

ANÁLISE DA EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DA TAIPA DE PILÃO CONTEMPORÂNEA

ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL EVOLUTION OF CONTEMPORARY RAMMED EARTH

LUDMILA CARDOSO FAGUNDES MENDES | UFMG

SOFIA ARAUJO LIMA BESSA, Dra. | UFMG

RESUMO

Presente em diferentes culturas, a taipa de pilão é uma técnica milenar. Com a industrialização e o descobrimento de novas tecnologias e materiais, a taipa de pilão caiu em decadência. Porém, as preocupações com a escassez de recursos naturais, levaram à necessidade de investimento em construções sustentáveis, o que resgatou práticas construtivas antigas. O objetivo deste artigo é analisar, nas publicações dos últimos 10 anos, a evolução tecnológica da taipa de pilão, enquanto material e sistema construtivo. Os estudos recentes sobre taipa buscam a obtenção de misturas que garantam melhorias nas propriedades físico-mecânicas. Observa-se, também, uma busca por técnicas que aumentem a produtividade da taipa e a qualidade das edificações. Apesar das mudanças tecnológicas, com adição do cimento (como estabilizante) em larga escala e pelo uso de mecanização na compactação, a taipa de pilão ainda pode ser considerada uma alternativa de baixo impacto ambiental quando comparada com as tecnologias convencionais.

66

PALAVRAS-CHAVE: Taipa de pilão; tecnologia; estabilização; mecanização; sustentabilidade.

ABSTRACT

Present in different cultures, rammed earth is a millenary technique. With the industrialization and the discovery of new technologies and materials, the rammed earth fell in decline. However, concerns about the scarcity of natural resources, led to the need for investment in sustainable buildings, which rescued old construction practices. The objective of this article is to analyse, in the publications of the last 10 years, the technological evolution of the rammed earth, as material and construction system. Recent studies on rammed earth seek to obtain mixtures that ensure improvements in physical and mechanical properties. There is also a search for techniques that increase the productivity of the mud and the quality of buildings. Despite the technological changes, with the addition of cement (as a stabilizer) on a large scale and the use of mechanization in compaction, the rammed earth can still be considered an alternative of low environmental impact when compared to conventional technologies.

KEY WORDS: Rammed earth; technology; stabilization; mechanization; sustainability.



1. INTRODUÇÃO

A taipa de pilão é uma técnica construtiva presente em diferentes culturas, que se baseia em socar a terra umedecida dentro de uma forma de madeira (taipal), com o auxílio de um pilão (FEIBER, 2012). Considerada uma técnica milenar, há comprovações arqueológicas de construções em terra apiloada que datam entre 9.000 e 5.000 a.C, na Turquia, na Assíria e em outros locais no Oriente Médio. Construídas com terra apiloada entre alvenarias de pedra, as muralhas da China também elucidam o uso da terra como material de construção (MINKE, 2001 *apud* PISANI, 2004).

Conforme explicado por Peixoto, Souza e Rezende (2016), a taipa de pilão foi introduzida em Portugal pelos árabes, na região do Algarve. Posteriormente, os colonizadores Portugueses trouxeram a técnica para o Brasil. O país conta com significativo patrimônio cultural edificado com a técnica de taipa de pilão histórica (REZENDE, 2012). De acordo com Feiber (2012), este patrimônio é constituído por variadas tipologias como igrejas, fortificações, residências e muralhas.

Devido às dificuldades de transporte, no período colonial brasileiro, as construções em taipa eram executadas com terra retirada das proximidades do local de construção. A qualidade da terra era avaliada pela aparência visual e pelo tato, pela experiência do próprio executor. Para evitar que a resistência final das paredes fosse afetada, a terra era retirada a certa profundidade, livre de impurezas superficiais, como areias e pedregulhos. Para o preparo da massa, era realizado o esfrelamento do solo, com pulverização de água. Em seguida, o amassamento era feito com as mãos ou com os pés, até a obtenção de uma massa homogênea (PISANI, 2004). Durante o amassamento, tendo em vista melhorias na resistência, havia a possibilidade de adicionar outros componentes à massa. Rezende (2012) aponta a cal virgem como material encontrado em muitas taipas históricas presentes no Brasil.

A mistura era disposta em camadas dentro do taipal, para ser apiloada. Após a conclusão de todas as camadas, a secagem da taipa de pilão tradicional depende tanto do tipo de solo utilizado, quanto das dimensões das paredes e das condições climáticas, variando de três a seis meses (PISANI, 2004). De acordo com Font e Hidalgo (2011), o taipal tradicional era executado em madeira dura, seca e resistente, com dimensões entre 100 a 150 cm de altura por 200 a 400 cm de comprimento (Figura 01), as

tábuas eram cortadas manualmente e os taipais eram considerados bens de alto valor (PISANI, 2004)

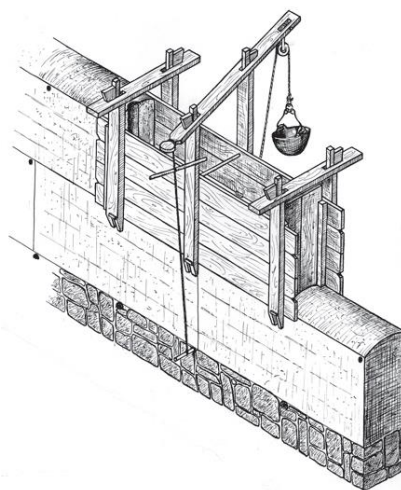


Figura 1. Taipal tradicional. Font e Hidalgo (2011)

Segundo Parisi, Rodrigues e Fricke (2015), o processo de racionalização e mecanização da taipa na Europa teve início por volta de 1790, principalmente na Dinamarca, Alemanha e Itália. Nos Estados Unidos, a partir de 1806 e, posteriormente na Austrália, também no princípio do século XIX, quando a prática foi introduzida pelos colonos europeus.

