

ASPECTOS AMBIENTAIS DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA TAIPA DE PILÃO

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF RAMMED EARTH'S LIFE CYCLE INVENTORY

ASPECTOS AMBIENTALES DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA DE LA TAPIA

ANA PAULA DA SILVA MILANI, DRA. | UFMS - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.

ISABELA MARIA CARVALHO IUNES, MA. | UFMS - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil.

RESUMO

O sistema construtivo taipa de pilão tem relevância pela sua baixa energia incorporada e emissão de CO₂ durante a extração da matéria-prima até sua execução. Assim, foi feito um estudo dos aspectos ambientais da taipa nas fronteiras “berço a berço”. Selecionou-se quatro tipos de taipa, diferenciando na adição do estabilizante cimento e no tipo de compactação, a fim de verificar se essas variáveis técnicas causam mudanças consideráveis nos aspectos ambientais nas etapas de extração; fabricação; transporte; construção; manutenção; demolição e destinação final. Foi utilizado a análise de ciclo de vida (ACV) para quantificar os indicadores ambientais resultantes das entradas e saídas de cada etapa. Os resultados mostraram que o transporte é a etapa mais prejudicial, com maiores emissões de CO₂. Além disso, a adição do cimento aumenta emissões de poluentes e energia incorporada, tornando a taipa estabilizada a mais nociva ambientalmente em qualquer etapa do seu ciclo de vida. Por fim, foi comprovado que independente da composição da mistura da taipa, o processo de compactação não influencia de forma relevante nos indicadores ambientais, sendo viável o uso de compactadores mecanizados por conta da sua facilidade de manuseio, eficiência, e padronização da compactação das camadas da parede.

PALAVRAS-CHAVE

Berço a berço; energia incorporada; indicadores ambientais; construção com terra.

ABSTRACT

Rammed Earth constructions have become environmentally relevant due to their lower embodied energy and carbon from extraction to construction phases. This study aims to assess environmental aspects of rammed earth walls from “cradle-to-cradle”. Therefore, four cases of rammed earth walls were chosen, being different the use of cement as a stabilizer and the type of compaction; in order to verify if these technical variables cause considerable changes in the environmental aspects of the extraction; manufacturing; transport; construction; maintenance; demolition and final disposal. Life cycle assessment (LCA) was applied to this study to quantify the environmental indicators resulting from the inputs and outputs of each stage. The results indicated that the transport phase is the most harmful one, releasing more carbon dioxide than all the others do. Moreover, the addition of cement increases pollutant emissions and embodied energy; so stabilized rammed earth is the most environmentally harmful at any stage of its life cycle. Another thing concluded was that the compaction process has little relevance to environmental aspects. Therefore, it is acceptable to use dynamic equipment, as it is still more practical; easy to handle; it speeds the construction process and standardizes wall layer compaction.

KEYWORDS

Cradle to cradle; embodied energy; environmental indicators; earth constructions.



RESUMEN

El sistema constructivo de la tapia es relevante por su baja energía incorporada y emisiones de CO2 desde la extracción de la materia prima hasta su ejecución. Así, se realizó un estudio sobre los aspectos ambientales de la tapia en los límites “de la cuna a la cuna”. Se seleccionaron cuatro tipos de tapia, que se diferencian en la adición de cemento estabilizador y en el tipo de compactación, con el fin de verificar si estas variables técnicas provocan cambios considerables en los aspectos ambientales en las etapas extracción; fabricación; transporte; construcción; mantenimiento; demolición y disposición final. Se utilizó el análisis del ciclo de vida (ACV) para cuantificar los indicadores ambientales resultantes de las entradas y salidas de cada etapa. Los resultados mostraron que el transporte es el paso más dañino, con las mayores emisiones de CO2. Además, la adición de cemento aumenta las emisiones contaminantes y la energía incorporada, por eso la tapia estabilizada es la más dañina para el medio ambiente en cualquier etapa de su ciclo de vida. Finalmente, se comprobó que independientemente de la composición de la mezcla de la tapia, el proceso de compactación no influye significativamente en los indicadores ambientales, siendo factible el uso de compactadores mecanizados por su facilidad de manejo, eficiencia y estandarización de la compactación por capas de pared.

PALABRAS CLAVE

de la cuna a la cuna; energía incorporada; indicadores ambientales; construcción con tierra.



1. INTRODUÇÃO

Dentre as construções com relevância para a descarbonização do setor da construção civil destaca-se o sistema construtivo taipa de pilão, ou também intitulada taipa, a qual se caracteriza por utilizar solo compactado como matéria-prima para a execução das paredes de edificações. Sua valorização acontece por conta de sua baixa energia incorporada durante a fase de extração de matéria-prima até sua execução na obra durante o seu ciclo de vida (KARIYAWASAM; JAYASINGHE, 2016; REDDY; LEUZINGER; SREEMAN, 2014; CIANCIO; JAQUIN; WALKER, 2013).

Torgal e Jalali (2012) mostraram que, mesmo que o tipo de solo para a construção não possa ser considerado uma fonte renovável, o solo ainda sim é muito menos agressivo ao ambiente que a extração de matéria-prima para fabricação de produtos industrializados, sendo o transporte sua única forma de poluição. Os autores também verificaram que a emissão de carbono da taipa de pilão é 63% menor do que as paredes convencionais de alvenaria de cerâmica vermelha.

Arrigoni et al. (2017) estudaram várias misturas do solo com aditivos naturais para que o mesmo possa ter melhor desempenho mecânico e ainda promova um baixo impacto ambiental do ambiente construído. A justificativa para esse estudo foi de que nem sempre o solo do local da construção possui as características físicas necessárias para promover o mínimo do desempenho estrutural.

A partir dessa hipótese, Arrigoni et al. (2017) analisaram o ciclo de vida da taipa nas etapas de extração até execução, quantificando os indicadores energia não renovável no transporte do material e sua emissão de gases poluentes. Dentre os estudos de caso, os autores verificaram que a adição de estabilizadores na mistura do solo + água pode ser mais vantajoso ao meio ambiente do que o uso de um solo apropriado, mas que sua jazida se encontra a uma distância mínima possível da obra.

Nesta mesma linha, Fernandes et al. (2019) investigaram o benefício ambiental de dois tipos de construção com terra: os blocos de terra comprimida (BTC) e a taipa de pilão. Os autores demonstraram que os impactos ambientais de energia incorporada no processo e do potencial de aquecimento global foram de apenas 50% quando comparado aos valores dos materiais convencionais tijolo cerâmico e bloco de concreto. Ainda que as construções com terra fossem consideradas mais vantajosas, os referidos autores também verificaram quais eram as fases mais prejudiciais dentro desses processos construtivos, concluindo que a fase de transporte dos materiais até o local

da obra é a etapa mais impactante no ciclo de vida das construções com terra.

