

TRANS VERSO

03 Análise comparativa de impactos ambientais em edificações de alvenaria estrutural e taipa de pilão: um estudo de caso em habitação de interesse social

recebido em 26/08/2024
aprovado em 26/09/2024

Análise comparativa de impactos ambientais em edificações de alvenaria estrutural e taipa de pilão: um estudo de caso em habitação de interesse social

Bruna da Cunha Castilho

brunacastilho199@gmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Augusto Montor de Freitas Luiz

augustom@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Sarah Honorato Lopes da Silva Tamura

sarahh@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO (PT): O presente artigo realiza uma análise comparativa dos impactos ambientais entre dois sistemas construtivos empregados em habitações de interesse social, a alvenaria estrutural com blocos cerâmicos (AEC) e a taipa de pilão (TP). O principal objetivo é avaliar a sustentabilidade ambiental desses sistemas, identificando os impactos em diferentes categorias ao longo do ciclo de vida das edificações. Para a realização da análise, foi conduzido um estudo de caso com a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), utilizando o software SimaPro e a base de dados Ecoinvent. Os resultados indicam que o sistema TP apresenta impactos ambientais significativamente menores em comparação ao sistema AEC, particularmente na fase de pré-operação. As conclusões deste estudo contribuem para o desenvolvimento de estratégias mais sustentáveis na construção civil, incentivando a adoção de técnicas construtivas que reduzam os impactos ambientais e promovam a sustentabilidade no setor.

Palavras-chave: *avaliação do ciclo de vida, construção sustentável, construção com terra, materiais não convencionais.*

ABSTRACT (ENG): This paper conducts a comparative analysis of the environmental impacts of two construction systems used in social housing, structural masonry with ceramic blocks (AEC) and rammed earth (TP). The main objective is to assess the environmental sustainability of these systems by identifying the impacts in different categories throughout the buildings' life cycle. The analysis utilized the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, employing the SimaPro software and the Ecoinvent database in a case study. The results indicate that the TP system presents significantly lower environmental impacts than the AEC system, particularly in the pre-operation phase. The conclusions of this study contribute to the development of more sustainable strategies in civil construction, encouraging the adoption of construction techniques that reduce environmental impacts and promote sustainability in the sector.

Keywords: *life cycle assessment, sustainable construction, earthen building, unconventional materials.*

1. Introdução

A indústria da construção civil exerce uma função essencial no desenvolvimento econômico e social, mas também se destaca como uma das maiores fontes de impactos ambientais. Diante da crescente urbanização, torna-se imprescindível o aprimoramento de qualificações e a adoção de técnicas que promovam construções mais sustentáveis e eficientes, considerando os cenários em que essas edificações estão inseridas (Brasileiro; Matos, 2015; Corrêa, 2009).

A popularmente discutida “sustentabilidade na construção civil” vai além da simples adoção de novos materiais. É essencial compreender os benefícios desses materiais não apenas para o setor produtivo, mas também para a redução dos impactos ambientais. Nesse cenário, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) se destaca como a metodologia adequada para avaliar os aspectos ambientais e os impactos potenciais dos materiais ao longo de todo o seu ciclo de vida (Santos *et al.*, 2011).

Outra abordagem promissora para reduzir os impactos ambientais da construção civil é a implementação de sistemas construtivos eficientes, como a coordenação modular, que otimiza o uso de matérias-primas e energia, além de reduzir a geração de resíduos. Dentro dessa perspectiva, a alvenaria estrutural com bloco cerâmico (AEC) e a taipa de pilão (TP) são apontadas como alternativas viáveis para uma construção mais sustentável, sendo a TP uma técnica tradicional que tem ganhado destaque por seu menor impacto ambiental em comparação com sistemas baseados em concreto, cerâmica e aço (Baldauf, 2004; Caldas; Sposto, 2017; Cordeiro *et al.*, 2019).

Pesquisas recentes têm se concentrado na utilização da terra como material de construção, devido ao seu caráter natural, menor demanda energética no processamento e menor poluição. No cenário nacional, Pinheiro *et al.* (2016) e Caldas, Martins e Toledo Filho (2021) destacam a taipa de pilão como uma técnica que combina eficiência ambiental e viabilidade econômica, especialmente em projetos de habitação social.

