FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE
CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

ASPECTOS AMBIENTAIS DO CICLO DE VIDA DA TAIPA DE PILÃO

Isabela Maria Carvalho Iunes

2022 **CAMPO GRANDE|MS**

FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

ASPECTOS AMBIENTAIS DO CICLO DE VIDA DA TAIPA DE PILÃO

ISABELA MARIA CARVALHO IUNES

Trabalho de Conclusão Final de Curso do Mestrado Profissional apresentada à Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para a obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade, na área de concentração: Sustentabilidade.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Paula Da Silva Milani

CAMPO GRANDE – MS
JANEIRO/ 2022

FOLHA DE APROVAÇÃO

ISABELA MARIA CARVALHO IUNES

ASPECTOS AMBIENTAIS DO CICLO DE VIDA DA TAIPA DE PILÃO

Redação final do Trabalho de Conclusão de Curso, aprovada pela Banca Examinadora em 31 de janeiro de 2022, na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul para obtenção do título de Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade.

Banca examinadora:

Dra. Ana Paula da Silva Milani – Orientadora
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Dr. Arthur Santos Silva
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Dra. Katia Regina Garcia Punhagui
Universidade Federal da Integração Latino-Americana

Dr. Daniel Anijar de Matos
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Profa. Dra. Andrea Naguissa Yuba
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Documento assinado eletronicamente por **Ana Paula da Silva Milani**, **Professora do Magistério Superior**, em 29/11/2022, às 07:20, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **KATIA REGINA GARCIA PUNHAGUI**, **Usuário Externo**, em 29/11/2022, às 08:10, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Arthur Santos Silva**, **Professor do Magisterio Superior**, em 29/11/2022, às 13:16, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufms.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3063257** e o código CRC **B90429FA**.

COLEGIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

Av Costa e Silva, s/nº - Cidade Universitária Fone:
CEP 79070-900 - Campo Grande - MS

AGRADECIMENTOS

Gostaria de Agradecer primeiramente à Deus pelas diversas oportunidades que ele me deu para eu persistir neste caminho de pesquisa e conhecimento.

À professora dr. Ana Paula, que também sempre me incentivou, praticamente pegou na minha mão e soube tirar o melhor de mim. Além de ser uma excelente profissional, suas orientações sempre tiverem seriedade e muito carinho, obrigada.

Aos professores Arthur, Nagui, Katia, Daniel e todos os outros professores da UFMS que me ensinaram e acrescentaram de alguma forma ao meu trabalho.

Ao Wellington, que nunca deixou de me apoiar e de me ajudar quando eu mesma não sabia mais como prosseguir. Você sempre muito determinado em fazer o impossível para que terminar minha pesquisa fosse possível. Obrigada.

À minha mãe, meu pai, Gabi, Netto e Rafa, que torceram por mim e me entenderam quando tive que me ausentar em alguns momentos. Eu amo muito vocês.

Aos amigos que estiveram ao meu lado nesses anos, me incentivaram, me apoiaram, se interessaram pelo tema para que de alguma forma pudessem me ajudar, além de torcerem muito por mim. É muito bom saber que não estamos sós.

E por fim, mas não menos importante, a UFMS e a CAPES pela oportunidade de concluir mais uma etapa da minha vida, com conhecimento adquirido e, agora, compartilhado.

RESUMO.

No contexto da sustentabilidade, o sistema construtivo taipa de pilão voltou a ser relevante por conta de sua baixa energia incorporada e baixa emissão de CO_2 durante a extração da matéria-prima até sua execução. No entanto, existem lacunas quanto ao ciclo de vida da taipa nas fronteiras de “berço a berço”. Assim, foi feito um estudo dos aspectos ambientais da taipa de pilão nas etapas de extração e fabricação, transporte até a obra, construção da parede, manutenção, demolição e reuso (reciclagem ou reversibilidade). Para tal, selecionou-se quatro tipos de taipa de pilão, diferenciando a adição do estabilizante cimento e uso do compactador manual ou mecânico. Foi utilizado o método de análise de ciclo de vida (ACV), de modo a quantificar os indicadores energético e ambiental por meio do consumo de fontes renováveis, de fontes não renováveis que cada insumo consumia nas etapas. Como resultado, foram obtidos valores de consumo de energia (MJ), emissões de gás carbônico (g) e emissões de poluentes (g), mostrando quais etapas são as mais prejudiciais ao meio ambiente, e quais variáveis tecnológicas do processo construtivo da taipa causaram mudanças consideráveis nos aspectos ambientais. Os resultados mostraram que entre as etapas analisadas, o transporte é a mais prejudicial, com maiores emissões de gás carbônico e poluentes, sendo a taipa de pilão estabilizada mais nociva ambientalmente por conta da etapa de fabricação do cimento. Por fim, foi comprovado que independente da composição da mistura da taipa, diferentes processos de compactação não têm influência relevante nos resultados do consumo de energia e nas emissões de gases. Sendo assim, seria viável a utilização de compactadores mecanizados por conta da sua facilidade de manuseio, agilidade no processo construtivo, e padronização da compactação das camadas da parede.

Palavras-chaves: ACV, “berço a berço”, indicadores energéticos e ambientais, construção com terra.

ABSTRACT

Rammed Earth is a construction technique that has become important for sustainability due its lower embodied energy and carbon of extraction, production and construction phases. However, there aren't many studies of rammed earth life cycle, especially with "cradle to cradle" boundaries. This study aims to asses environmental aspects of rammed earth walls since extraction phase until reuse phase (recycling and reversibility). Therefore, four cases of rammed earth walls were chosen, being different from the use, or not, of cement as stabilizer and the use of dynamic or manual compaction. Life cycle assessment (LCA) was the method applied to this study, in order to quantify environmental impacts indicators from renewable and non-renewable resources. As a result, the energy spent (MJ), carbon dioxide emission (g) and greenhouse gases emission (g) – GHG – were evaluated to show which phases are the most environmentally harmful and which rammed earth construction technology harms the most the environment. One thing the results indicated was that the transport phase is the most harmful one, releasing more carbon dioxide and GHG than all the others, but the cement stabilizer walls also harms the environment at production phase as well. Another thing was that the compaction process does not influence environmental aspects as much as any other activity or use of stabilizers, meaning that even though to use dynamic compaction, electric energy is spent, the dynamic equipment is still more practical, as it is easy to handle, it speeds the construction process and standardize wall layer compaction.

Keywords: LCA, "cradle-to-cradle", environmental indicators, earth constructions.

LISTA DE ILUSTRAÇOES

Figura 01 - Fases da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) 20
Figura 02 - Etapas da Análise do Ciclo de Vida (ACV) 21
Figura 03 - Canteiro experimental UFMS 39
Figura 04 - Fronteira do estudo com o método ACV 41
Figura 05 - Fronteira do estudo do ciclo de vida da taipa de pilão 43
Figura 06 – Consumo de energia das paredes nas etapas de extração e fabricação das matérias primas 58
Figura 07 a) e b) – Emissões das paredes na etapa de extração e fabricação das matérias primas 59
Figura 08 – Energia e emissão na etapa transporte até local da obra 61
Figura 09 – Emissão na etapa transporte até o local da obra. 62
Figura 10 – Consumo de energia na etapa construção 65
Figura 11 – Emissão de gases na etapa construção 66
Figura 12 – Consumo e emissão de poluentes dos insumos resina acrílica e cimento, na etapa extração e fabricação. 69
Figura 13 – Consumo de energia das paredes em cada etapa do ciclo de vida 75
Figura 14 – Emissão de CO_2 das paredes pelas etapas 75
Figura 15 – Emissão de poluentes das paredes pelas etapas 76
Figura 16 – Emissões de CO_2 77
Figura 17 – Emissão de poluentes 78
Figura 18 – Consumo de energia 78
Figura 19 – Consumo de energia etapas construção e demolição 80
Figura 20 – Emissão de CO_2 nas etapas de construção e demolição 81
Figura 21 – Emissão de poluentes nas etapas de construção e demolição 81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação solo solto e umidade ótima 46
Tabela 2 – Relação dos insumos com as entradas e saídas adotadas 48
Tabela 3 – Massa específica dos materiais 51
Tabela 4 – Tipos de taipa de pilão estudados 55
Tabela 5 – Quantidade dos insumos na fase de extração 56
Tabela 6 – Inventário do solo arenoso na fase de extração 56
Tabela 7 – Inventário do cimento na etapa de fabricação 57
Tabela 8 – Dados e combustível consumido no transporte 60
Tabela 9 – Inventário da etapa transporte até o local da obra 61
Tabela 10 – Tempo de uso da betoneira 63
Tabela 11 – Inventário da etapa construção 64
Tabela 12 – inventário da tinta – “berço ao portão” 68
Tabela 13 – Inventário da tinta na etapa transporte 69
Tabela 14 – Tempos de uso dos equipamentos na etapa demolição 71
Tabela 15 – Inventário da etapa de demolição 71
Tabela 16 – Inventário da etapa transporte e destinação 73
Tabela 17 – soma das entradas e saídas das etapas em ordem decrescente 84
Tabela 18 – Classificação das paredes por etapa e no total 85

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vidas
BTC	Bloco de Terra Comprimida
CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de Carbono (gás carbônico)
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COV	Composto Orgânico Volátil
COVNM	Composto Orgânico Volátil não Metanos
COVs/ THC	Composto Orgânico Volátil classificados em Hidrocarbonetos Totais.
DS	Demolição Seletiva
EPS	Poliestireno Estendido
GHG	*Greenhouse gas emissions*
GN	Gás Natural
H_2S	Sulfeto de Hidrogênio
Hg	Mercúrio Metálico
ISO	Organização Internacional de Normalização
MP	Material Particulado
NBR	Norma Brasileira
NH_3	Amônia
N_2O	Óxido Nitroso
NOx	Óxidos de Nitrogênio
PBT	Peso Bruto Total
PCM	*Phase Change Materials*
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
SO_2	Dióxido de enxofre
SOx	Óxidos de Enxofre
UFMS	Universidade Federal do Mato Grosso do Sul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 11
2. REFERENCIAL TEÓRICO 14
2.1. A taipa como sistema construtivo mais sustentável 14
2.2 Indicadores de impacto ambiental no ciclo de vida dos sistemas construtivos 19
2.3 Análise do ciclo de vida da parede de terra 28
3. MATERIAIS E MÉTODO 36
3.1. Sistema construtivo 36
3.1.1. Ciclo de vida da taipa de pilão 36
3.1.2. Seleção da taipa de pilão 38
3.2. Método ACV 40
3.2.1. Objetivo e Escopo 41
3.2.2. Inventário 45
3.2.3. Especificação dos insumos, equipamentos e localizações 48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 54
4.1. Etapas do ciclo de vida 54
4.1.1. Extração e fabricação 55
4.1.2. Transporte até o local da obra 59
3.1.3. Construção 63
4.2.4. Manutenção 66
4.2.5. Demolição 70
4.2.6. Transporte e destinação 72
4.3. Análise dos indicadores ambientais 74
5. CONCLUSÃO 87
REFERÊNCIAS 89
ANEXO A – INSUMOS ENERGÉTICOS 97
ANEXO B – INSUMOS MATERIAIS 100

1. INTRODUÇÃO

O fim do século XX foi marcado por preocupações sociais e ambienteis devido ao desenvolvimento descontrolado da industrialização e do mercado. Neste contexto, foi notado que o setor da construção civil ainda é responsável por 32% do consumo final de energia e por 18,4% de emissão globais, sendo notado ainda que essa porcentagem pode aumentar no decorrer da década (CBIC, 2017). Visto a significância dos dados, a construção civil teve que tomar atitudes e assumir sua responsabilidade socioambiental. Houve acordos e documentos assinados para discutir os rumos dos países no fim do século XX, como por exemplo, a Agenda 21, que foi importante para estabelecer limites ao desenvolvimento acelerado e sua responsabilidade com o ambiente e com a sociedade (CIB E UNEP – IETC, 2002). A partir dessas visões de preocupações com o meio ambiente, o setor de construção civil começou a analisar técnicas alternativas menos agressivas ambientalmente.

Dentre as construções não convencionais existentes, o sistema construtivo taipa de pilão, ou também intitulada taipa, se caracteriza por utilizar solo compactado como matéria-prima para a execução de paredes para edificações. O material utilizado na obra é a própria matéria-prima, não necessitando a passagem do mesmo em indústria para fabricação ou transformação química (CEPED,1984). Esta técnica construtiva acabou sendo preterida pela falsa associação de que os sistemas mais modernos seriam mais confiáveis que os tradicionais rurais (CIB E UNEP – IETC, 2002). Entretanto, a partir dos anos 2000, a taipa de pilão voltou a ser valorizada por conta de sua baixa energia incorporada durante a fase de extração de matéria-prima até sua execução (CIANCIO; JAQUIN; WALKER, 2013).

Alguns países, como Austrália, possuem incentivos para construção de sistemas mais sustentáveis, gerando certificados para as edificações construídas com menor impacto ambiental, intituladas “edificações verdes” (TAYLOR; FULLER; LUTHER, 2008). Esses incentivos junto com pesquisas técnico-científicas reforçam vantagens da construção alternativa, visto que sua agressão ao meio ambiente é menor que as técnicas convencionais.

Contudo, existem questionamentos sobre o uso, operação e descarte de vedações com taipa de pilão ao longo do seu ciclo de vida, pois há poucos estudos pontuais verificando se as fases de operação e descarte promovem o mesmo nível de

sustentabilidade que as fases de extração, transporte e fabricação, sendo eficiente, durável e reutilizável (SOUDANI, et al., 2017). Nesse sentido, Taylor, Fuller e Luther (2008) verificaram que as edificações de taipa demandam maior quantidade de energia para aquecimento do ambiente interno em comparação com edificações de sistemas convencionais, de maneira a promover conforto térmico aos ocupantes de climas frios. Assim, há uma limitação observada na fase de operação, em detrimento do melhor desempenho da taipa em fases anteriores do ciclo de vida.

Há metodologias que estudam cada etapa da vida de um determinado produto ou serviço, como o caso da avaliação do ciclo vida (ACV), que avalia os impactos ambientais causados durante a vida útil do produto ou serviço, a partir de entradas de insumos e energia; e saídas do produto, resíduos e emissões de poluentes (NBR ISO 14044/2009). Os impactos ambientais são qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, resultantes de atividades humanas (CONAMA/1986). Consegue-se medir essas alterações a partir dos aspectos ambientais, também chamados de indicadores de impacto ambiental, encontrados nas saídas da ACV, como, por exemplo, as emissões de CO_2 que tem potencial de colaborar para o aquecimento global, sendo este último um impacto ambiental.

No caso da taipa, Arrigoni et al. (2017) destaca os diversos estudos do seu ciclo de vida desde a extração do solo até a execução da parede, sendo considerado um material de baixo impacto ambiental. Porém, no caso das etapas de operação e descarte da taipa, as pesquisas são pontuais e sem integração nos quesitos desconforto dos ocupantes, sua eficiência energética e manutenção. Ainda se concentram os estudos técnicos de suas características físico-mecânicas-térmicas e durabilidade, como exemplo, Bui et al. (2009), que estudaram experimentalmente o desempenho térmico da taipa e a resistência à intemperismos ao longo do tempo, o que corrobora a falta de estudos holísticos sobre o tema impactos energético e ambiental nas fases de uso ao reuso da taipa.

Na etapa do descarte, Veraldo (2015) em seu estudo sobre processo construtivo de taipa mecanizada enfatiza que a taipa sem estabilizante químico é um material reversível e, portanto, sem nenhum impacto ambiental. Entretanto, atualmente existe possibilidade de uma edificação construída com taipa adicionada de cimento ser reciclada no fim de sua vida, se tornando um resíduo de demolição (RCD) e ser reinserido no setor da construção civil. O impacto ambiental que o cimento promove pode ser reduzido, tanto pelo fato de sua adição na mistura do solo não gerar

um aumento significativo na energia incorporada do processo construtivo, sendo ainda considerada mais sustentável que as técnicas convencionais, como também pela destinação correta do resíduo (REDDY, KUMAR, 2010). No caso da reinserção do RCD na construção, se reduz o lixo descartado e consequentemente, o uso de mais espaços ambientais como aterros (GHISELLINI, RIPA E ULGIATI, 2018).

Tendo em vista a falta de estudos que integram as informações sobre a eficiência energética e ambiental da taipa dentro do contexto de “berço a berço” desse sistema construtivo, é importante entender o impacto ambiental da taipa para contribuir no processo de tomada decisão frente aos sistemas convencionais de construção.

Diante destas situações, se faz necessário encontrar indicadores que revelem os impactos energético e ambiental do ciclo de vida da taipa nas etapas após a sua construção. Além disso, é relevante quantificar o quanto é eficaz ambientalmente a taipa adicionada de estabilizantes cimentícios no processo de manutenção e fim da sua vida útil.

Assim, **o objetivo geral** foi determinar a energia demandada e a emissão de gás carbônico em um 1m² de parede da taipa de pilão nas etapas de extração de matéria-prima, fabricação de materiais, execução da taipa, manutenção durante o uso, demolição e destinação; considerando as condições da aplicação de estabilizante e a mecanização neste sistema construtivo.

Com isso, **os objetivos** específicos foram:

- estudar a influência da tecnologia aplicada no processo construtivo da taipa nas etapas do seu ciclo de vida para fomentar a tomada de decisão sob os aspectos ambientais de uso da taipa com ou sem estabilizante cimentício, e manual ou mecanizada;
- verificar nas etapas demolição e destinação, os aspectos ambientais de transporte e britagem da taipa para viabilizar a sua escolha como sistema construtivo pelo benefício da propriedade de reversibilidade.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. A taipa como sistema construtivo mais sustentável

O protocolo de Kyoto foi um acordo internacional ocorrido em 1997 com o objetivo de propor reduções de poluentes causados pelo crescimento desenfreado dos países (ONU, 1998). Emissões de gases poluentes na atmosfera foram considerados vilões do planeta e foi estipulado que houvesse redução da emissão de CO_2 pelos países presentes no acordo. Como a construção civil também é responsável pela emissão de CO_2, buscar técnicas construtivas mais sustentáveis tornou-se relevante.

Para que o processo construtivo seja considerado sustentável, o mesmo deve seguir alguns requisitos como: redução e otimização do uso material, bem com a redução de resíduos gerados durante o processo construtivo (CIB E UNEP – IETC, 2002). Além disso, deve-se observar o ciclo de vida do material, pois quanto mais durável ou versátil o mesmo for antes do fim de sua vida, terá menor potencial de causar impactos ambientais.

Reddy, Leuzinger e Sreeman (2014) verificaram a energia incorporada do sistema construtivo taipa, para as etapas de extração de matéria-prima até sua execução. Eles mostram que a energia incorporada é significativamente menor se comparada com o processo construtivo convencional, o que possibilita também na redução de emissão de carbono. Isto porque, para se estabilizar o solo, adicionar em torno de 6% de cimento é suficiente para deixá-lo resistente e durável e, portanto, a emissão de CO_2 é muito menor se comparada com o concreto e alvenaria cerâmica (KARIYAWASAM; JAYASINGHE, 2016).

Kariyawasam e Jayasinghe (2016) expõem características do processo construtivo da taipa de pilão para que este faça parte do desenvolvimento sustentável. Além da emissão de carbono do material principal ser bem menor, sua energia incorporada é considerada baixa pelo fato da matéria-prima não precisar ser processada, como no caso do tijolo cerâmico. Nanz et al. (2019) também verificou a energia incorporada do processo construtivo e concluiu que o único indicador que não seja favorável para ser considerada uma construção ambientalmente vantajosa é a distância entre a jazida de solo até o local da obra, pois o transporte do material pode emitir uma quantidade de CO_2 equivalente ao processo construtivo convencional.

Quando o solo pode ser retirado no próprio local da obra, é dispensado o transporte, e não há um processo de fabricação antes do processo de execução da parede (CIANCIO; JAQUIN; WALKER, 2013).

O estudo de Nanz et al. (2019) avaliou duas construções existentes feitas de taipa de pilão, porém construídas de maneiras distintas. Enquanto a construção “A” foi feita de taipa de pilão com espessura de 45cm e a fabricação do material bem próximo ao local da construção, a construção “B” foi feita como parede dupla e a adição do isolante térmico espuma de vidro celular pré-fabricados em um local mais distante da construção. Os autores investigaram a energia incorporada de cada um dos casos desde a extração do material até a construção da edificação, utilizando como comparação referências convencionais, como por exemplo no caso “A”, o uso de dupla de tijolos cerâmicos e, no caso “B”, o uso de tijolos e EPS.

Os autores acima averiguaram que, no caso da edificação “A”, a energia incorporada foi 80% menor que a referência adotada, principalmente pelo fato da parede de taipa de pilão não precisar ir ao forno para fabricação do material de construção. Já no caso da edificação “B”, houve apenas uma diminuição de 21% da energia incorporada de sua referência, isto porque o transporte dos materiais tanto para produção quando, posteriormente para obra, requereu três vezes mais energia do que no caso “A”. Foi notado que o transporte é responsável por pelo menos 50% da energia incorporada das edificações.

Torgal e Jalali (2012) mostraram que, mesmo que o tipo de solo para construção não possa ser considerado uma fonte renovável, o solo ainda assim é muito menos agressivo ao ambiente que a extração de matéria-prima, sendo o transporte sua única forma de poluição. Os autores também verificaram que a emissão de carbono da parede de taipa de pilão não estabilizada é 63% menor do que as paredes convencionais de alvenaria cerâmica e concreto armado. Por fim, também foi apresentada uma melhor qualidade de ar interno de um ambiente vedado com taipa, visto que a parede absorve mais umidade que tijolos cerâmicos, controlando melhor a umidade relativa interna do ambiente.

Sameh (2014) investigou os benefícios econômicos e ambientais de promover construções com terra no Egito, uma região de clima quente e seco. Dentre seus pontos destacados, sua conclusão sobre as vantagens ambientais das técnicas de construção com terra é que ela pode ajudar a reduzir a emissão de carbono causada no Egito, em que 67% da emissão de CO_2 é provocada pela produção e uso do

cimento. Além disso, todo o setor de construção civil do Egito é responsável por 28% do total de emissões de CO_2 e ao substituir o material convencional por terra é possível reduzir a pegada de carbono desse setor, principalmente se o solo utilizado para confecção da edificação for do próprio local da obra, o que elimina a fase de transporte da matéria-prima. Por fim, Sameh (2014) também verificou os aspectos ambientais na fase de operação da edificação, destacando a redução do consumo de energia por meio da estratégia bioclimática da ventilação natural pelas aberturas da edificação e melhoria na qualidade do ar interno devido a construção com terra promover eficientemente a regulação da umidade do ambiente.

Da Rocha, Consoli e Johann (2014) estudaram estabilizadores naturais que pudessem ser inseridos no processo construtivo taipa de pilão, de maneira que eliminasse por completo a adição do cimento. Isto porque, segundo estes autores, a taipa é considerada bem mais sustentável que o concreto armado, mesmo com o estabilizante cimento Portland, já que o teor de uso é em média de 12% da massa de solo. Assim, Rocha, Consoli e Johann (2014) propuseram a substituição do cimento por cal ou cinzas volantes, em que a taipa mantivesse seu desempenho físico-mecânico, porém reduzindo a emissão de CO_2.

Reddy e Kumar (2010) calcularam a energia incorporada do processo construtivo da taipa de pilão, alterando a porcentagem do estabilizante cimento e a adição de cal para aumentar a resistência à compressão. Foi concluído que a energia de compactação para executar a parede de taipa de pilão aumenta quando se aumenta a porcentagem de cal na mistura do material. Já no caso da adição do cimento, a energia de compactação teve pouca variação, considerado irrelevante no estudo, mesmo porque a energia incorporada da adição do cimento é muito mais significativa do que o gasto de energia na compactação da mistura de solo + estabilizante. Por fim, foi concluído que, apesar da energia incorporada do processo construtivo da taipa de pilão aumentar com a incorporação de cimento, ainda assim esse valor é de 15 a 25% da energia incorporada na fabricação do bloco de concreto.

No setor da construção civil, há incentivos em alguns países para que haja construções com menores impactos ambientais. No Brasil, o banco de financiamento de empreendimento caixa econômica possui um certificado “Selo Casa Azul+ Caixa” para propostas de construções habitacionais que adotem soluções de eficiência energética, desde a concepção da obra, ou até na ocupação da mesma. Este tipo de certificado não especifica o material que seria ambientalmente mais sustentável, mas

sim, se seu projeto de construção seja eficiente energeticamente, com otimização do uso de material e de energia (CAIXA, 2009).

Outro certificado conhecido no Brasil é o selo LEED, desenvolvido nos Estados Unidos em 1993, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental causado na construção civil. O selo é dividido em várias modalidades para que cada edificação possa se encaixar, abrangendo as fases de projeto e a construção da obra. Segundo a GBC Brasil, o Brasil é o 3º país com mais edificações registradas para obter o selo LEED (GBC BRASIL, 2014).

Também há o processo AQUA, iniciado na Europa no século XX. O processo significa “alta qualidade ambiental” e tem como intenção a gestão do empreendimento e qualidade ambiental do edifício. Essa qualidade abrange os impactos sobre o ambiente externo, uma eco-construção e eco gestão, bem como o ambiente interno sadio e confortável (INMETRO – FUNDACAO VANZOLINI, 2013).

Outros países possuem incentivos para que se utilizem materiais considerados mais sustentáveis do que o convencional, além de um estudo de projeto e logística da construção. Na Austrália, há um certificado de “edificações verdes” que incentiva a pratica de redução ou até mesmo elimina os impactos negativos ao meio ambiente e a seus operadores. Dessa maneira, o incentivo é tanto para eficiência energética da edificação, reduzindo seu consumo de energia, quanto para o uso de recursos materiais que criem um ambiente mais saudável para os operadores da edificação, e também não seja prejudicial ao ambiente (GBCA, 2019).

Como a maioria dos certificados de baixo impacto ambiental avalia principalmente a etapa da construção da edificação, as etapas de operação, manutenção e descarte do sistema construtivo são pouco exploradas. 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). Por isso, há poucos estudos das etapas uso ao reuso dessas construções por meio de uma análise holística, verificando os aspectos ambientais da edificação pela integração dos dados relativos à sua eficiência energética durante o uso, ao seu gasto energético e emissão de poluentes com a manutenção e as possibilidades de reutilização e/ou reciclagem no final do ciclo de vida.