Porém, ao longo do século XX, nos países desenvolvidos, o uso da terra como material de construção tornou-se menos atraente (CRISTELO *et al.*, 2012). O desuso da prática da taipa de pilão ocorreu em consequência da difusão de materiais mais modernos, como o aço e o concreto (SILVA *et al.*, 2013). Para Cristelo *et al.* (2012), a atual falta de códigos de regulamentação para construções em taipa, em diversos países, é reflexo do período de decadência como material de construção, no século passado.

No Brasil não foi diferente. De acordo com Pisani (2004), os tijolos maciços começaram a ser utilizados no Brasil por volta de 1850. Já na década de 1940, a mão-de-obra dos taapeiros começou a ser, cada vez mais, substituída pela dos pedreiros, devido à maior agilidade para a execução das paredes em tijolos.

Todavia, a crise energética dos anos 1970 levou à crescente preocupação com o esgotamento de recursos naturais (FONT E HIDALGO, 2011). Com isso, a busca por construções sustentáveis, com o uso de materiais e técnicas construtivas, considerados ecologicamente corretos, desencadeou diversas pesquisas sobre

arquitetura bioclimática. Tal fato levou ao resgate de técnicas de construção antigas, como a taipa de pilão (CRISTELO *et al.*, 2012; FONT E HIDALGO, 2011).

De tal modo, atualmente, as construções com terra podem ser vistas em diferentes países, executadas tanto com técnicas de produção rudimentares e artesanais, quanto a partir de aprimorados processos de industrialização, como a mecanização (MAIA, ANDRADE E FARIA, 2016).

Diante do exposto, o objetivo deste artigo foi analisar, em publicações recentes, como se deu a evolução tecnológica da taipa de pilão, enquanto material e sistema construtivo.

2. MÉTODO

O presente artigo buscou realizar a análise da literatura publicada nos últimos 10 anos sobre a evolução tecnológica da taipa de pilão. Para tal, foram realizadas buscas em duas plataformas: i) os anais de dois eventos brasileiros, que ocorrem em formato bianual, e que tratam da temática das tecnologias construtivas em terra; e ii) o portal de Periódicos da CAPES, como detalhado a seguir:

- Anais do Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC), evento realizado bianualmente pela Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído (ANTAC), entre os anos 2010 e 2018;

- Anais do Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil (Terra Brasil), organizado bianualmente pela Rede Terra Brasil, entre os anos 2010 e 2018;

- Plataforma de busca Periódicos da CAPES (CAPES/ MEC, 2020).

Os anais de ambos os eventos foram obtidos nos respectivos sites dos respectivos organizadores. Assim, para filtrar os artigos relevantes para o presente estudo, o termo “taipa de pilão” foi digitado na ferramenta de busca de cada arquivo. Como os dois eventos são bienais, foram consultados os artigos publicados entre 2010 e 2018, totalizando cinco anais para cada evento.

Nesta busca, foram identificados 22 artigos nos Anais do Terra Brasil, que continham o termo “taipa de pilão” nos títulos ou nos resumos. Após a leitura dos resumos, para entender se o artigo tratava da evolução tecnológica da taipa, tema central deste artigo, foram selecionados sete artigos que tinham conteúdo pertinente ao assunto.

Na busca realizada nos anais do ENTAC, foram obtidos três artigos com o termo “taipa de pilão” presente em qualquer parte do texto. Os três

artigos foram considerados relevantes para o estudo, após a leitura dos respectivos resumos.

Já a plataforma de busca dos Periódicos CAPES/MEC dispõe de diferentes filtros. Inicialmente, foi pesquisado o termo “taipa de pilão”, sem nenhum filtro. Esta busca apresentou apenas sete resultados, todos relacionados à análise da taipa como patrimônio histórico, o que não é o foco deste trabalho. Em seguida, foi realizada a busca de arquivos estrangeiros sobre o assunto, com termo inglês “Rammed Earth”.

Essa busca resultou em 1.621 arquivos. Com isso, foram aplicados os seguintes filtros:

Filtro 1 - Data de publicação limitada aos últimos dez anos, o que resultou em 1.188 arquivos;

Filtro 2 - Tipo de material de busca foi restrito a “artigos”, o que excluiu teses e livros e reduziu os resultados a 1.028 arquivos;

Filtro 3 - Termo “Rammed Earth” presente no título. Esta busca resultou em 240 artigos;

Filtro 4 - Inclusão de novas palavras à busca. Assim, foram realizadas diferentes buscas, que mantiveram os filtros anteriores, com o acréscimo de palavras-chaves, em qualquer parte dos textos. As palavras-chaves incorporadas foram: “technology” e “stabilization”. As buscas resultaram em 120 e 63 artigos, respectivamente.

Filtro 5 - Leitura dos 183 títulos dos artigos, para identificar se o assunto abordado condiz com a presente pesquisa. Alguns títulos estiveram presentes nas duas buscas. Deste filtro, resultaram 47 artigos;

Filtro 6 - Leitura dos resumos dos artigos restantes, tendo em vista analisar a sua aplicabilidade para o presente estudo, o que resultou em 18 artigos.

Em seguida, foi realizada a leitura dos artigos selecionados, tanto pelos anais dos congressos, quanto pela Plataforma de Periódicos Capes, o que totalizou 28 artigos. A partir deste material, foi possível analisar os dados relativos à evolução tecnológica da taipa, principalmente nos últimos 10 anos.

3. ANÁLISE DA TECNOLOGIA DA TAIPA DE PILÃO CONTEMPORÂNEA

A evolução da taipa de pilão contemporânea foi analisada por meio de duas vertentes: a análise tecnológica do material e do sistema construtivo. A maior parte dos trabalhos analisados são de publicações estrangeiras, o que mostra como os estudos sobre novas tecnologias aplicadas à Taipa de Pilão ainda são escassos no Brasil.

3.1 Inovação tecnológica nos materiais utilizados na mistura de taipa

O desempenho físico-mecânico das paredes em taipa de pilão depende da granulometria da terra; do teor de umidade; da compactação; das adições de estabilizadores químicos e do tipo e do teor de fibras, presentes ou não na mistura (MICCOLI, MÜLLER E FONTANA, 2014).

