

Implantação da taipa de pilão como sistema de construção alternativa, quanto ao seu impacto ambiental

Implementation of taipa de pilão as an alternative construction system, as to its environmental impact

Implementación de taipa de pilão como sistema constructivo alternativo, en cuanto a su impacto ambiental

Recebido: 26/09/2022 | Revisado: 08/10/2022 | Aceitado: 10/10/2022 | Publicado: 15/10/2022

Vitor Smayder Nunes Barros

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9731-1870>

Centro Universitário de Goiatuba, Brasil

E-mail: vitorsmayder@gmail.com

Noam Alves Martins Marson

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1906-6291>

Centro Universitário de Goiatuba, Brasil

E-mail: noammarson@gmail.com

Resumo

Este trabalho avaliou os potenciais efeitos ambientais na técnica de construção da taipa de pilão, levando em consideração várias configurações tipicamente encontradas no Brasil. Três teores de cimento Portland foram avaliados: 5%, 10% e 15%. (em massa). As fases de produção e transporte de materiais, construção e conclusão do ciclo de vida da Taipa foram consideradas através da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). As várias configurações dos sistemas de taipa-de-pilão foram contrastadas com uma alvenaria de blocos cerâmicos estruturais, blocos de concreto estrutural e paredes de concreto moldado localmente. Os índices apurados demonstraram que a taipa de pilão é mais vantajosa, principalmente quando a capacidade térmica e o índice de redução de som calculado são levados em consideração na escolha da unidade funcional. Os fatores que mais influenciaram os efeitos ambientais no ciclo de vida do pilo taipam foram a produção de cimento e o tipo de madeira. Por conseguinte, foi possível determinar os potenciais efeitos ambientais do ciclo de vida desta técnica de construção, que foram parametrizados pela espessura da parede e do cimento, com equações derivadas de regressão sendo apresentadas. Também foram feitas recomendações para melhorar o impacto ambiental da taipa de pilão em meio aos problemas ambientais atuais.

Palavras-chave: Análise ciclo de vida; Impactos ambientais; Taipa de pilão.

Abstract

This work evaluated the potential environmental effects of the rammed earth construction technique, taking into account several configurations typically found in Brazil. Three Portland cement contents were evaluated: 5%, 10% and 15%. (in large scale). The phases of production and transport of materials, construction and completion of Taipa's life cycle were considered through the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. The various configurations of the rammed earth systems were contrasted with a masonry of structural ceramic blocks, structural concrete blocks and locally cast concrete walls. The calculated indices showed that the rammed earth is more advantageous, especially when the thermal capacity and the calculated sound reduction index are taken into account when choosing the functional unit. taipam were cement production and wood type. Therefore, it was possible to determine the potential life cycle environmental effects of this construction technique, which were parameterized by wall and cement thickness, with regression-derived equations being presented. Recommendations were also made to improve the environmental impact of rammed earth amid current environmental problems.

Keywords: Life cycle analysis; Environmental impacts; Pestle rammed earth.

Resumen

Este trabajo evaluó los efectos ambientales potenciales de la técnica de construcción con tierra apisonada, teniendo en cuenta varias configuraciones típicas de Brasil. Se evaluaron tres contenidos de cemento Portland: 5%, 10% y 15%. (en masa). Las fases de producción y transporte de materiales, construcción y finalización del ciclo de vida de Taipa fueron consideradas a través de la metodología Life Cycle Assessment (LCA). Las diversas configuraciones de los sistemas de tapial se contrastaron con una mampostería de bloques cerámicos estructurales, bloques de hormigón estructural y muros de hormigón colado localmente. Los índices calculados mostraron que la tierra apisonada es más ventajosa, especialmente cuando se tiene en cuenta la capacidad térmica y el índice de reducción de sonido calculado al elegir la unidad funcional.taipam fueron la producción de cemento y el tipo de madera. Por lo tanto, fue posible determinar los efectos ambientales potenciales del ciclo de vida de esta técnica de construcción, que se parametrizaron por espesor de

pared y cemento, presentándose ecuaciones derivadas de regresión. También se hicieron recomendaciones para mejorar el impacto ambiental de la tierra apisonada en medio de los problemas ambientales actuales.

Palabras clave: Análisis de ciclo de vida; Impactos ambientales; Mortero de tierra apisonada.

1. Introdução

O uso da terra como material de construção é utilizado em grande escala em todo o mundo, em diversos países e raças, e está presente no Brasil desde a colonização pelos portugueses e africanos, sendo utilizado em maior proporção durante o período colonial (Cordeiro et al., 2019).

Como um produto da natureza e em abundância, a terra tem ganhado espaço como fonte de pesquisa por pesquisadores e profissionais no âmbito da engenharia civil, no qual é destaque a rede PROTERRA, Associação Brasileira de Materiais Não Convencionais (ABMTENC), e congressos Terra Brasil.

O motivo pelo interesse impulsivo se vem pelo valor econômico e de fácil acesso, e principalmente pela busca de desenvolvimento ambiental mais sustentável. Além dos valores sucintos no mercado, possui como valor estrutural: hidrotérmico, acústico, resistente à abrasão, sem toxicidade e padrão reciclável (Pacheco-Torgal; Jalali, 2011).

Por ser um material presente na natureza, seu processo de usinagem é menos poluente e com produção de menos energia que os materiais de utilização atual com mesma finalidade, como o cimento, cerâmica e aço (Cordeiro et al., 2019). A maioria dos países compactuaram com a ideia de reduzir a emissão de gases do efeito estufa em seus territórios (GEE), alinhados com os propósitos da Organização das Nações Unidas (ONU) no programa de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Na perspectiva abrangente, é de suma importância que o setor ofereça materiais de menor impacto ambiental, sabendo-se da sua relevância como contribuinte para emissão de poluentes, geração de resíduos, consumo de recursos não renováveis e demanda energética (UNPE, 2017). Assim sendo, a terra como sistema de construção alternativa é suficientemente oportuna para sua utilização e substituição à materiais atuais de maior valor econômico e custo ecossistêmico.