A busca por práticas construtivas mais sustentáveis, que minimizem os impactos ao longo do ciclo de vida das edificações, tem sido uma prioridade crescente. Estratégias como o uso eficiente de recursos naturais, gestão sustentável da obra e reciclagem de resíduos sólidos são essenciais para alcançar maior ecoeficiência no setor (Yemal; Teixeira; Naas, 2011). Além disso, a recente normalização da taipa de pilão pela NBR 17014 (ABNT, 2022) ressalta a importância de padronizar e disseminar o uso de técnicas construtivas tradicionais adaptadas às exigências atuais de sustentabilidade.

Neste contexto, o presente estudo visa contribuir para a literatura nacional ao desenvolver uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) comparativa entre os sistemas construtivos em alvenaria estrutural com bloco cerâmico (AEC) e taipa de pilão (TP). A pesquisa busca fornecer subsídios para a tomada de decisões que favoreçam práticas mais sustentáveis na construção civil, especialmente em programas habitacionais de interesse social. Ao identificar variáveis críticas para a sustentabilidade ambiental, espera-se aprimorar as práticas de gestão habitacional e promover o uso de tecnologias construtivas que reduzam os impactos ambientais associados.

2. Sistemas construtivos em alvenaria estrutural com bloco cerâmico e taipa de pilão

A alvenaria estrutural, definida como um sistema construtivo que utiliza blocos cerâmicos ou de concreto unidos por argamassa para formar elementos coesos e rígidos, é projetada para resistir a esforços de compressão, desempenhando tanto a função de vedação quanto de suporte estrutural (Santos, 2016; Tauil; Nese, 2010). Historicamente, a evolução desse sistema está intimamente ligada ao desenvolvimento das técnicas construtivas, desde as estruturas simples das civilizações persas e romanas até as técnicas modernas, que incorporam materiais como concreto romano e cinzas pozolânicas (Mohamad; Machado; Jantsch, 2017).

No Brasil, a alvenaria estrutural começou a ganhar destaque na década de 1960, com a construção do primeiro edifício em alvenaria estrutural de bloco de concreto no Condomínio Central Parque Lapa, em São Paulo, em 1966 (Mohamad, 2021). A partir dos anos 1980, o uso de blocos cerâmicos em alvenarias estruturais tornou-se mais comum, acompanhando o avanço tecnológico e a racionalização do processo construtivo, que passaram a ser fundamentados em modelos matemáticos e pesquisas científicas (Ramalho; Corrêa, 2003; Santos, 2008).

A construção de edificações em alvenaria estrutural requer inicialmente um projeto executivo detalhado, que inclua o desenho de cada parede portante, especificando vãos modulares para janelas e portas, localizações de instalações e outros elementos relevantes. A modulação, segundo Ramalho e Corrêa (2003), é essencial para garantir a eficiência e racionalização do processo construtivo, evitando dificuldades no assentamento dos blocos e reduzindo custos e desperdícios de tempo. O sistema de modulação é baseado nas dimensões dos blocos utilizados, onde o comprimento, largura e altura dos blocos determinam os módulos horizontal e vertical. Elementos como encontros de paredes, aberturas e pontos de graute devem ser pré-dimensionados para facilitar a construção (Sampaio, 2010). Os blocos cerâmicos estruturais, conforme a NBR 15270-2 (ABNT, 2017), devem atender a requisitos específicos quanto às dimensões e propriedades físicas, sendo fundamentais para a resistência à compressão e estabilidade da construção.