Dessa forma, na atual técnica de construção em taipa de pilão, adicionam-se diferentes tipos de estabilizadores à mistura de terra. Estudos já realizados indicam que a incorporação de um material estabilizador tende a aumentar a resistência à compressão e a durabilidade das paredes com relação à erosão pela água (ARRIGONI et al., 2017a; MILANI, MAIA, 2018; SATO E BRASIL, 2012; TOUFIGH E KIANFAR, 2016).

Entretanto, a adição de um estabilizador pode aumentar, também, a energia incorporada da taipa. Isto pode ocorrer devido ao processo de extração, ou de produção, do material incorporado, o que prejudica os benefícios ambientais da taipa, em comparação ao uso da terra não estabilizada. A importância da redução dos impactos ambientais, leva à necessidade da escolha criteriosa dos estabilizadores (ARRIGONI et al., 2017a; SERRANO et al., 2013; SILVA et al., 2013).

3.1.1. Estabilização química

O cimento é, atualmente, o estabilizador mais utilizado em misturas de taipa, seguido pela cal (MILANI E MAIA, 2018; TOUFIGH E KIANFAR, 2019). De acordo com Kariyawasam e Jayasinghe (2016), o uso do cimento como estabilizador ganhou popularidade em decorrência de possibilitar maior e mais rápido ganho de resistência e durabilidade, com baixa porcentagem em relação à mistura. Como as reações do cimento são principalmente hidráulicas, este estabilizador precisa somente de água para reagir e aumentar a resistência da mistura de taipa (CRISTELO et al., 2012).

Kandamby (2019) destaca como fatores básicos de controle para o bom desempenho do uso do cimento como estabilizador, a seleção de um bom solo, o adequado teor de cimento e de água e a qualidade da compactação. O teor de cimento recomendado para a estabilização varia, geralmente, entre 6% e 10% do peso total da mistura, mas alguns autores, como Reddy e Kumar (2016), estendem este intervalo até o teor de 12%. Independentemente do teor, Font e Hidalgo (2011) consideram prudente realizar

ensaios prévios para a avaliação mecânica. Em alguns casos, a porcentagem de cimento é reduzida e são incorporados outros tipos de estabilizadores.

Contudo, Ciancio, Jaquin e Walker (2013) consideram duvidoso que o aumento do teor de cimento, bem como da pressão de compactação, possa melhorar as propriedades de misturas que utilizam solos inadequados. Os autores ainda enfatizam que a maioria das pesquisas atuais sobre estabilização da terra, é baseada em solos específicos. Logo, tendo em vista a variedade de solos existentes, as conclusões obtidas nos experimentos são válidas apenas para as misturas estudadas.

Toufigh e Kianfar (2016) compararam a confiabilidade de paredes de taipas comum e estabilizada com cimento, quando expostas às cargas de vento e neve. De acordo com os autores, a estrutura estabilizada apresenta maior índice de confiabilidade, por possuir menor probabilidade de erosão, menor propensão de perda de resistência por mudanças na umidade relativa e menor variação de resistência à compressão, em condições semelhantes à taipa não estabilizada.

Já o estudo de Reddy e Kumar (2010) comparou a resistência à compressão e a energia incorporada de paredes em taipa de pilão estabilizadas com cimento em relação às paredes de alvenaria em tijolos cerâmicos. De acordo com os autores, a resistência à compressão da parede de taipa de pilão com 8% de cimento é equivalente à da parede de tijolos, mas a energia incorporada nas paredes de taipa corresponde a cerca de 15%-25% da energia incorporada da parede de tijolos cerâmicos. À medida que o teor de cimento aumenta, assim, como a resistência, o percentual de energia incorporada também aumenta. Porém, mesmo com o teor de 12% de cimento, considerado alto (e até desnecessário), representa 22%-38% da energia incorporada de uma parede de tijolos cerâmicos.

Tendo em vista reduzir o impacto ambiental da taipa estabilizada com cimento e cal, pesquisadores propõem um tipo de estabilização alternativa, que se baseia na ativação alcalina de cinzas volantes (ARRIGONI et al., 2017b; CRISTELO et al., 2012; ROCHA, CONSOLI E JOHANN, 2014; SILVA et al., 2013). Considerada um resíduo industrial, a cinza volante é um subproduto da combustão do carvão utilizado em usinas termelétricas (SILVA et al., 2013).

Arrigoni et al. (2017b) realizaram ensaios de resistência à compressão com amostras de misturas para taipa estabilizadas com variados teores de cimento e com acréscimo de cinzas

volantes, em algumas amostras. Segundo os autores, para o mesmo tipo de solo, a redução do teor de cimento, para acréscimo das cinzas volantes, melhorou o desempenho ambiental, pois resultou em uma economia de energia considerável. Porém, ao substituir metade do quantitativo inicial de cimento pelas cinzas volantes, houve uma redução de 23% na resistência média. Ainda assim, todas as misturas estabilizadas atingiram a resistência mínima estipulada.

Por outro lado, a pesquisa desenvolvida em Portugal, por Silva *et al.* (2013), buscou a estabilização da mistura para taipa com a inserção de diferentes teores de cinzas volantes, sem adicionar nenhum outro tipo de estabilizador às misturas. Como Portugal não dispõe de normas específicas para construções em taipa, foram observados os requisitos de resistência à compressão mínima de normas internacionais (Estados Unidos, Nova Zelândia e Austrália). Todas as amostras apresentaram melhoria na resistência à compressão, porém nem mesmo a amostra com maior teor de cinzas volantes, 7%, conseguiu atingir os requisitos mínimos previstos nas normas internacionais. Este resultado levantou questões, para investigações futuras, sobre misturas com maiores porcentagens de cinzas volantes.

Já o estudo de Rocha, Consoli e Johann (2014) mostrou o uso de cinzas volantes, na mistura de taipa, em combinação com diferentes teores de cal hidratada. Os autores enfatizam que a inserção de cinzas volantes na mistura eleva o teor de material amorfo, o que, na presença de cal hidratada e água, potencializa as reações cimentícias.

Na ausência da cal hidratada, os minerais cristalizam e demandam mais tempo para reagirem. Por outro lado, os autores observaram que para o aumento da resistência à compressão, é necessário que o teor de cal na mistura seja elevado. Contudo, também foi observado que pequenas reduções na porosidade são capazes de produzir o mesmo aumento de resistência.