Há alguns estudos pontuais sobre eficiência energética e conforto em edificações construídas com taipa. Taylor, Fuller e Luther (2008) verificaram a eficiência energética e o conforto de uma edificação na Austrália. Essa edificação

estava localizada em uma universidade, executada de taipa e com painéis solares para captação de energia solar, sendo comparada com uma edificação situada na mesma região, de construção convencional. Foi verificado pelos referidos autores que a intitulada “edificação verde” consumia menos energia, porém a redução do consumo de energia foi considerada baixa, comparada ao tradicional, visto que a edificação verde tinha painéis solares, e a redução foi de apenas 13%. Quando foi analisado o conforto térmico, foi verificado que, pelo fato de a taipa possuir alta massa térmica devido a sua espessura, o ambiente estudado foi considerado levemente frio. Os autores concluíram que o ideal seria rever o projeto dos painéis solares para que sejam utilizados de maneira eficiente; além disso, pode ser aplicado isolante térmico na parede de taipa de pilão para regiões mais frias.

Outro estudo de conforto térmico foi de Soudani et al. (2017), também na Austrália, sobre uma edificação executada com taipa de pilão. Os autores verificaram a alta massa térmica da parede e observaram a consequência dessa propriedade. A transferência de calor entre os ambientes era lenta devido à alta inércia térmica da taipa, o que gerava um armazenamento de energia durante o dia e sua posterior transmissão para os ambientes adjacentes durante a noite. Neste estudo de caso, esse atraso térmico foi benéfico para o conforto térmico, pois deixava a edificação fresca durante o dia e durante a noite, quando a temperatura externa caía, a edificação transferia o calor recebido pelo dia.

Dong, Soebarto e Giffith (2014) também estudaram a possibilidade de uma edificação construída com taipa reduzir o consumo de energia em 3 regiões da Austrália. Para isso, eles estudaram quais alternativas de disposição de aberturas, como janelas para ventilação natural, seriam adequadas para manter o ambiente interno confortável. Foi concluído que a edificação consegue se manter confortável sem precisar de auxilio de ar-condicionado. Porém, quando a temperatura externa do ambiente for muito baixa, a edificação necessita de auxilio de equipamentos de aquecimento. Suas conclusões condizem com a de outras pesquisas, mostrando que a taipa de pilão pode ser eficiente em regiões amenas a quentes, como por exemplo, no Brasil.

Diante dos estudos apresentados, foi verificado que a taipa de pilão é um processo construtivo com significativas vantagens ambientais comparado aos sistemas convencionais. Isso devido às etapas iniciais do seu ciclo de vida já estarem respaldadas de dados que comprovam seu potencial mais sustentável, tanto pela sua

baixa energia incorporada quanto pela sua baixa emissão de gases poluentes no processo de extração da matéria-prima até a execução da taipa. Como existem estudos pontuais e isolados que destacam pontos positivos de uma edificação de taipa durante o seu uso e reuso, o sistema construtivo tem potencial de ser considerado sustentável em plenitude ao analisar o seu ciclo de vida completo.

2.2 Indicadores de impacto ambiental no ciclo de vida dos sistemas construtivos

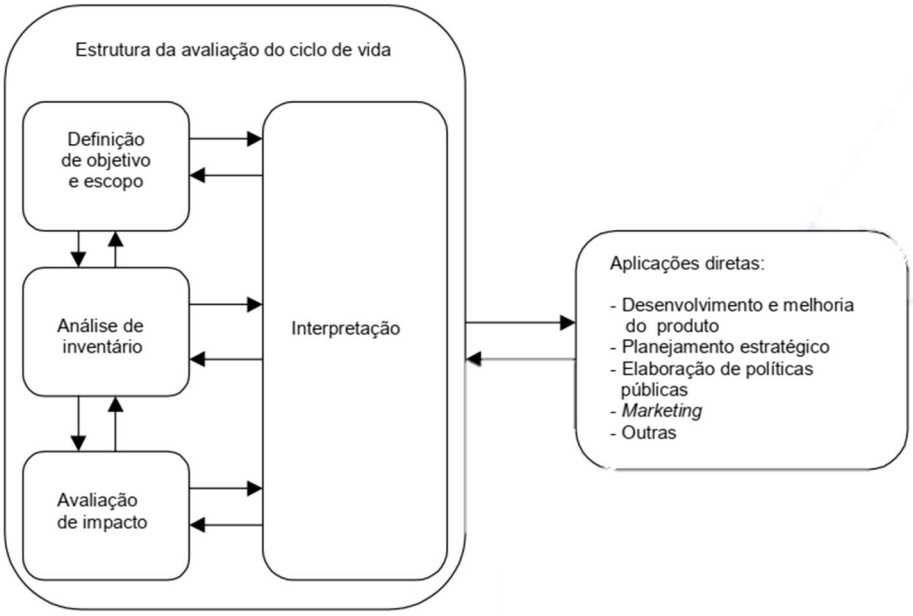
Há vários estudos de qualificação ou até mesmo quantificação dos aspectos ambientais de um determinado produto ou processo. Uma vertente desses estudos busca analisar o potencial de impactos energéticos e ambientais ocasionado pelo produto. Estes estudos vão desde partes pontuais, como durabilidade de um produto ou seu gasto de energia durante sua operação, até uma análise mais complexa, como a do ciclo de vida do mesmo. Quando o ciclo de vida é estudado, ele é dividido em etapas, para que seja mais fácil a obtenção de dados reais e concretos. Com isso, em cada etapa, é verificado, principalmente, o gasto de energia, o resíduo gerado e a emissão de gases.

A metodologia da avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta que busca obter conhecimentos de gestão ambiental de um determinado produto ou serviço, a partir das entradas, saídas e os potenciais impactos ambientais conforme a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009).

Para obtenção desse conhecimento, a ACV se divide em fases (figura 01): o escopo, que tem como objetivo definir o objeto de estudo, sua unidade funcional e qual o limite do estudo (fronteiras); o inventário, que abrange a coleta de dados do fluxo de massa e energia, baseadas nas entradas e saídas do processo; a análise do inventário, que avalia principalmente os indicadores de impacto, os quais são resultados das saídas com os dados já trabalhados, portanto um valor equivalente; e avaliação dos impactos ambientais, que verifica as consequências ambientais causadas por esses aspectos ambientais encontrados conforme a NBR ISO 14044 (ABNT, 2006).

Os principais impactos ambientais observados são o aquecimento global, eutrofização, redução da camada de ozônio, contaminação do solo e água, redução de recursos bióticos a abióticos e acidificação dos oceanos.

Figura 01 - Fases da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)



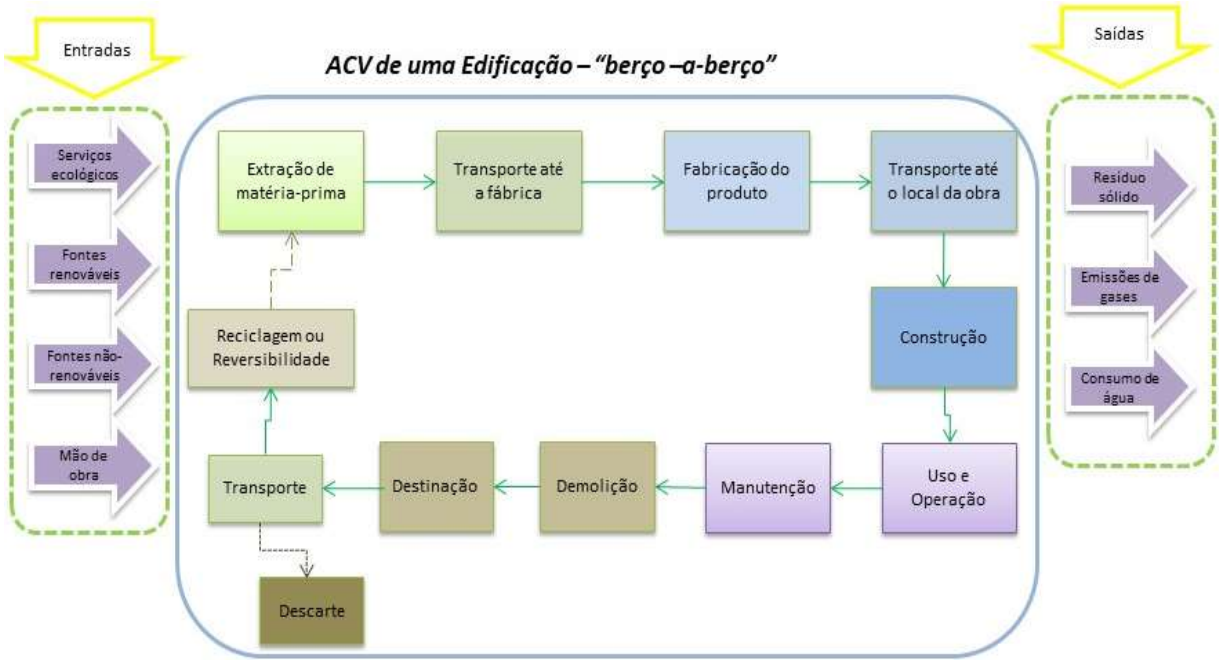
Fonte: NBR ISO 14040/2009.

Como a ACV divide o ciclo em etapas, foi adotado que a primeira etapa seria chamada de berço e, portanto, foi adotado o nome de túmulo para a última etapa, o fim da vida útil do produto ou processo (NBR ISO 14044/2006). No caso de um processo construtivo as etapas abrangem desde a extração da matéria-prima; fabricação dos produtos; o transporte do material primário para a fábrica e, posteriormente, o material gerado da fábrica até seu local de operação; a instalação; o uso e a manutenção do produto; e sua destinação final, podendo ser para reciclagem ou descarte. Cada etapa descrita tem potencial de proporcionar um impacto ambiental, pois são avaliadas as entradas como: a energia consumida, os insumos utilizados e o consumo de água; e as saídas que são: gases emitidos e os resíduos gerados no processo.

As saídas observadas são também chamadas de indicadores ambientais, sendo sempre mensuradas em medida de massa ou energia, para que seja possível avaliar os dados e, a partir desses aspectos, estimar quais impactos ambientais podem ser potencializados em razão do processo (figura 02). Pela perspectiva da ACV, pode se concluir que quanto menor o consumo de energia e emissão de gases, mais sustentável o produto é considerado (CHEHEBE, 1998 apud CAMPOS, 2012). Além disso, a durabilidade do produto na etapa de operação também é um fator importante, pois o tempo utilizado de maneira útil antes de ser devolvido, ou

descartado, na natureza influencia na análise de impacto ambiental (VIGON, 1993 apud SEO; KULAY 2006).

Figura 02 - Etapas da Análise do Ciclo de Vida (ACV)



Fonte: Adaptado de REZA, SADIQ e HEWAGE, 2014.

São considerados dentro do processo do sistema construtivo parede as seguintes etapas para a ACV:

- Etapa de produção: são as atividades que iniciam o ciclo de vida de uma edificação, que são a extração de matéria-prima, o transporte da matéria prima até as fábricas, a fabricação de algum material que será utilizado na mistura, o processo de manufatura e o transporte dos materiais até o local da obra. Nessa etapa há consumo de diferentes insumos como matérias-primas, água e energia de fontes renováveis e não-renováveis, sendo importante a otimização do consumo de materiais e dos processos a fim de diminuir o impacto ambiental;
- Etapa de construção: são as atividades relacionada na construção da edificação, desde fundação, estrutura, cobertura e acabamentos. Será contabilizado principalmente o gasto energético de maquinários em cada atividade, além do gasto energético da própria mão-de-obra que executa e auxilia na construção;
- Etapa de uso (operacional): inclui as atividades relacionadas ao uso de uma edificação durante sua vida útil. Como será abordada principalmente a

envoltória da edificação, sua interferência está ligada ao consumo de energia para aquecimento ou resfriamento de um ambiente. Quanto mais eficiente é a envoltória, menor é o consumo de energia. Além disso, é analisada também a qualidade do ar interno que a envoltória promove aos operadores, pois a emissão de compostos orgânicos voláteis (COVs) é prejudicial à saúde;

- Etapa de manutenção: aborda toda energia consumida para manter as paredes conforme eram originalmente. Será considerada qualquer ação para reformar, reparar ou repintar as paredes, sendo contabilizado o gasto energético para a produção e transporte do material de reparo, além do gasto energético da mão-de-obra;
- Etapa de demolição e destinação:
    - - Descarte: inclui as atividades para a demolição da edificação e a destinação do resíduo de demolição. Esta etapa pode ter diferentes destinos, o primeiro seria o descarte do material, em que é abordado o gasto de energia para demolir a edificação, o transporte do resíduo até o aterro, e o seu descarte no aterro;
    - – Reciclagem: inclui as atividades desde a demolição, separação e destinação do resíduo. Nessa etapa, a demolição deve ser planejada para que o máximo de material seja reaproveitado, o que gera uma otimização do uso de energia. Além disso, também é contabilizada a energia gasta pelo transporte até à fábrica de reciclagem, e pelo seu processo para se tornar um material secundário;
    - – Reversibilidade: esta etapa é uma singularidade do processo construtivo taipa de pilão sem estabilizante cimentício, promovendo a reinserção da matéria-prima solo, sem passar por um processo industrializado para seu reuso. Essa atividade também inclui a energia consumida para fazer a demolição seletiva e britagem, a fim de que o material reversível não seja misturado com outros resíduos.

Campos E. (2012) estudou a ACV no âmbito da construção civil, principalmente as etapas do ciclo de vida do material, mostrando quais indicadores são relevantes em cada fase. Foi verificado que para as fases de operação e manutenção de uma edificação, os principais indicadores de um bom funcionamento e baixo impacto ambiental são a eficiência energética; a manutenção da edificação; e a redução do uso de água potável. A eficiência energética de uma edificação é quantificada pela

utilização de energia, seja eletricidade ou a gás, pelos operadores. Já a manutenção verifica a durabilidade do material, e o custo para a edificação manter o seu estado inicial de uso em perfeito funcionamento.

O estudo de ACV na fase de uso é um pouco mais comum em materiais de construção convencionais. Ingrao et al. (2016) realizaram uma simulação de quatro tipos de paredes com disposição de materiais diferentes, mas basicamente com materiais convencionais, em uma região de temperaturas amenas da Itália. As fases analisadas pelos autores foram desde a produção da parede, no caso para as diferentes combinações, seu uso e posteriormente quando fosse o fim da vida útil da parede. Na fase operacional, os indicadores analisados foram o desempenho da parede pronta, como suas propriedades físicas e mecânicas, e o consumo de eletricidade para aquecimento ou resfriamento da edificação.

Ingrao et al. (2016) fizeram uma ponderação das categorias escolhidas como indicadores para ranquear suas paredes por seus prejuízos ambientais. Três categorias foram escolhidas para quantificar o impacto causado ao meio ambiente: a mudança climática, sendo calculado pela quantidade emitida de gases poluentes pelas paredes; o consumo de materiais de fontes primárias, calculada pela quantidade de extração de matéria-prima e; a saúde das pessoas que operariam essa edificação, verificada por uma medida da gravidade de uma doença, expressada em anos que podem ser perdidos devido a essa doença ou deficiência. Como conclusão, a disposição de materiais menos prejudicial ao meio ambiente é com o uso de ventilação natural na edificação, reduzindo o impacto tanto de energia quanto de emissão de gases poluentes. Além disso, o uso de material reciclado como isolantes térmicos é uma boa saída para que no fim da vida útil da parede possa também diminuir o impacto ambiental.

De acordo com Cabeza et al. (2014), há dificuldades de comparar vários estudos de casos de ACV em edificações devido aos fatores externos de cada região estudada e a variabilidade de resultado que essas condições implicam. Estes autores verificaram diversos estudos de ACV a fim de comparar resultados entre si para encontrar padrões de indicadores e unidade funcional. Apesar de nem todos os artigos estudados utilizarem os mesmos parâmetros de análise, a unidade funcional mais utilizada para edificação foi a de 1m² de parede. E os indicadores para a etapa de operação mais utilizados foram o consumo e a fonte de energia para aquecimento ou

resfriamento; consumo de energia para iluminação; e o gasto de energia por aparelhos domésticos.

Marceau e VanGeem (2006) analisaram um estudo de caso por meio da ACV de edificações, simulando uma edificação com dois tipos convencionais de paredes externas, madeira e concreto, e as analisaram em 5 regiões diferentes dos Estados Unidos, a fim de comparar os resultados dos impactos ambientais. As etapas abordadas pelos autores foram desde a construção da edificação até a operação, a partir dos indicadores de consumo de energia e consumo de combustível fóssil ou gás natural. Os resultados encontrados foram que a etapa de operação causa mais impacto ambiental que a construção, principalmente se a fonte de energia for de combustíveis fósseis, que além de prejudicar o ambiente, prejudica a saúde humana.

Proietti et al. (2013) estudaram o ACV de uma edificação na Itália, verificando alternativas na estrutura que pudessem trazer melhorias na edificação, desde o uso da edificação até a destinação, chamada na ACV de “berço-a-berço”. Na fase de utilização, os indicadores colhidos foram o consumo de energia, que foi dividido em cada caso em que há o consumo como o aquecimento de água, tomadas, eletrodoméstico e iluminação; e o gasto com a manutenção do envelope da construção, principalmente com o uso de painéis fotovoltaicos. No caso de edificações com isolamentos nas paredes e ventilação natural se reduz consideravelmente o consumo de energia, porém ainda há consumo, considerado na ACV como impacto ambiental. A solução considerada por Proietti et al. (2013) para reduzir o impacto ambiental do consumo de energia foi a utilização de painéis solares que produzem energia em uma proporção maior que o consumo.

Há também estudos de materiais que compõem a edificação, como no caso do estudo de Carabano et al. (2017) que analisaram o potencial de impacto ambiental de três isolantes térmicos, a lã de vidro, o poliestireno extrudado (XPS) e a cortiça. Foi proposto um estudo comparativo utilizando a metodologia ACV, sendo analisadas as seguintes etapas: extração da matéria-prima, fabricação do material, execução do material na edificação (berço ao portão), e o fim da vida. A unidade funcional adotada foi a de o Kg necessário para obter uma resistência térmica de 1m² K/W. Os autores identificaram que o isolante térmico cortiça obteve menores valores em quatro impactos ambientais: esgotamento de recursos abióticos; eutrofização; potencial de mudança climática e potencial de oxidação fotoquímica. A lã de vidro obteve o menor valor para a acidificação, entretanto, no ultimo impacto analisado, a deterioração da

camada de ozônio, a lã de vidro obteve o maior valor. Apesar dos autores concluírem que, no geral, a cortiça apresenta menores impactos ambientais, nenhum dos três materiais pode ser considerado realmente mais benéfico que os outros, pois os valores não foram considerados discrepantes entre si.

Reza, Sadiq e Hewage (2014) analisaram o ciclo de vida de edificações por meio da quantificação de energia consumida em cada etapa de todo o ciclo. No caso, os autores utilizaram a ACV para fazer a quantificação energética e verificar sua confiabilidade, testando dois tipos de residência no Canadá, uma de unifamiliar e multifamiliar. Para isso, os autores verificaram cada matéria-prima, material e combustível utilizado na edificação, desde a sua construção até o fim da vida útil, e verificaram alguns indicadores para cada etapa da ACV. Os indicadores analisados foram: a quantidade de energia utilizada pelo material à montante; a quantidade de emissões de gases; a quantidade de emissões de água e sua perda ecológica; o descarte de resíduo sólido; e o custo de vida para os operadores. Na etapa da manutenção foram analisados também o serviço de reparação da edificação, o gasto de energia dos trabalhadores, e o impacto ambiental das obras de reforma. Como o intuito da pesquisa era somente validar o método de quantificação energética na ACV, foi concluído que o método é válido para quantificar o fluxo energético e destacam a importância da quantificação para a tomada de decisões na hora de projetar uma edificação mais sustentável.

Hanandeh (2015) também fez um estudo de ACV “berço-ao-túmulo” de paredes, avaliando e comparando a eficiência dos processos construtivos convencionais da Jordânia. Este estudo utilizou como unidade funcional uma residência unifamiliar, abrangeu as disposição e espessura de materiais para compor a parede, e questionou qual composição construtiva seria a mais benéfica ambientalmente e economicamente. O autor concluiu que o uso de isolantes térmicos potencializa o impacto ambiental, e que o uso de calcário na composição, como matéria prima alternativa, não é eficiente, resultando, portanto, que a parede de concreto armado com espessura mínima oferece o melhor desempenho ambiental.

Há estudos focados na pegada ecológica de cada fase da ACV, como forma de quantificar o impacto ambiental de cada material, serviço ou produto usado em cada fase. Martinez-Rocamora, Solís-Guzmán e Marrero (2017) estudaram a pegada ecológica de uma edificação, focando nas etapas de uso e manutenção. Para isso, fizeram um estudo de caso de uma edificação construída em 1948 na Espanha, e

analisaram todos os materiais e produtos utilizados para construir a edificação, pois estes contribuem na avaliação das necessidades dos serviços de manutenção; como também todos os equipamentos e disposições na edificação para representar o tipo de uso. Como indicadores para a fase de manutenção, foi estudado o tempo para retoques na pintura de paredes e tetos, e no caso de portas e janelas, o tempo para as devidas reparações, além das manutenções dos próprios equipamentos domésticos. Foi concluído que as pegadas de carbono são as predominantes nas etapas de uso e manutenção, mas que o uso de materiais mais duráveis nas esquadrias e o uso de soluções mais sustentáveis na edificação ajudam a reduzir a pegada de carbono.

A destinação é outra etapa importante para a análise dos aspectos ambientais do produto, ou seja, um material não agressivo à natureza não se torna resíduo e pode ser reinserido como matéria-prima. Este exemplo é muito comum em materiais que não sofrem processos de combustão, ou sem mistura química, como, por exemplo, o solo, visto que o mesmo é considerado reversível, pois volta para a natureza como fonte de origem. Entretanto, com as tecnologias e estratégias ambientais desenvolvidas nos últimos tempos, a ideia de reutilizar ou reciclar o produto já no fim de sua operação se torna viável e benéfica ao meio ambiente.

Alguns estudos mais antigos já mostravam como a reciclagem da maior quantidade de material de demolição das construções pode ser benéfica ao meio ambiente. Blengini (2009) verificou a viabilidade e o impacto ambiental de reciclar o máximo de resíduo da demolição de uma edificação. O referido autor concluiu que mesmo com a fase de reciclagem de materiais, que compõe o transporte do material até a fábrica e o processo de reciclagem, essa etapa do ciclo de vida causa menos impacto ambiental e energético do que descartar todo o material em aterro, sendo um procedimento prático e viável.

A redução de resíduos no ambiente é prioridade num mundo em que se sustenta de produção e processos, a reciclagem e reuso dos materiais geram novos produtos que podem ser vendidos novamente, gerando mais empregos nesse novo setor, e reinventando produtos sem precisar extrair ainda mais recursos finitos do ambiente. Esse tipo de gestão é chamado de economia circular, em que a ideia principal é a redução de resíduos destinados ao aterro, e mais materiais secundários inserido novamente no mercado.

Ghisellini, Ripa e Ulgiati (2018) explicam como a economia circular funciona ao analisar o ciclo de vida, intitulando a análise de “berço-a-berço”. Isto porque os resíduos de construção e demolição (RCD) podem ser vistos como materiais secundários para serem reutilizados ou reciclados. Para obter o RCD é necessário que haja coleta dos materiais de demolição, de preferência que haja também uma seleção dos materiais para que resíduos com potenciais de se tornar um RCD não sejam descartados para o aterro. A implementação da economia circular reduz a quantidade de lixo destinada ao aterro, e, portanto, reduz o gasto com a tributação para descartar o material, como também minimiza o uso do aterro de maneira que não seja necessário que mais locais se tornem novos pontos de descarte destes resíduos.

O planejamento de ter uma economia circular implementada na construção civil desde a fase de projeto dessa obra é possível obter um impacto ambiental menor ainda, com menos descarte de material e mais materiais para se tornarem um RCD reciclado (RUIZ; RAMON; DOMINGO, 2020). Dentre as fases da economia circular, se encontra a demolição seletiva (DS), a qual seleciona como deve ser feita a demolição de maneira que a maior quantidade de resíduo possa ser aproveitada como material secundário. Além disso, como o transporte de material é prejudicial ao meio ambiente, o ideal seria que os procedimentos de reciclagem fossem realizados no próprio local onde houve a demolição (GHISELLINI; RIPA; ULGIATI, 2018).

Nesta mesma linha, Di Maria, Eyckmans e Acker (2018) estudaram qual alternativa de descarte para o resíduo de demolição é mais benéfica ambientalmente e economicamente. As opções para o RCD foram de descarte em aterro e posterior reciclagem; e de descarte por meio de coleta seletiva e reciclagem, sendo que a edificação já foi construída com concreto com adição de RCD. Os autores concluíram que a demolição seletiva apresenta o menor impacto ambiental por conta da melhor eficiência no processo de recuperação dos resíduos. Outros benefícios ambientais apresentados foram o reuso na substituição das matérias primas do concreto por material reciclado e a redução de resíduos destinados aos aterros.

Segundo Buyle et al. (2019) a utilização de materiais pré-fabricados, que no caso apenas são montados e desmontados em uma obra, reduz ainda mais a geração de resíduos de demolição, beneficiando o meio ambiente. Além disso, 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. Por fim, os autores destacaram a necessidade de estudos quantitativos,

de maneira que o mesmo demonstre o benefício ambiental de aplicar estratégias de economia circular.

Proietti et al. (2013), ao elencar alternativas para a edificação alcançar menor impacto ambiental na etapa do fim do ciclo de vida, verificaram quais materiais seriam mais benéficos ao meio ambiente no tocante de aumento da porcentagem de resíduo que poderiam ser destinados à reciclagem. A escolha da estrutura de aço, utilizando o mínimo possível de tijolos cerâmicos para vedação, promove uma demolição seletiva. Os autores ainda concluíram que a desconstrução seletiva e controlada permite a reciclagem e o reuso eficiente de até 95% dos materiais, reduzindo significativamente o impacto ambiental ao comparar com todo esse resíduo sendo destinado ao aterro, o qual pode emitir até 87% de gases poluentes.

Em um estudo de caso de ACV simulando uma edificação na Austrália, Aye et al. (2012) verificaram o impacto ambiental do uso de estruturas pré-fabricadas tanto na fase de uso e operação quanto na fase de descarte. No caso do ciclo de vida energético, ao ser simulado, o material que tinha mais energia incorporada também obteve maior energia operacional, sendo que o mesmo ocorreu ao verificar a emissão de gases de efeito estufa dos materiais. Os materiais pré-fabricados consumiram mais energia e emitiram mais gases poluentes, sendo mais prejudiciais ao meio ambiente, entretanto, ao analisar a fase de desconstrução e reuso, pelo fato de os materiais serem pré-moldados, seu impacto ambiental foi muito menor que o convencional. Os autores concluíram que apesar da estrutura de pré-fabricada apresentar um maior impacto ambiental na fase de operação da edificação, ainda assim, ao serem analisadas todas as fases, as construções pré-fabricadas apresentaram um menor impacto ambiental se comparadas com a construção convencional, pelo fato de sua desconstrução ser menos prejudicial ao meio ambiente.