Além dos blocos, a argamassa de assentamento desempenha um papel crucial, unindo as unidades, garantindo vedação e aderência, e compensando variações dimensionais. A argamassa mais comum é composta por cimento, cal e areia, com traço de 1:1:6, podendo ser preparada manualmente ou mecanicamente (Camacho, 2006). O graute, uma argamassa ou concreto fluido utilizado para preencher os vazios das unidades, também é um componente chave, especialmente quando combinado com armaduras que absorvem esforços de tração e compressão. Vergas e contravergas são dimensionadas para redistribuir cargas e são executadas com canaletas preenchidas com concreto armado (Sampaio, 2010). A fundação, geralmente do tipo radier, é projetada para distribuir uniformemente as cargas da estrutura e proporcionar uma base estável. Para coberturas, as lajes pré-moldadas e as estruturas de madeira são comuns, com vigas e treliças projetadas para assegurar a integridade e a durabilidade da edificação. Telhas de fibrocimento, cerâmica e concreto são frequentemente utilizadas, cada uma com suas vantagens e desvantagens em termos de custo, durabilidade e isolamento (Teixeira, 2017).

A modulação e a escolha adequada de materiais e métodos construtivos são cruciais para garantir a eficiência e qualidade das edificações em alvenaria estrutural, conforme orientado pelas normas técnicas vigentes.

Por sua vez, a taipa de pilão, uma técnica de construção milenar, utiliza a terra como matéria-prima principal. Segundo a NBR 17014 (ABNT, 2022), a taipa de pilão é caracterizada por paredes formadas a partir da compactação de terra dentro de fôrmas removíveis, resultando em um elemento monolítico. A técnica consiste em preencher fôrmas com camadas de terra misturadas a um estabilizante e água, compactando cada camada antes de remover as fôrmas (Minke, 2001).

No Brasil, a taipa de pilão foi amplamente utilizada durante o período colonial, com destaque para edificações históricas como a Igreja de Nossa Senhora do Rosário em Oeiras, Piauí. A técnica continuou a ser empregada em construções rurais até ser parcialmente substituída por novos métodos e materiais introduzidos com a Revolução Industrial no século XIX (Lopes *et al.*, 2013).

Recentemente, a taipa de pilão tem ganhado atenção renovada no Brasil, tanto entre pesquisadores quanto profissionais da construção civil. Estudos como o de Pinheiro *et al.* (2016) revelam que, embora a taipa de mão tenha sido mais comum historicamente, o uso da taipa de pilão tem crescido significativamente nos últimos anos. Esse aumento está associado à busca por soluções de construção ambientalmente sustentáveis, devido às propriedades naturais da terra, como abundância local, boas características higrótérmicas e acústicas, resistência ao fogo e reciclabilidade (Pacheco-Torgal; Jalali, 2012).

A técnica de taipa de pilão, portanto, representa não apenas uma herança cultural, mas também uma solução viável para construções sustentáveis no contexto contemporâneo, sendo utilizada como elemento estético e funcional em ambientes contemporâneos (Caldas; Martins; Toledo Filho, 2021).

Para a construção de uma edificação em taipa de pilão (TP), é imprescindível o desenvolvimento de um projeto executivo detalhado, que deve incluir especificações como materiais utilizados, tipos de elementos estruturais e o desenho completo do edifício (Neves; Faria, 2011). Sato (2011) destaca a importância de preparar adequadamente o terreno, assegurando uma boa drenagem, fundação sólida e fácil acesso à terra para garantir a eficiência da construção. A seleção da terra é uma etapa crucial no processo construtivo da TP. A terra deve ser extraída de uma jazida, preferencialmente até uma profundidade de 30 cm, garantindo sua umidade natural. É essencial evitar solos orgânicos em decomposição, solos com sais solúveis, solos expansivos ou aqueles com índice de plasticidade igual ou inferior a 25% (ABNT, 2022; Neves; Faria, 2011; Sato, 2011). Após a extração, o solo passa por processos de destorroamento e peneiramento para ajustar suas propriedades e facilitar a compactação (Neves; Faria, 2011).

A NBR 17014 (ABNT, 2022) define as especificações para a granulometria do solo e, se necessário, permite a adição de areia ou misturas de diferentes tipos de terra para ajustar a composição. A mistura do solo para a TP deve atender a uma curva de compactação garantindo uma massa específica aparente seca mínima de 1,750 g/cm³ (ABNT, 2022).