Diante meio dos sistemas de construção apresentados com uso de terra como matéria prima no Brasil, são de grande utilização: blocos de adobe e solo-cimento comprimido, e taipas de mão e pilão. A taipa foi amplamente utilizada no Brasil no período colonial e vem sendo muito utilizado atualmente do modo somente taipa de pilão, Pinheiro et al. (2016).

A taipa de pilão como técnica construtiva foi bastante utilizada em regiões onde as pedras eram um recurso escasso. O que ocorreu desde a colonização, em estados como São Paulo, Bahia, Minas Gerais, Paraná, Mato Grosso e Goiás. Em Goiás a técnica foi eficaz e bem comprometida ao uso, já em regiões com topografia local menos propensa, como de Minas Gerais, seu emprego foi substituído pela taipa de mão adobe.

Atentando-se para o interesse histórico da taipa de pilão no Brasil, o vigente estudo buscou a implementação de: (1) avaliar e validar os possíveis impactos ambientais na vida útil da taipa de pilão, levando em consideração potenciais diversas espessuras, processos de compactação e proporções de cimento (como estabilizante químico); (2) conferir as concepções usuais para a taipa como sistema alternativo de construção; (3) apresentar a finalidade e recomendações para a o desenvolvimento e melhoria de desempenho desse sistema construtivo, como o que está proposto na NBR 17014.

2. Revisão Bibliográfica

A taipa de pilão é um elemento estrutural com alta resistência a compressão e baixa resistência à tração, fator determinante para seu emprego e manuseio. Seu emprego e modulação se faz no próprio local, e possui em sua composição solo, areia em casos de correção, água e estabilizantes químicos, como o cimento e a cal hidratada (Neves, Faria, 2011).

A modulação dita anteriormente se dá por meio de formas de madeira compensada e tirantes de travamento (exemplos nacionais) e compactação por meio de métodos mecânicos ou manual. O manuseio de forma manual se dá pelo uso de pilão e

possui um menor aproveitamento de serviço, sendo assim, a maneira mecânica, defendida por Lopes et al. (2016) a melhor opção de tralho com maior produtividade, qualidade visual, acabamento e uniformidade.

Na Figura 1 temos o exemplo de um sistema híbrido da taipa de pilão, onde se institui uma estrutura metálica em junção com alvenarias em placas de madeira e terra comprimida (taipa de pilão), com destaque para seu acabamento visual bem formulado.

Figura 1 - Taipa de pilão em sistema construtivo híbrido, Pirenópolis – Go.



Fonte: Vieira (2022).

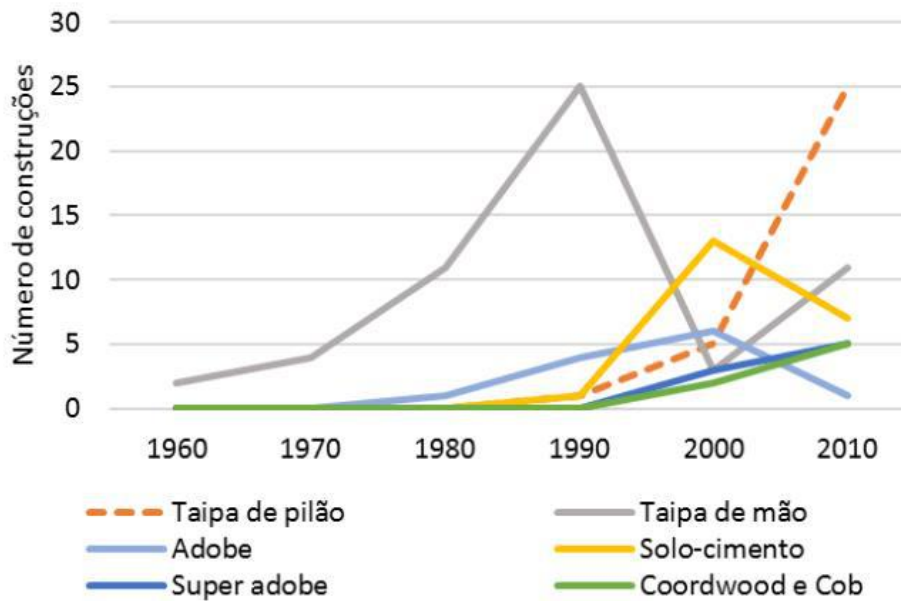
Para estudo de desempenho e comodidade, é válido ressaltar seus dados técnicos de natureza própria:

- Massa específica – autores especificam valores de 1550 kg/m^3 a 2200 kg/m^3 ; Milani (2008): 1550 kg/m^3 a 2000 kg/m^3 ; Maniatidis e Walker (2003) valores máximos de 2200 kg/m^3 ; e recentemente Jiang et al. (2020) com valores de 1730 kg/m^3 a 2200 kg/m^3 e que será nosso ponto de partida.
- Granulometria – variação usual para o solo de cada região e que é corrigido com areia. As características locais vão influenciar na quantidade de ligante químico, sua mistura e propriedades mecânicas (Maniatidis; Walker, 2003; MILANI, 2008).
- Durabilidade – o principal fator de influência na durabilidade está ligado ao seu contato com chuvas e geadas (Maniatidis; Walker, 2003), mas quando é bem protegida de agentes externos, pode ultrapassar uma vida útil de 300 anos, como visto em processos construtivo em São Paulo (Pisani, 2004).
- Propriedades térmicas – valores que correspondem a $0,6 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ a $1,0 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ para a condutividade térmica e $648 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ a $997 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ para o calor específico, Jiang et al. (2020).