Com isso, os autores destacaram a importância de comparar a energia de compactação demandada para obter a porosidade ideal, em relação à energia da quantidade adicional de cal, necessária para atingir a mesma resistência. Baseado em estudos anteriores, os autores concluíram que a energia de compactação é mínima, quando comparada à energia incorporada de ligantes de cimento. Logo, consideram que a redução da porosidade pode ser uma alternativa mais sustentável.

Os avanços no uso de aditivos químicos para melhoramentos em compósitos cimentícios, trouxeram a possibilidade de benefícios para o desempenho de construções de terra. Tal possibilidade desencadeou estudos sobre a incorporação de diferentes tipos de aditivos à mistura para taipa (CRISTELO *et al.*, 2012; MILANI E MAIA, 2018).

Diante disto, o estudo de Cristelo *et al.* (2012) analisou a ativação alcalina de cinzas volantes para a estabilização do solo, em conjunto com a incorporação de cloreto de sódio, ou superplastificante ou hidróxido de cálcio, na mistura para taipa. Todavia, os valores de resistência mecânica das amostras não apresentaram melhorias com a adição do cloreto de sódio e do superplastificante. Já a inserção do hidróxido de cálcio gerou, apenas, um aumento de resistência a curto prazo.

Para Milani e Maia (2018), a incorporação de aditivos químicos à mistura de taipa pode melhorar o desempenho tanto no estado fresco quanto no estado endurecido do compósito, através das interações físico-químicas entre o solo, a água e a matriz cimentícia. Com a finalidade de reduzir a energia de compactação para a execução de taipa de pilão, os autores realizaram testes com diferentes corpos de prova, que incorporaram à mistura o cloreto de cálcio ou o superplastificante a base de éter policarboxílico. Os ensaios foram realizados com e sem a inclusão de cimento ao solo.

Os resultados mostraram que a inserção do cloreto de cálcio elevou a resistência à compressão simples do solo compactado. Segundo os autores, o aumento da resistência ocorreu porque o cloreto de cálcio retém a umidade da mistura durante o processo de compactação, lubrificando as partículas do solo, o que contribui para melhorar o rearranjo dos grãos. Este aditivo também se mostrou eficiente na redução da energia de compactação de Proctor, em até 20%, tanto para a mistura de solo, quanto para a mistura com o acréscimo de cimento, sem prejuízos ao desempenho físico-mecânico do sistema construtivo. Ao contrário, a adição do superplastificante não chegou a ser testada para redução de energia de compactação de Proctor. A inserção deste aditivo reduziu a massa específica aparente seca do solo e do solo-cimento. Contudo, o superplastificante contribuiu para aumentar a resistência à compressão da mistura com cimento. Os autores concluíram que este aditivo atua quimicamente com o cimento, devido ao efeito estérico e à repulsão eletrostática durante a hidratação de compostos cimentícios.

3.1.2 Estabilização mecânica

Atualmente, a estabilização mecânica da mistura de taipa é obtida pela correção da composição granulométrica do solo, ou pela introdução de fibras, que podem ser naturais ou sintéticas. Como exemplo de fibra vegetal, Orui (2014) cita o uso da palha. Ao ser introduzida na mistura, esta fibra se comporta como uma ponte de transferência das tensões, pelas fissuras. Assim, a velocidade de propagação de fissuras reduz, a resistência pós-fissuração aumenta e a retração por secagem diminui.

Bernat-Maso, Gil e Escrig (2016) propuseram o reforço de paredes de taipa, a partir de um

sistema de armadura, composto por uma grade de fibras. Para tanto, foram utilizadas grades de fibras de vidro, carbono, cordões de aço, fibras de Poliparafenil-Benzobisoxazol (PBO) e fibras de basalto (Figura 02). Os autores identificaram o espaçamento entre os cabos de fibras como a variável que mais influencia o desempenho da armadura de reforço. Assim, concluíram que o aumento do espaçamento entre os cabos de fibra contribui para o aumento da tenacidade à flexão. Além disso, identificaram que o uso de grades de fibras com alta rigidez limita a deformação por flexão, sendo mais apropriado o uso de grades de fibras flexíveis.

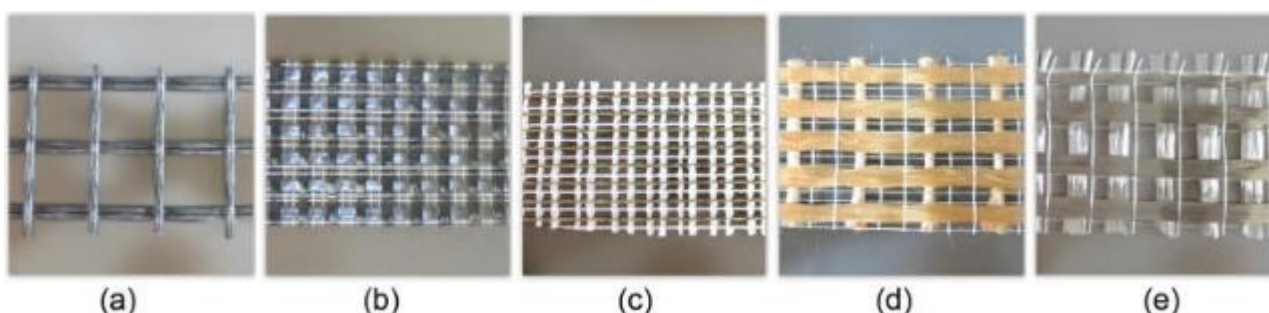


Figura 02. Grades de reforço de fibra: (a) vidro; (b) carbono; (c) aço; (d) PBO; (e) basalto. Fonte: própria

Veraldo, Yuba e Milani (2014) realizaram um estudo no qual elaboraram um protótipo de habitação social em taipa de pilão. A mistura de taipa contou com a introdução de microfibras de polipropileno. Após finalizada a construção das paredes, foi utilizada uma lixadeira para a correção das imperfeições presentes na superfície, como manchas, marcas advindas das formas e protuberâncias. Ao analisar os resultados do estudo, as autoras concluíram que as microfibras de polipropileno garantiram resistência ao lixamento.