Estabilizantes como cal e cimento podem ser adicionados à mistura para melhorar suas propriedades físico-mecânicas. A estabilização permite a redução da espessura das paredes e aumenta a esbelteza, mantendo a

resistência estrutural. Após a preparação da mistura, ela é depositada em camadas nas formas e compactada manual ou mecanicamente (ABNT, 2022; Pisani, 2004).

As fôrmas utilizadas para moldar as paredes de TP devem ser projetadas para suportar as forças de compactação e a pressão da terra, além de serem leves e fáceis de manusear (Neves; Faria, 2011). O processo de compactação pode ser realizado com compactadores manuais ou mecânicos, como o compactador elétrico de placa vibratória (Minke, 2001; Neves; Faria, 2011). A cura da TP varia conforme o estabilizante utilizado, com a secagem completa das paredes ocorrendo em cerca de seis meses. Após esse período, podem ser aplicados acabamentos como rebocos, pinturas e hidrofugantes (Pisani, 2004; Sato, 2011). Para garantir a durabilidade das construções em TP, é essencial proteger as paredes contra a infiltração de água, utilizando elementos arquitetônicos como beirais e pingadeiras (Neves; Faria, 2011). As fundações geralmente utilizam sapatas corridas, que distribuem uniformemente as cargas e impedem a capilaridade nas paredes (Bastos, 2016).

A taipa de pilão, por sua natureza autoportante, exige cuidados especiais na instalação de sistemas elétricos e hidráulicos, que devem ser planejados para evitar danos estruturais. A resistência à compressão da TP deve atender aos requisitos estabelecidos pela NBR 17014 (2022), garantindo a integridade e longevidade da edificação.

3. Avaliação do ciclo de vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica de gestão ambiental destinada a quantificar os impactos ambientais de produtos ou serviços ao longo de seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até o descarte final (ABNT, 2014). Segundo Queiroz (2010), a ACV permite avaliar os impactos causados pelo uso de recursos naturais e pela emissão de poluentes, identificando oportunidades para otimizar o desempenho ambiental dos produtos.

Apesar de ser uma ferramenta promissora, a ACV apresenta limitações como a subjetividade nas escolhas e suposições feitas durante a análise, as restrições dos modelos utilizados, a incerteza introduzida pela falta de dimensões espaciais e temporais nos dados, e a dependência da disponibilidade e qualidade dos dados. Portanto, é fundamental que o autor da ACV delinear cuidadosamente suas decisões, como a definição do sistema de produto, categorias de impacto e métodos de avaliação utilizados, garantindo transparência e completude dos resultados (UNEP, 1996; Coelho Filho; Saccaro Junior; Luedemann, 2016).

A ACV é composta por quatro fases principais: definição de objetivos e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação dos resultados (Roy *et al.*, 2009). Na fase inicial, o objetivo do estudo é definido, incluindo o propósito, amplitude, limites do sistema, unidade funcional e superposições (ABNT, 2014). A fase de inventário envolve a coleta e análise de dados, seguida pela avaliação de impacto, onde os resultados do inventário são associados a categorias de impacto ambiental específicas. Finalmente, a fase de interpretação sintetiza os resultados para tirar conclusões e fazer recomendações (Silva, 2010).

Um banco de dados robusto é crucial para a ACV, contendo informações ambientais sobre a produção de bens, disponibilidade de recursos energéticos e prestação de serviços (Ribeiro, 2009). O banco de dados Ecoinvent, amplamente utilizado, possui mais de 18.000 conjuntos de dados e facilita a análise de ciclos de vida ao fornecer informações detalhadas e rastreáveis (Ecoinvent, 2022). No Brasil, o Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) desenvolveu o Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida (SICV), promovendo a ACV no contexto nacional (Souza *et al.*, 2017).

Os métodos de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) variam conforme as categorias de impacto analisadas, podendo focar em impactos de ponto médio (midpoint) ou ponto final (endpoint) (Cavalett *et al.*, 2013). Esses métodos são integrados em softwares como SimaPro e OpenLCA, que facilitam a modelagem e análise de ciclos de vida complexos, seguindo as diretrizes da ISO 14040 (ACV Brasil, s.d.; SimaPro, 2020).