Com base na pesquisa sobre as especificações técnicas da taipa de pilão, percebe-se a relação direta de variação de dados pelo fator do solo não ser um material homogêneo, com características de variação para cada região.

Na Figura 2 são apresentadas as variáveis construções com terra com maior espaço no Brasil nos últimos anos. Observa-se que entre os anos de 2000 à 2010, a taipa de pilão teve um crescimento relevante em comparado com outras décadas, onde se concretou principalmente no Estado de São Paulo (Pinheiro et al., 2016). O fator que explica esse acontecimento se dá pela grande concentração de arquitetos, urbanistas e clientes abertos a ideia desse módulo de construção e a existência já nessa época de duas construtoras especializadas em taipa de pilão, iniciadas em 1990 e 2000.

Figura 2 - Progressão do uso da terra como construção civil no Brasil.



Fonte: Pinheiro et al. (2016).

Na pesquisa e banco de dados brasileiro, a taipa de pilão vem sendo estudada na perspectiva de suas manifestações patológicas e desgastes, Lopes et al. (2016). Os autores Peixoto, et al., (2016) observaram a parte cultural que se diz respeito à taipa de pilão e sua magnitude em uso e acervo existente em Minas Gerais e sua ausência construtiva no período colonial, enfatizando sua importância como propriedade histórica brasileira e por isso, a importância sua preservação.

Nesse cenário, onde é claro seu patrimônio cultural e crescimento de interesse por essa técnica construtiva alternativa dos profissionais da construção civil e clientes, é de suma importância que além dos aspectos estéticos e tecnológicos, o estudo de sua objetividade como preservação ambiental, desempenho e normativa prorrogada em janeiro de 2022. Para este fim, a sistematização de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) será explorada para buscas de potenciais impactos ambientais no ciclo de vida de diferentes sistemas construtivos, inclusive nos alternativos usuais de terra, além de análise da importância do avanço de uma norma específica para taipa de pilão.

2.1 ACV em técnicas de construção com terra diante outros autores

Na literatura recente, com menos de 10 anos para a atualidade, alguns autores aplicaram as técnicas de ACV para estudo e análise de materiais e sistemas à base de terra, e merecem o respaldo nesse trabalho. Serrano et al. (2013) investigaram uma parede terra-estabilizada com material micro encapsulado de mudança de fase, obtendo melhores propriedades térmicas. O desempenho termodinâmico e ambiental foi avaliado usando experimentos e ACV, respectivamente. A análise também resultou em dados que para melhorar as propriedades térmicas com materiais micro encapsulado de mudança de fase, ocorre um aumento vertiginoso nos impactos ambientais.

Em 2014, Melià et al., ao comparar os impactos ambientais de argamassas de revestimento à base de terra com o modelo convencional composto de cimento e cal hidratada, obteve um melhor desempenho do não convencional. Christoforou et al.

(2016) avaliaram os impactos ambientais de materiais convencionais, como o tijolo de adobe, para sistemas de alvenaria, superando os materiais industrializados em termos de desempenho.

Marcelino-Sadaba et al. (2017) utilizaram o ACV para avaliar os tijolos cerâmicos queimados e não queimados e descobriram que o processo de queima é um dos mais prejudiciais para o meio ambiente devido à utilização de combustíveis fósseis, sendo as placas cerâmicas não queimadas de menor impacto ambiental. Por outro lado, alcançaram um desempenho mecânico ruim. Seguindo essa perspectiva, os autores destacaram a importância de definir claramente onde cada tipo de tijolo deve ser utilizado para tirar o aproveitamento máximo de cada um.

Arrigoni et al. (2017) usaram o ACV para investigar terra compactada estabilizada com cimento e outros estabilizadores ecologicamente melhores (cinza volante, carbureto de cálcio e resíduos de concreto reciclado). Diante disso, descobriu-se que o cimento possui um maior impacto ambiental e menor desempenho, em vista que a cinza volante supriu positivamente todas essas expectativas.

Miranda e Yuba (2016) utilizaram a Análise de Ciclo de Vida modular para diagnósticos de emissão de CO₂ e energia incorporada em diversos sistemas construtivos para comparação com a taipa: blocos cerâmicos, blocos de concreto e concreto moldado in loco. Quando não há admissão das microfibras de polipropileno, a taipa de pilão apresentou maior vantagem. Martins et al. (2018) em meio a avaliações de compósitos de solo-cimento reforçado com fibras de sisal e constatou-se que o cimento é amplamente impactante nos resultados de desempenho, assim como a distância de transporte do solo até o local desejado. Caldas et al. (2020) com análises de formulações de argamassa de terra no Brasil, concluíram que os insumos cimento e cal-hidrata são os ligantes químicos mais impactantes.

Fundamentado na pesquisa bibliográfica, pode-se concluir que os materiais e sistemas à base de terra (argamassas, blocos, tijolos e paredes monolíticas) apresentam impactos ambientais inferiores aos característicos dos sistemas convencionais, particularmente os que utilizam cimento ou concreto como matéria prima. O uso do cimento Portland como estabilizante químico para materiais à base de terra, mostrou-se possuir um maior impacto aplicado. A influência do cimento pode ser reduzida com o uso de pozolanas, como a cinza volante.

Para exploração das configurações da taipa de pilão, foram analisados dezoito modelos com vida útil de 40 anos, (segundo valor mínimo da ABNT 2013a), com espessuras usuais de 10, 20 e 60 centímetros, como apresentados a seguir:

- Espessura de 10 centímetros, compactação manual/mecanizada (teor de 5%, 10% e 15% de cimento);
- Espessura de 20 centímetros, compactação manual/mecanizada (teor de 5%, 10% e 15% de cimento);
- Espessura de 60 centímetros, compactação manual/mecanizada (teor de 5%, 10% e 15% de cimento).