Em outro estudo, os autores analisaram as propriedades do solo utilizado no mesmo protótipo de edificação descrito anteriormente e moldaram diferentes corpos de provas com e sem a introdução de microfibras de polipropileno (VERALDO *et al.*, 2014). As misturas com microfibras apresentaram maior absorção de água e maior resistência à compressão simples. Segundo os autores, este resultado deve-se ao fato de que a adição das microfibras aumentou a área superficial não preenchida com produtos cimentares, o que resultou em uma mistura com maior capacidade de absorção. Quanto ao aumento da resistência à compressão, os autores identificaram que as “pontes” de microfibras com o solo estabilizado com cimento garantiram uma melhoria na capacidade de absorção de

energia, o que, conseqüentemente, aumentou a ductilidade do material.

Com o intuito de comparar as características mecânicas da taipa estabilizada com a taipa comum, Toufigh e Kianfar (2019) moldaram corpos de prova com solo estabilizado com diferentes materiais. Para analisar a estabilização por fibras, os autores escolheram incorporar a fibra de vidro. De acordo com os autores, este material possui resistência relativamente alta, e é geralmente empregado para aumentar a ductilidade. Foram moldados corpos de prova, com fibras de 20 mm de comprimento, com os teores de 0,75% e 1,5% do peso total das amostras.

Os ensaios mostraram uma redução na densidade dos corpos de prova estabilizados com fibras de vidro, sendo que a densidade reduziu ainda mais com o aumento do teor de fibra, de 0,75% para 1,5%. Como esperado, a resistência à ductilidade aumentou, assim como a resistência à tração. Entretanto, a resistência à compressão não aumentou, de forma notável, com a quantidade adicional da fibra de vidro. Os autores também fizeram uma análise sobre o impacto ambiental dos estabilizadores utilizados na pesquisa, e a mistura com fibra de vidro apresentou uma

pegada de carbono muito elevada se comparada à mistura não estabilizada.

Em contrapartida, Fagone, Loccarini e Ranocchiali (2017) defendem o uso de fibras naturais para o reforço de edifícios em taipa, como uma alternativa adequada do ponto de vista ambiental. Com isso, os autores realizaram uma pesquisa sobre a incorporação de fibras de juta à mistura de taipa. Segundo os autores, a juta apresenta boas propriedades mecânicas (boa resistência à tração), boa condutividade térmica e boa adesão à massa devido à estrutura grosseira dos fios. Entretanto, em outro trabalho, Fagone *et al.* (2019) destacaram que ao ser aplicada como reforço estrutural, pode ocorrer a ruptura do reforço antes da perda de adesão entre matriz e fibra.

3.2 Tecnologias atuais aplicadas ao processo produtivo

Além do apropriado desempenho técnico, o atual processo produtivo, racionalizado, mecanizado e industrializado, da construção civil, busca por métodos capazes de reduzir os prazos de execução, evitando retrabalhos. Somado a isto, devem ser consideradas questões econômicas, estéticas e ambientais, como a redução do consumo de energia e da geração e resíduos (MAIA, ANDRADE E FARIA, 2016).

Diversos estudos defendem que a mecanização do processo produtivo de taipa de pilão tende a aumentar a produtividade e a agregar mais qualidade às edificações de terra (MAG E RAUCH, 2011; HEISE, MINTO E HOFFMANN, 2012; VERALDO *et al.*, 2014; BARRETO *et al.*, 2016). Assim, atualmente são averiguados variados processos de mistura, homogeneização, lançamento e compactação da mistura para taipa, com vistas a melhorar a durabilidade, a resistência à compressão, à expansão, à contração, ao desgaste e à erosão (VERALDO *et al.*, 2014).

O estudo desenvolvido por Heise, Minto e Hoffmann (2012) apresentou as diferenças de desempenho entre duas paredes de taipa de pilão executadas com o mesmo traço, porém com processos de mistura diferentes (manual ou mecanizada). A parede cuja mistura foi executada de forma manual apresentou a vantagem de despender menor quantidade de energia, nesta etapa.

Apesar do maior consumo de energia, os autores concluíram que a parede executada com mistura mecanizada, além da maior velocidade de produção, apresentou melhor qualidade no acabamento, textura e coloração mais uniforme

e maior durabilidade, por apresentar superfície menos rugosa.

Dentre os misturadores mecânicos existentes, a pesquisa de Rocha e Oliveira (2016), sobre as tecnologias para execução de taipa utilizadas Austrália, destaca o uso de minicarregadeiras (Figura 03). Segundo os autores, a minicarregadeira trabalha revirando os materiais, o que garante uma uniformidade. Os autores ainda defendem que este equipamento agiliza o processo de mistura dos materiais e também facilita a colocação do material em formas a alturas mais elevadas. Com isso, comparam o uso das minicarregadeiras com o uso de betoneiras e outros tipos de misturadores, que não atingem os mesmos resultados, devido à parte da mistura que fica retida em suas paredes e palhetas.



Figura 03. Exemplo de minicarregadeira utilizada para a mistura dos materiais. Fonte: Zetur (2021).

Veraldo *et al.* (2014) compararam a produtividade de mistura de taipa realizada com o uso de betoneira e com o uso de um conjunto composto por misturador hexagonal, esteira e triturador. O uso da betoneira apresentou como vantagem uma produtividade de 12 minutos/m² de parede construída, em relação ao uso do conjunto misturador-esteira-triturador.

A segunda mistura apresentou-se mais homogênea e mais solta, enquanto a mistura realizada na betoneira apresentou alguns grumos. Apesar das características diferentes, os testes realizados pelos autores indicaram que as duas misturas apresentaram desempenho mecânico semelhante, sem influências significativas quanto ao tipo de misturador utilizado.