Contudo, existem questionamentos sobre o uso, manutenção, demolição e descarte ou reuso das vedações de taipa de pilão ao longo do seu ciclo de vida, pois há poucos estudos verificando se as fases de operação e destinação final do edifício de terra promovem o mesmo nível de impacto ambiental que as suas fases de extração, transporte e fabricação. Isto porque, essas etapas avançadas do ciclo de vida do material dependem não só da região estabelecida, como também das pessoas que operam as edificações (SOUDANI, et al., 2017).

Nesse sentido, Taylor, Fuller e Luther (2008) e Dong, Soebarto e Giffith (2014) verificaram que as edificações de taipa construídas na Austrália demandam maior quantidade de energia para aquecimento do ambiente em comparação com as edificações de sistemas convencionais no tocante de promover conforto térmico aos ocupantes em períodos que a temperatura externa do ambiente for muito baixa.

Já De Wolf et al. (2018) também analisaram o ciclo de vida de uma edificação de taipa localizada no oriente médio, sendo projetado a permanência do padrão de baixo impacto ambiental na etapa de operação do edifício com paredes de terra pelo uso de materiais recicláveis como isolante térmico. Essas conclusões sugerem o potencial de eficiência energética durante o uso da edificação em taipa de pilão quando construídas em regiões de clima quente, como por exemplo, no Brasil.

Ainda o estudo de Ben-Alon et al. (2021) analisaram as etapas de extração de matéria-prima, produção, transporte até o local, uso e manutenção do ciclo de vida de edificações construídas com os seguintes materiais de construção: COB (mistura de argila, areia, água e palha), fardos de palha; e a taipa de pilão com e sem isolamento térmico. Segundo os pesquisadores, comparando estes sistemas considerados naturais com processos construtivos convencionais em regiões dos Estados Unidos, estas técnicas alternativas resultaram menores impactos ambientais, principalmente nos climas áridos e semiáridos.

Sobretudo, Ben-Alon et al. (2021) destacam que ao comparar os valores dos impactos ambientais entre a taipa de pilão com isolante térmico e a alvenaria de bloco de concreto, os impactos causados pela taipa eram menores, sendo a redução de 78% da mudança climática (kg CO₂), 72% do consumo de energia (MJ), 90% da acidificação do ar (kg SO₂), e 98% das partículas de poluição prejudiciais à saúde humana (PM_{2.5}).

Em relação a demolição e a destinação final da taipa

de pilão, é muito comum o material que não sofre processo de combustão, ou sem mistura química - como no caso do solo - ser considerado reversível no final de seu ciclo de vida, pois volta para o ambiente a ser construído como fonte de origem. Entretanto, com as tecnologias e estratégias ambientais desenvolvidas nos últimos tempos, a ideia de reciclar o solo estabilizado quimicamente já no fim do ciclo de vida do edifício e reutilizar como agregado reciclado, também se torna viável e benéfica ao meio ambiente, fomentando a gestão ambiental por meio do conceito de economia circular.

Estas afirmações foram corroboradas por Di Maria, Eyckmans e Acker (2018); Buyle et al. (2019); Ghisellini, Ripa e Ulgiati (2018); sendo que a utilização de materiais pré-fabricados na etapa da construção e a demolição seletiva na etapa de fim da vida útil do edifício reduz a geração de resíduos e resulta na maior quantidade de material reciclado. Além disso, estes autores destacaram que o uso de paredes removíveis ou que apresentem reversibilidade pode incentivar a economia circular, sendo um facilitador para que os materiais de construção sejam recuperados e reutilizados.

Considerando estes estudos pontuais e a falta de trabalhos que integram as informações sobre os aspectos ambientais da taipa dentro do contexto do ciclo de vida nas fases “berço a berço” desse sistema construtivo, é importante entender o quão sustentável é a taipa para contribuir no processo de tomada de decisão frente aos sistemas convencionais de construção. Assim, se faz necessário encontrar indicadores que revelem os impactos energético e ambiental do ciclo de vida da taipa de pilão nas etapas após a sua construção.

Dessa maneira, o objetivo da pesquisa foi analisar os aspectos ambientais do inventário do ciclo de vida da taipa de pilão nas fronteiras berço a berço. Para tal, foi determinado a energia demandada e a emissão de gases poluentes em um 1m² de parede da taipa de pilão nas etapas de extração de matéria-prima, fabricação de materiais, transporte de insumos, execução da taipa, manutenção durante o uso, demolição e destinação final; considerando a influência das condições da aplicação tecnológica do cimento como estabilizante e da mecanização no processo construtivo.

2. MATERIAIS E MÉTODO

Os valores quantitativos dos aspectos ambientais do sistema construtivo taipa de pilão foram obtidos por meio do método de análise de ciclo de vida (ACV) seguindo

as diretrizes da norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009). Para isso, foram estudadas as etapas de extração, execução, manutenção, demolição e destinação da taipa de pilão, considerando a análise do inventário “berço a berço”, verificando os seguintes indicadores ambientais: energia incorporada (MJ); consumo de água (l); emissão de gás carbônico (g); e emissão de gases poluentes (g) - metano (CH₄); óxidos (N₂O; NO_x; SO_x; SO₂); componentes orgânicos voláteis (COVs).

2.1 TAIPA DE PILÃO

A taipa de pilão é um sistema construtivo de parede em que se utiliza o solo (terra) como matéria-prima, acrescida de água até atingir uma umidade ideal para a compactação da mesma. As diretrizes do processo construtivo são de acordo com a norma NBR 17014 (ABNT, 2022), que orienta o uso de fôrmas removíveis, preparação e mistura dos materiais no próprio local da obra e aplicação de um compactador manual ou mecanizado. Pode-se ou não adicionar estabilizantes químicos, desde que a parede atinja os pré-requisitos de desempenho físico-mecânico. Normalmente, a parede de terra não necessita de revestimentos primários como chapisco, emboço e reboco, pois a própria parede pode ser exposta, assim como as instalações elétricas e hidráulicas podem ser embutidas ou externas. Entretanto, a taipa pode receber acabamento de pintura ou assentamento de peças decorativas, sendo uma opção do usuário dessa edificação.

Quanto a manutenção das edificações de taipa, esta é feita com o intuito de manter a proteção e impermeabilização em dia, pois a água pode causar danos à estrutura. Já na destinação do fim de uso da parede, a taipa de pilão muda de acordo com componentes em sua mistura. A parede de terra sem estabilizante quando demolida de forma seletiva é considerada reversível. Já no caso da taipa estabilizada com cimento, a demolição de uma parede gera resíduos da construção e demolição (RCD), e deve passar por reciclagem e ser reutilizado como agregado reciclado.

O modelo de parede estabilizada com cimento e executada com o compactador pneumático (equipamento mecanizado) foi adotada como referência e utilizada para coleta de dados primários. A edificação modelo encontra-se na Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS) em Campo Grande – MS, intitulada de Canteiro experimental (Figura 1). Este protótipo foi construído por Veraldo (2015) como um estudo de caso e analisado o ciclo de vida desde a extração do material até sua execução por Miranda (2017).