Determinou-se que o solo tem granulação grosseira e proximidade de adequação para uso como a taipa de pilão (valores em torno de 70% de areia e 30% de argila). Segundo informações de uma empreiteira, foi utilizada uma correção com 10% de areia. Com base em entrevistas com construtores e nos achados de Miranda e Yuba (2016), o cimento Portland CPII-Z-32 é o que melhor corresponde como estabilizador químico nas porcentagens de 5%, 10% e 15% com relação à massa do solo. Microfibras de polipropileno também foram consideradas para o combate à retração por secagem, com consumo de 1,4% da massa de cimento integral (Miranda; Yuba, 2016).

2.2 Taipa de pilão conforme a NBR 17014

Ao final das décadas passadas (1984-1989), foram aprovadas e vigentes 14 normas para solo-cimento, sob a direção do CEPED (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Bahia), IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) e ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland).

Esse processo levou ao desenvolvimento progressivo quanto a produção e aprovação de novas normas de desempenho envolvendo o uso majoritário da terra, incluindo a taipa.

Sob a coordenação de Milani (2020), a NBR 17014 – Taipa de Pilão – Requisitos, foi explanada e levada à consulta nacional ao final de 2021, onde, posteriormente foi aprovada em 2022.

Pelas diretrizes da ABNT destaca-se a construção da norma pautada na participação equilibrada das seguintes Partes Interessadas:

- Produtor;
- Consumidor Intermediário;
- Consumidor Final;
- Órgãos Técnicos;
- Fornecedor de Insumos;
- Órgão regulador/regulamentador/acreditador;
- Organismo de avaliação da conformidade;
- Fornecedor do serviço;
- Empresa de Capacitação;
- Empresa onde o sistema será implantado;
- Empresa implantadora do sistema;
- Pessoas objeto da qualificação;
- Empresa que fornece a mão de obra;
- Empresa que utiliza a mão de obra.

A presente norma tornou esse trabalho mais ambicioso, em vista que as condições de destaques, se positivas, tornam a taipa de pilão uma construção alternativa segura em fatores de desempenho, econômico e ambiental.

3. Métodos

3.1 Definições de processos construtivos convencionais

As inúmeras definições da taipa foram comparadas aos seguintes sistemas construtivos comumente usados no Brasil, de acordo com o estudo de Souza et al (2016):

- Alvenarias de blocos cerâmicos estruturais;
- Alvenarias de blocos de concreto estrutural;
- Paredes de concreto moldada no local.

Como a taipa de pilão tem potencial para ser utilizada como elemento estrutural e é comumente utilizada para esse fim no Brasil, o sistema foi comparado ao modelo de vedação estrutural.

3.2 Objetividade da análise primária anterior à norma

A Análise de Ciclo de Vida realizada buscou informação dos seguintes seguimentos:

- Avaliação de potenciais impactos ambientais de várias espessuras de taipa de pilão e fornecer uma curva para estimar essa problemática com base nos dados obtidos e no teor de cimento Portland;
- Análise de desempenho da taipa de pilão como vedação estrutural em alvenarias, com fundamentação em critérios térmicos e acústicos, conforme NBR 15575-4 (ABNT, 2013).

O Quadro 1 mostra as propostas que foram formuladas em contrapartida ao sistema taipa, com dados do sistema de construção convencional. A análise do que está exposto ao mercado, servirá de norteamento ao que se propõe o nosso trabalho e seu grau de relevância para estudos futuros.

Quadro 1 – Dados dos sistemas construtivos presente na pesquisa e nos estudos de 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	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: Autores.

Dois unidades funcionais foram utilizadas para atender aos objetivos do estudo ACV. Para o primeiro escopo, foi utilizada somente a área de parede da taipa de pilão com 1m², com expectativa de vida de 40 anos e várias espessuras foram consideradas. Para o segundo escopo, foi utilizada uma área de 1m² de parede para a taipa e também outros sistemas construtivos, com expectativa de vida útil de 40 anos.

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{e_i} + \left(\frac{1}{R_{si} + R_{se}} \right) \quad (0.1)$$

$$Ct = \sum_{i=1}^n \rho_i * c_i * e_i \quad (0.2)$$

$$R_w = 12 + 5.3 * M^{\frac{1}{3}} \quad (0.3)$$

λ_i = condutividade térmica $\left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$;

e_i = espessura da camada (m);

R_{si} = resistência superficial interna $\left(\frac{m^2 \cdot K}{W} \right)$;

R_{se} = resistência superficial externa $\left(\frac{m^2 \cdot K}{W} \right)$;

ρ_i = massa específica do material por camada $\left(\frac{kg}{m^3} \right)$;

c_i = calor específico do material por camada $\left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$;

M = massa por metro quadrado de cada módulo $\left(\frac{kg}{m^2} \right)$.

Para compararmos a taipa de pilão com sistema de alvenaria de blocos cerâmicos/estruturais (em relação a transmitância térmica (equação 0.1), capacidade térmica (equação 0.2) e índice de redução sonora ponderada (equação 0.3)), é preciso dimensionar as espessuras das alvenarias convencionais e comparativo com a taipa para que sejam ideais ao caso, como foi feito no Quadro 2 por seguinte.

Quadro 2 - Cálculos com base nos dados propostos e no critério de desempenho presente em norma NBR 15220-2. Fonte: os autores.