Com relação à modernização das formas para taipa, a pesquisa de Font e Hidalgo (2011) apresenta duas técnicas para a moldagem das

paredes de taipa de pilão utilizadas, atualmente, na Espanha. Na primeira técnica, as formas convencionais são substituídas por placas de madeira, acopladas a um conjunto metálico de correias verticais e horizontais, conectadas por hastes. As placas são deslocadas à medida em que a mistura de taipa é compactada. Para conectar o conjunto, são transpassados tirantes em aço que, após a retirada da cofragem, devem ser cortados (Figura 04). O trabalho de Kandamby (2019) mostrou o bom desempenho do uso deste tipo cofragem no Sri Lanka.



Figura 04 - Cofragem com correias para fabricação de paredes em taipa de pilão. Fonte: Fonte Hidalgo (2011)

A segunda técnica consiste no uso de placas de compensado, que são fixadas em uma estrutura metálica, à medida em que a terra é compactada. Esta técnica com tirantes transpassados, que são protegidos em tubos de PVC. Ao final, os painéis são removidos com máquinas de elevação. Independentemente do modelo, Kariyawasam e Jayasinghe (2016) destacam que as cofragens devem apresentar resistência, rigidez e estabilidade diante das tensões exercidas durante a montagem, colocação e compactação do solo e desmontagem. Os autores afirmam que, ao contrário do concreto, as formas para taipa podem ser removidas pouco tempo após a compactação, o que permite a rápida reutilização.

Barreto *et al.* (2016) argumentam que a mecanização da compactação da mistura para taipa acrescenta diversos fatores a serem considerados na escolha das formas. Os estudos desenvolvidos por Barreto *et al.* (2016) e Lopes *et al.* (2016) analisaram as patologias decorrentes de problemas com a cofragem utilizada em um protótipo de edificação em taipa de pilão, criado pela Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS).

Para este protótipo, as paredes foram moldadas em formas de estrutura treliçada de aço e chapas de compensado. Nesta estrutura, a treliça atua sob tração, em substituição aos tirantes presentes nas técnicas descritas anteriormente (Figura 5).

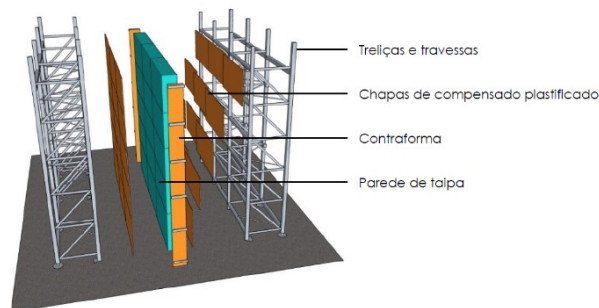


Figura 05. Perspectiva explodida da cofragem utilizada nos estudos desenvolvidos sobre taipa de pilão na UFMS. Fonte: Barreto *et al.* (2016)

As paredes foram moldadas com uma estrutura que já havia sido utilizada em outras obras e que, por este motivo, possuía algumas deformações. As folgas entre as chapas e a estrutura ocasionaram o deslocamento das chapas superiores, durante o processo de compactação mecânica. Como resultado, a superfície da parede ficou desnivelada.

Apesar de problemas que podem ser ocasionados pela vibração de compactadores mecânicos, Font e Hidalgo (2011) destacam o uso destes equipamentos como um dos maiores avanços para as construções em taipa. Isto se deve ao fato de os compactadores mecânicos conseguirem um maior rendimento na compactação, com menor esforço. Segundo os autores, estudos já realizados indicam que há melhorias no desempenho mecânico e na resistência à erosão hídrica, com a mecanização da compactação da mistura de taipa.

Com isso, enumeram diversos meios de compactação mecânica, como o uso de compactadores pneumáticos, placas vibratórias e rolos vibratórios. Os primeiros são os mais utilizados, pois os demais requerem formas industriais robustas.

Além da mecanização de paredes em taipa *in loco*, a pesquisa desenvolvida por Mag e Rauch (2011) aborda a industrialização do processo produtivo, através da pré-fabricação dos painéis (Figura 06). Os autores destacam que a técnica comum de construção da taipa de pilão demanda intensa quantidade de trabalho. Com isso, defendem que a industrialização da produção permite a redução dos custos com mão de obra, ao mesmo tempo em que otimiza o tempo de execução. Dessa forma, o rendimento da

execução pode ser calculado com grande precisão.

Os autores também argumentam que, no processo industrial, há maior controle de qualidade de execução, especialmente no que diz respeito à forma de compactação. Outra vantagem apontada pelos autores é a produção poder ser realizada independentemente das condições climáticas, o que evita interrupções durante a execução.

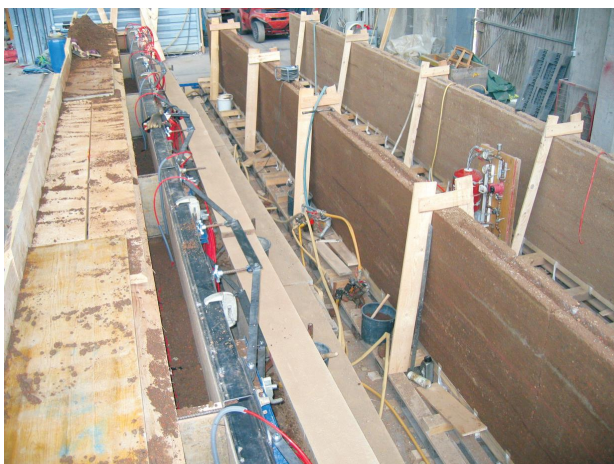


Figura 06. Pré-fabricação de paredes em taipa de pilão.
Fonte: Mag e Rauch (2011)

Por outro lado, apresentam a dificuldade para o transporte dos painéis como uma desvantagem da pré-fabricação. Devido à baixa ductilidade da taipa, o transporte necessita de maiores cuidados. As emissões de CO₂ advindas do transporte, principalmente para longas distâncias, também são apresentadas como desvantagens dos painéis pré-fabricados, em comparação à construção *in loco*.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma das principais considerações observadas, é de que a maior parte dos estudos brasileiros sobre a taipa de pilão está relacionada ao patrimônio histórico e às técnicas de conservação e de restauro.