2.3 Análise do ciclo de vida da parede de terra

Ortiz, Castells e Sonnemann (2009) revisaram vários estudos e normas sobre a análise do ciclo de vida (ACV) no setor da construção civil entre os anos de 2000 a 2007. Foi reconhecida a metodologia da ACV como eficaz e relevante, além de promover a benefícios ambientais nos projetos futuros. Muitos profissionais a utilizaram para o desenvolvimento de projetos, tomada de decisão e na gestão de obras. Uma das limitações destacada pelos autores é a complexidade de uma ACV

sobre todo o processo, havendo, principalmente, apenas estudos pontuais sobre materiais ou uma especifica fase do ciclo de vida. Dessa maneira, ainda faltam estudos que olhem para os processos da construção civil de uma ótica holística.

Os principais estudos aplicando ACV para a taipa de pilão abrangem principalmente a fase inicial do material, a extração do material até sua construção. As pesquisas avaliam principalmente o impacto ambiental que a parede causa, sendo as vezes, considerado positivo por ser relativamente menor que outros processos construtivos convencionais. Um exemplo desses estudos é o de Ben-Alon et al. (2021), que verificou os impactos ambientais de processos construtivos considerados por eles como naturais, comparando-os com processos construtivos convencionais.

Ben-Alon et al. (2021) estudaram quatro tipos de processos construtivos naturais, sendo eles cob (mistura de argila, areia, água e palha), fardos de palha e taipa de pilão com e sem isolamento térmico; e os comparou com processos construtivos convencionais como alvenaria de concreto e wood frame em regiões dos Estados Unidos. Para análise dos impactos ambientais, foi adotado o método da ACV para as seguintes etapas do ciclo vida: extração de matéria-prima, produção, transporte até o local, uso e manutenção da edificação, sendo a unidade funcional 1m² de parede de uma casa unifamiliar. Os autores verificaram quatro categorias de impactos ambientais, acidificação do ar (kg SO_2), consumo de energia (MJ), mudança climática (kg CO_2) e partículas de poluição prejudiciais à saúde humana (PM_2) em todas as etapas abordadas na pesquisa. Os resultados mostraram que, no geral, as técnicas consideradas naturais resultaram menores impactos ambientais, principalmente nos climas áridos e semiáridos. Nos outros climas estudados, os processos construtivos convencionais eram mais vantajosos nas fases operacionais, devido aos seus isolantes térmicos. Entretanto, ainda assim, ao analisar todo o ciclo de vida, o impacto ambiental dos processos construtivos é tão menor que os convencionais que seria preciso 50 anos de uso da edificação para se igualar aos impactos ambientais causados pelos processos construtivos convencionais.

Por fim, os autores Ben-Alon et al. (2021) destacaram algumas porcentagens relevantes para quantificar a amenização dos impactos ambientais causados pelos processos construtivos naturais. Ao comparar os valores dos impactos ambientais da taipa de pilão com isolantes e a alvenaria de concreto, foi verificado que os impactos ambientais causados pela taipa eram menores, sendo a redução de 78% da mudança

climática, 72% do consumo de energia, 90% da acidificação e 98% das partículas de poluição.

Outro estudo feito aplicando a ACV no processo construtivo taipa de pilão foi o de Arrigoni et al. (2018), que estudaram o material modificando sua mistura normalmente utilizada na região oeste da Austrália. A mistura comumente utilizada é o solo local com adição de 60% de calcário, pois o solo puro não é considerado adequado, adicionando também 10% de cimento como estabilizante. Para as variações da mistura, foram utilizados estabilizantes alternativos como cinzas volantes e resíduos da hidrólise carbonato de cálcio. Além disso, foi proposto também outros componentes para otimizar o solo local, como agregados de concreto reciclado e solo argiloso, no lugar ou em conjunto do calcário. Os autores propuseram 6 misturas diferentes para analise, sendo uma a mistura original da região.

Arrigoni et al. (2018) verificaram os seis impactos ambientais, entre eles o potencial de aquecimento global nos próximos 100 anos e a acidificação da água e da terra, nas etapas de extração da matéria-prima até o transporte do material para o local de construção. A unidade funcional utilizada foi 1m² para uma parede com 30cm de espessura. A partir disso, os autores verificaram que todas as misturas propostas tinham um desempenho ambiental melhor que a tradicional, especialmente misturas que propuseram a substituição do cimento. As misturas com agregados de reciclado obtiveram o menor impacto ambiental, porém os autores consideraram relevante destacar jazidas de resíduo de demolição próximo ao local de estudo, afetando positivamente na etapa de transporte. Por fim, foi notado, pelo método de demanda acumulativa de energia, que apesar das alternativas sem adição de cimento conseguirem reduzir seu impacto ambiental, ainda demandavam de pelo menos 30% de energia acumulada da tradicional, por causa do transporte dos materiais.

Os autores Ben-Alon et al. (2019) analisaram impactos ambientais de construções com uma mistura de terra, fibra natural e água (COB) em climas quentes e úmidos dos EUA, a partir do método ACV. O estudo foi comparativo com outros 3 tipos de parede: wood frame com isolante térmico e alvenaria de concreto com e sem isolantes térmicos, com o objetivo de avaliar principalmente dois impactos ambientais: consumo de energia (MJ_{eq}) e potencial de aquecimento global (kg Co_{2eq}). As fronteiras do estudo foram desde a extração de material até o transporte até o local da construção, utilizando 1m² de parede de residência unifamiliar como unidade funcional.

Os autores verificaram que a construção com COB demonstrou o menor impacto ambiental, especialmente na etapa de fabricação dos materiais, pois o mesmo não passa por essa etapa. Já o processo construtivo que mais impactou ambientalmente nos indicadores analisados foi a alvenaria de concreto com isolante, devido ao isolante ser feito de poliestireno. As etapas de produção e transporte do COB consomem apenas entre 18% a 38% de energia que os outros processos consomem, além disso, o COB impactou o aquecimento global entre 15% a 25% do que os outros materiais impactaram. Por fim, foi destacado pelos autores as etapas do COB que mais causaram impactos ambientais, sendo elas a distância do material até o local da construção e o consumo de solo rico em argila para melhorar o desempenho do processo construtivo.

Houve um estudo na Itália sobre os impactos ambientais de uma argamassa de revestimento feito de terra, comparando-a com argamassas convencionais baseadas em cimento e cal hidratada, utilizando a ACV como método (MELIÁ, et al., 2014). Foi estudado dois tipos de argamassa de revestimento, ambas feitas com areia, argila e fibras vegetais, porém uma com ocre de fornecedores locais e outra com argila amarela importada da Alemanha. As etapas analisadas foram desde a extração do material até o local de construção, com a unidade funcional de 1m² de parede, sendo dividida em camadas do revestimento: o primeiro revestimento com espessura de 15mm e o revestimento final com espessura de 3mm.

Meliá et al. (2014) avaliaram os seguintes impactos ambientais, a partir dos indicadores encontrados: demanda de energia cumulada (MJ_{eq}), o potencial de gases do efeito estufa (kg CO2eq) e a pegada ecológica (ha/m²) das argamassas de revestimento estudadas. Foi verificado que a argamassa de terra apresentou menos de 50% da demanda de energia acumulada das outras argamassas, apenas 20% dos gases de efeito estufa e pegada ecológica. A argamassa de revestimento de terra foi considerada com menor impacto ambiental, sendo ainda que pelo menos 98% do impacto de pegada ecológica foram causados pelo consumo de combustíveis fosseis nas etapas de transporte.

Há estudos relacionados aos impactos ambientais dos materiais utilizados como aditivos na mistura dos processos construtivos com terra, como no estudo de Christoforou et al. (2016). Os autores estudaram dois tipos de fibras aditivas consideradas resíduos de outros materiais, que são a palha de trigo e o pó de serra,

sendo estas utilizadas na mistura para se fazer o processo construtivo com adobe. O objetivo do estudo era verificar os impactos ambientais ao utilizar outro tipo de fibra, o pó de serra. O estudo propôs seis cenários comparativos em que divergiam sobre a coleta do solo, seria proveniente do local da construção ou transportado de uma jazida, porém, a mistura para produção do adobe seria feita no local da construção. Já no último caso, seria feita a mistura em uma fábrica apropriada, e o adobe pronto seria transportado até o local de construção. Cada um desses 3 casos foi verificado para os dois tipos de aditivos estudados, entretanto, não foi considerado no estudo a produção dessas fibras, visto que estão sendo consideradas resíduos.

Christoforou et al. (2016) utilizaram a ACV para determinar os impactos ambientais dos cenários, avaliando principalmente o potencial de aquecimento global, a acidificação, a eutrofização e o potencial de redução da camada de ozônio. A unidade funcional escolhida foi 1 kg de tijolo de adobe e as distâncias adotadas para transporte do material até o local da obra foi de 50 km, e a distância da fábrica até a obra foi de 100 km. Os resultados obtidos demonstraram que os cenários em que há a etapa de mistura na fábrica são os que mais impactaram ambientalmente, por exemplo, a energia incorporada, de 1,65 MJ/kg, foi o dobro da consumidas nos outros casos. Entretanto, as duas fibras adicionadas obtiveram impactos similares, demonstrando que alterar ou adicionar etapas no processo construtivo influenciam mais do que o utilizar materiais diferentes.

Há alguns estudos de ACV que comparam alguns sistemas construtivos entre si, como o trabalho de Miranda (2017) que comparou a taipa de pilão com outras técnicas convencionais desde a extração da matéria-prima até sua construção no local da obra para verificar o impacto ambiental de cada processo construtivo por meio dos indicadores ambientais dessas etapas. De acordo com os resultados de Miranda (2017), os métodos de ACV utilizados não foram suficientes para obter um ranking qualitativo entre os sistemas construtivos, isto devido aos poucos indicadores encontrados em cada método, diminuindo a chance de encontrar singularidades benéficas ao meio ambiente em um dos sistemas. Sobre as etapas analisadas da ACV de cada sistema construtivo, foi concluído que a fase de produção de materiais como cimento e cal, e a fase de transporte são as etapas mais impactantes negativamente, independentemente do tipo de sistema construtivo avaliado.

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, em

relação a construções convencionais como o tijolo cerâmico e o bloco de concreto. Para isso, os autores utilizaram a ACV, analisando-os desde a etapa de extração da matéria-prima até sua construção, considerando o 1m² de parede como unidade funcional. Apesar de terem avaliados diferentes impactos ambientais, os autores se atentaram principalmente na energia incorporada no processo e o potencial de aquecimento global.

Os autores mostraram que construções com terra podem ser consideradas mais sustentáveis, pois os valores encontrados, principalmente os dos dois impactos ambientais destacados pelos mesmos, foi de apenas 50% comparado aos valores dos materiais convencionais. 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 ACV das construções com terra.

Estabilizadores adicionados na taipa de pilão também podem aumentar o potencial de impacto ambiental, mesmo quando promove um desempenho melhor do processo construtivo. Serrano et al. (2017) analisaram a adição de estabilizadores alternativos ao cimento, como a cal e o pó de um mineral chamado alabastro. Também avaliaram a adição de materiais PCM[1], que mudam a fase da mistura quando atingem uma determinada temperatura para melhorar o desempenho térmico da taipa de pilão. O objetivo era verificar dois pontos: o desempenho térmico e o impacto ambiental, sendo que para este último, os autores adotaram a ACV como método, a unidade funcional 1m² e quatro tipos de misturas de taipa. A primeira composição foi sem estabilizante, a segunda teve a adição de palha e cal; a terceira adicionou-se palha e alabastro; e por fim, na quarta utilizaram de fibras de borracha de pneu, sendo estabilizadas com PCM.

Na análise do ciclo de vida, os autores averiguaram os impactos ambientais de toda a vida do material, que foram classificados em três tipos: 1 – qualidade do ecossistema, que abrange a acidificação, a eutrofização e ocupação da terra; 2 – saúde humana, contendo potenciais de mudança climática, radiação de íons e deterioração da camada de ozônio; e 3 – recursos, sendo o consumo de combustíveis

[1] PCMs mudam de fase quando atingem determinada faixa de temperatura, ou seja, eles se liquefazem ou solidificam nessa faixa de temperatura, respectivamente absorvendo ou liberando energia.

fosseis e a extração de minérios. Os resultados mostraram que a adição de PCM aumentou 4,5 vezes o impacto ambiental do processo construtivo, sendo considerado o pior caso. Entretanto, somente com os estabilizadores também geraram um aumento de 1,5 vezes do impacto ambiental, sendo a cal causando maior impacto ambiental que o alabastro.

De Wolf et al. (2018) também analisaram o ciclo de vida de uma edificação de taipa, localizada no oriente médio, observando indicadores ambientais do edifício, comparado com os sistemas construtivos convencionais. Para isso, os autores verificaram quatro variações de uma mesma edificação, com o objetivo de melhorar o desempenho da edificação, como por exemplo, adicionando isolantes ou painéis fotovoltaicos, sendo 1m² de parede a unidade funcional utilizada para o estudo. Seus resultados mostraram que o material alternativo consegue diminuir o carbono incorporado significantemente, e, consequentemente, seu impacto ambiental.

Além disso, De Wolf et al. (2018) fizeram uma projeção do impacto ambiental da edificação de taipa e suas respectivas melhorias aplicadas ao longo de sua operação, simulando o uso por 70 anos. Os autores observaram que o padrão de baixo impacto ambiental nas etapas de execução da taipa com o uso de materiais recicláveis como isolantes tem potencial para se manter baixo na etapa de uso e operação deste sistema construtivo. Isto foi projetado a partir da redução de carbono operacional emitido quando se substitui o concreto e o isolante térmico por materiais menos agressivos ao meio ambiente.

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. 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 de uma estrutura. A partir dessa hipótese, foi feita a análise do ciclo de vida nas etapas de berço até execução, quantificando os indicadores de impacto ambiental, para assim verificar qual estabilização da taipa é mais eficiente. 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 encontre a uma distância considerável da obra. O principal indicador destacado é o uso de energia não renovável no transporte do material, e sua emissão de gases poluentes.

Galán-Marín, Rivera-Gómez e García-Martinez (2015) também estudaram a energia incorporada e operacional de uma parede de alvenaria construída com blocos de terra. Para isso, foram escolhidos quatro tipos de processos construtivos para comparação, como blocos de concreto e alvenaria cerâmica, analisando as etapas de construção, sua manutenção e o descarte das paredes. Além das comparações, o próprio modelo de edificação foi sendo modificado, a fim de verificar os impactos ambientais conforme há mais pavimentos, e com isso, a unidade funcional utilizada foi uma unidade de parede.

Os referidos autores concluíram que as fases mais impactantes do ciclo de vida da parede são a fabricação do material e a construção da parede, entre essas fases, o bloco de terra é o menos agressivo ao meio ambiente. Já nas fases de operação e descarte, a emissão de CO_2 do bloco de terra foi apenas 12% menos agressivo do que o bloco de concreto. Além disso, conforme foram aumentando o número de pavimentos, menos viável o bloco de terra foi considerado devido a energia incorporada aumentar numa proporção maior do que do bloco de concreto. Ainda assim, o bloco de terra foi considerado mais sustentável que os blocos cerâmicos e a parede de concreto reforçada.

3. MATERIAIS E MÉTODO

Os valores quantitativos dos aspectos ambientais do sistema construtivo taipa de pilão foram obtidos por meio do método ACV. Para isso, foram estudadas as etapas de extração, execução, manutenção, demolição e destinação da taipa de pilão, considerando a análise de “berço a berço” e os indicadores delineados nos estudos pontuais do referencial teórico.

Portanto, para se estudar os indicadores ambientais do sistema construtivo taipa de pilão, quatro maneiras de execução foram propostas para o estudo: taipa de pilão mecanizada estabilizada com cimento (parede 1); taipa de pilão mecanizada (parede 2); taipa de pilão manual estabilizada com cimento (parede 3); taipa de pilão manual (parede 4).

O método ACV tem suas diretrizes na norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009). A mesma explica o método como sendo uma forma de gestão ambiental que verifica o ciclo de vida de um produto de forma sistêmica e quantificada, buscando compreender os impactos gerados por ele.

3.1. Sistema construtivo

3.1.1. Ciclo de vida da 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. Pode-se ou não adicionar estabilizantes químicos, desde que a parede atinja os pré-requisitos de desempenho mecânico e físico. Essa mistura dos materiais é feita no próprio local da obra, podendo ser realizada de maneira manual ou mecanizada.

O processo construtivo da taipa deve ser seguido de acordo com as diretrizes da norma NBR 17014 (ABNT, 2022) que orienta utilizar fôrmas removíveis e um compactador (manual ou mecanizado). Com a mistura preparada, adiciona-se a terra umedecida dentro das fôrmas, até uma camada de aproximadamente 20 cm, que será compactada pelo compactador até que não haja mais terra solta nessa camada. Esse

processo é repetido até que se atinja a altura desejada da parede, retiram-se as fôrmas, e assim parede está pronta.

Normalmente, a parede de taipa de pilão não necessita de revestimentos primários como chapisco, emboço e reboco, pois a própria parede pode ser exposta. Entretanto, ela pode receber acabamento de pintura ou assentamento de peças decorativas, sendo uma opção do usuário dessa edificação. As instalações elétricas e hidráulicas são embutidas ou externas, conforme NBR 17014 (ABNT, 2022). Uma vez que as paredes de taipa de pilão foram executadas, finalizam-se as outras etapas da edificação.

A manutenção das edificações de taipa de pilão é feita com o intuito de manter a impermeabilização em dia, pois a água pode causar danos à estrutura. Empresas de execução de paredes de taipa recomendam a utilização de hidrofugantes ou resinas acrílicas a base de água em um período de a cada 5 anos, independente se a parede é estabilizada com cimento ou não. Há, também, o controle da impermeabilização nas esquadrias, nas calhas e rufos. Já na parte de tubulações hidráulicas, uma execução correta e dentro das normas garante, em situações normais, que não haja infiltrações na parede. É importante reforçar que o controle promove uma manutenção preventiva, que é mais econômico do que fazer reparos.

Fissuras causadas por retração ou a própria movimentação da taipa podem ser corrigidas com aplicação de argamassa de solo e/ou cimentícia em proporções menores de cimento. O ideal é que essa argamassa tenha a cor similar da terra que foi utilizada para fazer a parede, para que a aparência da parede original seja mantida (MANIATIDIS; WALKER, 2003).

Já em problemas de fissuras estruturais, o procedimento de execução na manutenção é o mesmo. Porém, a mistura de terra, que será utilizada para o preenchimento da fissura, possui o mesmo traço utilizado na construção da parede, além disso, pode exigir ainda materiais de reforço, como exemplo telas, malha de aço (MANIATIDIS e WALKER, 2003).

A destinação do fim de uso da parede de taipa de pilão muda de acordo com componentes em sua mistura, pois há diferença se contém ou não adição de estabilizantes químicos que modificam a matéria-prima solo. Porém, para que haja destinação do material, nas situações de reciclagem ou reversibilidade, a demolição da parede é feita de maneira seletiva, a fim de que retirem todos os outros componentes, como esquadrias e cobertura, antes de demolir as paredes. Após a

separação, há divergências na destinação, a parede demolida de taipa de pilão sem estabilizante não é considerada resíduo, pois a mistura é o próprio solo, que pode ser retornado quase que instantaneamente ao ambiente, causando menor impacto. Portanto, pelo fato de a terra ainda ser considerada matéria-prima, a taipa é considerada reversível.

Contudo, mesmo sendo um material reversível, a parede demolida, inicialmente, não terá o mesmo aspecto de um solo natural solto. Sendo assim, é necessário passar por um equipamento de trituração/britagem, a fim de que o material demolido e tratado volte a ser solo reutilizável. Normalmente, é utilizado um britador de entulho da construção civil no próprio local da obra. Após a britagem, o material se torna novamente solo solto e pode ser reutilizado como matéria-prima em uma obra ou, até mesmo, ser destinado à jazida de origem.

Já no caso da taipa de pilão estabilizada com cimento, a mistura não é mais considerada reversível no fim da sua vida, ou seja, a demolição de uma parede estabilizada gera resíduos. Apesar disso, o resíduo pode ser reutilizado após a reciclagem deste resíduo de construção e demolição (RCD) e ser novamente inserido no setor da construção civil. O RCD da taipa de pilão é classificado como um resíduo da classe “A” pelo CONAMA (Resolução nº 307, 2002), e por isso tem potencial para se tornarem agregados reciclados para o setor da construção civil, podendo haver sua reinserção no ciclo de vida da edificação, promovendo uma economia circular. Portanto, na etapa de demolição e destinação deste resíduo não há a necessidade do uso do equipamento triturador, pois esse processo ocorre no local da usina de reciclagem do RCD, sendo necessário o transporte até o local das recicladoras.

3.1.2. Seleção da taipa de pilão

Como foi descrito acima, foram selecionados diferentes tipos de taipa de pilão, sendo elas variadas na adição de estabilizantes químicos e no processo de execução da parede. O modelo de parede estabilizada com cimento e executada com o compactador pneumático (equipamento mecanizado) foi adotada como referência, pois já existe uma edificação em que pode se utilizar de seus dados primários.

A edificação encontra-se na Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS) em Campo Grande – MS, intitulada de Canteiro experimental (figura 03). Este protótipo foi executado como um estudo de caso por Veraldo (2015), e com isso sua

pesquisa fornece dados desde a concepção do ambiente até a execução da edificação.

Figura 03 - Canteiro experimental UFMS

Fonte: Site do programa de pós-graduação UFMS (PPGEES) (2019)

Com base na pesquisa de Veraldo (2015), Miranda (2017) estudou a ACV desta edificação, desde a extração do material até sua execução, e comparou o processo construtivo da taipa de pilão mecanizada estabilizada com cimento com as seguintes técnicas: parede de blocos de concreto; parede de blocos cerâmicos de oito furos; e parede de concreto moldado *in loco*. Assim, os dados primários dos aspectos ambientais causados pela construção do Canteiro experimental e obtidos por Miranda (2017) serviram como modelo de referência para o estudo dos outros casos selecionados no presente trabalho.

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.

Já na etapa do preparo da mistura do material, foi 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, as espessuras devem variar a fim de 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 esbeltez, 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.

Diante dessas diretrizes e de espessuras mais comuns encontradas nas referências de construções com terra, como Zhang et al., 2018; Soudani et al., 2018; Serrano et al., 2017; Nanz et al., 2019; Milani, Labaki, 2012; Veraldo, 2015; foi escolhido para o estudo os seguintes tipos de taipa de pilão:

- **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 (modelo referência – canteiro experimental);
- **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.

É necessário frisar que as taipas selecionadas para a pesquisa podem diferir no comportamento físico-mecânico, entretanto, todas atendem os requisitos mínimos, ou seja, os casos entre si apresentam mesmas características mínimas, conforme exigências da NBR 17014 (ABNT, 2022) no que diz respeito a massa específica aparente, a erosão da superfície, a forma e dimensão, a resistência à compressão simples, e o grau de compactação. Desta maneira, estes aspectos não influenciaram a análise das etapas uso, operação, manutenção, demolição e destinação do ciclo de vida da taipa.

3.2. Método ACV

O método ACV se divide em etapas, a fim de auxiliar na construção do pensamento, para enfim chegar a conclusões pertinentes. As etapas já explicadas no capítulo anterior são: Escopo e objetivo; Inventário; Análise do inventário e; Avaliação

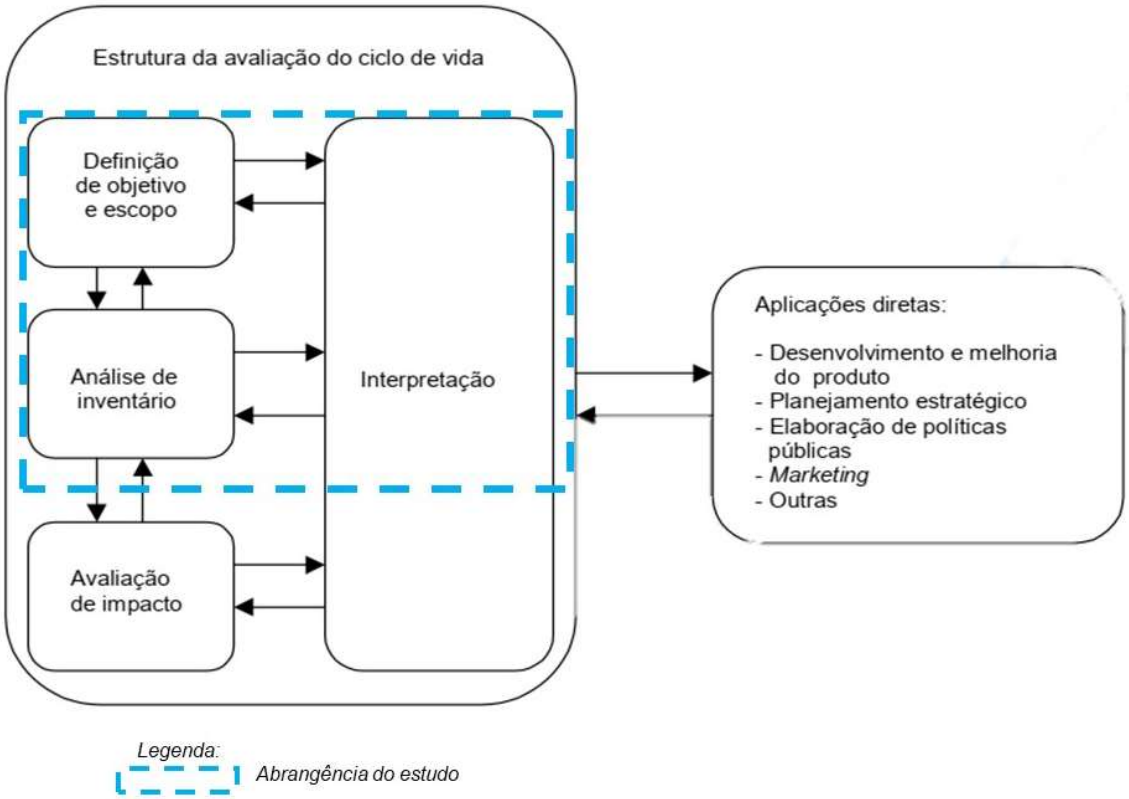
do impacto ambiental. No caso desse estudo sobre o processo construtivo taipa de pilão, o mesmo critério foi utilizado para os quatro modelos escolhidos para estudo.

3.2.1. Objetivo e Escopo

O objetivo deste estudo foi obter dados quantitativos dos aspectos ambientais no ciclo de vida da taipa de pilão, de “berço a berço”. A partir dessa escolha, a metodologia ACV foi realizada até o inventário, sendo este o objeto de análise. Os dados analisados foram os indicadores ambientais, não sendo abordado, portanto, os impactos ambientais (figura 04).