Critério de desempenho	Sistema construtivo	Valor de critério	Espessura da parede (cm)
Transmitância térmica	Alvenaria de bloco cerâmico	2,2	22
	Alvenaria de bloco de concreto	2,7	15,5
	Parede de concreto	4,2	5,3
Capacidade térmica	Alvenaria de bloco cerâmico	194	12,2
	Alvenaria de bloco de concreto	272	17,2
	Parede de concreto	288	18,2
Índice de redução sonora ponderada	Alvenaria de bloco cerâmico	41	6,3
	Alvenaria de bloco de concreto	46	13,9
	Parede de concreto	48	16,2

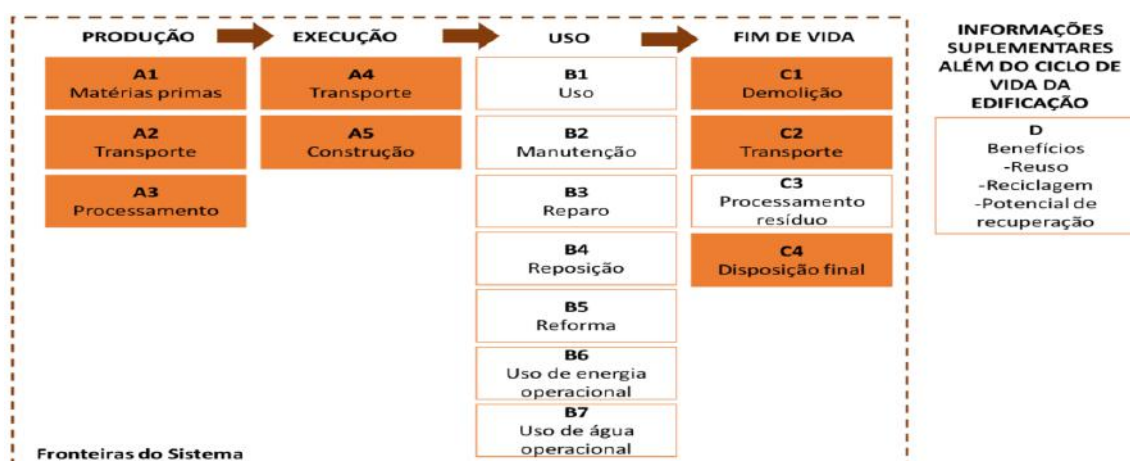
Fonte: Autores.

Percebe-se que aos sistemas construtivos convencionais para atingir desempenhos em termos térmicos e acústicos, a parede possui uma espessura considerável. Essa fonte servirá de análise comparativa para propor as vantagens e desvantagens do sistema taipa.

Os métodos de abordagem para cálculos foram de acordo com a NBR 15575-4 para o dimensionamento de espessuras, e lei das massas para o índice de redução sonora ponderada. Dados de condutividade para taipa de pilão: $0,77 W/m.K$, calor específico: $830 J/kg.K$ e massa específica seca: $1910 kg/m^3$, valores médios encontrados por estudos de Milani (2008) e Jiang et al. (2020). Os resultados foram apresentados no Quadro 2 e estão de acordo com os critérios de desempenho e sistema construtivo.

O escopo de pesquisa está apresentado na Figura 3 nos dará aspectos à cerca de procedimentos construtivos e será válido para resultados de pesquisas posteriores, Caldas, et al., (2021).

Figura 3 - Escopo representativo com dados em laranja do que foi fonte de pesquisa para tabelas seguintes.



Fonte: Caldas, Martins e Toledo Filho (2021).

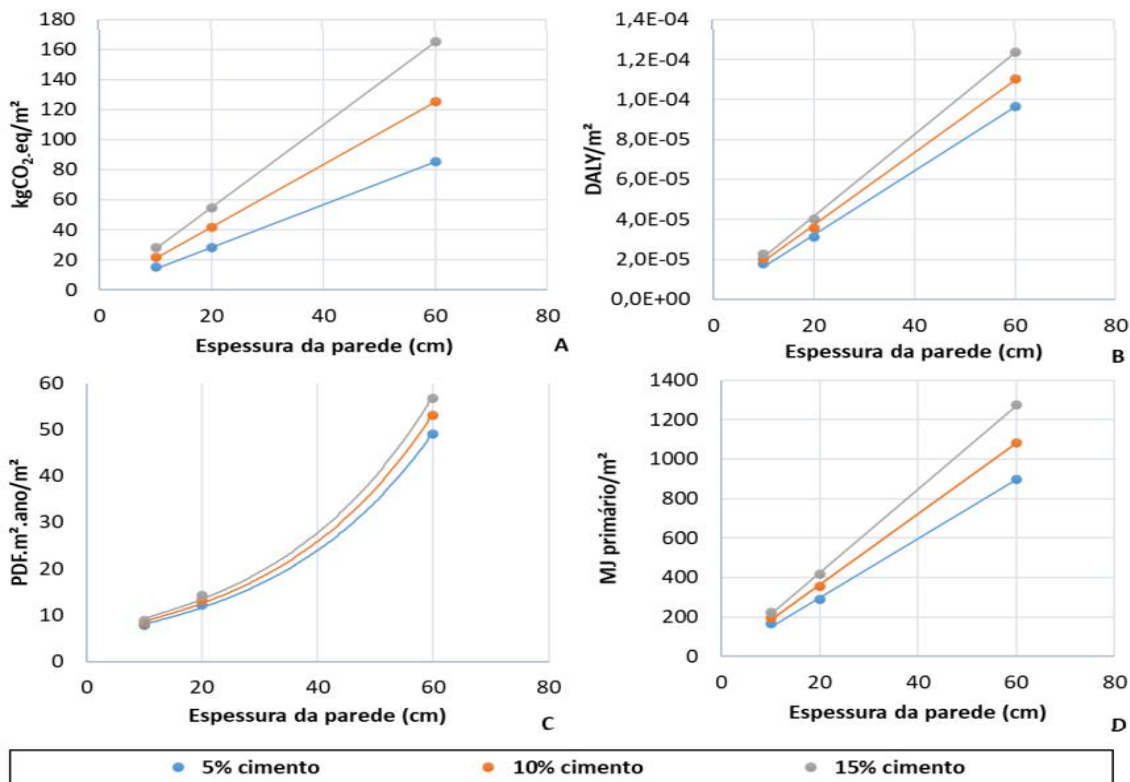
As etapas que prosseguem a cor em destaque (produção, execução e fim de vida) dizem sobre o que será analisado nesse trabalho e que possui um impacto relevante no resultado final.