A aplicação da ACV na construção civil é particularmente desafiadora devido à longa vida útil das obras, que pode se estender por décadas ou até séculos (Soares; Souza; Pereira, 2006). Estudos comparativos entre diferentes materiais e técnicas construtivas têm utilizado métodos como CML e IMPACT 2002+ para avaliar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida das edificações (Souza *et al.*, 2016; Caldas; Martins; Toledo Filho, 2021). Esses estudos destacam a importância de fatores como a origem local dos materiais e a eficiência dos métodos construtivos na minimização dos impactos ambientais. A aplicação da ACV no contexto da construção civil continua a evoluir, com estudos focados em melhorar a precisão dos inventários e a relevância dos impactos analisados. No entanto, a complexidade dos sistemas e a subjetividade inerente à metodologia exigem uma abordagem cuidadosa e transparente para garantir a validade dos resultados e a aplicabilidade das conclusões.

4. Metodologia

O estudo de caso foi conduzido para uma residência térrea com dimensões de 6,0 por 8,5 metros, projetada para atender às demandas de Habitação de Interesse Social (HIS), buscando analisar o desempenho de uma construção convencional dentro do contexto brasileiro.

A avaliação dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida da edificação considerou os sistemas construtivos AEC e TP. Os detalhes referentes aos sistemas construtivos e um esboço do projeto arquitetônico estão apresentados na Figura 1.

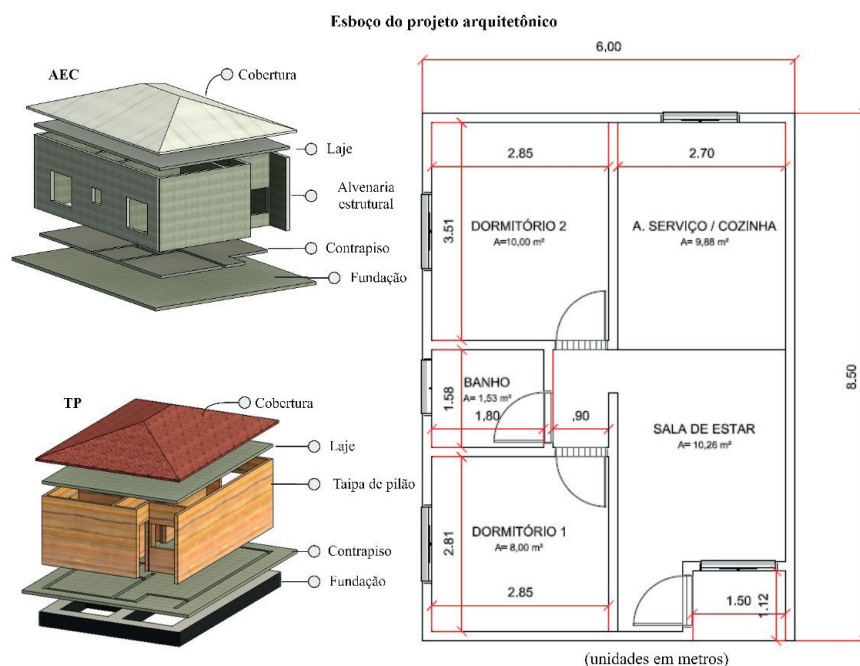


Figura 1 - Simplificação dos sistemas construtivos e esboço do projeto arquitetônico. Fonte: Adaptado pelos autores de Castilho, 2022.

Para ambos os sistemas construtivos, foi utilizado o mesmo projeto base, atualmente em prática por uma construtora no interior do estado de São Paulo, o que influenciou diretamente na escolha dos materiais. No entanto, para o sistema construtivo em TP, foram realizadas adaptações no projeto, de modo a atender aos requisitos estabelecidos na NBR 17014 (ABNT, 2022), na Portaria nº 959, de 18 de maio de 2021 (MDA, 2021), e às recomendações de profissionais da área. As etapas consideradas foram de subestrutura, superestrutura, vedações e cobertura, com a descrição dos elementos e materiais apresentados no quadro 1. A terra empregada nas paredes de TP e sua dosagem estão em conformidade com as recomendações delineadas por Caldas *et al.* (2020) e com os padrões estabelecidos pela NBR 17014 (ABNT, 2022). Maiores detalhamentos acerca do quantitativo de materiais de ambos o sistema, podem ser encontrados no estudo de Castilho (2022).