Para que as quatro paredes sejam avaliadas de maneira igualitária, foi adotado a unidade funcional de 1m² de taipa de pilão, variando suas espessuras conforme os tipos descritos no item anterior.

Figura 04 - Fronteira do estudo com o método ACV



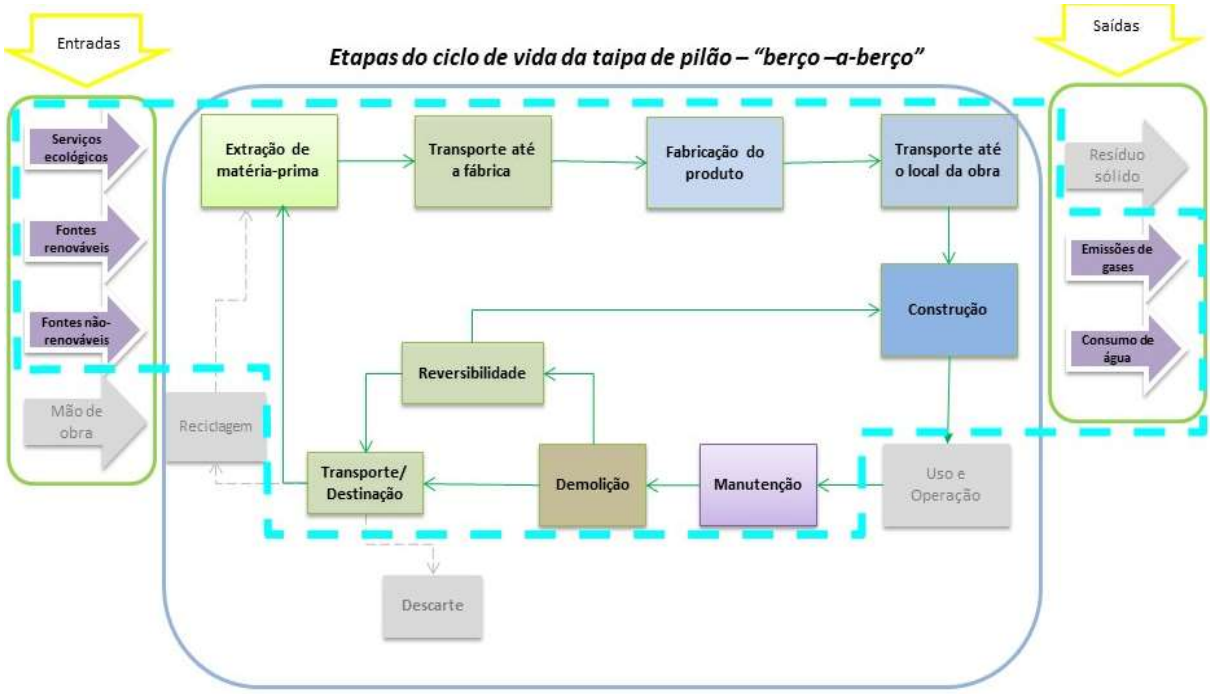
Fonte: Autora

3.2.1.1 Fronteiras:

Este estudo aborda as etapas de “berço a berço” do processo construtivo taipa de pilão, entretanto, não foram abordadas as etapas a seguir (figura 05).

a) Operação: essa etapa foi excluída pelo motivo de depender majoritariamente dos usuários da edificação, não retratando apenas aspectos relacionados ao desempenho da parede, mas outros aspectos como conforto térmico também. O uso da habitação depende não só do que ela proporciona, como também todo o ambiente ao redor da mesma, e o comportamento do usuário, sendo este influenciado ambientalmente e culturalmente.
b) Extração de matéria prima e fabricação de materiais e equipamentos que participam de alguma forma na vida útil da taipa de pilão: o material de estudo ficaria extenso e empírico, deixando de trazer resultados quantitativos relevantes pela falta de precisão. Assim, o único material acompanhado desde sua extração foi o solo. Apesar disso, foram incluídos no estudo dados de aspectos ambientais obtidos em inventários de outros trabalhos, ou em fichas técnicas dos equipamentos/ produtos (dados secundários), no qual não especificam de quais etapas foram abordadas para a obtenção destas informações, podendo ser desde a extração, como o cimento e a resina acrílica;
c) Mão de obra utilizada nas etapas do ciclo de vida: os indicadores ambientais podem sair subjetivos e não trazer valores quantitativos, que é o objetivo deste estudo.
d) Resíduos sólidos de cada etapa: esta saída traz incertezas ao trabalho, pois não há dados primários, e os secundários seriam empíricos e pouco precisos.
e) Reciclagem do resíduo de demolição: nesta etapa já se inicia outro ciclo de vida, que é o do material RCD (resíduo da construção e demolição), deixando de ser taipa de pilão. Dessa maneira, iria além do objetivo proposto.
f) Descarte de material: não foi proposta a abordagem dessa etapa, pois ela impacta igualmente independente do tipo de parede, assim não agregando no estudo, nem de maneira quantitativa ou qualitativa.

Figura 05 - Fronteira do estudo do ciclo de vida da taipa de pilão



Fonte: Autora

3.2.1.2 Qualidade dos dados:

Nas etapas de extração da matéria-prima até a execução da parede dos casos propostos, os dados foram gerados a partir do estudo de caso da edificação Canteiro experimental, localizado em Campo Grande, MS, realizado por Miranda (2017). A autora estudou a ACV do Canteiro desde a extração da matéria-prima até sua execução, utilizando-se de documentos que detalham a construção do protótipo, como notas fiscais, diário de obra; e o próprio trabalho de Veraldo (2015) que detalha o processo e soluções construtivas do Canteiro. A partir do estudo de Miranda (2017), foi adotado que os dados obtidos no inventário do Canteiro experimental seriam a modelo referência para as outras variações propostas nesse trabalho.

Os dados do estudo de Miranda (2017) foram adaptados proporcionalmente às espessuras e aos produtos e equipamentos utilizados em cada etapa – desde a extração até a execução – das paredes propostas. Por exemplo, as paredes 1 e 2 (taipa cim+mec e taipa mec) utilizaram-se do compactador mecanizado por um determinado tempo, que foi estabelecido de acordo com o volume de terra sendo compactado em 1 m² de parede; a quantidade de material consumido também se baseou no volume final da parede. Além disso, houve divergências em algumas etapas, como as paredes 2 e 4 (taipa cim+man e taipa man) não adicionaram o

cimento e a quantidade de solo solto também foi reajustada para chegar no volume final da parede.

A partir da etapa de manutenção em diante, os dados utilizados foram obtidos a partir de entrevistas com as empresas privadas Taipal, Can Sustentável e Terra Compacta, as quais executam edificações com paredes de taipa e pilão. A entrevista abordou temas da prática e da rotina dessas construtoras com a execução, manutenção e demolição da taipa. As perguntas realizadas foram:

- Se adicionavam estabilizantes na mistura do material, e se sim, qual estabilizante era o mais comum utilizado pela empresa;
- Qual a espessura executada da parede, com e sem estabilizante;
- Quais eram as orientações propostas pela empresa para manutenção preventiva da parede;
- Qual a principal causa de manifestações patológicas nas paredes de taipa de pilão;
- Qual a periodicidade indicada para essas manutenções; e se essa periodicidade se alterava caso a parede de taipa não houvesse estabilizantes;
- Quais materiais, produtos ou equipamentos indicados para essas manutenções;
- Quais manifestações patológicas poderiam aparecer nas paredes e como fazer a manutenção/ correção da mesma.

Com relação a fase de demolição, foram obtidos dados também por meio de entrevistas com as empresas privadas Taipal, Terra Compacta e Rosa Construções, com o objetivo de definir o tempo de uso do equipamento martelo demolidor para demolir 1m³ de parede de material cerâmico. Isto porque a taipa é um material cerâmico, podendo ser considerado o mesmo tempo de uso para demolição. As principais perguntas efetuadas foram:

- Com que frequência essas empresas fazem demolição de paredes e como são supervisionadas;
- Quais as principais ferramentas utilizadas para demolição;
- Se há mais atividades que são feitas dentro dessa etapa de demolição;
- A duração média da demolição de parede com o determinado equipamento; isso de acordo com qual quantidade de volume de parede;

— Se em alguma situação esse tempo de uso do equipamento pode ser alterado e o porquê.

Vale ressaltar que o uso do martelo demolidor é apenas uma alternativa, podendo ser utilizado também uma marreta, porém o tempo de uso do equipamento normalmente será maior, visto que o equipamento não é mecanizado. Todavia, não foi abordado o uso da marreta na etapa de demolição, pois seria mais uma alternativa, o que aumentaria o número de casos de paredes propostas, sendo que os aspectos ambientais causados por este equipamento são empíricos e imprecisos (a fonte de energia é da mão de obra, por exemplo).

Sobre a etapa de destinação, a mistura do solo com estabilizante cimento é demolida e destinada a usinas de reciclagem para se tornar um agregado reciclado. Já a mistura apenas de solo pode ficar no próprio local ou ser destinada à jazida novamente, por ser um material reversível.

É importante destacar que esta parede sem estabilizante demolida deve ser primeiramente britada e peneirada por um equipamento no próprio local da obra para depois ser reutilizada ou transportada ao local da matéria-prima. Os dados abordados no presente trabalho abrangem somente até a etapa de transporte dos resíduos até uma usina de reciclagem localizada em Campo Grande – MS; ou, no caso dos solos, o transporte até sua jazida.

3.2.2. Inventário

A coleta de dados desde a extração até a execução foi obtida por meio de Miranda (2017). De acordo com a autora, a jazida de solo utilizada na obra do canteiro experimental encontra-se a 20 km de distância da obra. Já a fábrica de produção de cimento mais perto da região se encontra a 298 km de distância. Com base nisso, o início do ciclo de vida do cimento no processo construtivo é a partir do transporte do mesmo da fábrica até a obra. Foi escolhido o caminhão 23 PBT de carga máxima 15 toneladas, como o transporte dos materiais, sendo que este equipamento se utiliza de óleo diesel como combustível.

Como o canteiro experimental foi projetado com uma espessura de 20 cm e com adição de microfibra de polipropileno, os valores obtidos no estudo anterior foram adaptados, utilizando-se do mesmo princípio proposto para os dados das demais paredes estudadas. No caso da microfibra, ela foi excluída do estudo, adotando-se

unicamente o cimento como estabilizante. Já a alteração da espessura foi importante para determinar o tempo de uso dos equipamentos elétricos, como o compactador pneumático e o martelo demolidor, e o consumo do material solo, que consequentemente, também modifica o consumo de água.

A mistura de solo + cimento + água utilizada no Canteiro experimental aplicou a seguinte umidade ótima: para cada 1 m³ de solo solto eram misturados 76,92 litros de água. Assim, para as paredes estabilizadas (taipa cim+mec e taipa cim+man) foi utilizada tal proporção de água. No caso das paredes não estabilizadas (taipa mec e taipa man), a umidade ótima da mistura solo + água é em torno de 10%, segundo Milani e Maia (2018), sendo um pouco maior que a consumida no Canteiro experimental.

Além disso, de acordo com Miranda (2017), o fator de compactação adotado para determinar a quantidade de massa solta de solo consumida em uma parede de taipa de pilão foi de 1,8. Desta forma, para todas as paredes foi adotado este fator de compactação, já que corresponde a massa especifica máxima úmida independente da mistura (tabela 1).

Tabela 1 – Relação solo solto e umidade ótima

Paredes	Volume da parede (m³)	Fator de compactação	Volume de massa solta (m³)	Umidade ótima	Consumo de água (litros)
Taipa cim+mec	0,12 m³	1,8	0,22 m³	7,7%	16,61 L
Taipa mec	0,30 m³		0,54 m³	10%	54 L
Taipa cim+man	0,12 m³		0,22 m³	7,7%	16,61 L
Taipa man	0,30 m³		0,54 m³	10%	54 L

Fonte: autora.

Seguindo para a próxima etapa, na execução da parede foi considerado o uso de uma betoneira com produção horária de 4 m³/h e de 220 W para misturar os materiais, sendo assim, o tempo de uso da betoneira foi de acordo com a quantidade de m³ necessário para construir cada parede. Com a mistura pronta, a confecção da parede necessita do uso de um compactador, desse modo, nas taipa cim+mec e taipa mec foi considerado o uso de um compactador mecanizado, que é abastecido por um compressor de ar de 3800 W. Nos outros dois casos (taipa cim+man e taipa man) foi considerado o uso de um compactador manual, não utilizando fontes de energia para funcionar.

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 4 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. A fonte de energia tanto da betoneira quanto do compressor de ar é a energia elétrica, sendo esta analisada por meio da potência do maquinário e o tempo de uso.

Como empresas de construção com taipa afirmaram não haver distinção na manutenção dos tipos de taipa de pilão, foi adotado para todos o uso de resina acrílica a base de água a cada cinco anos. A resina se assemelha com tintas, por isso, seus dados foram tirados da especificação técnica do seu produto, e suas emissões foram obtidas por meio do estudo de Hammond e Jones (2011), que estudaram e obtiveram dados indicadores de energia incorporada e CO_2 incorporado, além de também detalhar as fontes de energia para se produzir uma tinta à base de água, em geral.

Com relação às manifestações patológicas que podem ocorrer na vida útil da taipa de pilão, não foram obtidos dados primários ou secundários suficientes para que se encontrasse um padrão de patologia, nem com medidas de degradação similares ou periodicidade em comum. As empresas entrevistadas manifestaram não fazer parte da prática deles de manutenção corrigir desagregações, fissuras, entre outras, pois não era comum, não podendo, então, responder sobre essa atividade com propriedade. Por causa da falta de dados que pudessem ser padronizados e confiáveis, não foi possível inserir essa parte da manutenção no estudo do ciclo de vida deste trabalho.

Verificando a etapa de demolição, foi adotado o uso do martelo demolidor de 7 kg como equipamento, para simplificação e obtenção de dados. A duração do uso do martelo para demolição de uma parede também foi consultada em empresas construtoras para obter o consumo de energia elétrica, da mesma maneira que foi feita com os outros equipamentos, do qual foi relacionada a quantidade de material a ser demolido (m^3). Na situação das paredes sem estabilizantes, as quais após a demolição o material residual precisa ser triturado, foi escolhido o equipamento triturador de entulho TE2 CSM, que necessita igualmente de energia elétrica para o seu funcionamento.

Por fim, na etapa de destinação, houve dois destinos diferentes para os materiais, 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 (empresa RESELIX). O mesmo caminhão 23 PBT de 15 toneladas foi adotado como o transporte destes materiais até sua destinação final.

Com relação as entradas, as principais adotadas neste estudo foram o consumo de insumos e de energia, independente da fonte. Os insumos foram o solo arenoso, o cimento CPII-F, água e resina acrílica. Já as fontes de energia foram adotadas de acordo com que cada insumo em cada etapa utilizava, como energia elétrica, gás natural e óleo diesel (tabela 2). Já em relação as saídas coletadas foram principalmente a emissão de gases poluentes, como gás carbônico (CO_2), metano (CH_4), óxidos, carbonetos e material particulado. As saídas foram coletadas de acordo com cada etapa e os insumos equipamentos utilizados nos mesmos (tabela 2).

Tabela 2 – Relação dos insumos com as entradas e saídas adotadas

INSUMOS e ENERGIA	ENTRADAS E SAÍDAS	UNIDADE
SOLO ARENOSO	Quantidade consumida	Tonelada
CIMENTO CPII – F	Energia	MJ
ENERGIA ELÉTRICA	CO_2	g
RESINA ACRÍLICA	CH_4	g
	MP	g
	NH_3	g
	N_2O	g
	NOx	g
	SO_2	g
	SOx	g
	H_2S	g
	COVNM	g
ÁGUA	Quantidade consumida	Litros

Fonte: autora.

3.2.3. Especificação dos insumos, equipamentos e localizações

3.2.3.1. Insumos

Os insumos selecionados são, não somente, os materiais ou produtos finais que a taipa necessita, como também as fontes de energias utilizadas nas etapas. Entre os insumos estão:

- Solo arenoso: foi extraído como matéria-prima em uma jazida localizada a 20 km do protótipo na UFMS. O solo deve atender características, segunda a norma NBR 17014 (ABNT, 2022) como granulometria, ou seja, 100% do material passar pela peneira de 50 mm para a taipas com espessura maior que 20 cm, ou passar na peneira de 19 mm para paredes com espessura entre 12 cm e 20 cm. Além disso, a terra (solo pronto para executar a parede) tem um limite de liquidez menor que 50% e limite de plasticidade menor que 25%;
- Cimento CP II F: esse tipo de cimento foi escolhido por ser o utilizado no Canteiro experimental em um maior número de paredes constituintes da edificação. Este insumo teve seus aspectos ambientais analisados a partir da etapa de produção na fábrica, não abrangem os dados de extração de matérias-primas para se produzir o cimento. A localização da sua fábrica foi escolhida de modo hipotético utilizando a ferramenta Google Maps para referenciar uma distância (MIRANDA, 2017);
- Água: o consumo de água foi considerado apenas para se fazer a mistura dos materiais e realizar a compactação, sendo sua medida de uso variando com o uso de estabilizante (tabela 1);
- Resina acrílica: os valores da quantidade de consumo da resina acrílica foram retirados de acordo com manuais técnicos da marca Suvinil (BASF – S.A., 2018), Arara-azul tintas (BR TINTAS, 2021) e produtos Quartzolit (WEBER SAINT-GOBAIN, 2021). Para o estudo dos indicadores ambientais foi adotado o estudo de inventário de Hammond e Jones (2011) que fizeram a ACV por quilograma (kg) de tipos de tintas usadas na construção civil, analisando desde a extração dos materiais até a produção da tinta. Assim, foi adotado que:
    - Como a tinta se passa apenas na superfície da parede, todas os casos (parede 1,2,3 e 4) teriam a mesma quantidade de material utilizado, pois a unidade funcional é de 1 m²;
    - A composição da tinta, segundo os manuais técnicos, é produzida a partir de: água, resina à base de dispersão aquosa de copolímeros estireno-acrílico, pigmentos isentos de metais pesados, glicóis, tensoativos, bactericidas e fungicidas. Tendo a finalidade de acabamento, embelezamento e proteção da superfície de telhas, fibrocimento, concreto aparente e paredes cerâmicas. Sua proteção está relacionada as intempéries e mofo;

- Como a resina acrílica possui água como solvente e durabilidade de aproximadamente 10 anos – ou seja, posteriormente a isso, seus poluentes já foram emitidos e a degradação da pintura (descascamento) já é bem avançada – 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 pode ser ainda consideradas material reversível (CHAI et al., 2011);
- Segundo os manuais, o consumo de 2 demãos desse produto é em uma faixa de 0,16 L/m² a 0,24 L/m². Essa mesma faixa foi utilizada para calcular mínimos e máximos dos casos;
- A periodicidade escolhida para o uso do produto como manutenção foi de 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), o produto seria utilizado pelo menos 10 vezes na parede, durante sua vida útil;
- Não foi considerado o trabalho de fazer a pintura, pois esta atividade consta apenas com a mão-de-obra, que não está sendo abordada neste trabalho.

— Gás natural, óleo diesel, óleo leve e óleo pesado: são as fontes de energias consumidas nos equipamentos utilizados nas etapas extração, produção, transporte e demolição. Os dados de indicadores ambientais dessas fontes não-renováveis foram retirados da pesquisa de Miranda (2017) e utilizados também nas outras etapas não estudadas pela autora a fim de que os resultados se mantenham condizentes. A referida autora utilizou-se de dados relativos à energia e à emissão de gases incorporadas no processo de produção, refino e na combustão dos combustíveis fósseis;

A quantificação do consumo de material se deu de acordo com o volume da parede e, consequentemente, o volume de cada insumo necessário para a produção dessa parede. Para encontrar a quantidade de massa de cada material, Miranda (2017) pesquisou as massas específicas dos insumos e aplicou a conversão de medida (tabela 3). O presente trabalho utilizou-se dos mesmos valores para adaptar aos casos das paredes 1,2,3 e 4, e seus respectivos volumes.

Tabela 3 – Massa específica dos materiais

Material	Massa específica	Fonte
Solo arenoso	1.700 kg/m³	OPERACTION,2016
Cimento CP II	1.400 kg/m³	
Óleo pesado	1 kg/L	SAWAKI, 2003
Óleo leve	0,87 kg/L	
Óleo diesel	0,84 kg/L	BEM, 2014
Gás natural	0,74 kg/m³	

Fonte: Adaptado de Miranda, 2017.

3.2.3.2. Equipamentos

Aqui são apresentados e especificados os equipamentos que fazem parte das etapas do ciclo de vida da taipa de pilão. Os consumos de fontes de energia foram obtidos por manuais técnicos e, de acordo com o consumo dessa fonte, foram estimados aspectos ambientais emitidos pelos equipamentos. Os equipamentos abrangem também veículos de transporte e os equipamentos manuais (como o compactador), mesmo que posteriormente não seja abordado seus indicadores neste trabalho.

- Pá-carregadeira: utilizado na fase de extração do solo arenoso na jazida, abastecido por óleo diesel. Foram considerados os limites máximos de emissões dos equipamentos de acordo com a resolução nº 433/2011 (CONAMA, 2011). A potência adotada pela autora foi entre 130 kW e 560 kW de acordo com suas referências em manuais técnicos;
- Caminhão de carga: o mesmo caminhão utilizado como transporte dos materiais da fábrica ou da jazida até a obra foi adotado para o transporte de destinação do material demolido. O veículo adotado nas primeiras etapas foi o caminhão 23 PBT de capacidade de carga 15 toneladas. A faixa de consumo de combustível estabelecida foi de acordo com Campos E. (2012), que foi de 0,006 a 0,022 L/t.km. E, de acordo com os manuais técnicos do veículo, sua fonte de combustível também é óleo diesel;
- Betoneira: foi utilizado uma betoneira para fazer a mistura do solo com os materiais para confecção da parede. A betoneira utilizada na obra do Canteiro Experimental foi de capacidade do tambor de 400 litros, ligado por energia elétrica e utilizado apenas no tempo da mistura (Veraldo, 2015). Como Miranda adotou, a partir de referências, que o equipamento teria capacidade de, em

média, produzir 4m³/h, foi adotado a mesma média de tempo para fazer a proporção da quantidade de tempo gasta em cada parede (1,2,3 e 4);

- Compactador mecanizado/ compressor de ar: o compactador pneumático é abastecido por um compressor de ar, equipamento também alimentado pela rede elétrica e com potência de 2200 W. Este equipamento foi adotado apenas nos casos da taipa cim+mec e taipa mec, que são as paredes confeccionadas de maneira mecanizada. O tempo de uso também é de acordo com o volume de terra na camada para ser compactado, que neste caso, foi adotado de acordo com a média usada em cada camada confeccionada nas paredes do Canteiro experimental (MIRANDA,2017);
- Compactador manual: o compactador manual utiliza-se de que o operador o coloque a uma certa altura para ser lançado, repetindo esse processo por toda camada da parede até que a mesma esteja toda compactada. Como a fonte de energia desse equipamento é apenas da mão-de-obra, seus aspectos ambientais foram desconsiderados, conforme dito no item 3.2.1.1.;
- Rolo de pintura e pincel: equipamentos utilizados na etapa de manutenção da parede, também foram desconsiderados pois seus aspectos ambientais que deveriam ser considerados seriam de etapas anteriores ao uso no ciclo de vida da parede. Seu uso funciona apenas a partir da mão-de-obra, cujos aspectos ambientais também foram desconsiderados, conforme dito no item 3.2.1.1.;
- Martelo demolidor: equipamento adotado para a etapa de demolição das paredes. O Martelo demolidor selecionado foi o de 7kg, que de acordo com manuais técnicos possui impacto de 1.100 a 2.650 golpes por minuto (MAKITA, 2021). Além disso, o equipamento possui 1300 W e o tempo de uso foi baseado na média dos tempos fornecidos nas entrevistas das empresas;
- de especificação técnica, possui potência de 3 CV e produção aproximada de
- Triturador de entulho: equipamento utilizados apenas na taipa mec e taipa man (sem estabilizante) após a demolição para retornar o material ao seu aspecto de solo solto. O equipamento selecionado foi o TE2, que de acordo com manual 2 m³/h (CSM – 4.01.24.043, 2021).

3.2.3.3. Localizações

As localizações adotadas foram retiradas de duas maneiras: ou dados primários referentes a extração de matéria-prima, local da obra e destinação; ou a partir de dados secundários que foram obtidos de maneira hipotética, como o caso das fábricas que apenas podem ser supostas que o insumo foi produzido naquele local.

Salienta-se que as hipóteses escolhidas foram as mais favoráveis ao estudo, como localizações mais próximas e sua distância até a obra ou ambiente construído – não considerando que o produto possa passar por uma loja antes de chegar na obra, deixando assim, com valores mínimos os aspectos ambientais dos casos analisados.

- Canteiro experimental: o protótipo foi construído dentro da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS) conforme dito no item 3.2.1.; este campus fica na cidade de Campo Grande, localizada mais ao sul da cidade;
- Jazida de solo arenoso: a jazida se encontra nos arredores da cidade de Campo Grande, tendo uma distância de 20 km até o protótipo construído, conforme relatado no trabalho de Veraldo (2015);
- Fábrica de cimento: a fábrica foi considerada de maneira hipotética, pois não há certeza de onde se originou o cimento utilizado na obra, assim, Miranda (2017) adotou uma distância de 289 km, sendo esta a fábrica mais próxima do local da obra, segundo a autora;
- Fábrica de tinta: foi considerada de maneira hipotética, porém considerando uma fábrica localizada em Campo Grande – MS, a 6,4 km do Canteiro experimental;
- Usina de reciclagem: a destinação dos resíduos também foi adotada de maneira hipotética, porém considerando uma usina situada na cidade de Campo Grande – MS, a RESILIX. Esta usina se localiza a 13 km do local do protótipo e foi considerada o local mais próximo para a reciclagem dos resíduos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são apresentados os resultados do inventário da ACV da taipa de pilão, de acordo com as diretrizes da NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), e respeitando as fronteiras apontadas no tópico anterior. Os indicadores obtidos e analisados foram o consumo de energia (MJ), consumo de água (litro), a emissão de CO_2 (g) e emissão de gases poluentes (g).

Para melhor entendimento da obtenção destes indicadores ambientais, este tópico foi dividido em: as etapas do ciclo de vida, mostrando a utilização dos insumos e os resultados dos aspectos ambientais e; análise dos indicadores, primeiramente analisando individualmente cada etapa do ciclo de vida comparando os quatro casos propostos entre si – taipa de pilão mecanizada estabilizada com cimento (taipa cim+mec); taipa de pilão mecanizada (taipa mec); taipa de pilão manual estabilizada com cimento (taipa cim+man); taipa de pilão manual (taipa man) – e, posteriormente, uma análise global de cada parede comparando todas as etapas abordadas entre si – extração e fabricação; transporte até a obra; construção; manutenção; demolição e transporte e destinação.