3.3 Validação da taipa de pilão como processo construtivo diante impactos ambientais

As equações traçadas a seguir são de utilização para obras novas e reparos, sendo de grande relevância nessa pesquisa. A tendência apresentada pelas curvas e equações deve ser interpretada como uma primeira aproximação para sistemas de taipas com características semelhantes às apresentadas como dados de entrada, tendo em conta a restrição de 10 a 60 cm. De qualquer forma, servem de guia para os potenciais impactos que uma parede de taipa com determinada largura e determinado teor de cimento pode ter, facilitando o trabalho dos gerentes de projeto.

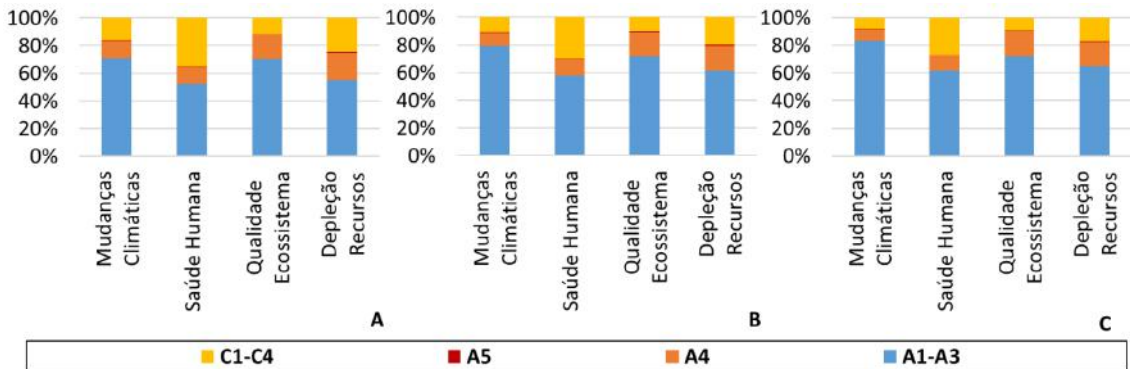
A contribuição das etapas consideradas no ciclo de vida, bem como os materiais utilizados na produção da taipa de pilão, será apresentada nas Figuras 4, 5 e 6, assim como também um cálculo matemático de auxílio a projetistas no Quadro 3 consequente.

Figura 4 - Gráficos de eventuais impactos ambientais quanto à taipa de pilão, caracterizados pelo teor de cimento: (A) Mudanças Climáticas. (B) Saúde Humana. (C) Qualidade do Ecossistema. (D) Depleção de Recursos. Fonte: Caldas, Martins e Toledo Filho (2021).



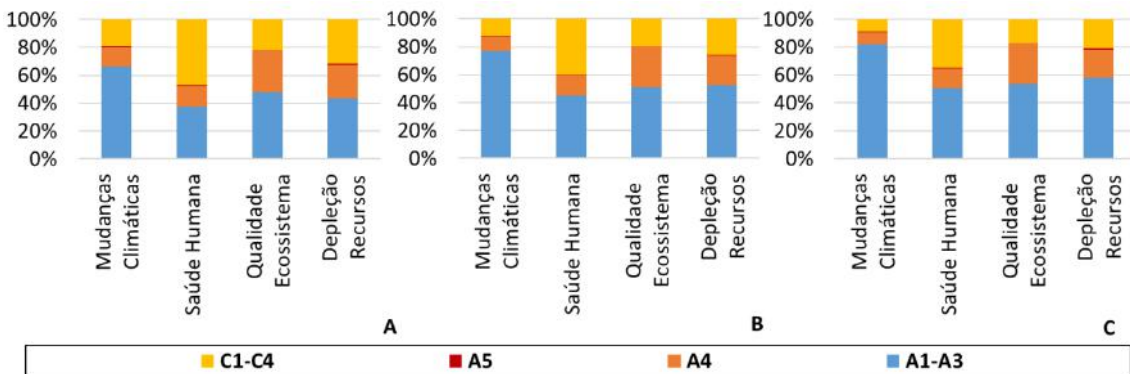
Fonte: Caldas, Martins e Toledo Filho (2021).

Figura 5 - Análise do Ciclo de Vida da taipa de pilão de 10 cm de acordo com os processos construtivos: Teor de cimento de 5%, 10% e 15% respectivamente a ordem A, B e C.



Fonte: Caldas, Martins e Toledo Filho (2021).

Figura 6 – Análise do Ciclo de Vida da taipa de pilão de 60 cm de acordo com os processos construtivos: Teor de cimento de 5%, 10% e 15% respectivamente a ordem A, B e C.



Fonte: Caldas, Martins e Toledo Filho (2021).

Quadro 3 - Equação para determinar fatores climáticos, de acordo com a espessura da parede (x).

Teor cim. (%)	Mudanças clim.	Saúde humana	Qual. Ecosistema	Depleção recursos
	Equação	Equação	Equação	Equação
5	$y=1,4265x$	$y=2E-06x$	$y=5,623e0,0363x$	$y=14,951x$
10	$y=2,0807x+0,04993$	$y=2,06E-06x+8E-07$	$y=6,052e0,0364x$	$y=17,888x+8,2716$
15	$y=2,7465+0,4006$	$y=2,2E-06x+8E-07$	$y=6,4924e0,0363x$	$y=21,098x + 5,6653$

Fonte: Caldas, Martins e Toledo Filho (2021).