Para a presente pesquisa, o intuito foi variar a composição da mistura de solo e o modo de execução da taipa, e assim obter a influência destas variáveis sobre as etapas do ciclo de vida. Na etapa de execução, há duas maneiras de compactar a terra umedecida, utilizando um compactador manual, sem uso de energia, ou um compactador pneumático. Essa é a primeira diferença de processo construtivo abordada no estudo para verificar quais são os indicadores ambientais que despontam ao utilizar um equipamento mecanizado.



Figura 1: Canteiro experimental UFMS
Fonte: Site do programa de pós-graduação UFMS (2019)

Já na etapa do preparo da mistura do material, se seguiu diretrizes de Zhang et al., 2018; Soudani et al., 2018; Serrano et al., 2017; Nanz et al., 2019; Milani, Labaki, 2012; Veraldo, 2015; sendo selecionada a composição de solo+água e a composição de solo+água+adição de cimento com traço 1:12 (cimento:solo, em massa). Nesse caso de diferentes misturas, implica na resistência físico-mecânica da parede, e, portanto, para equalizar esta variável e não influenciar na ACV, as espessuras variaram para que se alcance o mínimo de resistência exigida para paredes de edificações, que é de 1,3 MPa (NBR 17014, 2022).

Ainda de acordo com esta norma, a taipa sem adição de estabilizante também deve atender um limite de esbelteza, que se traduz numa espessura de, no mínimo, 30 cm. Já a taipa com adição de cimento deve possuir espessura maior ou igual a 12 cm. Assim, foi adotado quatro tipos de paredes para o estudo:

- Parede 1 – taipa cim+mec: taipa de pilão estabilizada com adição de cimento, no traço 1:12 (cimento: solo, em massa) e executada com compactador pneumático. Espessura da parede de 12 cm;

- Parede 2 – taipa mec: taipa de pilão sem estabilizante e executada com compactador pneumático. Espessura da parede de 30 cm;

- Parede 3 – taipa cim+man: taipa de pilão estabilizada com adição de cimento, no traço 1:12 (cimento:solo, em massa) e executada com compactador manual. Espessura da parede de 12 cm;

- Parede 4 – taipa man: taipa de pilão sem estabilizante e executada com compactador manual. Espessura da parede de 30 cm.

2.2 Método ACV

A metodologia ACV foi realizada até a fase inventário, sendo consideradas as entradas, fronteiras e saídas na Figura 2. Para que as quatro paredes fossem avaliadas de maneira igualitária, foi adotado a unidade funcional de 1m² de taipa de pilão. Não foram abordadas as etapas de operação devido a dependência de fatores comportamentais de usuários; e nem de reciclagem ou descarte do RCD pela relação intrínseca com programa de gestão ambiental local.

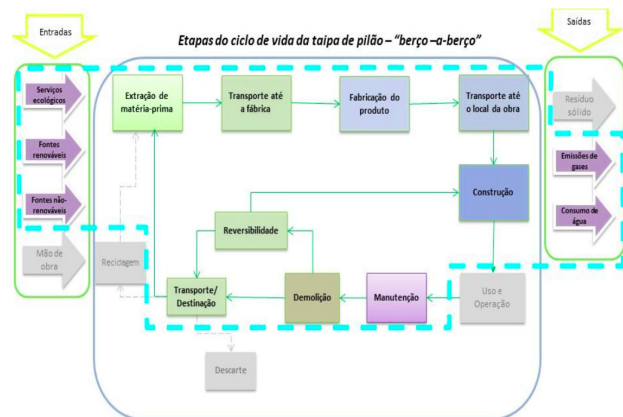


Figura 2 Fronteiras do estudo do ciclo de vida da taipa de pilão
Fonte: Autora

Para as entradas do inventário, os insumos foram o solo arenoso, o cimento CII-F, a água para construção da taipa e a resina acrílica para acabamento e posterior manutenção da taipa. Ainda como entradas foi considerado o consumo de energia, independente da fonte, para extração, fabricação e transporte desses insumos, bem como a energia consumida pelos equipamentos para construção, manutenção, demolição e destinação da taipa. Já em relação as saídas, a análise do inventário abordou a emissão de gases poluentes, como gás carbônico (CO₂), metano

(CH4), óxidos, carbonetos e material particulado.

A coleta de dados primários em relação aos tipos e quantitativos dos insumos e dos equipamentos usados nos quatro tipos de paredes propostos partiu do estudo de caso da edificação Canteiro experimental UFMS (Tabela 1), utilizando-se de documentos que detalharam a construção do protótipo, como notas fiscais, diário de obra; e o próprio trabalho de Veraldo (2015) que detalhou o processo construtivo no Canteiro Experimental.

A jazida de solo arenoso utilizada na obra do canteiro experimental encontra-se a 20 km de distância da obra, sendo utilizada a pá carregadeira de potência entre 130 kW e 560kW para fase de extração desta matéria-prima, e o caminhão 23 PBT de carga máxima 15 toneladas como o transporte do material até a obra. Estes equipamentos utilizam óleo diesel para funcionar, sendo adotado de Campos (2012) a faixa de consumo de combustível para pá carregadeira de 17,74 L/h e de 0,006 a 0,022 L/t.km para o caminhão basculante. Considerou-se os dados de energia e emissão incorporados no diesel de BEN (2014), EPA (2010), MMA (2014), Silva (2013), Vianna (2006) e CONAMA (2011).

Já a fábrica de produção de cimento mais perto da região se encontra a 298 km de distância. Essa quilometragem foi considerada porque para uma análise equitativa da etapa de transporte dos insumos até a obra, deve-se partir da origem de fabricação do cimento e de extração do solo. Desta maneira evita-se mascarar os resultados que consideram o cimento como se fosse produzido no local de uso.

O cimento teve seus aspectos ambientais analisados a

partir da etapa de produção na fábrica, não abrangendo os dados de extração de matérias-primas para se produzir o cimento. O cálculo da energia e emissões relativas à produção do cimento CP II-F foi feito uma média dos relatórios de sustentabilidade das empresas INTERCEMENT (2015) e VOTORANTIM (2015).

Seguindo para a próxima etapa, na execução da parede foi aplicado uma betoneira com produção horária de 4 m³/h com 220 W de potência para misturar os materiais. Com a mistura pronta, a confecção da parede necessita do uso de um compactador, desse modo, nas paredes taipa cim+mec e mec foi considerado o uso de um compactador mecanizado, que é abastecido por um compressor de ar de 3800 W de potência. Nos outros dois casos (taipa cim+man e man) foi considerado o uso de um compactador manual, não utilizando fontes de energia para funcionar. A energia de ambos equipamentos é a energia elétrica, sendo esta analisada por meio da potência do maquinário e o tempo de uso no Canteiro Experimental (Tabela 1).

Para o caso da energia consumida para produção de 1 kWh de energia elétrica, foi adotado o valor de 3323 kJ/ kWh de energia incorporada (SILVA, 2013). Já para a emissão de gases poluentes incorporados na geração de energia elétrica foi de acordo com a Estimativas Anuais de Gases do Efeito Estufa no Brasil (MCTI, 2022).