Pode-se observar que os estudos atuais sobre a taipa, enquanto material, objetivam, principalmente, a obtenção de misturas que garantam melhorias nas propriedades físico-mecânicas. Embora o cimento seja apresentado atualmente, é importante considerar os impactos ambientais advindos da produção deste material.

Estes impactos justificam a constante busca por materiais alternativos, capazes de substituir o

cimento, ou de reduzir o seu teor nas misturas. Entretanto, de um modo geral, ainda não foram alcançados bons resultados para o uso de aditivos químicos, na mistura para taipa, sem a inclusão do cimento.

Com relação à estabilização mecânica, o acréscimo da energia incorporada com uso de fibras sintéticas, visando o aumento da resistência à tração, também levanta discussões sobre a sustentabilidade do sistema.

Já os estudos voltados para o sistema construtivo têm como principal objetivo a busca por técnicas que aumentem a produtividade e a qualidade das edificações em taipa, por meio da mecanização. Os principais desafios estão relacionados às ferramentas utilizadas no processo produtivo. Ainda não há um equipamento específico para a mistura mecânica da taipa. Portanto, ainda que a mecanização acelere a produção, a improvisação de equipamentos nem sempre traz bons resultados, levando, muitas vezes, ao desperdício de materiais.

Da mesma forma, existe uma lacuna com relação aos sistemas de cofragens da taipa de pilão contemporânea, pois não existe uma padronização que garanta a qualidade final das paredes. Assim, na maioria das vezes, as cofragens utilizadas são adaptações da indústria de concreto pré-moldado.

Pesquisas internacionais mostram uma tendência para a industrialização da taipa de pilão a partir da pré-fabricação de painéis. Entretanto, devem ser consideradas as emissões de CO₂ provenientes do transporte destes painéis, quando fabricados longe dos locais de instalação. Não foram encontrados artigos brasileiros sobre pré-fabricação de painéis de taipa, o que indica que esta tendência, presente em países desenvolvidos, ainda é pouco explorada no Brasil.

Apesar dos impactos ambientais advindos das novas tecnologias de estabilização e de mecanização da taipa, estudos comparativos mostram que a energia incorporada da taipa contemporânea é muito inferior à energia incorporada de paredes de tijolos cerâmicos, por exemplo. Tal comparação mostra que taipa de pilão, apesar de todas as mudanças tecnológicas, ainda pode ser considerada uma alternativa de baixo impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

ARRIGONI, A.; BECKETT, C. T. S.; CIANCIO, D.; DOTELLI, G. Life cycle analysis of environmental impacts vs. durability of stabilised rammed

- earth. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 128-136, 2017a. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.066>
- ARRIGONI, A.; GRILLET, A. C.; PELOSATO, R.; DOTELLI, G.; BECKETT, C. T. S.; WOLOSZYN, M.; CIANCIO, D. Reduction of rammed earth's hygroscopic performance under stabilization: an experimental investigation. **Building and Environment**, v.115, p. 358-367, 2017b. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.034>
- BARRETO, M. F.; AJIKI, C. L.; YUBA, A. N.; TREVISAN, K. L. Levantamento de parâmetros de projeto de formas para taipa. In: **ENTAC - ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 2016, São Paulo. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2016. p. 5271-5281.
- BERNAT-MASO, E.; GIL, L.; ESCRIG, C. Textile-reinforced rammed earth: Experimental characterisation of flexural strength and toughness, **Construction and Building Materials**, v. 106, p. 470-479, 2016. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.139>
- CAPES/MEC. **Portal e acervo de artigos**. Disponível em < www.periodicos.capes.gov.br>. Acesso em set. de 2020.
- CIANCIO, D.; JAQUIN, P.; WALKER, P. Advances on the assessment of soil suitability for rammed earth. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 40-47, 2013. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.049>
- CRISTELO, N.; GLENDINNING, S.; MIRANDA, T.; OLIVEIRA, D.; SILVA, R. Soil stabilisation using alkaline activation of fly ash for self compacting rammed Earth construction. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 7727-7735, 2012. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.037>
- FAGONE, M.; KLOFT, H.; LOCCARINI, F.; RANOCCHIALI, G. Jute fabric as a reinforcement for rammed earth structures. **Composites Part B: Engineering**, v. 175, 2019. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107064>
- FAGONE, M.; LOCCARINI, F.; RANOCCHIALI, G. Strength evaluation of jute fabric for the reinforcement of rammed earth structures. **Composites Part B: Engineering**, v. 113, p. 1-13, 2017. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.054>
- FEIBER, S. D. Técnicas construtivas tradicionais: Os primórdios da sustentabilidade. **Revista Thêma et Scientia**, v.2, n. 1, p. 32-38, 2012.
- FONT, F.; HIDALGO, P. Latapia en Espana. Tecnicas actuales y ejemplos. **Informes de la Construcción**, v 63(523), p.21-34, 2011. DOI:10.3989/ic.10.015
- HEISE, A. F.; MINTO, F. C. N.; HOFFMANN, M. V. Proposta de contribuição para análise do desempenho técnico-construtivo das paredes de taipa de pilão. In: **IV CONGRESSO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO COM TERRA NO BRASIL**, 2012, Fortaleza. Anais. Fortaleza: TerraBrasil/UFC, 2012. p. 129-134.
- KANDAMBY, G. W. T. C. Investigation and analysis of wall cracks in cement in stabilized rammed earth technology. **Engineering, technology & applied science research**, v. 9, n. 4, p. 4349-4354, 2019.
- KARIYAWASAM, K. K. G. K. D.; JAYASINGHE, C. Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 519-527, 2016. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.189>
- LOPES, C. A.; BARRETO, M. B. F.; LATOSINSKI, K. T.; YUBA, A. N. Medição de manifestações patológicas em paredes de taipa e levantamento dos desperdícios decorrentes. In: **VI CONGRESSO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO COM TERRA NO BRASIL**, 2016, Bauru. Anais. Bauru: UNESP, 2016. p. 49-56.
- MAG, A.; RAUCH, M. Paredes de tapial y su industrialización (encofrados y sistemas de compactación). **Informes de la Construcción**, 63(523), 2011. p.35-40. DOI:10.3989/ic.10.013
- MAIA, L. R.; ANDRADE, A. G. S.; FARIA, O. B. Tecnologia apropriada na construção com terra - Taipa e Blocos de Terra Comprimida. In: **ENTAC - ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 2016, São Paulo. Anais... São Paulo: ANTAC, 2016. p. 2138-2149.
- MICCOLI, L.; MÜLLER, U.; FONTANA, P. Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between Earth block masonry, rammed earth and cob. **Construction and Building Materials**, v. 61, p. 327-339, 2014. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.009>
- 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 DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO COM TERRA NO BRASIL**, 2018, Rio

de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Rede Terra Brasil, 2018. p. 68-74.