As últimas figuras e quadros pressupostos representam nosso ponto de conclusão e inclusão desse trabalho, através deles que será feito todo o comparativo de impactos ambientais positivos e negativos, e sua relação direta com a espessura de um sistema construtivo.

4. Resultados e Discussão

O presente trabalho teve como base para resultados esperados várias fontes de pesquisa que foram analisadas e serão justificadas, em sua maioria com resultados de pesquisa pressuposto, e com dimensões de impacto que podem ser substancialmente analisadas mais a fundo em tempos superiores.

Com vários atos prorrogativos na última década, é de relevância ressaltar que foi de suma importância demarcar os seguintes tópicos quanto a análise de impactos ambientais:

- A compactação pouco teve importância na análise ACV, em vista que obteve impacto ambiental irrelevante. O que pode ser explicado pelo baixo consumo de energia em sua execução e alta disposição de fontes renováveis de energia em território brasileiro;
- De acordo com a pesquisa de Martins, Miranda e Yuba, e nossa análise técnica ACV, seguiu os resultados já esperados à análise do cimento como principal causador de impacto de mudanças climáticas, onde quanto maior seu teor de uso, maiores os danos;
- Caso conseguinte do cimento é sua depleção de recursos naturais, fator associado ao consumo de combustíveis fósseis para sua produção, sobretudo o petróleo (resultantes da calcinação do CaCO_3 e obtenção do clínquer);
- Obtenção de solo e areia não possui impactos negativos, devido ao fácil acesso e processamento;
- A madeira de acordo com o aspecto de utilização possui impacto relevante, influência causada ao uso de gás natural à sua extração;
- Impactos ambientais quanto à espessura da parede aumentam de forma progressiva, quanto maior a espessura, maior serão os impactos negativos;

A base de dados analisada está de acordo com o banco de dados internacional (Ecoinvent v.3.3), em consequência da falta de um banco de dados nacional pressuposto a análises de construções alternativas não convencionais, que ainda está em desenvolvimento e servirá de primícia de elevação de dados futuroso, e que poderá ser diagnosticado de maneira mais rápida e abrangente.

4.1 Possíveis orientações para redução de impactos ambientais

De acordo com os resultados obtidos, será de importância para casos futuros, observar as seguintes orientações de estudos para proporcionar soluções coesivas aos impactos da taipa de pilão ao meio ambiente.

4.1.1 Disposição de solo local

Como pesquisa futura, espera-se buscar soluções quanto ao uso local de solo, para evitar danos decorrentes da sua locomoção em território distantes.

Será de estudo a análise de possível uso da terra do “bota-fora”, principalmente em regiões demasiadamente ocupadas. Dessa forma, a movimentação de terra em edificações e obras de infraestrutura pode ser útil como solução para obras de taipa de pilão em retornos econômicos e ambientais positivos.

4.1.2 Reutilização e uso de formas de materiais alternativos

A madeira possui grande impacto à sua utilização, e a busca de formas alternativas se torna necessária. Será de estudo posterior a análise de uso de formas metálicas, que apesar de impactos ambientais superiores à sua produção, sua reutilização é maior, Castro et al. (2016).

4.1.3 Reduzir o uso de estabilizantes químicos

Neste momento, o cimento Portland continua sendo o estabilizante químico com maior utilização em conjunto a taipa de pilão, devido suas elevadas propriedades mecânicas. O uso de adições minerais pozolânicos, como a cinza volante, já foi comprovado sua eficiência neste trabalho, o que já resolve parte da sua problemática à redução do teor de cimento. Entretanto, os resultados podem ser aprimorados com o uso de cinzas de outros processos industriais, Arrigoni et al. (2017). A disponibilidade dessa alternativa em elevadas proporções servirá para trabalhos futuros.

4.1.4 Minimizar a espessura da parede

A espessura de uma alvenaria está associada diretamente à sua estabilidade, desempenho termoacústico. Portanto, além de impactos ambientais, a taipa de pilão possui aspectos de qualidade a ser pensados em projeto, o contraponto está em sua otimização a obter a menor espessura de forma satisfatória.

O erro humano em execução de obras é pressuposto em maior consumo de materiais e maior geração de impactos negativos: serviços mal executados passam por reparos e manutenções com maior frequência.

Então minimizar ainda mais a espessura da parede será um trabalho de desempenho difícil e com demanda de qualidade negativa. O processo mecanizado de execução é proporcionado como melhor resposta a esse modelo alternativo e sua relevância em qualidade de acabamento e impactos ambientais é um resultado esperado. A disposição de dados comparativos do modelo de execução manual e mecanizado estará disponível em estudos posteriores.

5. Conclusão

Neste estudo, o sistema de taipa de pilão apresentou vantagens acentuadas em comparação com sistemas moldados em concreto, sob critérios de desempenho térmico. O cimento como principal aditivo e o uso da madeira como forma provou-se como os maiores causadores de danos ambientais, com correções apresentadas ao longo do trabalho.

Os impactos ambientais foram diagnosticados por parametrização da espessura da parede, que agora pode ser controlada pelas equações pressupostas. A disponibilidade das mesmas ajudará projetistas e engenheiros a lidar com as situações corriqueiras e atender as necessidades da obra.

Em recomendação para trabalhos futuros, pretende-se responder as questões do módulo 4 de maneira mais aprofundada, além dos possíveis testes e análises de validação de outros materiais à base de terra como modelos construtivos, tais como a taipa de mão e adobe, o que será de grande contribuição para aceitação ainda maior desses modelos de construção com uso majoritário da terra.