4.1. Etapas do ciclo de vida

Primeiro serão mostrados os dados quantitativos obtidos em cada etapa, tanto para entendimento de como foram encontrados os indicadores ambientais como também a quantidade consumida de cada insumo, isso para os quatro casos abordados nessa pesquisa (tabela 4). Vale ressaltar que a qualidade dos dados muda entre as etapas, sendo dados primários da extração até a execução da parede, e a partir da manutenção já são dados secundários. As etapas do ciclo de vida analisadas são: extração da matéria-prima e fabricação do produto; transporte até a obra; construção da parede; manutenção; demolição e; transporte e destinação para usina de reciclagem ou jazida de solo.

Tabela 4 – Tipos de taipa de pilão estudados

CASOS	Adição de cimento	Espessura	Tipo de compactação
Taipa cim+mec	1:12 (cimento: solo, em massa)	12 cm	Mecanizada
Taipa mec	Não	30 cm	Mecanizada
Taipa cim+man	1:12 (cimento: solo, em massa)	12 cm	Manual
Taipa man	Não	30 cm	Manual

Fonte: Autora.

4.1.1. Extração e fabricação

O único material considerado para extração de matéria-prima foi o solo arenoso encontrado na jazida a 20 km do local da obra. De acordo com Miranda (2017), foi considerado uma pá-carregadeira para extrair o solo e suas emissões foram estabelecidas segundo a resolução nº 433/2011 (CONAMA, 2011).

A quantidade proposta de solo arenoso extraído foi a mesma considerada para o valor de solo solto, que no caso, são dois valores diferentes, uma quantidade para as taipas cim+mec e cim+man; e outra quantidade para as taipas mec e man. Considerando que: o fator de compactação da parede taipa de pilão 1,8; o volume das paredes 1 e 3 é igual a 0,12 m³ e o das paredes 2 e 4 igual a 0,3 m³; a quantidade de solo solto extraída foi de 0,22 m³ e 0,54 m³, respectivamente. Transformando esta quantidade em massa, foi extraído 340 kg no caso das taipas cim+mec e cim+man e 850 kg no caso das taipas mec e man (tabela 4).

Outro insumo consumido foi o cimento, que foi considerado por Miranda (2017) de maneira hipotética desde sua fábrica de produção. Como o traço da mistura adotada foi de 1:12, a quantidade de cimento CPII-F consumida na mistura dos casos das taipas cim+mec e cim+man foi de 23 kg (tabela 5). As taipas mec e man não são estabilizadas quimicamente, portanto não há entrada do insumo cimento no ciclo de vida das mesmas.

Para finalizar a mistura, foi considerado também o consumo de água para o solo atingir a umidade ótima e estar adequada para a compactação na massa específica máxima. A quantidade de água foi considerada apenas o seu consumo, sendo retirada na rede de água da própria obra. Como dito no item 3.2.2., o volume de água consumido nas taipas cim+mec e cim+man foi de 16 litros, já no caso das taipas mec e man, o consumo foi de 54 litros (tabela 5).

Tabela 5 – Quantidade dos insumos na fase de extração

CASOS	Solo arenoso (kg)	Cimento (kg)	Água (L)
Taipa cim+mec	340	23	16
Taipa mec	850	0,0	54
Taipa cim+man	340	23	16
Taipa man	850	0,0	54

Fonte: autora.

As emissões incorporadas no solo arenoso na fase de extração estão relacionadas ao consumo de combustível fóssil do equipamento pá-carregadeira, para extrair a quantidade de solo já especificada. Para identificar os indicadores ambientais, foi adaptado de Miranda (2017) que se baseou em referencias de acordo com a quantidade de petróleo necessário para produzir o óleo diesel para que mantenha o equipamento funcionando para extração de materiais. A partir dessa pesquisa, foi calculado proporcionalmente pela quantidade de solo extraída em cada parede e assim, quais suas entradas e saídas (tabela 6).

Tabela 6 – Inventário do solo arenoso na fase de extração

Insumo	Entradas/ Saídas	Taipa cim+mec	Taipa mec	Taipa cim+man	Taipa man
SOLO ARENOSO	Quantidade consumida (kg)	340	850	340	850
	Energia (MJ)	0,93	2,32	0,93	2,32
	CO_2 (g)	182,76	456,89	182,76	456,89
	CH_4 (g)	0,06	0,15	0,06	0,15
	MP (g)	0,05	0,13	0,05	0,13
	NH_3 (g)	0,000001	0,00	0,000001	0,00
	N_2O (g)	0,0000	0,00	0,0000	0,00
	NOx (g)	0,95	2,38	0,95	2,38
	SO (g)	0,30	0,75	0,30	0,75
	SOx (g)	0,00	0,00	0,00	0,00
	H_2S (g)	0,00000	0,00	0,00000	0,00
	COVNM (g)	0,02150	0,05	0,02150	0,05

Fonte: Autora.

Nas emissões do cimento, foi baseado na pesquisa de sustentabilidade das empresas fabricantes do produto, como a Votorantim (2015) e Intercement (2015), mostrados no anexo B. São dados referentes a fabricação do produto, por isso não foi

incluído as matérias-primas para se fazer o cimento. Com isso, obteve os indicadores de impactos ambientais do consumo de cimento das taipas cim+mec e cim+men (tabela 7).

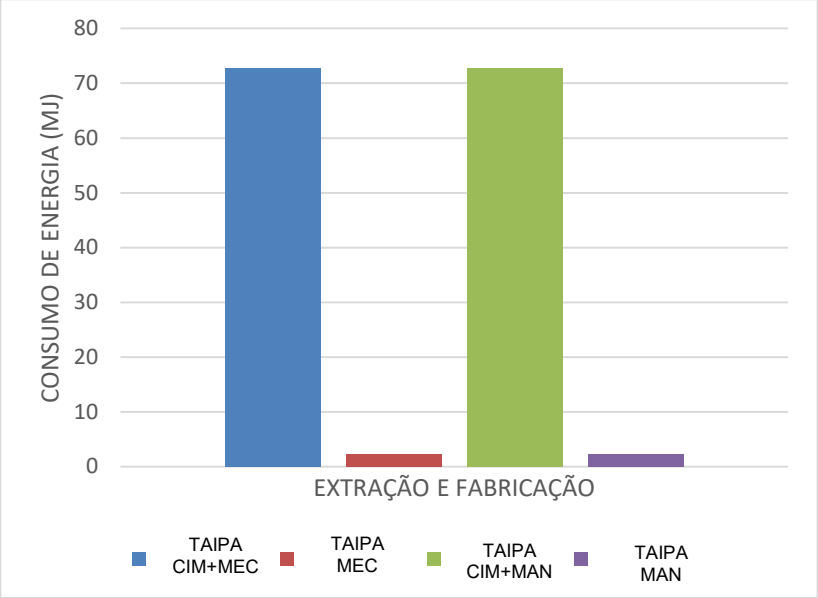
Tabela 7 – Inventário do cimento na etapa de fabricação

Insumo	**Entrada/ saídas**	**Taipas cim+mec e cim+man**
CIMENTO CP II - F	Quantidade consumida (kg)	23
	Energia (MJ)	71,81
	CO_2 (g)	12161,74
	MP (g)	2,53
	NOx (g)	34,90
	SOx (g)	10,05
	COVs/THC (g)	0,53
	Hg (g)	0,000

Fonte: Autora.

Diante desses dados obtidos, foi notado que as taipas cim+mec e cim+man (estabilizadas com cimento) consomem mais energia e emitem mais gases poluentes que as taipas mec e man (figura 06). No caso do consumo de energia, o valor é significativo, pois enquanto as paredes 2 e 4 consomem 2,33 MJ, as taipas cim+mec e cim+man consomem 72,74 MJ, o que é 30 vezes maior do que a taipa sem produto cimentício.

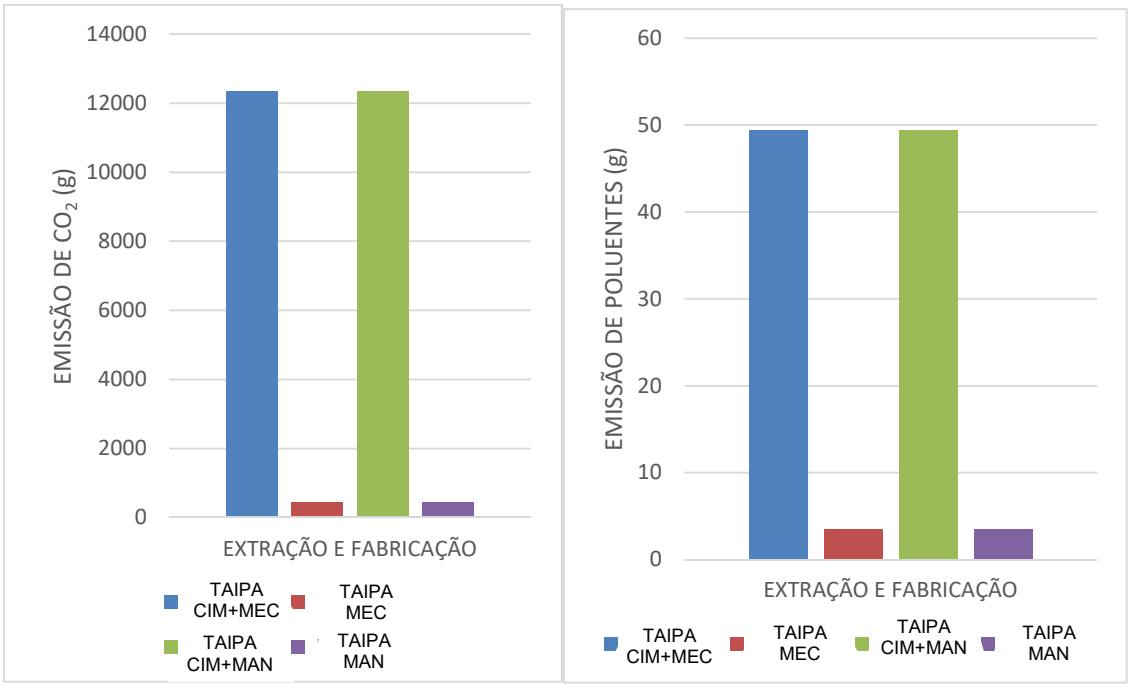
Figura 06 – Consumo de energia das paredes nas etapas de extração e fabricação das matérias primas



Fonte: Autora

O padrão de discrepância ocorre nas saídas, as emissões de CO_2 e poluentes nas taipas cim+mec e cim+man, estão em torno de 12.344,5 g e 49,9 g, respectivamente, enquanto as emissões das taipas mec e man são de 15 a 25 vezes menores (Figura 07a e b). Esses dados corroboram com o que Nanz et al. (2019), Sameh (2014) e Chistoforou et al. (2015) concluíram, pois, a fabricação de um produto causa maior emissão de poluentes, e que o cimento é o principal material responsável pela emissão de poluentes na taipa de pilão na etapa de extração e fabricação das matérias primas.

Figura 07 a) e b) – Emissões das paredes na etapa de extração e fabricação das matérias primas



Fonte: Autora.

4.1.2. Transporte até o local da obra

A etapa de transporte foi considerada para o solo arenoso e para o cimento, saindo da jazida e da fábrica, respectivamente, até o local da obra. Para ambos os casos foi adotado o caminhão de 23PBT e carga máxima de 15 toneladas, como dito anteriormente, e as distâncias propostas no item 4.1.3.

Com o objetivo de encontrar a faixa de consumo de combustível gasta em cada insumo (C_{con}), foi feito o cálculo a partir da faixa de consumo equivalente do caminhão adotado, no caso, de 0,006 L/ t.km a 0,022 L/t.km (CAMPOS E. 2012). Para encontrar a quantidade em litros, foi feito o seguinte pensamento:

— Se a quantidade do insumo extraída fosse menor que 15 toneladas, apenas um caminhão é o suficiente para transporta-lo; caso seja maior, quantos caminhões são necessários, explicados na equação (1). Em todos os 4 casos (paredes 1,2,3 e 4) os insumos solo e cimento utilizaram apenas 1 caminhão, vide sua quantidade na tabela 4;

$$se\ m_{cam} + m_{mat} \leq 15\ t, então: 1\ caminhão;$$

$$se\ m_{cam} + m_{mat} > 15\ t, então: mais\ de\ 1\ caminhão; \quad (1)$$

— Foi verificado quanto o caminhão pesaria em cada caso, para cada insumo, somando o peso vazio do veículo com a massa do material, esse valor multiplicado pelas distâncias dos locais até a obra e, por fim, multiplicado pela faixa de consumo adotada neste estudo, conforme demonstra a equação (2) (tabela 8);

$$C_{con} = [\,(m_{cam} + m_{mat}) * d] * \ f_{con} \quad (2)$$

Tabela 8 – Dados e combustível consumido no transporte

Casos	Insumo	Quantidade (t)	Massa com o caminhão (t)	Distância (km)	Combustível consumido (l)	
					Mínimo	***Máximo***
Taipas cim+mec e cim+man	Solo arenoso	0,34	8,34	20	1,96	7,19
	Cimento	0,023	8,023	289	27,78	101,88
Taipas mec e man	Solo arenoso	0,85	8,85	20	2,02	7,41
	Cimento	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: autora.

Com isso, foi possível encontrar a energia consumida e as emissões de gases de cada caso, de acordo com a quantidade (litros) de combustível consumido (tabela 9). Como a diferença de distância entre a jazida de solo e a fábrica de cimento é significativa, acabou afetando os dados dos indicadores ambientais, sobressaindo os casos das taipas cim+mec e cim+man com mais emissões e consumo (figura 8). Entretanto, no caso de diferentes quantidades de solo entre os casos das taipas cim+mec e cim+man para os casos taipas mec e man, não houve significativa diferença no volume de combustível gasto.

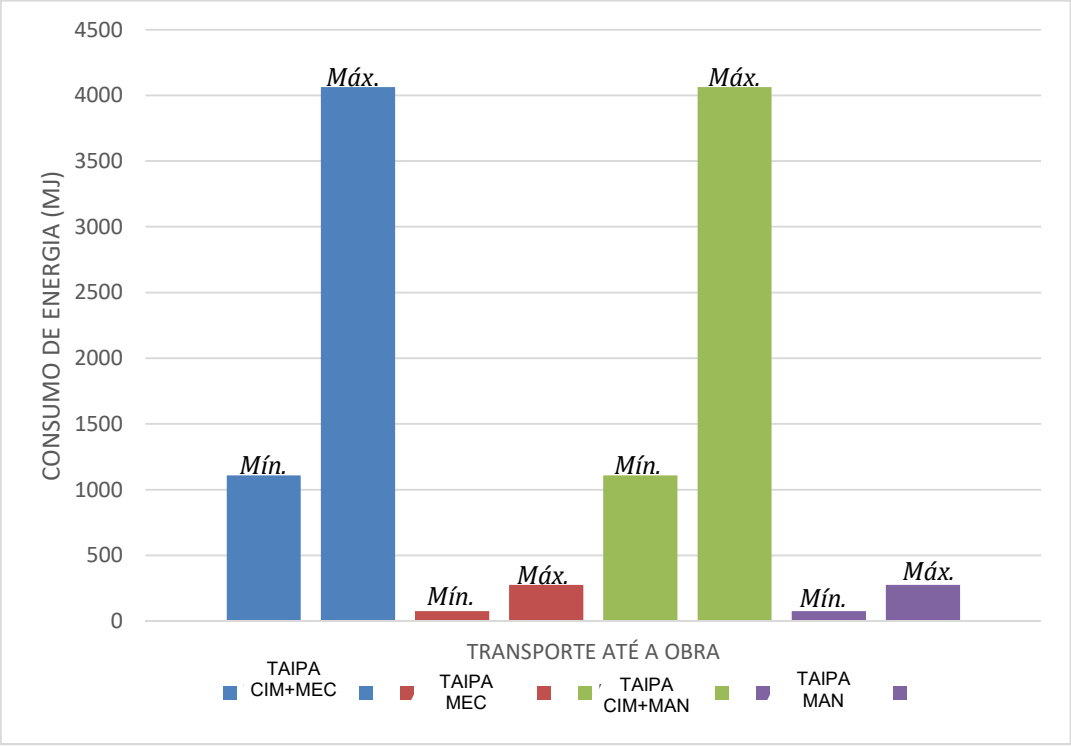
Isto porque, mesmo a massa de solo arenoso das taipas mec e man serem mais que o dobro do que a massa das paredes de taipas cim+mec e cim+man, ainda assim, é insignificante perto da massa do caminhão. Sendo assim, o que realmente alterou os valores entre os casos foi a distância dos locais de extração e fabricação dos insumos até a obra (figuras 08 e 09).

Tabela 9 – Inventário da etapa transporte até o local da obra

	Entrada/ saídas	Taipas cim+mec e cim+man		Taipas mec e man	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Solo arenoso	Energia (MJ)	73,06	267,89	75,33	276,22
	CO_2 (g)	5546,68	20337,84	5719,28	20970,71
	CH_4 (g)	5,03	18,43	5,18	19,00
	MP (g)	0,35	1,301	0,37	1,34
	NH_3 (g)	0,0001	0,00026	0,0001	0,00027
	N_2O (g)	0,20	0,74	0,21	0,76
	NOx (g)	13,70	50,24	14,13	51,80
	SO_2 (g)	2,11	7,74	2,18	7,98
	SOx (g)	0,01	0,045	0,01	0,05
	H_2S (g)	0,000	0,0013	0,0004	0,0015
	COVNM (g)	1,690	6,19	1,74	6,39
Cimento	Energia (MJ)	1035,33	3796,2	0,00	0,00
	CO_2 (g)	78600,97	288203,6	0,00	0,00
	CH_4 (g)	71,22	261,1	0,00	0,00
	MP (g)	5,030	18,44	0,00	0,00
	NH_3 (g)	0,001	0,00367	0,00	0,00
	N_2O (g)	2,867	10,5	0,00	0,00
	NOx (g)	194,17	711,95	0,00	0,00
	SO_2 (g)	29,9	109,64	0,00	0,00
	SOx (g)	0,18	0,64	0,00	0,00
	H_2S (g)	0,006	0,02	0,00	0,00
	COVNM (g)	23,94	87,79	0,00	0,00

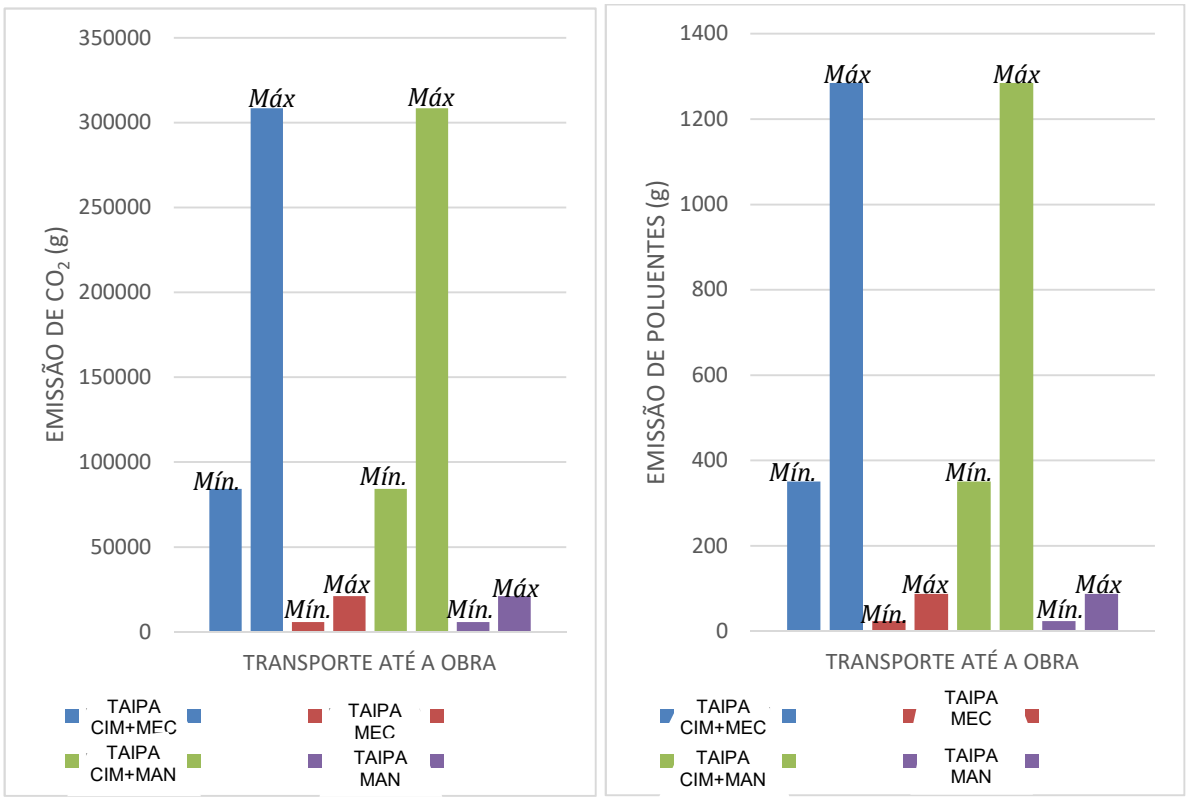
Fonte: Autora

Figura 08 – Energia e emissão na etapa transporte até local da obra



Fonte: Autora.

Figura 09 – Emissão na etapa transporte até o local da obra.



Fonte: Autora.

É importante destacar que houve essa discrepância pelo fato de a fábrica de cimento ser consideravelmente mais longe da obra, do que a jazida de solo (tabela 7). Dessa maneira, ela acarretou uma considerável diferença na emissão de CO_2 e de poluentes. Entretanto, se a jazida de solo arenoso não fosse próxima – o que pode ocorrer em vários lugares do Brasil, por ser um tipo especifico 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.

Portanto, é possível ver que o 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, visto 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 Meliá 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.

3.1.3. Construção

Para a etapa de construção, foi considerado diferentes compactadores (manual e o mecânico) para as paredes 1,2,3 e 4. Todavia, foi adotado o uso da betoneira para todas a paredes. A partir disso, foi adotado o tempo de uso de acordo com dados primários retirados por meio das médias do uso – tanto da betoneira quanto dos compactadores – na execução do Canteiro experimental.

Inicialmente, foi estudado o tempo de uso da betoneira para realizar as misturas conforme quantidades já especificadas nos itens anteriores. A betoneira escolhida possuí potência de 2200 W e média de produção de 4 m³/h. Com esses dados, foi obtido o volume que seria misturado no equipamento e posteriormente, o tempo proporcional de uso para deixar a mistura homogênea (tabela 10).

Tabela 10 – Tempo de uso da betoneira

Casos	Volume de massa solta (m³)	Consumo de água (litros)	Tempo de uso betoneira (h)
Taipa cim+mec	0,25	16,61 L	0,063
Taipa mec	0,59	54 L	0,149
Taipa cim+man	0,25	16,61 L	0,063
Taipa man	0,59	54 L	0,149

Fonte: Autora.

Importante ressaltar que essa mistura de massa é onde se acrescenta o cimento, mas também a água, a fim de atingir a umidade ótima do solo para taipa de pilão. Na tabela 10, o consumo de água em cada parede foi diferente devido ao uso de variados volumes de solo conforme presença do estabilizante cimentício, o que resultou em um consumo de água três vezes maior nas taipas mec e man (sem cimento) do que nas taipas cim+mec e cim+man (com cimento). Apesar do volume em massa ser um pouco mais que o dobro de diferença – 0,25 m³ nas taipas cim+mec e cim+man; para 0,59 m³ nas taipas mec e man – o consumo de água foi mais que o triplo, pois as quantidades de água foram diferentes para se atingir a umidade ótima - 16,6 L nas taipas cim+mec e cim+man, e 54 L nas paredes de taipa mec e man. Sendo assim, pode-se dizer que o uso de cimento na mistura pode auxiliar no menor gasto de água na execução da taipa de pilão.

O segundo ponto analisado foi o uso do compactador, que no caso das paredes taipa cim+mec e mec, foi adotado o uso de compactadores mecanizados. O

compactador pneumático é abastecido por um compressor de ar se utiliza de energia elétrica como fonte de energia. Assim, para identificar o tempo em que o compactador ficou funcionando, foi feito uma média do uso do equipamento para compactar as camadas das paredes do protótipo da UFMS, chegando numa média de 4 minutos e 34 segundos por cada “massada”, que era em torno de 1m³ (MIRANDA, 2017).

Após identificar a média de uso por m³, foi calculado o consumo de energia elétrica do compressor de ar, visto que o mesmo consome energia mesmo sem estar sendo acionado (apenas ligado na tomada o equipamento consome parte da potência), portanto sua potência nominal não é a que realmente é consumida pelo compressor no funcionamento (MIRANDA, 2017). Isso quer dizer que: se a potência nominal do compressor de ar é de 3,8 kW; o seu consumo em vazio representa 25% da potência nominal e seu funcionamento em carga é de 70% do tempo; a potência média consumida pelo compressor é de 2,945 kW (MIRANDA, 2017). Por meio desses dados, foi possível estabelecer o tempo de uso do compressor para as paredes 1 e 2, que foi de 0,02 h e 0,045 h, respectivamente.

Como os dois equipamentos dessa etapa são abastecidos por energia elétrica, o consumo de energia incorporada (MJ) e as emissões de gases (g) foram obtidos conforme explicados no anexo A (tabela A.4). Assim, foi calculado a proporção de cada caso das emissões de gases do efeito estufa (tabela 11). Nessa etapa é interessante notar que as taipas cim+man e man não apresentam consumo de energia pelo compactador, por ser manual, assim sua fonte de energia origina da mão-de-obra.

