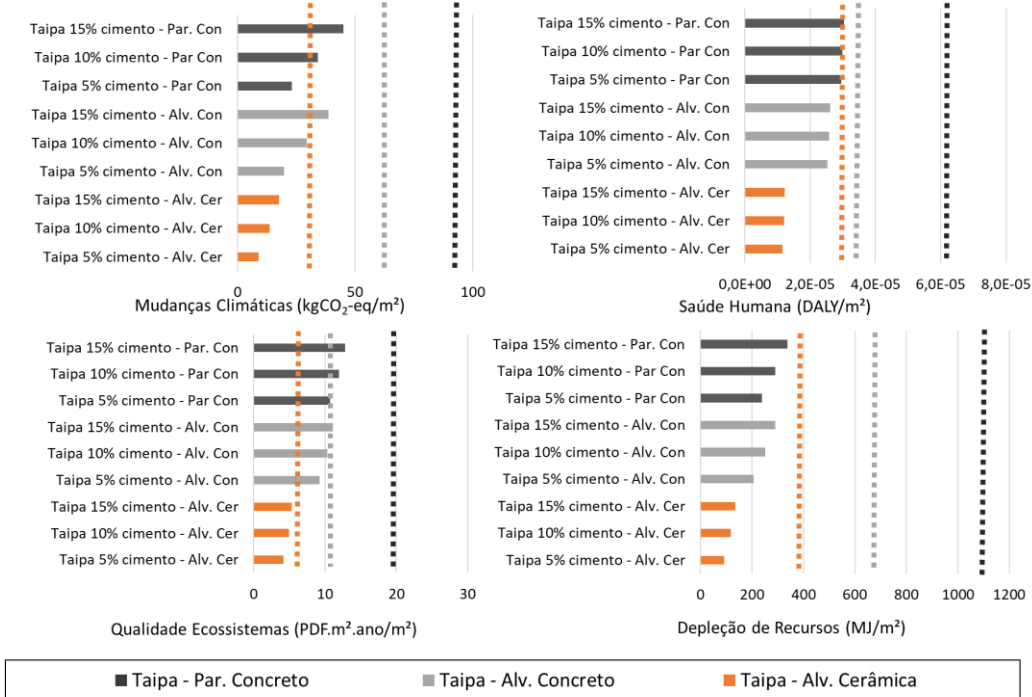
Fonte: os autores.

Figura 11 – Comparação das paredes de taipa de pilão (valores médios) com sistemas construtivos convencionais considerando o critério de capacidade térmica – Ct: (A) Mudanças Climáticas. (B) Saúde Humana. (C) Qualidade do Ecossistema. (D) Depleção de Recursos. As linhas pontilhadas representam os valores das categorias de impacto ambiental para os sistemas construtivos convencionais



Fonte: os autores.

Figura 12 – Comparação das paredes de taipa de pilão (valores médios) com sistemas construtivos convencionais considerando o critério de Índice de redução sonora ponderado – Rw: (A) Mudanças Climáticas. (B) Saúde Humana. (C) Qualidade do Ecossistema. (D) Depleção de Recursos. As linhas pontilhadas representam os valores das categorias de impacto ambiental para os sistemas construtivos convencionais



Fonte: os autores.

O sistema de parede de concreto moldado no local é o mais impactante, entre os sistemas convencionais, de acordo com os dados utilizados, para todas as categorias de impacto avaliadas, enquanto o sistema com blocos cerâmicos é o mais vantajoso.

As paredes de taipa de pilão são mais vantajosas principalmente quando critérios de desempenho influenciados por uma maior massa específica são considerados. Nesse caso quando a C_t e o R_w (quando a lei das massas é empregada) são utilizados. Para esses casos, a alternativa de taipa com teor de cimento de 5% e 10% se apresentam como os mais vantajosos para a maioria das categorias de impacto, a não ser para a categoria de Qualidade do Ecossistema, devido à influência do compensado de madeira utilizado nas formas que pontua negativamente para essa categoria. Por outro lado, para o critério de U e comparando com o sistema de alvenaria de blocos cerâmicos, o sistema de taipa passa a ser mais desvantajoso para a maior parte dos casos.

Dessa forma, surge um questionamento em termos dos critérios de desempenho térmico: o que é mais vantajoso, atender mais satisfatoriamente o critério de U ou C_t ? A primeira alternativa é olhar como esses critérios influenciam em termos das diferentes zonas bioclimáticas (ZB) brasileiras, definidas na NBR 15220-3:(ABNT, 2005b). Para algumas zonas, como por exemplo a “ZB8” (onde se localizam cidades de climas mais quentes e úmidos, tais como Rio de Janeiro, Manaus, Salvador etc.) não é necessário ter um valor mínimo de C_t para atender a NBR 15575-4 (ABNT, 2013b). Enquanto para as zonas bioclimáticas “1” e “2”, onde se localizam cidades de clima mais frio, como por exemplo Curitiba, a transmitância térmica deve ter um valor máximo de $2,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ para atender essa norma. Desta forma, as paredes de taipa de pilão são mais indicadas para climas que requerem uma maior capacidade térmica (inércia térmica) e onde a transmitância térmica é menos relevante.