Etapas construtivas	Sistema construtivo	AEC		TP	
		Elemento	Material	Elemento	Material
Subestrutura	Fundação		Madeira pinus		
			Água		
			Areia		Madeira pinus
		Fôrma	Brita	Lastro de concreto	Barra de aço (Ø 10 mm)
		Radier em concreto (25 MPa)	Cimento Portland	Viga Baldrame em concreto (25 MPa)	Impermeabilizante asfáltico
			Tela soldada Ø 4,2 mm, malha 15x15		
			Impermeabilizante asfáltico		

Superestrutura	Parede autopor- tante	Parede (pé direi- to 2,70 metros)	Bloco estrutural cerâmico (4 MPa)	Fôrma	Compensado plastifi- cado e madeira pinus
			Barra de aço (Ø 6,3 mm, Ø 10 mm)		Mistura de terra e cimento: (70% areia, 30% argila e 5% cimento Portland)
			Água		
			Areia		
			Graute (20 MPa)		
	Verga/ contra- verga	Canaleta estrutural Graute (20 MPa)	Cal	Viga	Madeira pinus
			Cimento Portland		
			Canaleta cerâmica (4 MPa)		
			Barra de aço (Ø 6,3 mm, Ø 10 mm)		
			Água		
Revestimento	Laje	Laje pré moldada (espessura 10 cm)	Areia	Laje pré moldada com lajotas cerâmicas	Vigota treliçada
			Cimento Portland		
			Vigota treliçada		
			Placa de EPS (30x20 cm)		
			Aço em tela soldada (Ø4,2 malha 15 x 15)		
	Revesti- mento	Sistema chapisco e emboço	Água	Tratamento Superficial	Lajota cerâmica
			Areia		Aço em tela soldada (Ø4,2 malha 15 x 15)
			Cal		Água
			Cimento Portland		Areia
					Brita
Cobertura	Cobertura	Estrutura de madeira com telhamento	Telha de concreto	Estrutura de madeira com telhamento	Cimento Portland

Quadro 1 – Descrição resumida dos elementos e materiais conforme o sistema construtivo. Fonte: Adaptado pelos autores de Castilho, 2022.

4.1 Desenvolvimento da ACV

Para o desenvolvimento da ACV seguiu-se a estrutura apresentada nas normas ABNT 14040 (ABNT, 2014) e 14044 (ABNT, 2009), empregando-se o software SimaPro 9.1.1 com a base de dados Ecoinvent 3.8 e o método CML-baseline, analisadas todas as categorias de impacto deste último. A análise abrange o ciclo de vida de uma HIS térrea, considerando os sistemas construtivos mencionados, desde o “berço ao portão”. São incluídas duas fases do ciclo de vida: pré-operação e operação, levando em conta tanto os materiais de construção utilizados na fabricação das HISS quanto as reposições de materiais ao longo de sua vida útil. Na pré-operação foram considerados os materiais necessários até a finalização da construção, já na fase de operação somente as substituições necessárias de materiais durante o uso da construção devido à processos de manutenção foram consideradas. Ademais, tomou-se como base uma vida útil de 50 anos de construção (Pilz; Maceno, 2015). Explicita-se que não foram considerados a produção e manutenção de infraestrutura (máquinas e meios de transporte, por exemplo), o transporte do insumo água, a energia consumida pela edificação e, ainda, a lona plástica 150 micras referente à execução do radier.

Para os dados de entrada (primários), levou-se em conta as quantidades de insumos levantadas para as habitações de cada sistema construtivo e estimados a partir do estudo de caso. Para os dados de saída (secundários), foram extraídos da base de dados Ecoinvent, disponível no software Simapro. Na fase inventário do ciclo de vida, o processo de cadastro dos insumos no software Simapro para as duas fases da ACV foi discriminado a partir da utilização de dados secundários extraídos da base Ecoinvent. A versão da base de dados utilizada para o cadastro dos materiais foi a Ecoinvent 3.8 — allocation, cut-off by classification — unit. No quadro 2 estão descritos os materiais presentes no quantitativo dos sistemas construtivos e os correspondentes selecionados na base de dados.