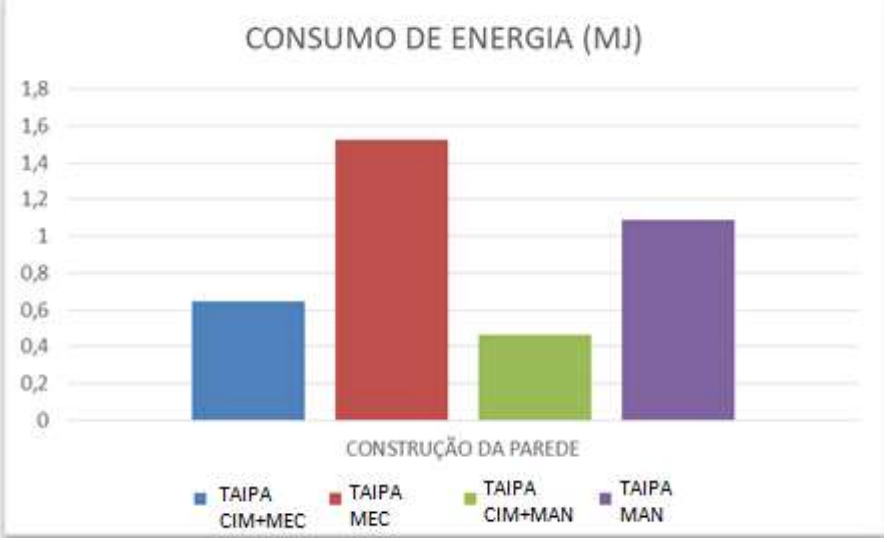
Tabela 11 – Inventário da etapa construção

Insumo	Entrada/ saídas	Taipa cim+mec	Taipa mec	Taipa cim+man	Taipa man
ENERGIA ELÉTRICA	Energia (MJ)	0,65	1,5260	0,460568	1,085624
	CO_2 (g)	13,68	32,300	9,748691	22,979058
	CH_4 (g)	0,00219	0,005177	0,001563	0,003683
	N_2O (g)	0,00027	0,000632	0,000191	0,000450
	CO (g)	0,02656	0,06269	0,018920	0,044598
	NOx (g)	0,09271	0,2188	0,066049	0,155687
	COVNM (g)	0,00126	0,00296	0,000894	0,002108

Fonte: Autora.

A partir do inventário, foi possível verificar que, apesar das taipas cim+man e man serem compactadas manualmente, comparando com as paredes taipa cim+mec e mec, respectivamente, não apresentou consumo ou emissões muito diferentes, podendo serem consideradas pouco relevante (figuras 10 e 11). Por exemplo, a energia consumida pela parede taipa cim+mec foi de 0,65 MJ, quando a energia consumida na parede taipa cim+man foi de 0,46 MJ, valores estes muito próximos mesmo com tipo de compactação diferente e mesma espessura de parede (figura 10). O mesmo padrão se repetiu nas emissões de gases, tanto para o CO2 quanto para os poluentes, sendo a taipa mec o caso que mais emitiu (figura 11). Isto porque o caso 2 (taipa mec) necessitou de mais tempo na betoneira para mistura, quanto também no momento de compactação de uma espessura maior (30 cm).

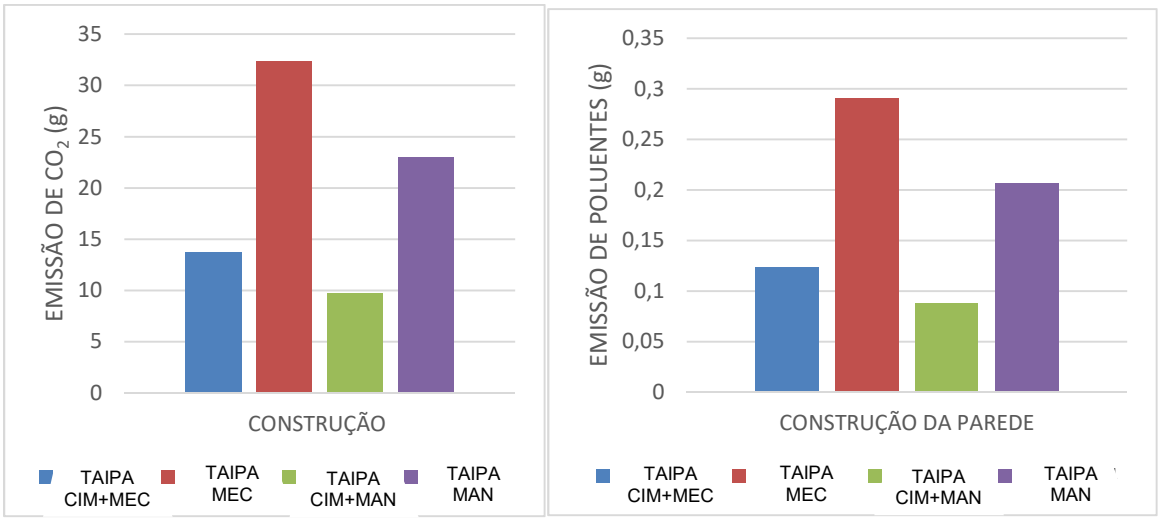
Figura 10 – Consumo de energia na etapa construção



Fonte: Autora.

Apesar de ter diferenças entre os quatros casos, a diferença notada nos resultados é entre as paredes adicionada de cimento com as paredes sem cimento (figuras 10 e 11). Por exemplo, comparando as paredes 1 e 2 (cim+mec e mec) – ambas compactadas de forma mecanizada – obtiveram 13,68 g e 32,3 g de emissão de CO_2, respectivamente, o que mostrou uma diferença mais discrepante do que entre as paredes de mesma composição, como a 1 e 3 (cim+mec e cim+man) – ambas com uso de cimento - que emitiram 13,68 g e 9,74 g de CO_2 (figura 11). O mesmo padrão se repete na emissão de poluentes, principalmente porque nos quatro casos emitiram valores baixos, entre 0,07 g a 0,28 g (figura 11).

Figura 11 – Emissão de gases na etapa construção



Fonte: Autora.

Sobre a pouca diferença na energia de compactação de diferentes misturas (com e sem adição de cimento) Reddy e Kumar (2010) já haviam notado também que os valores não eram expressivos. Segundo eles, a adição de cimento não aumentaria mais que 15% a energia de compactação, sendo outros compostos considerados mais relevantes como a cal, por exemplo.

Além disso, foi notado que a espessura que a taipa de pilão pode ter quando se é estabilizada com cimento (mínimo 12 cm) otimiza material e tempo, quando comparado a uma parede sem estabilizante, que gasta quase o triplo de energia elétrica, e consequentemente, emite mais poluentes. Visto isso, nessa etapa, a taipa estabilizada com cimento seria a mais interessante por conta da otimização do tempo de uso dos equipamentos, consumindo e emitindo por volta de metade do que as paredes sem cimento. Contudo, ao avaliar entre o compactador mecanizado e o manual, como foram obtidos resultados similares, seria interessante o uso do equipamento mecanizado (mesmo que consumindo e emitindo um pouco mais) pela facilidade do manuseio e padronização da compactação, já que o compactador manual depende da força do operador, o que varia de um para outro).

4.2.4. Manutenção

A partir da etapa de manutenção os dados coletados são secundários, feito por meio de questionário para empresas que trabalham com a taipa de pilão, descrevido no item 3.2.1.2. As empresas foram questionadas em dois pontos: primeiro, quais manifestações patológicas eram as comuns de aparecer e como fazer a manutenção

das mesmas; e se eles notavam diferenças na manutenção de paredes com e sem adição de cimento. De acordo com as empresas, foi relatado que:

- A manutenção fundamental – e normalmente única indicada pelas empresas – indicada é o uso de hidrofugantes ou de resina acrílica a base de água. Isto porque, a principal manifestação patológica que pode aparecer é a degradação da parede por conta de contato com a água. Sendo assim, esses produtos protegem a parede do contato com a água, mantendo sua integridade;
- Podem acontecer manifestações patológicas diversas por intempéries, mas as próprias empresas não aconselham seus clientes a fazerem paredes em ambientes propícios a isto (exemplo: cozinha, parede externa com beiral curto). Devido a este fato, não é de familiaridade das empresas fazer algum tipo de conserto da parede, sendo para eles, uma raridade ou um acidente acontecer algo que possa danificar a parede durante seu tempo de uso. Faz sentido quando se olha estudos como o de Bui et al. (2008), que verificaram a durabilidade de painéis de taipa de pilão construídas ao ar livre, sem nenhum mecanismo de proteção, e, após 20 anos, praticamente nenhuma parede apresentou degradação que comprometesse a durabilidade do sistema, ou quando aparecia, menos de 2% da superfície estava prejudicada. Além dessa pesquisa, Falceto, Mazarrón e Canãs (2012) aplicaram testes de erodibilidade em vários tipos de taipa de pilão, verificando que todas passavam em seu teste, inclusive as paredes sem estabilizante químico. Visto isso, não foi possível coletar dados mais fiéis ao tipo de manutenção quando há manifestações patológicas envolvidas na parede, sendo somente considerado dados sobre manutenção preventiva;
- É indicado passar esse tipo de tinta nas paredes a cada 5 anos, o que já vem descrito no manual do uso do proprietário, que é entregue pelas empresas. As mesmas aconselham passar 2 demãos da tinta para ter o efeito de hidrofugantes ou impermeabilizante;
- Apenas a empresa Taipal comentou sobre já ter feito paredes de taipa de pilão sem a adição de cimento, portanto para as paredes 3 e 4 foi adotado de acordo com a resposta dessa construtora. Segundo eles, é adotado a mesma periodicidade de manutenção, apenas não indicam ser instaladas nos ambientes já mencionados, para evitar que haja alguma degradação da parede.

De acordo com as entrevistas, o presente trabalho pesquisou dados de hidrofugantes e resinas acrílicas para chegar em um dado confiável do consumo do material em cada manutenção.

Para o cálculo do consumo de energia que o produto necessita na vida e suas emissões, foi adotado os dados obtidos no inventário de Hammond e Jones (2011). Os autores fizeram um inventário de energia e de carbono de vários materiais da construção civil, desde infraestrutura até os acabamentos. Em cada material, os autores indicavam quais as fronteiras adotadas por eles, no caso do produto tinta, o inventário foi feito do "*berço ao portão*" – ou seja, desde a extração da matéria-prima até a fabricação do produto.

De acordo com os autores, a energia incorporada de uma tinta à base de água é de 59 MJ/kg e seu carbono incorporado é de 2,54 kgCO_{2eq}/kg. Além disso, os autores também indicaram as fontes de energia consideradas no inventário da tinta, que foram: 4,1% de combustível fóssil; 21,4% de gás natural (GN) e 74,5% de energia elétrica. As mesmas proporções de fontes foram adotadas para o inventario deste trabalho na etapa de manutenção, porém, vale lembrar que esta pesquisa é internacional (Reino Unido), portanto pode ser que essas porcentagens variem para o ciclo de vida da tinta no Brasil (tabela 12).

Tabela 12 – inventário da tinta – "berço ao portão"

Insumo	**Entradas/ saídas**	**Paredes 1, 2, 3 e 4**	
		Mínimo	**Máximo**
RESINA ACRÍLICA - 2 demãos	Quantidade consumida (L)	1,60	2,40
	Energia (MJ)	18,91	28,36
	CO_2 (g)	905,02	1357,53
	CH_4 (g)	0,03	0,05
	MP (g)	0,13	0,20
	NH_3 (g)	0,17	0,25
	N_2O (g)	0,61	0,92
	NOx (g)	0,55	0,82
	SO_2 (g)	1,54	2,31
	SOx (g)	0,02	0,03
	H_2S (g)	0,04	0,05
	COVNM (g)	25,60	38,40

Fonte: Autora.

Entretanto, visto que o estudo de Hammond e Jones (2011) sobre o inventário das tintas foi apenas do "berço ao portão", estas etapas não incluem o transporte do produto pronto até a loja e/ou até a obra. Dessa maneira, o presente trabalho também acrescentou o transporte deste material até o edifício, considerando o mesmo veículo

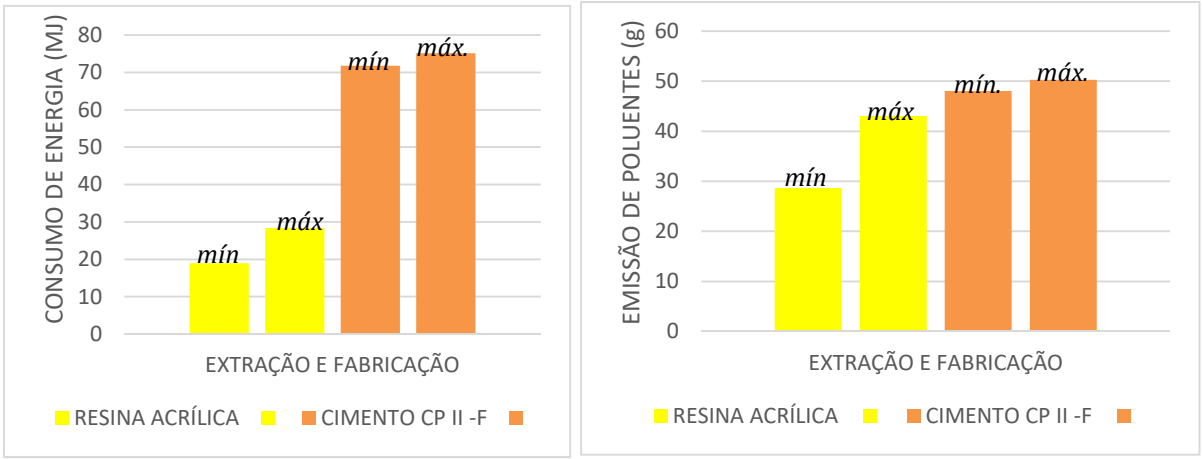
de transporte, o caminhão de 23 PBT e máxima carga de 15 toneladas. Para este caso, utilizando a distância de apenas 6,4 km, quando se olha os valores máximos e mínimos desse transporte (tabela 13), verifica-se valores ambientais expressivos, pois apesar de uma distância curta, alguns valores são maiores que os encontrados na etapa de fabricação (tabelas 12 e 13). Por exemplo, a energia consumida na etapa de extração e fabricação é de 18,9 MJ, enquanto a do transporte é de 22,9 MJ, valores próximos, porém no caso da emissão de CO2, a diferença é maior, enquanto na primeira etapa a emissão é de 905 g, na etapa de transporte é 1738,3 g, quase o dobro de emissão (tabelas 12 e 13).

Tabela 13 – Inventário da tinta na etapa transporte

Insumo	Entradas/ saídas	Paredes 1, 2, 3 e 4	
		Mínimo	Máximo
RESINA ACRÍLICA	Quantidade de combustível consumida (L)	0,614	2,253
	Energia (MJ)	22,897	83,958
	CO_2 (g)	1738,281	6373,999
	CH_4 (g)	1,575	5,775
	MP (g)	0,111	0,408
	NH_3 (g)	0,0000	0,0001
	N_2O (g)	0,063	0,233
	NOx (g)	4,294	15,746
	SO_2 (g)	0,661	2,425
	SOx (g)	0,004	0,014
	H_2S (g)	0,0001	0,0005
	COVNM (g)	0,530	1,942

Fonte: Autora.

Figura 12 – Consumo e emissão de poluentes dos insumos resina acrílica e cimento, na etapa extração e fabricação.



Fonte: Autora.

Como foi obtido nas entrevistas que não há diferença entre os tipos de paredes para se executar a manutenção, dados de consumo de energia e emissão de gases são os mesmo para os 4 casos (tabelas 12 e 13). Nesta parte do inventário, pode se notar que o consumo de energia e emissão de gases são valores altos, se comparado com a etapa de produção do cimento apenas (figura 12). Os valores fazem sentido, visto que para se fazer a resina acrílica também passa pelo processo de fabricação do produto, e, como os autores Nanz et al. (2019) e Christoforou et al. (2016) verificaram, a etapa de produção de materiais industrializados causa significativas emissões de poluentes. Um ponto a se destacar é a emissão de compostos orgânicos voláteis (COVs) que é entre 25,6 g a 38,4 g, valores altos se comparar por exemplo com a produção do cimento, que foi de 0,53 g.

4.2.5. Demolição

A etapa de demolição também foi baseada em dados coletados na entrevista com as empresas, a fim de se obter valores médios de uso. Foi adotado apenas um equipamento mecanizado (martelo demolidor) para demolição, por ser comum e de maior acesso nas empresas para fornecerem tais consumo de uso do equipamento. De acordo com os manuais técnicos referenciados no item 3.2.3.2, a potência média do equipamento é de 1300 W e sua fonte de energia é proveniente da energia elétrica.

Segundo as empresas, para se derrubar uma parede cerâmica de 3 x 3 m^2 e espessura de 12 cm, considerada a parede média usual (volume de 1,08 m^3) demora em torno de 2 horas, utilizando o martelo demolidor de 7 kg. No caso da parede de taipa de pilão com espessura 30 cm (volume de 2,7 m^3), espessura comum para as empresas entrevistadas, 2 operadores com o martelo demolidor demoram em torno de 2 horas e meia. Como os valores foram similares, foi possível adotar que o equipamento funcionaria, em média 2 h/ m^3.

Assim, foi calculado o tempo de uso do martelo demolidor (t_{uso}) para demolir cada caso das paredes, conforme equação (3). Como agora a parede está compactada, o volume das paredes se tornou: 0,12 m^3 para paredes 1 e 3 (taipa cim+mec e cim+man); e 0,3m^3 para as paredes 2 e 4 (taipas mec e man). Diante disso a média de uso do equipamento foi de 0,24 h nas paredes 1 e 3, e 0,6 h nas paredes 2 e 4 (tabela 14).

Além disso, foi utilizado outro equipamento com as paredes não estabilizadas (taipas mec e man), que é o britador de RCD, a fim de triturar o material compactado, para retornar a ser solo solto (material reversível). Este equipamento não foi abordado na entrevista com as empresas, portanto seus dados são retirados dos manuais técnicos especificados no item 3.2.3.2. Segundo os manuais, a potência do equipamento é de 2206,50 W (3 CV) e seu tempo de produção é de 2 m³/h, utilizando-se de energia elétrica, conforme equação (4). Portanto, para se britar 0,3 m³ (volume das paredes 2 e 4) o equipamento necessita de 0,15h de uso (tabela 14).

$$t_{uso} = 2 * vol \quad (3)$$

$$t_{uso} = \frac{vol}{2} \quad (4)$$

Tabela 14 – Tempos de uso dos equipamentos na etapa demolição

Casos	Volume de massa (m³)	Tempo de uso martelo demolidor (horas)	Tempo de uso triturador de entulho (horas)
Taipa cim+mec	0,12	0,24	0,00
Taipa mec	0,30	0,60	0,15
Taipa citm+man	0,12	0,24	0,00
Taipa man	0,30	0,60	0,15

Fonte: Autora.

Com o tempo de uso dos equipamentos, foram obtidos o consumo de energia e suas emissões de gases (tabela 15). Foi observado que o consumo das paredes 2 e 4 (não estabilizadas) foram três vezes maiores do que as paredes 1 e 3 – consumiram 3,69 MJ enquanto as estabilizadas consumiram 1,037 1 MJ – entretanto, ainda são números baixos comparados com as outras etapas.

Tabela 15 – Inventário da etapa de demolição

Insumo	Entrada/ saídas	Taipa cim+mec	Taipa mec	Taipa cim+man	Taipa man
ENERGIA ELÉTRICA	Consumo de Energia elétrica	0,31	1,11	0,31	1,11
	Energia	1,036776	3,691770	1,036776	3,691770
	CO_2	21,945106	78,142514	21,945106	78,142514
	CH_4	0,003517	0,012525	0,003517	0,012525
	N_2O	0,000429	0,001529	0,000429	0,001529
	CO	0,042591	0,151660	0,042591	0,151660
	NOx	0,148682	0,529430	0,148682	0,529430
	COVNM	0,002013	0,007169	0,002013	0,007169

Fonte: Autora.

No caso da emissão de CO_2, as taipas mec e man (sem estabilizante) emitem quase 4 vezes maior que as taipas cim+mec e cim+man (tabela 14). Além disso, as emissões de CO_2 podem ser consideradas um pouco maiores por sobressaírem a etapa construção mesmo ambos utilizando a energia elétrica como fonte de energia. Por fim, a emissão de poluentes também não são valores expressivos quando comparados com as outras etapas, mas ainda assim as taipas mec e man emitem maiores valores (0,7g) do que as taipas cim+mec e cim+man (0,2g). Isto porque, além das paredes 2 e 4 (taipas mec e man) terem maiores volumes da composição solo+água (0,3 m³ de volume compactado) de parede para ser demolido, o que gasta mais tempo de uso do martelo demolidor, essas paredes também se utilizam de outro equipamento para retornar a solo solto, o que também gasta mais energia e emite mais gases.

4.2.6. Transporte e destinação

Nesta última etapa abordada, foi considerado o transporte do material residual gerado na demolição das paredes. O resíduo proveniente das paredes 1 e 3 (taipa cim+mec e cim+man) foi transportado para a usina de reciclagem (RESILIX) localizada a 13km da obra. Nas paredes 2 e 4 (taipas mec e man), foi considerado o transporte do solo reversível retornando a sua jazida de origem, a uma distância de 20 km. Para ambos casos, adotou-se o mesmo caminhão de 23PBT e carga máxima de 15 toneladas, assim como na etapa de transporte para o local da obra.

Para o cálculo da quantidade de litros consumidas para cada situação, foi utilizada a mesma lógica do item 4.2.2. e também adotado o valor de 1,8 para o empolamento do solo para a parede demolida. No entanto, nessa etapa mudou-se as distâncias de acordo com as destinações. Não houve variação discrepante do consumo de combustível, devido ao fato de não serem distâncias dispersas uma da outra. Vale lembrar que como o solo demolido das taipas mec e man já pode ser reutilizado, essa etapa de transporte e destinação pode ser uma distância qualquer – dependendo da próxima obra – inclusive zero (nenhuma distância) se for reutilizada no próprio local da obra. Retornar para a jazida foi apenas uma das opções adotadas neste trabalho para finalizar o ciclo de vida dos quatro casos contemplados.

Conforme foi notado na etapa de transporte para obra, a emissão de CO_2 é relevante nos 4 casos, mesmo sendo distâncias consideradas pequenas ou periféricas

à cidade (tabela 15). 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 16). 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 é o principal fator no consumo de energia e emissão de gases (tabela 16).

Tabela 16 – Inventário da etapa transporte e destinação

INSUMO	Entradas/ Saídas	Mínimo	Máximo
RCD TAIPA (taipa cim+mec e taipa cim+man)	Quantidade de combustível consumida (L)	1,82	4,67
	Energia (MJ)	67,83	(Continuação)
	CO_2 (g)	5149,96	13219,60
	CH_4 (g)	4,67	11,98
	MP (g)	0,33	0,85
	NH_3 (g)	0,00	0,00
	N_2O (g)	0,19	0,48
	NOx (g)	12,72	32,66
	SO_2 (g)	1,96	5,03
	SOx (g)	0,01	0,03
	H_2S (g)	0,00	0,00
	COVNM (g)	1,57	4,03
SOLO REVERSÍVEL (taipa mec e taipa man)	Quantidade de combustível consumida (L)	2,02	7,41
	Energia (MJ)	75,33	276,22
	CO_2 (g)	5719,28	20970,71
	CH_4 (g)	5,18	19,00
	MP (g)	0,37	1,34
	NH_3 (g)	0,00	0,00
	N_2O (g)	0,21	0,76
	NOx (g)	14,13	51,80
	SO_2 (g)	2,18	7,98
	SOx (g)	0,01	0,05
	H_2S (g)	0,00040	0,00148
	COVNM (g)	1,74	6,39

Fonte: Autora.

Dessa maneira, o transporte se mostrou novamente significante na emissão de poluentes, assim como Nanz et al. (2019) e Arrgoni et al. (2017). Mas é interessante observar que os aspectos ambientais apresentados no transporte, apesar de altos,

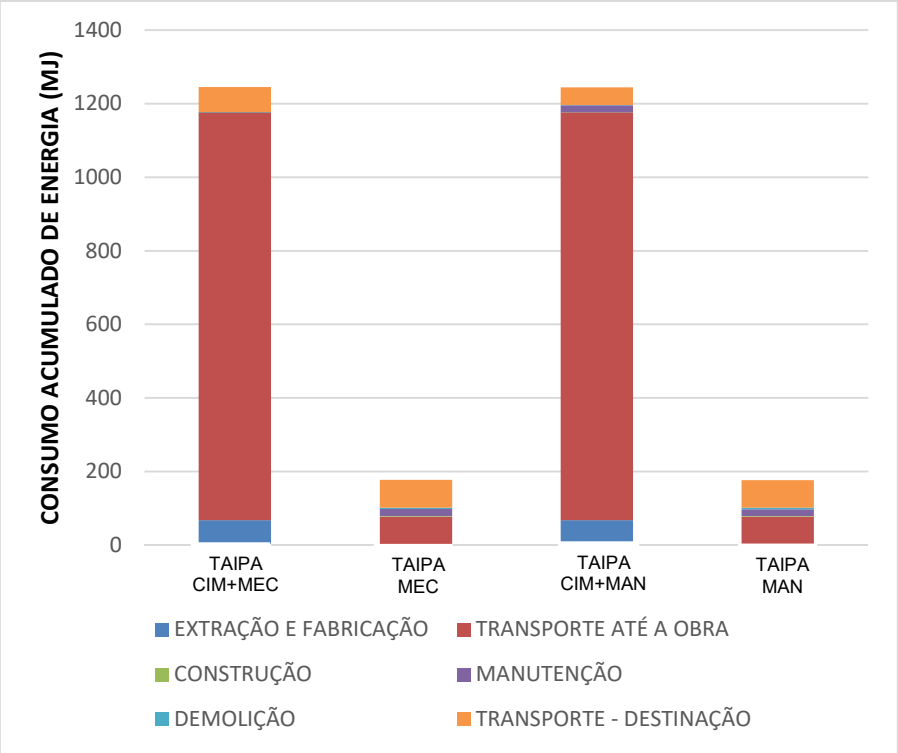
são reduzidos quando os locais são próximos, reforçando a ideia de buscar sempre locais perto da obra ou aos arredores da cidade, já que o transporte é necessário para que haja uma construção, nem que seja mínima possível. Isso acontece também por conta do tipo de transporte feito, que é o de caminhão a base de combustível fóssil (diesel).

4.3. Análise dos indicadores ambientais

Nesse tópico são apresentados os indicadores ambientais das etapas de forma comparativa entre elas. O objetivo é entender a relevância das variáveis composição da mistura de solo e modo de execução da taipa nos valores encontrados para os indicadores ambientais de forma global.