Não foi considerado o ciclo de vida das fôrmas utilizadas para a construção, e sim apenas o uso delas, isto se deve pelo motivo de que os quatro tipos proposto de paredes fazem parte do mesmo sistema construtivo, o que quer dizer que todas necessitam da mesma quantidade de fôrmas, se tornando então indiferente para a presente pesquisa.

Paredes	Solo (kg)	Cimento (kg)	Água (l)	Solo compacto (m ³)	Solo solto (m ³)	Umidade ótima	Tempo de uso betoneira (h)	Tempo de uso compactador (h)
1- Taipa cim+mec	340	23	16,6	0,12	0,25 m³	7,7%	0,063	0,02
3 -Taipa cim+man								0,0
2 -Taipa mec	850	0,0	54	0,30	0,59 m³	10%	0,149	0,45
4 -Taipa man								0,0

Tabela 1: Dados primários dos insumos e dos equipamentos coletados no Canteiro Experimental UFMS
 Fonte: Autora

A partir da etapa de manutenção em diante, os dados primários dos quantitativos dos insumos e dos equipamentos usados nos quatro tipos de paredes foram obtidos a partir de entrevistas com três empresas privadas brasileiras do setor de construção com terra.

De acordo com as entrevistas nas empresas construtoras de taipa, foi considerado na fase de manutenção o uso da tinta resina acrílica a base de água a cada 5 anos. Como o mínimo de durabilidade a ser atingido por uma parede é de 50 anos, segundo a norma de desempenho para edificações habitacionais NBR 15575 (ABNT, 2013), foi adotado para os cálculos do inventário a aplicação de 10 vezes da tinta na parede durante a vida útil da taipa. Adotou-se dos manuais técnicos dos fabricantes o consumo de 2 demãos de tinta na faixa de 0,16 L/m² a 0,24 L/m².

Segundo a ficha técnica da tinta resina acrílica, esta possui a água como solvente e a garantia de durabilidade de aproximadamente 5 anos após sua aplicação, ou seja, posteriormente a isso, seus poluentes já foram emitidos e a degradação da pintura (descascamento) já é bem avançada. Então, foi possível considerar que o uso da resina não altera as propriedades das paredes 2 e 4 (sem estabilizante cimentício) ao final do ciclo de vida da taipa e, portanto, essas paredes podem ser ainda consideradas material reversível (CHAI et al., 2011).

Para produção da tinta resina acrílica a base de água utiliza-se das seguintes fontes de energia: óleo diesel; energia elétrica e gás natural. Assim, este produto teve suas emissões e energia incorporada calculadas pelo percentual da influência dessas fontes energéticas no inventário sobre tintas apresentado por Hammond e Jones (2011).

Verificando a etapa de demolição, segundo as empresas entrevistadas, o uso do martelo demolidor elétrico de 7 kg e potência de 1300 W apresenta o consumo de tempo médio de 2 h/m³ de taipa demolida. Na situação das paredes sem estabilizantes, as quais após a demolição o material residual precisa ser britado, foi adotado o equipamento triturador de entulho TE2 CSM com potência de 2200 W, que necessita igualmente de energia elétrica para o seu funcionamento e produção de britagem de RCD aproximada de 2 m³/h.

Por fim, na etapa de destinação, houve dois destinos diferentes para os materiais residuais, pois um se tornou RCD e o outro solo reutilizável. Foi adotado que o material solo fosse transportado de volta a jazida localizada a 20 km da obra. Já o resíduo de demolição foi encaminhado a usina de reciclagem, localizada em Campo Grande a 13

km do local da obra. O mesmo caminhão 23 PBT de 15 toneladas foi adotado como o transporte destes materiais até sua destinação final.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao analisar de forma global os aspectos ambientais de todas as etapas do inventário verifica-se a relevância do fator transporte sobre as emissões e o consumo de energia do ciclo de vida da taipa de pilão (Tabela 2). Isto porque quando se agrupam os resultados, independente dos valores mínimos ou máximos de entradas e saídas na etapa do transporte, há uma grande diferença entre os valores dos indicadores de transporte e demais fases do ciclo de vida.

Essa discrepância se deu pelo fato de a fábrica de cimento ser consideravelmente mais longe da obra, do que a jazida de solo. Dessa maneira, ela acarretou significativa diferença na emissão de CO₂ e de gases poluentes nos casos das taipas cim+mec e cim+man. Mesmo a quantidade de solo arenoso das taipas mec e man serem mais que o dobro do que o solo necessário nas paredes de taipas cim+mec e cim+man, ainda assim, a significância é dada pelas distâncias dos locais de extração e fabricação dos insumos até a obra (Tabela 3).

Por outro lado, se o cimento fosse adquirido com maior proximidade do seu local de fabricação, ainda sim a etapa de transporte dos insumos até a obra continuaria a ser a mais relevante diante as demais fases do ciclo de vida da taipa de pilão. Entretanto, o cimento não escapa dos seus elevados indicadores ambientais, pois sua fabricação também é significativa, e independente do transporte, o cimento gera consideráveis emissões de gases poluentes, principalmente o gás carbônico.

Já se a jazida de solo arenoso não fosse próxima a obra – o que pode ocorrer em vários lugares do Brasil, por ser um tipo específico de solo, com propriedades físicas mínimas para ser considerável próprio para a execução da taipa – poderia ser o próprio solo que estaria proporcionando essa discrepância de valores nos indicadores ambientais.

Portanto, o foco do problema é a distância dos locais, independente do insumo, principalmente porque a fonte de energia do transporte é proveniente de combustíveis fósseis que emitem mais poluentes, já que o meio de transporte mais comum no Brasil é o rodoviário.

Estes dados vão de acordo com Arrigoni et al. (2017), Nanz et al. (2019) e Melià et al. (2014) que também concluíram que compensaria corrigir a granulometria de um solo da jazida próxima ao local da obra, para se tornar adequado ao projeto, do que transportar um solo adequado, porém distante da construção/obra.

Ainda na Tabela 2, independente do tipo de parede, as etapas

ETAPAS *	PAREDE 1			PAREDE 2			PAREDE 3			PAREDE 4		
	Talpa cim+mec			Talpa mec			Talpa cim+man			Talpa man		
	Energia (MJ)	Emissão CO ₂ (g)	Emissão poluentes (g)	Energia (MJ)	Emissão CO ₂ (g)	Emissão poluentes (g)	Energia (MJ)	Emissão CO ₂ (g)	Emissão poluentes (g)	Energia (MJ)	Emissão CO ₂ (g)	Emissão poluentes (g)
TRANSP. OBRA	1.108	84.147	350,40	75,33	5.719	23,82	1.108	84.147	350,40	75,33	5.719	23,82
DESTI-NAÇÃO	67,83	5.150	5.171	75,33	5.719	23,82	47,49	5.150	5.171	75,33	5.719	23,82
EXTR. FABRI.	67,79	12.344	49,39	2,32	456,89	3,46	67,79	12.344	49,39	2,32	456,89	3,46
MANU-TENÇ.	18,91	2.643	35,93	18,91	2.643	35,93	18,91	2.643	35,93	18,91	2.643	35,93
DEMO-LIÇÃO	1,04	21,94	0,20	3,69	78,14	0,70	1,04	21,49	0,20	3,69	78,14	0,70
CONS-TRUÇÃO	0,65	13,68	0,12	1,53	32,30	0,29	0,46	9,75	0,09	1,09	22,98	0,21
TOTAL	1.265	104.321	5.607	177,11	14.649	88,02	1.244	104.317	5.607	176,67	14.640	87,94
	4º Posição			2º Posição			3º Posição			1º Posição		

*Considerado para todas as paredes valores mínimos de entradas e saídas no inventário.