Material	Correspondente na base de dados
Aço	<i>Steel, low-alloyed, hot rolled {RoW} production Cut-off, U</i>
Água	<i>Tap water {BR} tap water production, conventional treatment Cut-off, U</i>
Areia	<i>Sand {BR} market for sand Cut-off, U</i>
Argila	<i>Clay {RoW} clay pit operation Cut-off, U</i>
Bloco cerâmico	<i>Clay brick {GLO} market for Cut-off, U</i>
Brita	<i>Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed Cut-off, U</i>
Cimento Portland	<i>Cement, Portland {BR} market for cement, Portland Cut-off, U</i>
Cal hidratada	<i>Lime, packed {RoW} lime production, milled, packed Cut-off, U</i>
Compensado plastificado	<i>Plywood, for outdoor use {RoW} production Cut-off, U</i>
Madeira pinus (forma de concretagem)	<i>Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RoW} market for Cut-off, U</i>
Impermeabilizante asfáltico	<i>Bitumen seal, VA4 {RoW} production Cut-off, U</i>
Lajota cerâmica	<i>Clay brick {GLO} market for Cut-off, U</i>

Madeira pinus (demais usos)	Sawnwood, hardwood, dried (u=10%), planed [RER] market for Cut-off, U
Placa EPS	Polystyrene, general purpose [RoW] production Cut-off, U
Telha cerâmica	Ceramic tile [RoW] production Cut-off, U
Telha de concreto	Concrete roof tile [RoW] production Cut-off, U
Verniz acrílico	Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state [RoW] acrylic varnish production, product in 87.5% solution state Cut-off, U

Quadro 2 – Materiais selecionados na base de dados. Fonte: Castilho, 2022.

A versão utilizada não considera o reuso de resíduos ou produtos e materiais recicláveis, dessa maneira, os impactos consideram os impactos que ocorrem no processo produtivo sem a redução de materiais recicláveis (Ecoinvent, 2022). Para mais, uma vez que a base de dados Ecoinvent utilizada se baseia no princípio de alocação, este procedimento não foi realizado durante o processo de desenvolvimento do inventário e levantamento de dados. Além disso, neste estudo, foram excluídos o contrapiso e a estrutura de madeira para o telhado, uma vez que suas quantidades são semelhantes em ambos os sistemas. Isso significa que não contribuem para a análise, uma vez que se trata de um comparativo. Por fim, explicita-se que os dados de caracterização, pós cálculo dos impactos de ambos os sistemas, foram normalizados. A normalização consiste em dividir os impactos gerados pelo produto, por categoria, pelos impactos gerados em alguma referência temporal e geográfica e pela população local ou mundial (Heijungs; Suh, 2011). A base de dados normalizada empregada nesta pesquisa foi a World 2000, disponível no SimaPro para o método CML-baseline.

5. Resultados e discussões

Neste item serão apresentados os resultados relativos aos impactos ambientais da habitação nas fases de pré-operação e operação, das etapas construtivas e totais para ambos os sistemas construtivos.

5.1 Impactos das fases de pré-operação e operação

A participação das duas fases do ciclo de vida da residência, em relação às categorias de impactos do estudo, está apresentada na Figura 2.