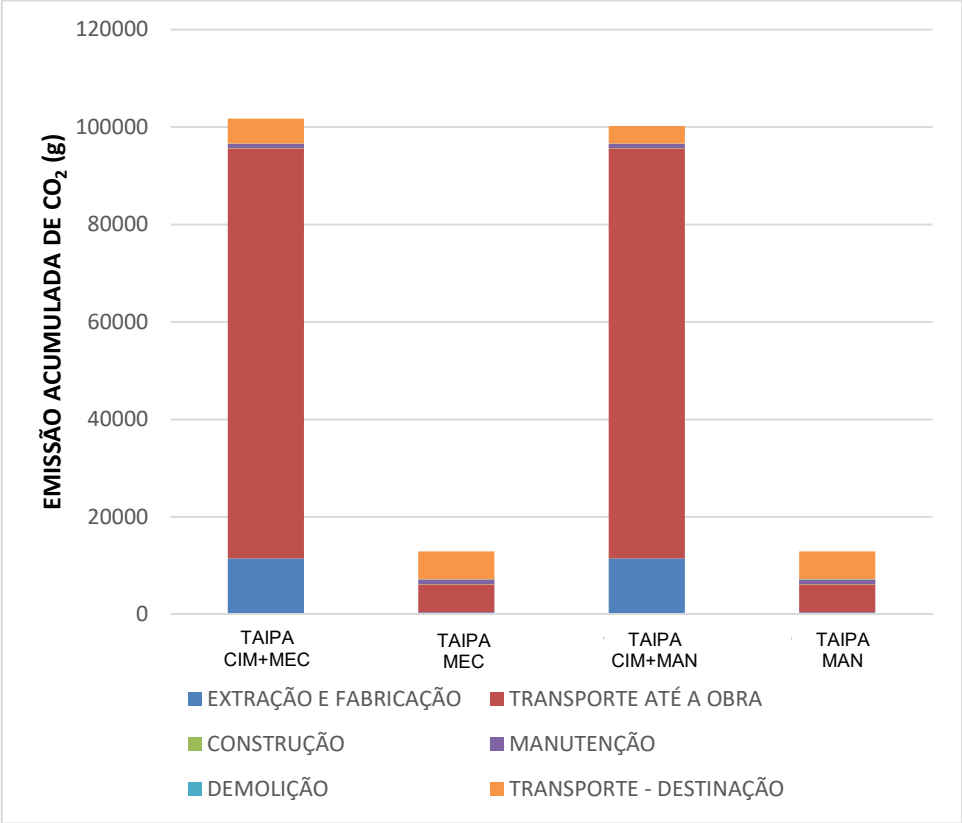
Primeiro, ao analisar os aspectos ambientais de todas as etapas, não é possível obter muitas conclusões, além de que o transporte tem grande “peso” sobre as emissões e consumo de energia do ciclo de vida da taipa de pilão (figura 13). Isto porque, quando se agrupam os resultados de todas as etapas, os outros valores são ofuscados pela grande diferença de valor encontrado na etapa Transporte, e o padrão se repete tanto para emissão de gás carbônico quanto para emissão de poluentes (figuras 14 e 15).

Figura 13 – Consumo de energia das paredes em cada etapa do ciclo de vida



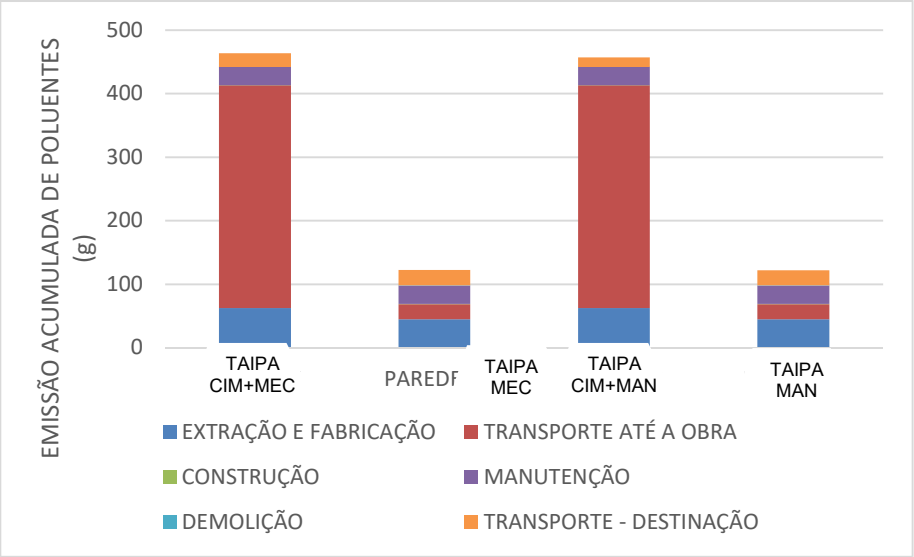
Fonte: autora.

Figura 14 – Emissão de CO_2 das paredes pelas etapas



Fonte: autora.

Figura 15 – Emissão de poluentes das paredes pelas etapas



Fonte: Autora.

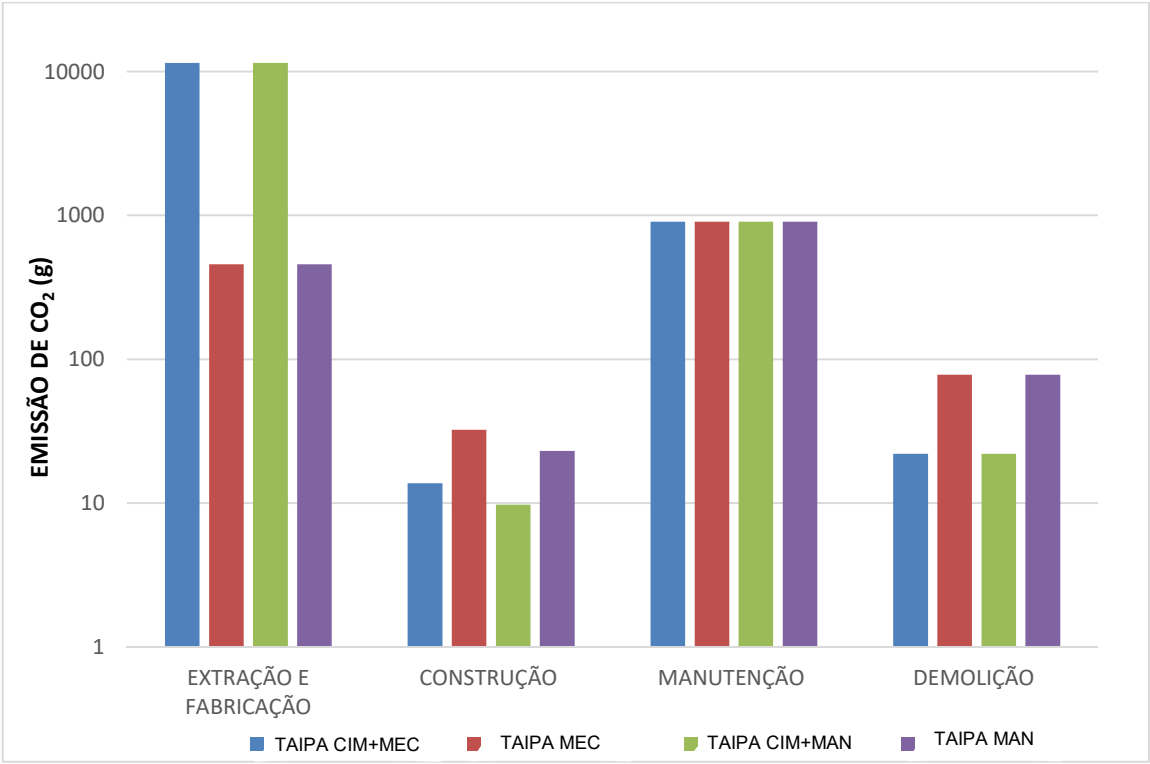
Portanto, com o entendimento que o transporte eleva de forma discrepante os valores dos indicadores ambientais, optou-se por fazer uma análise dos dados sem contar com os resultados da etapa transporte. Para isso, foi excluído da análise as duas etapas de transporte, pois mesmo que o transporte e destinação proporcione valores bem menores que o transporte à obra, seus valores ainda continuam destoantes quando comparados com as outras etapas. Mesmo que tenha excluído o transporte, ainda houve valores muito distantes entre si, visto isto, foi feito um gráfico em escala logarítmica apenas para facilitar a visualização dos valores (figuras 16, 17 e 18). E também a conversão de unidades na emissão de poluentes – de gramas (g) para miligramas (mg) – e no consumo de energia – de Megajoules (MJ) para quilo joules (kJ) (figuras 17 e 18).

Assim, analisando as etapas extração e fabricação, construção, manutenção e demolição, é possível identificar as seguintes situações. A emissão de gás carbônico se destaca dentre as etapas, sendo muito maior do que as emissões de poluentes. Enquanto a emissão de CO_2 está na faixa de 1.000 g a 11.000 g, a emissão de poluentes não chega nem a 70 g em nenhuma das etapas (figuras 17 e 18).

Outro ponto interessante de observar, é que as etapas que se destacam com maiores consumos energéticos e emissões gasosas são as etapas extração e fabricação, seguida da manutenção. Justamente as etapas comentadas anteriormente sobre o fato de que materiais que necessitam de produção fabril são os que mais consomem energia e emitem gases poluentes (figuras 16,17 e 18).

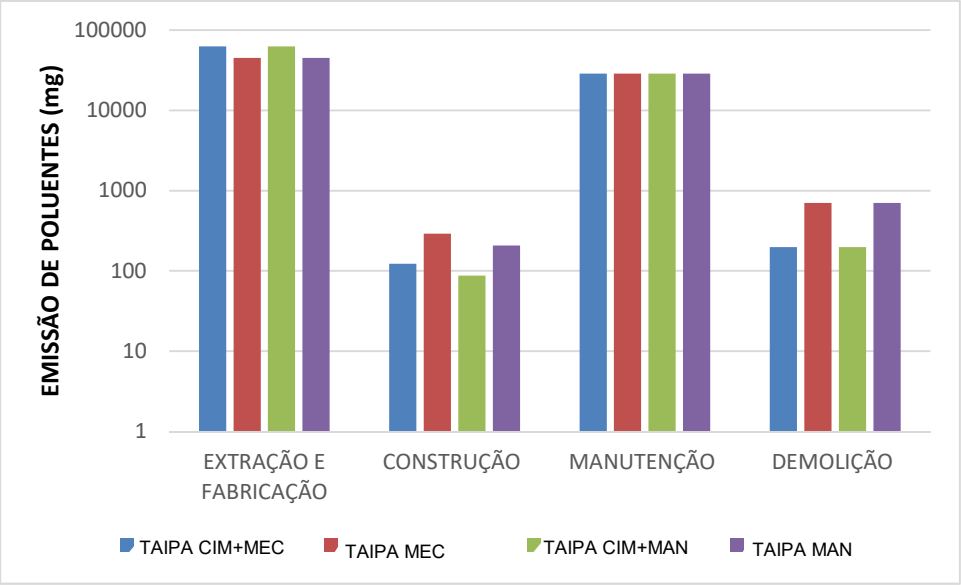
Visto isso, pode se observar que os valores comentados nas etapas de construção e demolição de maneiras isoladas são baixos se comparados com outras etapas como a extração e a manutenção. Enquanto os poluentes da extração são em torno de 3 g a 40 g, as paredes na etapa de construção não emitem mais que 0,3 g de poluentes (figura 17).

Figura 16 – Emissões de CO_2



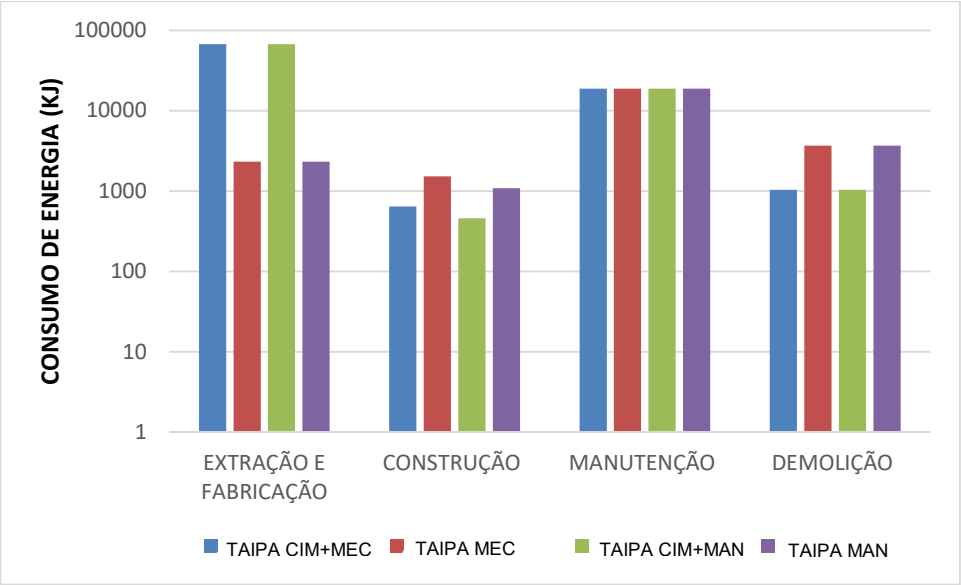
Fonte: Autora.

Figura 17 – Emissão de poluentes



Fonte: Autora.

Figura 18 – Consumo de energia



Fonte: Autora.

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. Enquanto na etapa extração e fabricação as paredes emitem em torno de quase 12 kg de CO_2, na manutenção os valores são por volta de 1,6 kg, isto é 7,5 vezes menor que a etapa extração – provavelmente por conta da produção do cimento (figura 16). Entretanto, quando se foca para o consumo de energia, a diferença de valor entre as paredes se reduz – paredes 1 e 3 consomem em média

68 MJ na extração e fabricação, e na manutenção consomem 18 MJ, sendo “apenas” 4 vezes menor (figura 18).

O principal fator que apresenta a tinta com menor emissão de poluentes é que, enquanto o cimento consumido é de 23 kg, o consumo de tinta é 15 vezes menor, 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. Entretanto, observando a quantia necessária no ciclo de vida da taipa de pilão, há essa divergência de valores nos indicadores ambientais.

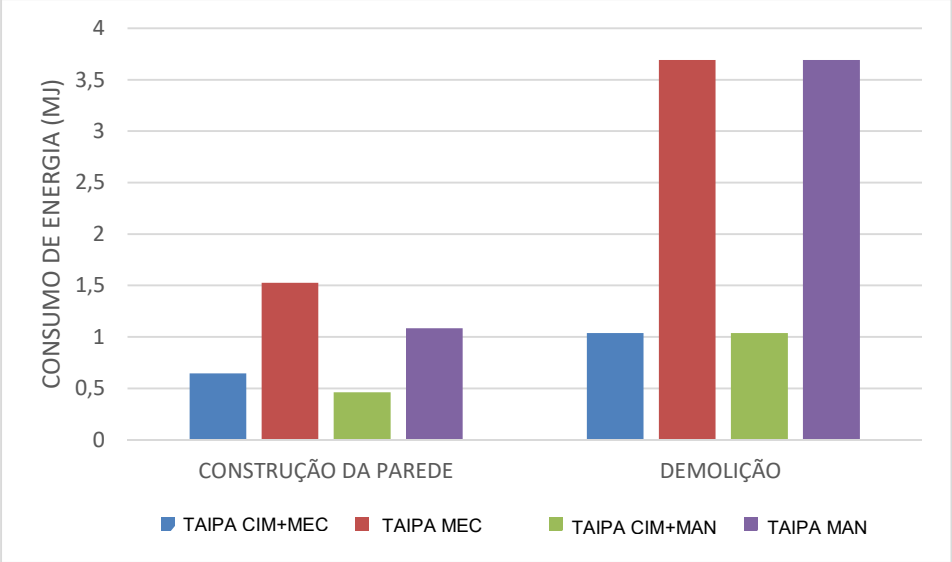
Por fim, verificando os resultados de emissão de poluentes, a divergência de valor já é bem menor, porém é porque na etapa de manutenção há maior emissão de poluentes do que de gás carbônico (figura 17). Isso evidencia que em alguns materiais, os aspectos ambientais se comportam de maneira distinta, e que nem sempre porque em um aspecto tem um valor mais expressivo que em outro terá valores proporcionais. Miranda (2017) também verificou isso quando comparou a parede de taipa de pilão com os materiais convencionais, apesar de em alguns indicadores apresentarem bom desempenho com valores menores, no consumo de água, a taipa consumia um valor bem mais alto que as outras técnicas, podendo ser considerada a mais prejudicial nesse aspecto.

Outro ponto importante é que, mesmo retirando o transporte, as etapas construção e demolição ainda parecem quase “invisíveis” quando comparadas com as outras etapas (figuras 16,17 e 18). 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.

A partir deste fato, foi observado apenas as duas etapas que não utilizam fontes de combustíveis – construção e demolição da parede – a fim de verificar se entre elas, há alguma interferência das variáveis estudadas (figura 19, 20 e 21). Ressalta-se que a etapa de construção foi a única etapa que cada parede (1,2,3 e 4) teve um valor diferente para os indicadores calculados (figura 19, 20 e 21). Isto porque houve variação no volume de massa misturado e compactado, e também houve dois tipos de compactação, a manual e a mecanizada.

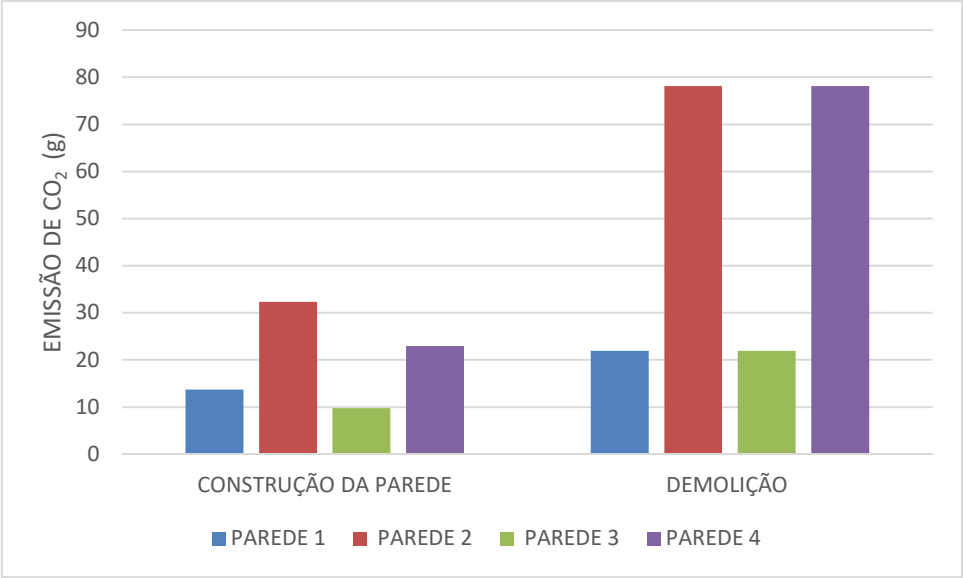
Os resultados mostraram que, as paredes com mesma composição da mistura de solo e diferente tipo de compactação, ou seja, as paredes 1 e 3 (taipas cim+mec e cim+man) e as paredes 2 e 4 (taipas mec e man) se comparadas entre si, apresentaram similares consumo energético e emissões, independente do tipo de compactação, refletindo no uso do compactador mecanizado com pouca interferência nos valores de consumo de energia e emissões de gases poluentes (figuras 19 e 20). 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.

Figura 19 – Consumo de energia etapas construção e demolição



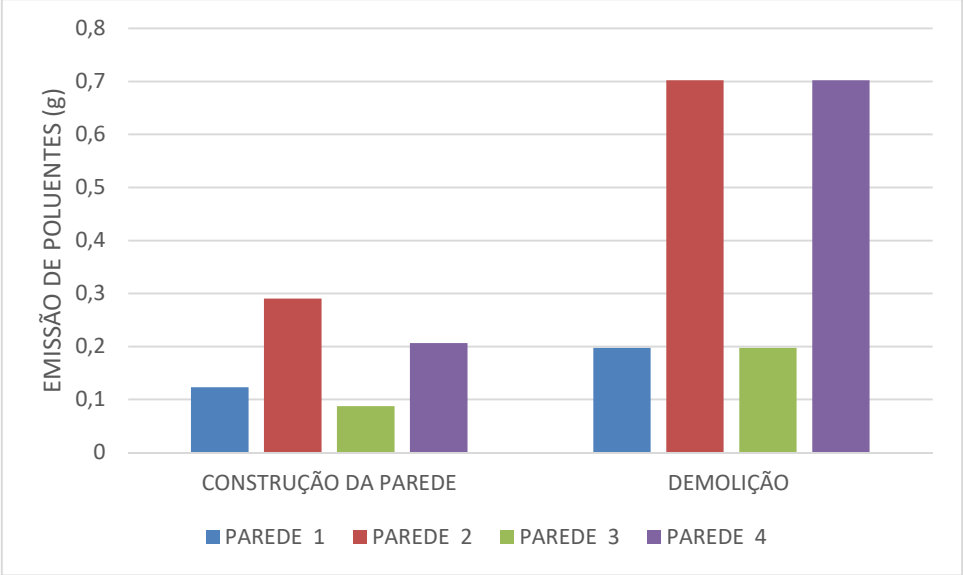
Fonte: autora.

Figura 20 – Emissão de CO_2 nas etapas de construção e demolição



Fonte: autora.

Figura 21 – Emissão de poluentes nas etapas de construção e demolição



Fonte: autora.

Mais um ponto a ser apresentado sobre as duas etapas - construção e demolição - é que a quantidade de volume de massa existente interfere mais nos aspectos ambientais que os próprios tipos de materiais ou equipamentos utilizados (figuras 19,20 e 21). Claro que, ao olhar em todo o ciclo de vida, os materiais que fazem parte do ciclo de vida têm muito mais influência – como por exemplo o uso de um produto localizado muito distante da obra – mas ao analisar somente as etapas em questão, o consumo de energia e emissões de poluentes dependem consideravelmente da quantidade de volume de massa existente para construir ou

demolir a parede (figuras 19, 20 e 21). Um exemplo disso é a emissão de gás carbônico das paredes compactadas por mecanização paredes 1 e 2: a parede 1 (taipa cim+mec) emitiu 12 g na etapa de construção e 22 g na etapa de demolição; já a parede 2 (taipa mec) emitiu 31 g na etapa de construção e 78 g na etapa de demolição (figura 18), sendo em torno de 2,5 vezes menor na etapa de construção e 3,5 vezes menor na etapa de demolição, mesmo sendo a parede 1 (taipa cim+mec) estabilizada com cimento.

Um último ponto a se destacar, dentre essas duas etapas, é que a etapa de demolição apresenta maiores valores dos indicadores ambientais, mesmo o valor do volume ser o volume já do material compactado (menor do que no caso da compactação). O que quer dizer que, apesar do volume influenciar dentro do mesmo equipamento utilizado, ao se comparar dois equipamentos diferentes, suas potências também têm relevância para os valores de indicadores de impacto ambiental. 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 (figura 19).

O motivo da diferença de valores entres essas etapas está na potência do triturador de entulho. O equipamento consome mais energia por hora do que os equipamentos da etapa da construção (a betoneira e o compressor de ar). Contudo, esses dados de diferença só são possíveis de serem analisados olhando apenas essas duas etapas, visto que no geral, essas diferenças comentadas são irrisórias para o ciclo de vida das paredes.

Analisando todos os aspectos ambientais elencados neste tópico, alguns pontos podem ser destacados. No geral, mesmo que as paredes 1 e 3 (taipas cim+mec e cim+man) tenham sido destacadas por seu consumo de cimento, pode-se observar o ponto relevante responsável pelos valores altos dos indicadores de impacto ambiental. Assim, foi notado que:

- A etapa transporte é a mais significativa no ciclo de vida da taipa de pilão; e as distâncias dos produtos para o uso em obra devem ser verificadas e considerar jazidas ou materiais que possuem suas fábricas próximas ao local de obra;
- Só houve a discrepância na diferença de valores no transporte, porque o local da obra teve a coincidência de ter uma jazida próxima. Caso contrário, o valor gerado do transporte do solo poderia ser tão alto quanto a do cimento;

— Outro motivo da relevância de valores da etapa transporte em comparação com as demais etapas é sua fonte de energia proveniente de combustíveis fósseis. O consumo de combustível fóssil também gera maiores valores dos aspectos ambientais, sua principal emissão é o de gás carbônico, tendo valores bem mais expressivos que os outros gases poluentes (enquanto os poluentes estão na faixa de dezenas de gramas, a emissão de CO_2 está na faixa do mil gramas);

— As etapas que também demonstraram resultados relevantes é a fabricação dos produtos, isso porque em fábricas há o uso de equipamento abastecido por combustíveis fosseis; como no ciclo de vida estudado neste trabalho foram inseridos todos os valores do inventario da tinta na etapa manutenção, esta etapa também tem destaque junto com a extração e produção de matéria prima;

— O inventário da tinta foi o único material que apresentou maiores dados dos gases poluentes que do gás carbônico. Isto porque na produção das tintas há o uso de solventes orgânicos, que são responsáveis pela emissão de COVs, inclusive durante a vida útil da tinta (SANTOS, 2015);

— A análise entre o uso de compactadores manuais e mecanizados se mostrou também similar, não gerando valores expressivos do uso do equipamento mecanizado, ou seja, seus aspectos ambientais obtiveram valores baixos, a ponto de ser pouca a diferença com o manual, que foi considerado com valor nulo;

— 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. Este valor pode ser considerado relevante, porém, quando observado os valores de todas as etapas, essa diferença também é desprezível comparada com os resultados das demais etapas que envolvem transporte;

— Foi verificado que as etapas de construção e demolição da parede possuíram os menores valores de indicadores ambientais. Foi notado 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.

A partir dessas avaliações, foi feita uma classificação entre as etapas do ciclo de vida da taipa, sendo a 1ª colocada a etapa que gera os valores mais altos dos indicadores ambientais, até a última que seria a que quase não gera consumo energético e emissão de poluentes (tabela 16). Mostrando, de maneira decrescente, as etapas e seus aspectos ambientais, de cada parede respectivamente. Com esses resultados gerais, também foi possível observar quais paredes obtiveram os piores números dos aspectos ambientais, por exemplo, a taipa cim+mec consumiu a maior quantidade de energia (1.245,69MJ) enquanto a parede a parede taipa man foi a que menos consumiu (176,68MJ). O mesmo aconteceu no indicador emissão de gases poluentes, a parede 1 (taipa cim+mec) obteve os maiores valores, de 102.206,80g, enquanto a parede 4 (taipa man) foi a que menos emitiu, com 13.023,83g (tabela 16).

Tabela 17 – soma das entradas e saídas das etapas em ordem decrescente

ETAPAS	**Taipa cim+mec**		**Taipa mec**		**Taipa cim+man**		**Taipa man**	
	EN (MJ)	Saída (kg)	EN (MJ)	Saída (kg)	EN (MJ)	Saída (kg)	EN (MJ)	Saída (kg)
Transporte até a obra	1108,39	84,498	75,33	5,743	1108,39	84,498	75,33	5,743
Transporte - destinação	67,83	5,171	75,33	5,743	47,49	5,171	75,33	5,743
Extração e fabricação	67,79	11,567	2,32	0,5019	67,79	11,567	2,32	0,5019
Manutenção	18,91	0,933	18,91	0,934	18,91	0,933	18,91	0,934
Demolição	1,04	0,022	3,69	0,0788	1,04	0,022	3,69	0,0788
Construção	0,65	0,0138	1,53	0,0326	0,46	0,00984	1,09	0,02
Total	1245,69	102,207	177,12	13,033	1244,07	100,652	176,68	13,024

Legenda: EN – Entrada = Consumo de energia

Saída – Emissão de CO_2 + gases poluentes

Fonte: Autora.