ORUI, S. Adequação das vedações em terra à Norma Brasileira de Desempenho Térmico. In: **V CONGRESSO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO COM TERRA NO BRASIL**, 2014, Viçosa. Anais. Viçosa: UFV, 2014. p. 1-7.

PARISI, R. S .B.; RODRIGUES, R.; FRICKE, G. T. Inovações tecnológicas na taipa contemporânea. In: **EURO ELECS**, 2015, Guimarães, Portugal. Anais. Guimarães: UMINHO, 2015. p. 173-182.

PEIXOTO, M. V. S.; SOUZA, L. A. C; REZENDE, M.A.P. O acervo em taipa de pilão em Minas Gerais e novas estratégias de conservação. In: **VI CONGRESSO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO COM TERRA NO BRASIL**, 2016, Bauru. Anais... Bauru: UNESP, 2016. p. 147-155.

PISANI, M. A. J. **Taipas: a arquitetura de terra**. Sinergia. v. 5, n. 1. p. 9-15, 2004.

REDDY, B. V. V.; KUMAR, P. P. Embodied energy in cement stabilised rammed earth walls. **Energy and Buildings**, v. 42, p. 380-385, 2010. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.005>

REZENDE, M. A. P. Taipa de pilão histórica: roteiro para reconstituição. **Arquiteturarevista**, v. 8, n. 2, p. 101-107, 2012.

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**, v. 66, p. 19-26, 2014. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.041>

ROCHA, R. A. P; OLIVEIRA, P. H. M. Descrição da técnica de construção com terra estabilizada compactada na Austrália. In: **VI CONGRESSO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO COM TERRA NO BRASIL**, 2016, Bauru. Anais. Bauru: UNESP, 2016. p. 93-102.

SERRANO, S.; BARRENECHE, C.; RINCÓN, L.; BOER, D.; CABEZA, L. F. Optimization of three new compositions of stabilized rammed earth incorporating PCM: Thermal properties characterization and LCA. **Construction and Building Materials**, v. 47, p; 872-878, 2013. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.018>

SILVA, R. A.; OLIVEIRA, D. V.; MIRANDA, T.; CRISTELO, N.; ESCOBAR, M. C.; SOARES, E. Rammed earth construction with granitic residual soils: The case study of northern Portugal. **Construction and Building Materials**, v. 47, p; 181-191, 2013.

DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.047>

SATO, M. H.; BRASIL, R. M. L. R. F. Análise de estruturas em taipa de pilão. In: **IV CONGRESSO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO COM TERRA NO BRASIL**, 2012, Fortaleza. Anais. Fortaleza: TerraBrasil/UFV, 2012. p. 106-115.

TOUFIGH, V.; KIANFAR, E. Reliability analysis of rammed earth structures. **Construction and Building Materials**, v. 127, p; 884-895, 2016. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.052>

TOUFIGH, V.; KIANFAR, E. The effects of stabilizers on the thermal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts. **Construction and Building Materials**, v. 200, p; 616-629, 2019. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.050>

VERALDO, A. C.; YUBA, A. N.; MILANI, A. P. S. Análise de soluções construtivas para interfaces de paredes de taipa. In: **XV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 2014, Maceió. Anais. Maceió: ANTAC, 2014. p. 3367-3376.

VERALDO, A. C.; PAZ, J. G. S.; YUBA, A. N.; MILANI, A. P. S. Análise do processo de produção de paredes maciças de solo estabilizado a partir do uso de mecanização. In: **V CONGRESSO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO COM TERRA NO BRASIL**, 2014, Viçosa. Anais. Viçosa: UFV, 2014. p. 1-9.

ZETUR. Disponível em: <http://zetur.com.br/como-escolher-sua-mini-carregadeira/>. Acesso em maio, 2021

AUTORES

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7751-2069>

LUDMILA CARDOSO FAGUNDES MENDES (LCFM) | Universidade Federal de Minas Gerais | Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável | Belo Horizonte, MG - Brasil | Correspondência para: Rua Planetóides, 271, 101, Santa Lúcia, CEP 30360-440 | E-mail: ludmilamendes@ufmg.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1883-1251>

SOFIA ARAUJO LIMA BESSA (SALB), Dra. | Universidade Federal de Minas Gerais | Escola de Arquitetura | Belo Horizonte, MG - Brasil | Correspondência para: Rua Paraíba, 697, Sala

319, Savassi, CEP 30130-141 | E-mail:
sofiabessa@ufmg.br

HOW TO CITE THIS ARTICLE

MENDES, Ludmila Cardoso Fagundes; BESSA, Sofia Araujo Lima. Análise da Evolução Tecnológica da Taipa de Pilão Contemporânea. MIX Sustentável, v. 8, n. 1, p. 66-77, jan. 2022. ISSN 24473073. Disponível em: <<http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>>. DOI: <http://dx.doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2022.v8.n1.66-77>

Submitted: 03/03/2021

Approved: 13/05/2021

Published: 01/12/2021

Editor Responsável: Paulo Cesar Machado Ferroli

Registro da contribuição de autoria:

Taxonomia CRediT (<http://credit.niso.org/>)

LCFM; SALB: conceituação, metodologia, validação, visualização, escrita -revisão e edição.

LCFM: curadoria de dados, investigação, visualização, escrita -rascunho original

SALB: análise formal, administração do projeto

Declaração de conflito: nada foi declarado.