Para avaliar essa questão de forma mais assertiva teria que ser realizado algum tipo simulação termoenergética computacional, com a inclusão da etapa operacional da edificação e os impactos relacionados ao consumo de energia para climatização artificial, que é uma forma frequente empregada nos estudos de ACV (ANAND; AMOR, 2017; MAHECHA et al., 2020).

É importante ressaltar que a comparação realizada com base no dimensionamento da espessura da taipa de pilão tem influência direta das propriedades físicas consideradas, como massa específica, condutividade térmica e calor específico, que como foi visto, pode variar, principalmente para o sistema de taipa (MILANI, 2008; MANIATIDIS; WALKER, 2003). A massa específica em especial tem influência direta nos três critérios avaliados, já que seu aumento colabora para melhoria dos critérios de C_t e R_w (quando a Lei das Massas é utilizada) e piora do U (já que uma maior massa leva à uma maior condutividade térmica (JIANG et al., 2020)). Saber como essa variação influencia esse tipo de comparação deve ser objeto de futuros estudos. Adicionalmente, uma análise de incertezas entre todas as alternativas construtivas também deve ser realizada, por exemplo, utilizando a simulação Monte Carlo, que também é comumente empregada nos estudos de ACV (ROBATI; DALY; KOKOGIANNAKIS, 2019).

Assim, a taipa de pilão se apresenta como uma alternativa mais competitiva, com considerável vantagem, quando critérios de desempenho térmico e acústico são considerados, principalmente em relação à alternativa de fechamento estrutural massiva, que no caso deste estudo foi o sistema de parede de concreto. O fato de os blocos utilizados na alvenaria serem vazados conferem vantagem em termos do U e, adicionalmente menor consumo de materiais.

Com relação aos dados utilizados no inventário do ciclo de vida, Souza et al. (2016) consideraram para esse sistema o uso de cavacos de madeira, que especialmente para a categoria de Mudanças Climáticas, Qualidade do Ecossistema e Depleção de Recursos resulta em redução de impactos. O uso de cavacos, por ser uma fonte biológica e renovável, de acordo com o método de AICV utilizado (IMPACT2002+) considera

emissões de CO₂ nulas. Tendo em vista que o processo de queima dos blocos cerâmicos é uma das etapas mais impactantes de sua produção (MARCELINO-SADABA *et al.*, 2017), se fosse utilizado outra fonte combustível, por exemplo gás natural, que é comum em algumas olarias do Brasil, os impactos do sistema de alvenaria de blocos cerâmicos aumentariam, como foi verificado no estudo de Martins *et al.* (2018) e Mahecha *et al.* (2020).

A produção das curvas, a partir do processo de regressão, parametrizadas pela espessura da taipa se mostrou uma ferramenta prática quando se quer avaliar e comparar diferentes configurações desse sistema com base em critérios de desempenho. Essa mesma abordagem pode ser empregada e adaptada para a avaliação de outros sistemas construtivos de camada homogênea, como por exemplo, diferentes paredes monolíticas.

Conclusões

A taipa de pilão se mostrou mais vantajosa principalmente quando comparada com sistemas de alvenaria de blocos de concreto estruturais e parede de concreto moldado *in loco*, quando critérios de desempenho térmico e acústico para fachadas são considerados. O cimento e a forma de madeira compensada foram os itens que mais influenciaram nos impactos ambientais.

Os potenciais impactos ambientais no ciclo de vida da taipa de pilão foram parametrizados pela espessura da parede, sendo apresentadas equações obtidas por regressão. Dessa forma, o presente trabalho apresenta como principal contribuição essas equações, que podem ser utilizadas por projetistas, de forma rápida e fácil, para uma primeira estimativa dos potenciais impactos ambientais de diferentes configurações de taipa, com base na espessura da parede e no teor de cimento (considerando as premissas utilizadas neste estudo). Adicionalmente, foram apresentadas algumas recomendações de projeto para uma especificação ambientalmente mais responsável do sistema de taipa de pilão.

Para futuros estudos pretende-se avaliar outros materiais à base de terra, tais como como taipa de mão (pau a pique), adobe e tijolos de solo-cimento, contribuindo assim para a divulgação de informações ambientais desses materiais e uso mais disseminado em projetos de arquitetura e obras correntes, além das aplicações na área de restauração de monumentos históricos. Uma nova modelagem considerando dados mais representativos do contexto brasileiro para os insumos dos sistemas construtivos avaliados (principalmente o cimento, o concreto e os agregados) deve ser realizada, incluindo uma análise de incertezas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio e concessão da bolsa de doutorado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e as valiosas contribuições dos revisores que melhoraram a qualidade do trabalho.