Tabela 2: Indicadores ambientais do ciclo de vida da taipa de pilão em ordem decrescente

Fonte: Autora

Entradas/saídas		Talpa cim+mec		Talpa mec	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Energia (MJ)	solo	73,06	267,89	75,33	276,22
	cimento	1035,33	3796,20	-	-
CO ₂ (g)	solo	5546,68	20337,84	5719,28	20970,71
	cimento	78600,97	288203,60	-	-
CH ₄ (g)	solo	5,03	18,43	5,18	19,00
	cimento	71,22	261,10	-	-
MP (g)	solo	0,35	1,301	0,37	1,34
	cimento	5,03	18,44	-	-
NH ₃ (g)	solo	0,0001	0,00026	0,0001	0,00027
	cimento	0,001	0,00367	-	-
N ₂ O (g)	solo	0,20	0,74	0,21	0,76
	cimento	2,87	10,50	-	-
NO _x (g)	solo	13,70	50,24	14,13	51,80
	cimento	194,17	711,95	-	-
SO ₂ (g)	solo	2,11	7,74	2,18	7,98
	cimento	29,90	109,64	-	-
SO _x (g)	solo	0,01	0,045	0,01	0,05
	cimento	0,18	0,64	-	-
H ₂ S (g)	solo	0,000	0,0013	0,0004	0,0015
	cimento	0,006	0,02	-	-
COVNM (g)	solo	1,69	6,19	1,74	6,39
	cimento	23,94	87,79	-	-

Tabela 3: Inventário da etapa transporte dos insumos até o local da obra.

Fonte: Autora

que seguem se destacando com maiores consumos energéticos e emissões gasosas são as etapas extração e fabricação, seguida da manutenção. Estas são justamente as etapas de produção de materiais industrializados, os quais tem maior consumo de energia e emissão de gases poluentes no seu processo fabril. Também foi verificado que as etapas de construção e demolição da parede possuíram os menores valores de indicadores ambientais, visto que ambas se utilizam apenas de energia elétrica com fonte de energia, mostrando que essa fonte é a que menos gera poluentes para a ACV da taipa de pilão.

Na Tabela 4, conforme foi notado na etapa de transporte para obra, a emissão de CO₂ é relevante nos quatro casos, mesmo sendo distâncias consideradas pequenas ou periféricas à cidade para a etapa de transporte e destinação da taipa demolida. Porém, nota-se pouca diferença, por exemplo, no valor mínimo de combustível consumido entre a destinação do resíduo (taipas cim+mec e cim+man) e a destinação do solo reversível (taipas mec e man), sendo compreendido pelo consumo mínimo do combustível de 0,006 L/t.km. Ou seja, para volume de massa das taipas que, mesmo diferentes, ainda pequenas em relação a 1 tonelada, se tornam irrelevantes no conjunto do cálculo (Tabela 4). Já nos valores máximos, a diferença se dá um pouco maior, visto que o consumo considerado é de 0,022 L/t.km. Assim, maiores distâncias altera a quantidade de combustível consumida, reforçando que a longinquidade dos insumos é o principal fator no consumo de energia e emissão de gases no ciclo de vida da taipa.

Com o entendimento que o transporte eleva de forma discrepante os valores dos indicadores ambientais, optou-se por fazer uma análise relacionando os indicadores das etapas extração e fabricação, construção, manutenção e demolição (Figuras 3 a 7). Assim, pode-se identificar que a emissão de gás carbônico se destaca dentre as etapas, sendo muito maior do que as emissões de poluentes. Enquanto a emissão de CO₂ está na faixa de 1.000 g a 11.000 g, a emissão de poluentes não chega nem a 70 g em nenhuma destas etapas (Figura 3).

Entradas/ Saídas	RCD TAIPA (taipa cim+mec e taipa cim+man)		TAIPA REVERSÍVEL (taipa mec e taipa man)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Quantidade de combustível consumida (L)	1,82	4,67	2,02	7,41
Energia (MJ)	67,83	174,13	75,33	276,22
CO ₂ (g)	5149,96	13219,60	5719,28	20970,71
CH ₄ (g)	4,67	11,98	5,18	19,00
MP (g)	0,33	0,85	0,37	1,34
NH ₃ (g)	0,00	0,00	0,00	0,00
N ₂ O (g)	0,19	0,48	0,21	0,76
NO _x (g)	12,72	32,66	14,13	51,80
SO ₂ (g)	1,96	5,03	2,18	7,98
SO _x (g)	0,01	0,03	0,01	0,05
H ₂ S (g)	0,00	0,00	0,0004	0,0015
COVNM (g)	1,57	4,03	1,74	6,39

Tabela 4: Inventário da etapa transporte da taipa demolida para destinação final.
Fonte: Autora

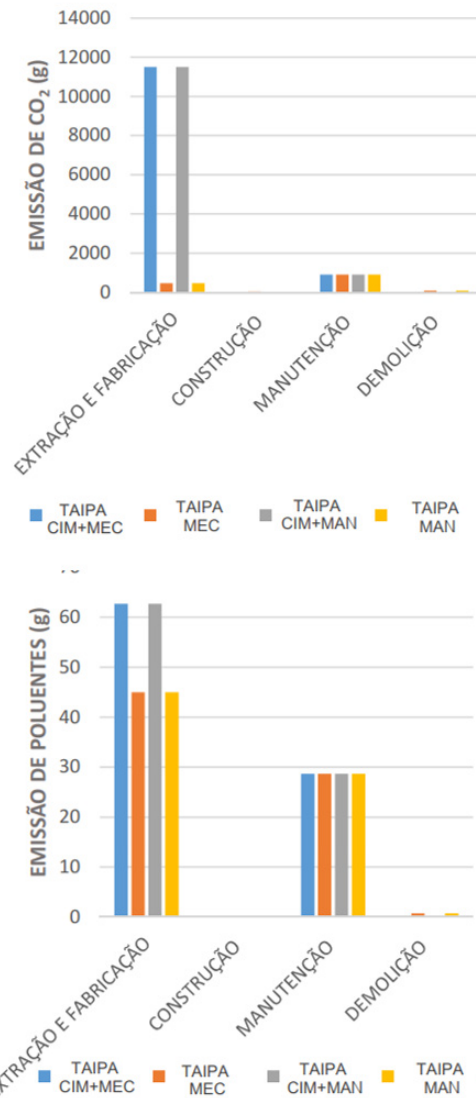


Figura 3: Emissão de CO₂ e poluentes nas etapas excludentes de transporte
Fonte: Autora

Visto isso, pode se observar que os valores comentados nas etapas de construção e demolição de maneiras isoladas são baixos se comparados com outras etapas como a extração e a manutenção. Enquanto os poluentes da extração são em torno de 3 g a 40 g, as paredes na etapa de construção não emitem mais que 0,3 g de poluentes (Figura 3).