Referências

- Arrigoni, A., Beckett, C., Ciancio, D., & Dotelli, G. (2017). Life cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilised rammed earth. *Construction and Building Materials*, 142, 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.066>
- ABNT. (2009). NBR ISO 14040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- ABNT. (2005). NBR 15220 - 2: Desempenho térmico de edificações. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- ABNT. (2022). NBR 17014: Taipa de pilão – Requisitos, procedimentos e controle. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- ABNT. (2013). NBR 15575 - 4: Edificações Habitacionais – Desempenho. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- Cordeiro, C. C. M., Brandão, D. Q., Durante, L. C., & Callejas, I. J. A. (2019). Construções vernáculas em terra: perspectiva histórica, técnica e contemporânea da taipa de mão. *PARC Pesquisa Em Arquitetura E Construção*, 10, e019006–e019006. <https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8651212>
- Caldas, L. R., Filho, R. D. T., Martins, A. P. S., & Paiva, R. L. M. (2020). Argamassas de terra x convencionais: validação do desempenho ambiental considerado no ciclo de vida. *MIX Sustentável*, 6(4). <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/4120>

- Caldas, L. R., Filho, R. D. T., & Martins, A. P. S. (2021). Construção com terra no Brasil: Avaliação ambiente de taipa de pilão. https://www.researchgate.net/publication/353166958_Construcao_com_terra_no_Brasil_avaliacao_ambiental_da_taipa_de_pilao.
- Castro, V. M., *et al.* (2016) ACVE e diferentes formas para paredes de concreto moldadas no local. *Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído*, 16. São Paulo.
- Christoforou, E., Kylili, A., Fokaides, P. A., & Ioannou, I. (2016). Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of adobe bricks. *Journal of Cleaner Production*, 112, 443–452. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.016>
- Jiang, B., Wu, T., Xia, W., & Liang, J. (2020). Hygrothermal performance of rammed earth wall in Tibetan Autonomous Prefecture in Sichuan Province of China. *Building and Environment*, 181, 107128. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107128>
- Lopes, C. A. *et al.* (2016). Medição de manifestações patológicas em paredes de taipa e le vantamento dos desperdícios decorrentes. *Congresso de arquitetura e construção com terra no brasil*, São Paulo.
- Maniatis, V., & Walker, P. (2003). A Review of Rammed Earth Construction for DTi Partners in Innovation Project “Developing Rammed Earth for UK Housing.” <https://people.bath.ac.uk/abspw/rammedearth/review.pdf>
- Marcelino-Sadaba, S., Kinuthia, J., Oti, J., & Seco Meneses, A. (2017). Challenges in Life Cycle Assessment (LCA) of stabilised clay-based construction materials. *Applied Clay Science*, 144, 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.05.012>
- Paiva, A., Caldas, L., Paiva, R. & Filho, R. D. T. (2018). Avaliação do ciclo de vida de compósitos solo, cimento e fibras de si saI considerando diferentes distâncias de transporte. *Congresso de arquitetura e construção com terra no brasil*, Rio de Janeiro.
- Melià, P., Ruggieri, G., Sabbadini, S., & Dotelli, G. (2014). Environmental impacts of natural and conventional building materials: a case study on earth plasters. *Journal of Cleaner Production*, 80, 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.073>
- Milani, A. P. S. (2008). Avaliação física, mecânica e térmica do material solo, cimento e cinza de Casca de Arroz e Seu Desempenho Como Parede Monolítica. *Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Agrícola*. <https://www.academicoo.com/artigo/avaliacao-fisica-mecanica-e-termica-do-material-solo-cimento-cinza-de-casca-de-arroz-e-seu-desempenho-como-paredes-monoliticas-physical-mechanical-and-thermal-evaluation-of-material-soil-cement-ri-ce-husk-ash-and-its-performance-on-monolithic-wall>
- Miranda, A. & Yuba, A. N. (2016). Comparativo de impactos ambientais de sistemas construtivos de paredes utilizando avaliação do ciclo de vida modular. *Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído*, 16., 2016, São Paulo. Anais[...] Porto Alegre: ANTAC.
- Neves, C., & Borges Faria, Obede (2011) Técnicas de construção com terra. *Bauru : FEB-UNESP / PROTERRA*. (n.d.). https://www.athuar.uema.br/?page_id=469
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2012). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29, 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>
- Peixoto, M. V. S., Souza, L. A. C. & Rezende, M. A. P. (2016). O acervo em taipa de pilão em Minas Gerais e novas estratégias de conservação. *Congresso de arquitetura e construção com terra no brasil*, 6, 2016, Porto. Anais [...]. Bauru: São Paulo.
- Pinheiro, L., Rangel, B., Guimarães, A., & Silva, A. (2016). Panorama de produção de obras em terra crua com design contemporâneo em 60 anos no Brasil [Review of Panorama de produção de obras em terra crua com design contemporâneo em 60 anos no Brasil]. *Congresso Internacional de História Da Construção Luso Brasileira*, Porto.
- Pisani, M. A. J. (2004). Taipas: a arquitetura de terra. *Sinergia Revista do Centro Federal de Educação Tecnológica de São Paulo*, São Paulo, 5(1). https://www.researchgate.net/publication/271829655_TAI_PAS_A_ARQUITETURA_DE_TERRA.
- Maia de Souza, D., Lafontaine, M., Charron-Doucet, F., Chappert, B., Kicak, K., Duarte, F., & Lima, L. (2016). Comparative life cycle assessment of ceramic brick, concrete brick and cast-in-place reinforced concrete exterior walls. *Journal of Cleaner Production*, 137, 70–82. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.069>
- Vieira, G. (2022). Taipa de pilão em sistema construtivo híbrido, Pirenópolis – Go [Review of Taipa de pilão em sistema construtivo híbrido, Pirenópolis – Go]. In Instagram.