Na tabela 18, foram colocadas as quatro paredes em uma classificação entre etapas do ciclo de vida, classificando-as de acordo com suas emissões de poluentes e consumo de energia, considerando os menores valores como os mais benéficos (1º lugar), chegou-se ao resultado do 1º lugar para a taipa man (sem cimento e manual).

Todavia, com valores muitos próximos, a taipa mec se coloca em 2º lugar, por ser mecanizada. Já em 3º e 4º lugar estão as paredes estabilizadas com cimento, taipa cim+man e taipa cim+mec, respectivamente. Isto porque, mesmo que em algumas etapas (demolição e construção), as taipas mec e man tenham apresentado rebaixamento na colocação – ou seja, consumindo e emitindo mais – os resultados encontrados não são tão relevantes a ponto de deixar as quatro paredes em faixa de valores similares.

Tabela 18 – Classificação das paredes por etapa e no total

CLASSIFICAÇÃO DAS ETAPAS		POSIÇÃO DAS PAREDES			
		Taipa cim+mec	Taipa mec	Taipa cim+man	Taipa man
6º	**Transporte até a obra**	2º	1º	2º	1º
5º	**Transporte - destinação**	2º	1º	2º	1º
4º	**Extração e fabricação**	2º	1º	2º	1º
3º	**Manutenção**	1º	1º	1º	1º
2º	**Demolição**	1º	2º	1º	2º
1º	**Construção**	2º	4º	1º	3º
POSIÇÃO FINAL DAS PAREDES		**4º**	**2º**	**3º**	**1º**

Fonte: Autora.

Apesar de conseguir encontrar quais etapas da ACV que geraram maiores saídas de consumo e emissões – e também quais variáveis tecnológicas do processo construtivo da taipa causaram maiores valores no quesito de aspectos ambientais – o estudo depende de muitas hipóteses, o que deixa os dados como sendo adequados apenas nas condições propostas neste estudo. Principalmente, pelo fato de ter uma jazida adequada nas proximidades da cidade em que foi feito o protótipo de taipa de pilão, e o oposto acontecer com a fábrica de cimento. 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.

Por fim, apesar da proximidade da jazida de solo - que ameniza consideravelmente os indicadores das taipas sem cimento (taipas mec e man) - 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 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 CO_2 foi exageradamente maior que a emissão de poluentes, entretanto, não foram estudados quais valores seriam necessários para causar um determinado impacto ambiental. Sendo assim, pode ser que os valores dos poluentes representam mais perigo ao meio ambiente do que a emissão de CO_2, o que não pode ser afirmado neste trabalho, pois não foram abordados impactos ambientais, apenas os indicadores de impacto ambiental. Portanto, não serão abordados como conclusão quais indicadores apresentaram maiores valores, visto que não se tem a importância desses valores para o impacto ambiental.

5. CONCLUSÃO

Diante da discussão abordada a partir dos resultados desta pesquisa, para os quatro casos da taipa de pilão e todas as etapas do ciclo de vida abordadas (extração e fabricação, transporte até a obra, construção, manutenção, demolição e transporte e destinação), foi possível obter algumas conclusões. Vale mencionar que não foi considerado a carbonatação na vida útil das paredes estabilizadas com cimento, assim como estas conclusões se referem as hipóteses propostas no trabalho, podendo não serem necessárias adaptações para tomada de decisão em outras situações de projeto/execução da taipa de pilão.

Primeiro, foi possível analisar os aspectos ambientais do ciclo de vida taipa de pilão, mostrando quais etapas são as que mais prejudicam ambientalmente, e quais insumos e saídas ambientais são as mais relevantes neste sistema construtivo. Reafirmando o que foi visto em revisão bibliográfica, o transporte é a etapa mais prejudicial do ciclo de vida da taipa de pilão, sendo responsável por pelo menos 80% das emissões de CO_2 e de consumo de energia. Além disso, a etapa de fabricação de materiais também colabora com maiores emissões de poluentes, como no caso da produção do cimento e da resina acrílica.

Visto que a fabricação também apresentou resultados altos dos 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, consequentemente, o uso de equipamentos tanto na construção quanto na demolição, essas etapas não são suficientes para balancear a emissão de gases e consumo de energia gastos 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 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 reinserida 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 reciclagem ou descarte.

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. 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.

Para trabalhos futuros:

- Abordagem das etapas e entradas/ saídas não abordadas neste estudo, como a etapa de operação da parede, reciclagem, mão-de-obra e geração de resíduo de cada etapa;
- Avaliar os impactos ambientais causados pelos aspectos ambientais resultados nesta pesquisa; normalizando os dados e verificando quais indicadores tem mais influência sobre os impactos;
- Estudar os aspectos sociais e econômicas da construção da taipa de pilão, e quais benefícios a inserção desta técnica no mercado de trabalho brasileiro pode trazer;
- Verificar diferentes alternativas para o ciclo de vida da taipa de pilão, a fim de identificar quais parâmetros mais influenciam os aspectos ambientais. E talvez encontrar faixas de valores que pode ser considerado “aceitável” para se selecionar: distância de jazidas e fabricas, quantidade de material consumido e quais produtos podem ser adotados como estabilizantes.

REFERÊNCIAS

ANSI/ASHRAE Standard 55 (2017): Thermal Environmental conditions for Human Occupancy. Atlanta – Estados Unidos.

ARRIGONI, A. et al. Life cycle analysis of environmental impact vs. durability of stabilized rammed earth. Construction and Building Materials. N. 142, p. 128-136. 2017.

ARRIGONI, A. et al. Rammed Earth incorporating recycled concrete aggregate: a sustainable, resistant and breathable construction solution. Resources, Conservation & Recycling. N 137, p. 11-20. 2018.

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 ISO 14044 (2009): Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro.

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

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

AYE, L. et al. Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules. Energy and Buildings. N 47, p. 159-168. 2012.

Balanço Energético Nacional 2014. Rio de Janeiro 2010. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf. Acesso em: 10 julho 2022. 288 p.

BAPTISTA JUNIOR, J. V. ROMANEL, C. Sustentabilidade na indústria da construção: uma logística para reciclagem dos resíduos de pequenas obras. Brazilian Journal of Urban Management. N 2, p. 27-37. 2013.

BASF – S.A. Boletim técnico Suvinil Resina Acrílica Base Água. 2018. Disponível em: https://www.suvinil.com.br/upload/8d516a78-cd3e-4cef-9a91-96f82a314568-suvinil-resina-acrilica-base-aguamaio2018.pdf . Acesso em: outubro 2021.

BEN-ALON, L. et al. Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of natural vs conventional building materials: A case study on cob earthen material. Building and Environment. N 160, p. 01-10, 106150. 2019.

BEN-ALON, L. et al. Life cycle assessment (LCA) of natural vs conventional building assemblies. Renewable and Sustainable Energy Reviews. N 144, p. 1-11, 110951. 2021.

BLENGINI, G. A. Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy. Building and Environment. N 44, p. 319-330. 2009.

BUI, Q. B., et al. Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering. Building and Environment. N 44, p. 912-919. 2009.

BR TINTAS. Linha imobiliária – Ficha técnica: hidroflex multiuso arara azul. Disponível em:https://cdn.awsli.com.br/373/373909/arquivos/Ficha%20Tecnica_Hidroflex%20Multiuso%20(3%20em%201)%20Arara%20Azul.pdf . Acesso em: outubro 2021.

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. N 218, p, 141-156. 2019.

CABEZA, L. F. et al. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. N 29, p. 394-416. 2014.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. Selo Casa Azul – Boas práticas para uma habitação mais sustentável. 2009. Disponível em: http://www.caixa.gov.br/sustentabilidade/negocios-sustentaveis/selo-casa-azul-caixa/Paginas/default.aspx. Acesso em: outubro 2020.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇAO – CBIC. Energia nas construções: Uma contribuição do setor à redução de emissões e de uso de fontes renováveis de energia. Brasilía – DF. 2017. 120p.

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.

CAMPOS, M. G. Abordagem de Ciclo de Vida na Avaliação de impactos ambientais no processamento primário offshore. 2012. 127 f. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Ambiental) – UFRJ. Rio de Janeiro, 2012. 142 p.

CARABANO, R. et al. Life cycle assessment (LCA) of building materials for the evaluation of building sustainability: the case of thermal insulation materials. Revista de la construcción. N 16(1), 22-33. 2017.

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO – CEPED. Manual de construção com solo-cimento. São Paulo: ABCP, 1984.147p.

CHAI, C. et al. Previsão da vida útil de pinturas de paredes exteriores. Engenharia civil. N 41, p. 51 – 63. 2011.

CHRISTOFOROU, E. et al. Cradle to site life cycle assessment (LCA) of adobe bricks. Journal of Cleaner Production. N 112, p. 443-452. 2016.

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.

CIB e UNEP – IETC. Agenda 21 for sustainable construction in developing countries. Pretória: Editora CSIR Building and Construction Technology. 2002. 82p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução Nº 1, de 23 de janeiro de 1986 publicada no DOU, de 17/02/1986, págs. 2548-2549.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução Nº 307, de 5 de julho de 2002 publicada no DOU nº 136, de 17/07/2002, págs. 95-96.

CONELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 433, de 13 de julho de 2011.

CSM. Catálogo de máquinas. Disponível em: https://www.csm.ind.br/catalogo_maquinas.pdf . Acesso em: Novembro 2021.

DA ROCHA, C. G. CONSOLI, N. C. JOHANN, A. D. R. Greening stabilized rammed earth: devising more sustainable dosages based on strength controlling equations. Journal of Cleaner Production. N 66, p. 19-26. 2014.

DE WOLF, C. et al. Life cycle building impact of a Middle Eastern residential neighborhood. Energy. N 134, p. 336-348. 2017.

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. N. 75, p. 03-21. 2018.

DONG, X. SOEBARTO, V. GRIFFITH, M. Achieving thermal comfort in naturally ventilated rammed earth houses. Building and Environment. N 82, p. 588-598. 2014.

FALCETO, J. C. MAZARRÓN, F. R. CAÑAS, I. Assessment of compressed Earth blocks made in Spain: International durability tests. Construction and Building Materials. N 37, p. 738-745. 2012.

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. N 241, p. 01-19, 118286. 2019.

GALÁN-MARÍN, C. RIVERA-GÓMEZ, C. GARCÍA-MARTÍNEZ, A. Embodied energy of conventional load-bearing walls versus natural stabilized earth blocks. Energy and Buildings. N 97, p. 146-154. 2015.

GREEN BUILDING COUNSIL AUSTRALIA (GBCA). What is a Green Star? 2019. Disponível em: https://new.gbca.org.au/ . Acesso em: agosto 2020.

GREEN BUILDING COUNSIL BRASIL (GBC). O que é certificação ambiental? 2014. Disponível em: https://www.gbcbrasil.org.br/o-que-e-certificacao-ambiental/?gclid=Cj0KCQjwhvf6BRCkARIsAGI1GGjm0Na3QtpnIG8bHgkLEKlhjlgWbPbpDARNZdvhrBIakTp5kZfAbXIaAmVDEALw_wcB. Acesso em: Agosto 2020.

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. N178, p. 618-643. 2018.

HAMMOND, G. JONES, C. Embodied carbon – The inventory of carbon and energy (ICE). University of Bath – BSRIA. 2011.

HANADEH, A. E. Environmental assessment of popular single-family house construction alternatives in Jordan. Building and Environment. N 92, p. 192-199. 2015.

INGRAO, C. etal. A comparative Life Cycle Assessment of external wall-compositions for cleaner construction solutions in buildings. Journal of Cleaner Production. N 124, p. 283-298. 2016.

INMETRO - FUNDAÇAO VANZOLINI. Processo de certificação AQUA – Alta qualidade ambiental. 2013. Disponível em: http://www.inmetro.gov.br/painelsetorial/palestras/Processo_Certificacao_AQUA_Alta_Qualidade_Ambiental_Manuel_Martins.PDF . Acesso em: agosto 2020.

INTERCEMENT. Relatório Anual 2015. Brasil, 2015. Disponível em: http://www.intercement.com/sites/ra2015/web/. Acesso em: julho 2022.

KARIYAWASAM, K.K.G.K.D. JAYASINGHE, C. Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material. Construction and Building Materials. N 105, p. 519-527. 2016.

MAKITA. Martelo Demolidor HM1111C HM1101C – Manual de instruções. Disponível em: http://www.makita.com.br/manuais/HM1111C.pdf . Acesso em: novembro 2021.

MANIADITIS, V. WALKER, P.A Review of Rammed Earth Construction for DTi Partners in Innovation Project Developing Rammed Earth for UK Housing. 2003

MARCEAU, M. L. VANGEEM, M. G. Comparison of the Life Cycle Assessments of an Insulating Concrete Form House and a Wood Frame House. Journal of ASTM International. N 9, p. 01-11. 2006.

MARTÍNEZ-ROCAMORA, A. SOLÍS-GUZMÁN, J. MARRERO, M. Ecological footprint of the use and maintenance phase of buildings: Maintenance tasks and final results. Energy and Buildings. N 155, p. 339-351. 2017.

MELIÀ, P. et al. Environmental impacts of natural and conventional building materials: a case study on earth plasters. Journal of Cleaner Production. N 80, p. 179-186. 2014.

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. N 24, p. 775-782. 2012.

MILANI, A. P. S., MAIA, M. M. Uso de aditivos químicos para redução de energia de compactação na execução de taipa de pilão. In: VII Congresso Terra Brasil, 2018, Rio de Janeiro, RJ. Anais do VII Congresso Terra Brasil.

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: 25/10/2022.

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.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwew/mdmx/~edisp/inea0031540.pdf. Acesso em: julho 2022.

MIRANDA, A. S. (2017) análise comparativa de métodos simplificados de ACV aplicado a paredes de edificações. Campo Grande: dissertação – UFMS. 170p.

NACIONES UNIDAS. Protocolo de Kyoto de la convención marco de las Naciones Unidas sobre cambio climático. GE.05-61702, 1998. 25p.

NANZ, L. et al. Impacts on the Embodied Energy of Rammed Earth Façades During Production and Construction Stages. Journal Of Facade Design & Engineering. N 1, p. 075-088. 2019.

ORTIZ, O. CASTELLS, F. SONNEMANN, G. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. Construction and Building Materials. N 23, p. 28-39. 2009.

PROIETTI, F. et al. Life Cycle Assessment of a passive house in a seismic temperate zone. Energy and Buildings. N 64, p. 463-472. 2013.

REDDY, B. V. V. KUMAR, P.P. Embodied energy in cement stabilized rammed earth walls. Energy and Buildings. N 42, p. 380-385. 2010.

REDDY, B.V.V. LEUZINGER, G. SREERAM, V.S. Low embodied energy cement stabilized rammed earth building—A case study. Energy and Buildings. N 68, p. 541-546. 2014.

REZA, B. SADIQ, R. HEWAGE, K. Emergy-based life cycle assessment (Em-LCA) of multi-unit and single-family residential buildings in Canada. International Journal of Sustainable Built Environment. N 3, p. 207-224. 2014.

RUIZ, L. A. L. RAMÓN, X. R. DOMINGO, S. G. The circular economy in the construction and demolition waste sector - A review and an integrative model approach. Journal of Cleaner Production. N 248, p. 01-15, 119238. 2020.

SAMEH, S. H. Promoting earth architecture as a sustainable construction technique in Egypt. Journal of Cleaner Production. N 65, p. 362-373. 2014.

SANTOS, A. C. (2015). Implementação e validação de um método de controlo do teor de COV em tintas líquidas, por GC – MS com amostrador headspace. Porto: dissertação – FCUP. 105p.

SEO, E. S. M. KULAY, L. A. Avaliação do ciclo de vida: ferramenta gerencial para tomada de decisão. InterfacEHS - Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente. N 1, p. 01- 23. 2006.

SERRANO, S. et al. Rammed earth walls in Mediterranean climate: material characterization and thermal behavior. International Journal of Low-Carbon Technologies. N 12, p. 281-288. 2017.

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.

SOUDANI, L. et al. Energy evaluation of rammed earth walls using long term in-situ measurements. Solar Energy. N. 141, p. 70-80. 2017.

TAYLOR, P. FULLER, R.J. LUTHER, M.B. Energy use and thermal comfort in a rammed earth office building. Energy and Buildings. N40, p.793-800. 2008.

TORGAL, F. P. JALALI, S. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. Construction and Building Materials. N 29, p. 512-519. 2012.

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.

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.

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.

VOTORANTIM. Relatório Integrado – 2015. Brasil,2015. Disponível em: http://vcimentos.com.br/extras/pdf/relatorio/Relatorio-Integrado-Votorantim-Cimentos-2015.pdf. Acesso em: julho 2022.

WEBER SAINT – GOBAIN. Boletim técnico repele água quartzolit. Disponível em: https://www.quartzolit.weber/files/br/2018-01/repele_gua_quartzolit.pdf . Acesso em: outubro 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.

ANEXO A – INSUMOS ENERGÉTICOS

Neste anexo é explicado como foram obtidos os valores de consumo de energia e emissão de gases poluentes de cada fonte de energia utilizada no trabalho. Os valores de emissões foram retirados a partir de estudos publicados, e manuais técnicos de empresas e inventários; todos listados e referenciados abaixo.

Óleo Diesel

Foi adotado o óleo diesel para as etapas de transporte, visto que o caminhão hipotético na pesquisa é abastecido a diesel. Considerou-se dados do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (MMA, 2013), e os estudos de Silva (2013); Vianna (2006) e o Balanço Energético Nacional (BEN, 2014). A tabela A.1 mostra o somatório de valores do consumo de energia e da emissão de gases relativos à produção do diesel e, posteriormente, sua combustão.

Tabela A.1. Fatores de energia e emissão incorporados no diesel – em caminhões de transporte

Entradas/ saídas	Fatores (Unidade/ Litro)		
	Produção em refinaria	**Combustão**	**Total (considerado)**
Energia (MJ)	*1,74*[1]	*35,52*[3]	*37,26*
CO_2 (g)	*225,97*[2]	*2.603*[4]	*2.828,97*
CH_4 (g)	*2,36* [2]	*0,204* [4]	*2,56*
MP (g)	*0,13* [2]	*0,049*[4]	*0,18*
NH_3 (g)	*0,00004*[2]	-	*0,000036*
N_2O (g)	*0,001* [2]	-	*0,10*
NOx (g)	*1,37* [2]	-	*6,99*
SO_2 (g)	*1,08* [2]	-	*1,076*
SOx (g)	*0,0063* [2]	-	*0,0063*
H_2S (g)	*0,0002* [2]	-	*0,0002*

1 SILVA, 2013

2 VIANNA, 2006

3 BEN, 2014

4. Calculado com base em MMA, 2013

Fonte: Autor.

Fatores para equipamentos

Adotou-se as emissões dos equipamentos como pé-carregadeira de acordo com a resolução nº 433/2011 (CONAMA, 2011) que estabelece os limites máximos de emissões para veículos fora da estrada (tabela A.2). Já a potência do intervalo de 130 a 560 kW, de acordo com suas referências em manuais técnicos.

Tabela A.2. Fatores de emissão para veículos fora da estrada

Potência P em kW	CO (g/ kWh)	HC + NOx (g/ kWh)	MP (g/kWh)
130 ≤ P ≤ 560	*3,5*	*4,0*	*0,2*
75 ≤ P < 130	*5,0*	*4,0*	*0,3*
37 ≤ P < 75	*5,0*	*4,7*	*0,4*
19 ≤ P < 37	*5,5*	*7,5*	*0,6*

Fonte: CONAMA (2011).

Gás Natural

O consumo de gás natural aparece no inventário da Resina acrílica, este foi retirado dos estudos de Miranda (2017). A autora calculou as emissões relativos da etapa de fabricação do gás natural e seus insumos – que no caso são o petróleo (t) e energia (KJ). A partir da quantidade necessária de petróleo e energia para se fazer GN (para cada entrada de 1.618.171,4 t de petróleo e 1,03xE+11 KJ de energia, sai 5.562 t de gás natural), foi possível chegar nas emissões incorporadas dessa fonte de energia (tabela A.3.).

Tabela A.3. Fatores de energia e emissão incorporados no gás natural

Entradas/ saídas	Fatores (Unidade/ m³)		
	Produção em refinaria	Combustão	Total (considerado)
Energia (MJ)	*0,41*[1]	*36,84*[2]	*37,25*
CO_2 (g)	*7,67(*[1]	*1.920*[3]	*1.927,67*
N_2O (g)	*0,000071* [1]	*0,0352*[3]	*0,035*
CH_4 (g)	*0,047* [1]	*0,0368*[3]	*0,083*
THC (g)	*0,0053*[1]	-	*0,0053*
COV (g)	*0,12*[1]	*0,088*[3]	*0,21*
SO_2 (g)	*0,00013*[1]	*0,0096*[3]	*0,0097*
MP $_{25}$ (g)	*0,00044*[1]	-	*0,00044*
MP $_{10}$ (g)	0,*00044*[1]	-	*0,00044*
MP (g)	-	*0,1216*[3]	*0,12*

(Continuação)

NOx (g)	*0,10 (1)*	*1,60*(3)	*1,70*

1 Calculado com base em CAMPOS M. G., 2012 e VIANNA,2006

2 BEN, 2014

3 EPA, 201

Fonte: Adaptado de Miranda (2017)

Energia elétrica

Foi quantificado as emissões relativas à produção de energia de acordo com o Segundo Inventário Nacional de Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa (BRASIL, 2010) sobre os anos 1990 a 2005, e também de acordo com a Estimativas Anuais de Gases do Efeito Estufa no Brasil (MCTI, 2022). A partir dos dados encontrados nessas referencias, a quantidade em gramas da substância por kWh produzido (g/ kWh) em cada ano. E 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) e obteve as entradas e saídas dessa fonte de energia, mostrada na tabela A.4.

Tabela A.4. Fatores de energia e emissão incorporados na energia elétrica

Entrada/ saídas	Fatores (Unidade/ kWh)	Fonte
Energia Incorporada (MJ)	3,323	SILVA, 2013
CO_2 (g)	70,34	Calculado com base em BRASIL, 2010 e MCT, 2014
CH_4 (g)	0,011	
N_2O (g)	0,00138	
CO (g)	0,137	
NOx (g)	0,476	

Fonte: Autor

ANEXO B – INSUMOS MATERIAIS

Solo Arenoso

Os dados de energia e emissão incorporada na extração do solo arenoso também foi baseado no estudo de Miranda (2017). Segundo o estudo, primeiramente foi calculado o consumo de combustível necessário para a pá-carregadeira extrair o solo, isso de acordo com o seu tempo de uso (m³/h). Também foi utilizado a potência nominal e o fator de potência da pá-carregadeira para obter o consumo horário do equipamento.

O consumo horário de combustível utilizado foi de 17,74 L/h. Como a pá-carregadeira é abastecida por diesel, obteve-se os fatores de energia e emissão incorporados no solo arenoso.

Tabela B.1. Fatores de energia e emissão incorporados no solo arenoso

Entrada/ Saídas	Fatores (Unidade/ tonelada)	Fonte
Energia (MJ)	*2,74*	*BEM, 2014; VIANNA, 2006.*
CO_2 (g)	*539,18*	*Calculado com base em VIANNA,2006; CONAMA, 2001; EPA,2010.*
CH_4 (g)	*0,174*	
MP (g)	*0,155*	
NH_3 (g)	*0,0000027*	
N_2O (g)	*0,000088*	
NOx (g)	*2,81*	
SO_2 (g)	*0,88*	
SOx (g)	*0,000465*	
H_2S (g)	*0,000014*	
COVNM (g)	*0,063*	

Fonte: Adaptado de Miranda (2017).

Cimento

O cálculo da energia e emissões relativas à produção do cimento foi feito uma média dos relatórios de sustentabilidade de duas empresas - INTERCEMENT, 2015; VOTORANTIM, 2015 - entre os anos de 2012 e 2015, obtendo dados dos fatores de energia e emissão multiplicado pela faixa de fatores de clínquer de cada tipo de cimento. A tabela B.2 mostra a média adotada para o cimento CP II-F.

Tabela B.2. Fatores de energia e emissão incorporados no cimento CP II – F

Entrada/ Saídas	Fator (unidade / tonelada de produto)		Fonte
	Mínimo	Máximo	
Energia (MJ)	*3087,19*	*3230,78*	*Calculado com base nos relatórios de sustentabilidade da Intercement, 2015 e da Votorantim, 2015.*
CO_2 (g)	*522.526,25*	*547.143,75*	
MP (g)	*108,84*	*113,96*	
NOx (g)	*1.500,18*	*1.569,96*	
SOx (g)	*431,91*	*452,00*	
COV (g)	*22,71*	*23,76*	
Hg (g)	*0,0081*	*0,0085*	

Fonte: Autor.

Resina acrílica

Os dados para o cálculo da resina acrílica foram baseados no inventario de energia e de carbono feito por Hammond e Jones (2011). De acordo com os autores, a tinta à base de água (adotada neste estudo como a hipotética para a resina acrílica) se utiliza das seguintes fontes de energia: óleo diesel; energia elétrica e gás natural. Sendo assim, os autores encontraram as porcentagens em que cada uma dessas fontes de energia fosse responsável pela energia e carbono incorporado da tinta (tabela B.3).

Tabela B.3. Percentual da influência das fontes de energia no inventário da tinta.

Fonte de energia	Inventário da tinta	
	Energia incorporada (%)	Carbono incorporado (%)
Óleo diesel	41,%	5,1%
Gás natural	21,4%	18,7%
Eletricidade	74,5%	76,2%

Fonte: Adaptado de Hammond e Jones (2011).

Com essas informações, a mesma proporção de fontes de energia foi adotada para os fatores de energia e emissão de gases para a tinta. Utilizando-se dessas proporções, os fatores incorporados na tinta adotados estão representados na tabela B.4.

Tabela B.4. Fatores de energia e emissão incorporados na resina acrílica.

Entradas e saídas	FATORES (unidade/litro)	FONTE
Energia (MJ)	11,817	*Calculado com base no estudo de inventario de energia e carbono incorporado de Hammond e Jones, 2011.*
CO_2 (g)	565,637	
CH_4 (g)	0,021	
MP (g)	0,084	
NH_3 (g)	0,104	
N_2O (g)	0,383	
NOx (g)	0,343	
SO_2 (g)	0,961	
SOx (g)	0,012	
H_2S (g)	0,023	

Fonte: Autora.