Na emissão de gás carbônico, a etapa extração e fabricação tem maior discrepância nas paredes 1 e 3 (taipas cim+mec e cim+man) quando comparada com a etapa manutenção (Figura 3). Enquanto na etapa extração e fabricação as paredes emitem em torno de quase 12 kg de CO₂, na manutenção os valores são por volta de 1,6 kg, isto é 7,5 vezes menor que a etapa extração por conta da produção do cimento. E quando se foca para o consumo de energia, as paredes 1 e 3 consomem em média 68 MJ na extração e fabricação, e na manutenção consomem 18

MJ, sendo ainda considerável a diferença de valor entre as paredes (Figura 4).

Isto pode ser explicado pelo fato de a tinta resina acrílica apresentar-se com menor emissão de poluentes neste inventário, pois enquanto o cimento consumido é de 23 kg, o consumo de tinta é, em torno de 1,5 kg de resina por parede. Sendo assim, não necessariamente a tinta é menos poluente que o cimento, se fosse comparado em mesma quantidade aplicada.

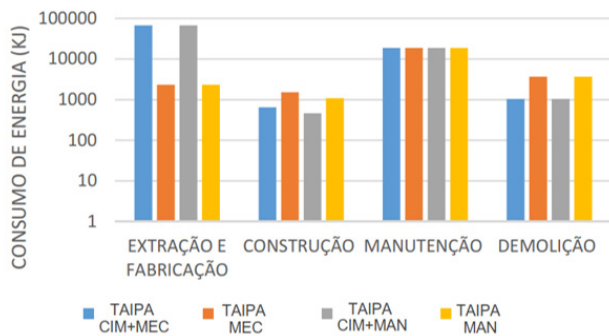


Figura 4: Consumo de energia (KJ) nas etapas excludentes de transporte
Fonte: Autora

Outro ponto importante é que, mesmo retirando o transporte da análise, as etapas construção e demolição ainda parecem quase irrisórias quando comparadas com as outras etapas (Figura 3). O que elas têm em comum é que ambas utilizam apenas de energia elétrica como fonte de energia, podendo ser um dos fatores responsáveis pelos pequenos valores apontados. Como Arrigoni et al. (2017) constataram em sua pesquisa, o uso de combustíveis fosseis são os principais insumos responsáveis pelo consumo de energia e emissões de poluentes, podendo até ser responsável por 80% dos valores dos aspectos ambientais da taipa.

Mais um ponto notado é que, verificando os resultados de emissão de poluentes, a divergência de valor já é bem menor, porém é porque na etapa de manutenção há maior emissão de poluentes do que de gás carbônico (Figura 3). Isso evidencia que em alguns materiais, os aspectos ambientais se comportam de maneira distinta, e que nem sempre porque em um aspecto tem um valor mais expressivo que em outro resultará em valores proporcionais.

A partir deste fato, foi observado nas Figuras 5, 6 e 7, apenas as duas etapas que não utilizam fontes de combustíveis – construção e demolição da parede – e os resultados mostraram que, as paredes com mesma composição da mistura de solo e diferente tipo de compactação, ou seja, as paredes taipa cim+mec e taipa cim+man e as paredes taipa mec e taipa man, se comparadas entre si, apresentaram similares consumo energético e emissões, independente do tipo de compactação, refletindo no uso do compactador mecanizado com pouca interferência nos

valores de consumo de energia e emissões de gases poluentes. Isto quer dizer que diante de todo o ciclo de vida da taipa de pilão, o uso do compactador tem pouca influência sobre os resultados, sendo considerado viável ambientalmente o uso do equipamento mecanizado em detrimento ao processo manual.

Ressalta-se que a etapa de construção foi a única fase do ciclo que cada parede teve um valor diferente para os indicadores calculados, isto porque houve variação no volume de massa misturada e compactada. Essa variação de volume dos materiais componentes da taipa refletiu negativamente no consumo de água de cada parede (Tabela 1), o que resultou na quantidade de água três vezes maior para construir as taipas mec e man (sem cimento) do que nas taipas cim+mec e cim+man (com cimento). Miranda (2017) também verificou isso quando comparou a parede de taipa de pilão com os materiais convencionais, pois apesar de em alguns indicadores apresentarem bom desempenho com valores menores, no quesito consumo de água, a taipa consumia um valor bem mais alto que as outras técnicas, podendo ser considerada a mais prejudicial nesse aspecto.

Já na etapa de demolição apresentou-se os maiores valores dos indicadores ambientais do que na etapa de construção, visto que apesar de serem o mesmo volume de massa compactada ou demolida, a potência dos equipamentos tem maior relevância para os valores de consumo de energia e emissão de poluentes. Isso pode ser visto na emissão de poluentes, enquanto a parede 2 (taipa mec) emite em torno de 0,29 g de gases na etapa de execução, a mesma parede emite 0,7 g na etapa de demolição (Figuras 6 e 7).

Um último destaque na etapa de demolição, o ato de tornar a parede demolida um solo reversível gerou maiores valores de gasto de energia e emissão de gases. Entre os valores dos indicadores das paredes que não utilizaram o triturador (paredes 1 e 3) e as paredes sem estabilizantes (paredes 2 e 4), tanto a energia quanto a emissão de gases obtiveram uma diferença de, no mínimo, 3 vezes maior no valor destes indicadores (Figuras 5, 6 e 7). Este comportamento pode ser considerado relevante na análise somente desta etapa, levando num primeiro momento a contestar os ganhos ambientais com a reversibilidade, porém, quando observado os valores de todas as etapas (Tabela 2), essa diferença é desprezível comparada com os resultados das demais etapas que envolvem o transporte.