Referências

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**, January, v. 67, n. 1, p. 408-416, jan. 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**. 142, 128 – 136, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.066>.

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

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho Térmico de Edificações. Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho Térmico de Edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações Habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4**: Edificações Habitacionais – Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE. Rio de Janeiro, 2013b.

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, jun. 2018. ISSN 1980-6809. Disponível em: Acesso em: 24 maio 2018. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v9i2.8651552>

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, ago. 2020. DOI: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n4.115-128>

CASTRO, V. M.; et al. Avaliação do ciclo de vida energético (ACVE) e de custos de diferentes formas para paredes de concreto moldadas no local. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais[...]** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

CEN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 15978**: sustainability of construction works: environmental product declarations: core rules for the product category of construction product Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method. Brussels, 2011.

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, jan. 2019. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8651212>

JIANG, B.; WU, T.; XIA, W.; LIANG, J. Hygrothermal performance of rammed earth wall in Tibetan Autonomous Prefecture in Sichuan Province of China. **Building and Environment**. v. 181, n. 15. Aug. 2020, 107128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107128>

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

LOPES, C. A. et al. Medição de manifestações patológicas em paredes de taipa e levantamento dos desperdícios decorrentes. In: CONGRESSO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO COM TERRA NO BRASIL, 6, 2016, Porto. **Anais [...]**. Bauru: São Paulo, 2016.

MAHECHA, R. E. G.; CALDAS, L. R.; GARAFFA, R.; LUCENA, A. F. P.; SZKLO, A.; TOLEDO FILHO, R. D. Constructive systems for social housing deployment in developing countries: a case study using dynamic life cycle carbon

assessment and cost analysis in Brazil. **Energy and Buildings**. v. 227, n. 15, 110395, August 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110395>

MANIATIDIS, V.; WALKER, P. A **Review of Rammed Earth Construction for DTi Partners in Innovation Project ‘Developing Rammed Earth for UK Housing’**. Natural Building Technology Group Department of Architecture & Civil Engineering University of Bath, 2003.

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

MARTINS, A. et al. 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: Rio de Janeiro, 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>

MILANI, A. P. S. **Avaliação Física, Mecânica e Térmica do Material Solo-Cimento-Cinza de Casca de Arroz e Seu Desempenho Como Parede Monolítica**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Agrícola, 2008.

MIRANDA, Aline; YUBA, Andrea Naguissa. 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.

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

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.

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>

PEIXOTO, M. V, S.; SOUZA, L. A. C.; REZENDE, M. A. P. O acervo em taipa de pilão em Minas Gerais e novas estratégias de conservação. In: CONGRESSO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO COM TERRA NO BRASIL, 6, 2016, Porto. **Anais [...]**. Bauru: São Paulo, 2016.

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.

PISANI, M. A. J. Taipas: a arquitetura de terra. **Sinergia-Revista do Centro Federal de Educação Tecnológica de São Paulo**, São Paulo, v. 5, n. 1, 2004.

ROBATI, M.; DALY, D.; KOKOGIANNAKIS, G. A. method of uncertainty analysis for whole-life embodied carbon emissions (CO₂-e) of building materials of a net-zero energy building in Australia. **Journal of cleaner production**, v. 225, p. 541-553, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.339>

ROCHA, R. A. P.; OLIVEIRA, P. H. M. Descrição da técnica de construção com terra estabilizada compactada na Austrália. In: CONGRESSO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO COM TERRA NO BRASIL, 6, 2016, Porto. **Anais [...]**. Bauru: São Paulo, 2016.

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>

SILVA, M. J. J. **Avaliação do consumo energético no processo de demolição de construções**. 2017. 237 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Portugal, 2008.

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, nov.2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.069>

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector**. Global Status Report, 2017.

1 Lucas Rosse Caldas

Engenheiro civil, ambiental e sanitarista. Doutor em engenharia civil. Professor Adjunto A. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Endereço postal: Prédio da Reitoria, Av. Pedro Calmon, 550, Cidade Universitária, Caixa postal: 21941485, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 21941-485

2 Adriana Paiva de Souza Martins

Engenheira civil. Doutora em engenharia civil. Engenheira civil do Campus Universitário. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coppe, Programa de Engenharia Civil. Endereço postal: Cidade Universitária, CT, Bloco B, Caixa postal 68506, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 21945-970

3 Romildo Dias Toledo Filho

Engenheiro civil. Doutor em engenharia civil. Professor Titular. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Coppe, Programa de Engenharia Civil. Endereço postal: Cidade Universitária, CT, Bloco B, Caixa postal 68506, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 21945-970