Por fim, apesar da proximidade da jazida de solo - que ameniza consideravelmente os indicadores das taipas sem cimento (paredes 2 e 4) - essa hipótese de curta distância entre matéria prima/produto e obra/edificação pode considerar viável ambientalmente a construção de paredes apenas com a composição da mistura solo+água. Por mais que os equipamentos na execução e na demolição da taipa sem cimento sejam aplicados por mais tempo do

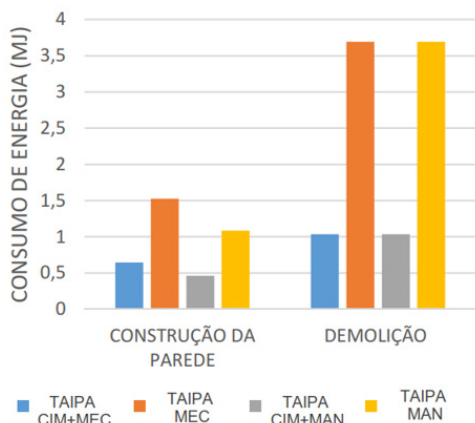


Figura 5: Consumo de energia nas etapas de construção e demolição
 Fonte: Autora

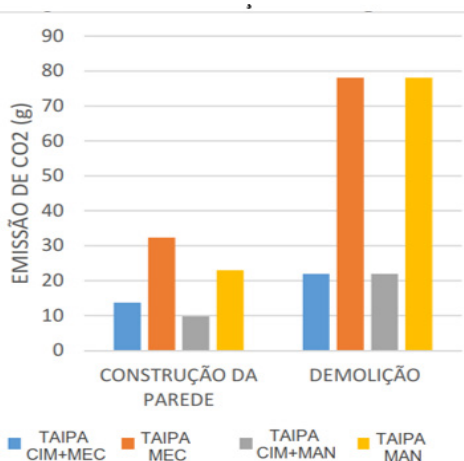


Figura 6: Emissão de CO2 nas etapas de construção e demolição
 Fonte: Autora

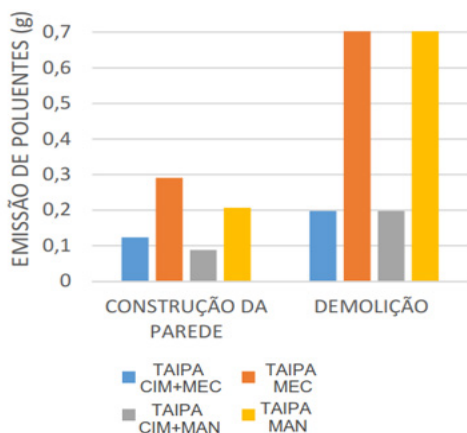


Figura 7: Emissão de poluentes nas etapas de construção e demolição
 Fonte: Autora

que na taipa estabilizada com cimento; no geral, os indicadores ambientais da taipa de pilão, sem estabilizante, com compactação manual ou mecanizada, construída em conformidade com as diretrizes da NBR 17014 (ABNT, 2022), e demolida para se tornar um solo reversível ainda apresentam valores baixos comparados aos indicadores da taipa de pilão estabilizada com cimento.

É interessante adicionar que, para melhor entendimento do que os valores dos aspectos ambientais

representam para problemática ambiental, deve-se estudar o que cada faixa de valores dos indicadores indica de gravidade para impactos ambientais. Destaca-se a emissão de CO2 que foi exageradamente maior que a emissão de poluentes para a ACV da taipa de pilão, entretanto, não foram estudados quais valores seriam necessários para causar um determinado impacto ambiental. Sendo assim, pode ser que os valores de alguns poluentes representem mais perigo ao meio ambiente do que a emissão de CO2, o que não pode ser afirmado neste trabalho, pois não foram abordados impactos ambientais.

4. CONCLUSÃO

Foi possível analisar os aspectos ambientais da taipa de pilão, corroborando o transporte como a etapa mais prejudicial do ciclo de vida, sendo responsável por pelo menos 80% das emissões de CO2 e do consumo de energia independente do tipo de parede. Além disso, a etapa de fabricação de materiais também colabora com maiores emissões de poluentes, como no caso da produção do cimento Portland e da tinta de resina acrílica.

Visto que os resultados da fabricação foram de altos valores de indicador ambiental, a adição de cimento como estabilizante na taipa de pilão não é benéfico ou viável ambientalmente. Apesar de otimizar o consumo do material solo e, conseqüentemente, o uso de equipamentos, essas etapas não são suficientes para balancear a emissão de gases e o consumo de energia gasto nas etapas de extração e fabricação e transporte até a obra. Ademais, o cimento não influencia na etapa de manutenção, já que a taipa sem produto cimentício garante a mesma durabilidade que a estabilizada quimicamente e, portanto, o mesmo processo de conservação à base tinta deve ser utilizado para ambos os casos.

Diante disso, a taipa de pilão sem o estabilizante cimento pode ser considerada a mais viável, mesmo que esta parede necessite de mais solo para se adequar as mínimas características físico-mecânicas, e mais tempo de uso dos equipamentos nas etapas de construção e demolição. Além de seus valores dos indicadores ambientais, em sua maioria, serem menores em relação a parede adicionada de cimento, a taipa de pilão sem material cimentício é reversível, ou seja, não gera resíduo da construção civil no fim do uso e pode ser inserida como matéria-prima. Dessa maneira, a taipa de pilão sem cimento pode fechar o ciclo de vida através do processo de reversibilidade, sem a necessidade de maiores gastos energéticos e emissões gasosas com as etapas de destinação final por

reciclagem ou descarte em aterros.

Quando o quesito de comparação dos processos construtivos das taipas foi o uso de compactadores manual ou mecanizado, os resultados não mostraram valores expressivos, ou seja, o uso de compactador mecanizado consome e emite valores irrisórios de energia e poluentes. Isto se deve pelo fato de o equipamento ser abastecido com energia elétrica, e ser quase que desprezível se comparar com as outras etapas do ciclo de vida da taipa. Com isso, pode ser concluído que não há diferença relevante entre taipa mecanizada e taipa manual, podendo apresentar maior viabilidade técnico-ambiental o uso de compactador mecânico, por conta da facilidade do manuseio, agilidade no processo construtivo, e padronização da compactação das camadas das paredes.

REFERÊNCIAS

ARRIGONI, A. et al. Life cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilized rammed earth. **Construction and Building Materials**. v. 142, p. 128-136. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.066>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040 (2009): **Avaliação de ciclos de vida, princípios e estrutura**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575 (2013): **Edificações habitacionais – Desempenho**. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 17014 (2022): **Taipa de pilão – Requisitos, procedimentos e controle**. Rio de Janeiro.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL - BEN. Rio de Janeiro. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf. Acesso em: jul. 2021.

BEN-ALON, L. et al. Life cycle assessment (LCA) of natural vs conventional building assemblies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 144, p. 1-11, 110951. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110951>

BUYLE, M. et al. Sustainability assessment of circular building alternatives: Consequential LCA and LCC for internal wall assemblies as a case study in a Belgian context. **Journal of Cleaner Production**. v. 218, p,

141-156. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.306>

CAMPOS, E. F. DE. **Emissão de CO2 da madeira serrada da Amazônia: o caso da exploração convencional**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012. Dissertação de Mestrado. 172 p. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-12062013-170523/publico/POLI_Defesa_FINAL_revisao.pdf. Acesso em: jul. 2021.

CHAI, C. et al. **Previsão da vida útil de pinturas de paredes exteriores**. Engenharia civil. v. 41, p. 51 – 63. 2011. Disponível em: <http://www.civil.uminho.pt/revista/artigos/n41/Pag51-63.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2021.

CIANCIO, D. JACQUIN, P. WALKER, P. Advances on the assessment of soil suitability for rammed earth. **Construction and Building Materials**. N.42, p.40–47, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.049>

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução no433, de 13 de julho de 2011. Disponível em: http://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/cao_urbanismo_e_meio_ambiente/legislacao/leg_federal/leg_fed_resolucoes/leg_fed_res_conama/Resol-CONAMA-433-11_PROCONVE.pdf. Acesso em: jul. 2021.

DE WOLF, C. et al. **Life cycle building impact of a Middle Eastern residential neighborhood**. Energy. v.134, p. 336-348. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.026>

DI MARIA, A. EYCKMANS, J. ACKER, K. V. Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: **Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. Waste Management**. v. 75, p. 03-21. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.028>

DONG, X. SOEBARTO, V. GRIFFITH, M. Achieving thermal comfort in naturally ventilated rammed earth houses. **Building and Environment**. v. 82, p. 588-598. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.029>

FERNANDES, J. et al. Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese

context: Rammed earth and compressed earth blocks. **Journal of Cleaner Production**. v. 241, p. 01-19, 118286. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118286>

GHISELLINI, P. RIPA, M. ULGIATI, S. Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and demolition sector. A literature review. **Journal of Cleaner Production**. v. 178, p. 618-643. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.207>

HAMMOND, G. JONES, C. **Embodied carbon – The inventory of carbon and energy (ICE)**. University of Bath – BSRIA. 2011. Disponível em: <http://www.emccement.com/pdf/Full-BSRIA-ICE-guide.pdf>. Acesso em: jul. 2021.

INTERCEMENT. **Relatório Anual** 2015. Brasil, 2015. Disponível em: <http://www.intercement.com/sites/ra2015/web/> Acesso em: jul. 2021.

KARIYAWASAM, K.K.G.K.D. JAYASINGHE, C. Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material. **Construction and Building Materials**. V. 105, p. 519-527. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.189>

MELIÀ, P. et al. Environmental impacts of natural and conventional building materials: a case study on earth plasters. **Journal of Cleaner Production**. v. 80, p. 179-186. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.073>

MILANI, A. P. S. LABAKI, L. C. Physical, Mechanical, and Thermal Performance of Cement-Stabilized Rammed Earth–Rice Husk Ash Walls. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 24, p. 775-782. 2012. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000439](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000439)

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO - MCTI. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**, 6ª edição. 2022. Disponível em: http://www.mct.gov.br/upd_blob/0237/23769.pdf. Acesso em: jul. 2021.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013** Ano Base 2012 – Relatório Final, Brasília, 2014. Disponível em: <http://www.ineia.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zweu/mdmx/~edisp/ineia0031540.pdf>. Acesso em: jul. 2021.

ineia.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zweu/mdmx/~edisp/ineia0031540.pdf. Acesso em: jul. 2021.

MIRANDA, A. S. (2017) **Análise comparativa de métodos simplificados de ACV aplicado a paredes de edificações**. Campo Grande: dissertação – UFMS. 170p. Disponível em: <https://posgraduacao.ufms.br/portal/trabalho-arquivos/download/4820>. Acesso em: jan. 2020.

NANZ, L. et al. Impacts on the Embodied Energy of Rammed Earth Façades During Production and Construction Stages. **Journal Of Facade Design & Engineering**. v. 7, p. 075-088. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.7480/jfde.2019.1.2786>

Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Eficiência Energética e Sustentabilidade da UFMS – PPGEES/UFMS. Disponível em: <https://ppgees.ufms.br/publicacoes/repositorio-ppgees/producao-tecnica-tecnologica/>. Acesso em: jan.2019.

REDDY, B.V.V. LEUZINGER, G. SREERAM, V.S. Low embodied energy cement stabilized rammed earth building—A case study. **Energy and Buildings**. v. 68, p. 541-546. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.051>

SERRANO, S. et al. Rammed earth walls in Mediterranean climate: material characterization and thermal behavior. **International Journal of Low-Carbon Technologies**. v. 12, p. 281-288. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctw022>

SILVA, B. V. **Construção de ferramenta para avaliação do ciclo de vida de edificações**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2013. Dissertação de Mestrado. 146 p. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-15052013-103100/publico/digital.pdf>. Acesso em: jul. 2021.

SOUDANI, L. et al. Energy evaluation of rammed earth walls using long term in-situ measurements. **Solar Energy**. v. 141, p. 70-80. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.002>

TAYLOR, P. FULLER, R.J. LUTHER, M.B. Energy use and thermal comfort in a rammed earth office building. **Energy and Buildings**. v. 40, p.793-800. 2008. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.05.013>

TORGAL, F. P. JALALI, S. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. **Construction and Building Materials**. v. 29, p. 512-519. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>

UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling -Compression-Ignition. Assessment and Standards Division Office of Transportation and Air Quality U.S. **Environmental Protection Agency. Report No. NR-009d July 2010**. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P10081UI.PDF?Dockey=P10081UI.PDF>. Acesso em: jul. 2021.

VERALDO, A. C. (2015). **Análise do processo construtivo de taipa mecanizada: estudo de caso da sede do canteiro experimental da UFMS**. Campo Grande: dissertação – UFMS. 121p. Disponível em: <https://posgraduacao.ufms.br/portal/trabalho-arquivos/download/4824>. Acesso em: jan. 2020.

VIANNA, F. C. **Análise de Ecoeficiência: Avaliação do Desempenho Econômico-Ambiental do Biodiesel e petrodiesel**. Dissertação Mestrado. Escola Politécnica – USP, São Paulo, 2006. 205 p. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-27112006-180855/publico/Analise_de_Ecoeficienica_Avaliacao_do_desempenho_economico.pdf. Acesso em: jul. 2021.

VOTORANTIM. **Relatório Integrado – 2015**. Brasil, 2015. Disponível em: <http://vcimentos.com.br/extras/pdf/relatorio/Relatorio-Integrado-Votorantim-Cimentos-2015.pdf>. Acesso em: jul. 2021.

ZHANG, Y. KANG, J. JIN, H. A Review of Green Building Development in China from the Perspective of Energy Saving. **Energies**. N 11, p.01-18. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en11020334>

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) – Código de Financiamento 001; e da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC – Brasil.

COMO CITAR ESTE ARTIGO

MILANI, Ana Paula da Silva; IUNES, Isabela Maria Carvalho. Aspectos ambientais do inventário do ciclo de vida da taipa de pilão. **MIX Sustentável**, v. 9, n. 3, p. 117-130, 2023. ISSN 244-73073. Disponível em: <<http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>>. Acesso em: dia/mês/ano doi: <<https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2023.v9.n3.117-130>>.

SUBMETIDO EM: 10/01/2023

ACEITO EM: 25/03/2023

PUBLICADO EM: 30/07/2023

EDITORES RESPONSÁVEIS: Lisiane Ilha Librelotto e Paulo Cesar Machado Ferroli

Registro da contribuição de autoria:

APSM: Conceituação, Metodologia, Visualização, Escrita - revisão e edição.

IMCI: Conceituação, Análise formal, Investigação, Visualização, Escrita - rascunho original.

Declaração de conflito: nada foi declarado.