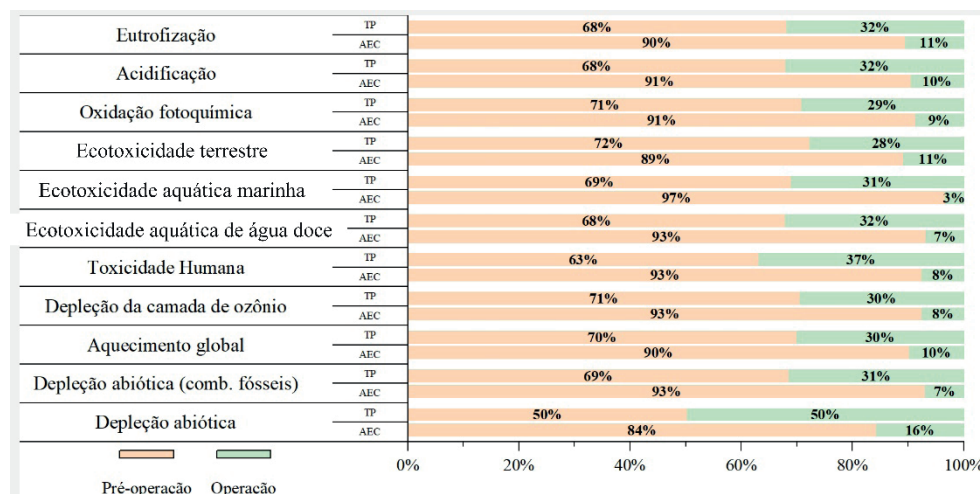


Figura 2 - Impactos das fases da construção na habitação para os sistemas em AEC e TP. Fonte: Adaptado pelos autores de Castilho, 2022.

Para ambos os sistemas construtivos, a fase de maior relevância do ciclo de vida para todas as categorias de impacto é a pré-operação. No sistema AEC, os impactos para todas as categorias analisadas na fase de pré-operação superam 80% do impacto total. No sistema TP, por outro lado, a fase de operação apresenta uma contribuição maior em relação à pré-operação; no entanto, esta última ainda supera 50% dos impactos por categoria. Apesar dos avanços na durabilidade das estruturas contemporâneas de terra, a exposição às intempéries, juntamente com a falta de cura e estabilização adequadas do solo, pode resultar em uma maior necessidade de manutenção dessas construções (Kulshreshtha *et al.*, 2020). Isso pode justificar a observação de uma contribuição maior da fase de operação do sistema em TP em comparação com a fase de construção no ciclo de vida do edifício.

Destaca-se que, para o sistema em AEC, a ecotoxicidade aquática marinha apresenta maior contribuição na fase de pré-operação, representando cerca de 97% do total. Já para a fase de operação, a categoria de impacto com maior participação é a depleção abiótica com, representando cerca de 16%. Para o sistema em TP, a maior contribuição na fase de pré-operação é referente à ecotoxicidade terrestre, atingindo cerca de 72%. De forma análoga ao sistema em AEC, na fase de operação, a depleção abiótica apresenta maior participação, representando cerca de 50%.

Tanto para o bloco cerâmico presente no sistema AEC quanto para a parede de TP, a terra é o principal insumo. No entanto, este material é utilizado em proporções distintas, já que os blocos cerâmicos não são maciços e geralmente possuem menor espessura em comparação com a parede de TP. Além disso, na fabricação dos blocos cerâmicos, há um processo de queima que requer uma alta demanda de energia. Como resultado, os impactos causados pela extração e consumo da terra são diluídos em relação às outras categorias influenciadas pelo consumo energético, no sistema em AEC. Por outro lado, para a TP, onde a terra é utilizada em seu estado natural, surge a hipótese de uma sobrecarga na categoria de impacto da ecotoxicidade terrestre em comparação com as demais, devido à ausência dessa diluição. Portanto, observa-se que o processo de queima da terra desempenha um papel relevante na geração de impactos ambientais durante a fase de pré-operação.

5.2 Impactos dos materiais na fase de pré-operação

A Figura 3 compara os sistemas AEC e TP na fase de pré-operação, considerando o impacto ambiental nas três categorias com as maiores contribuições, que representam cerca de 99% das emissões totais em ecopontos (dados normalizados): Depleção Abiótica (combustíveis fósseis), Aquecimento Global e Ecotoxicidade Aquática Marinha.

Observa-se que os componentes contribuem de forma diferenciada para as categorias de impacto analisadas. No sistema AEC, o bloco cerâmico e o cimento Portland são os principais contribuintes para as três categorias, seguidos pelo aço em menor proporção. Em contrapartida, o Sistema TP apresenta uma distribuição mais equilibrada na contribuição dos materiais, com destaque para os materiais cerâmicos (telha e lajota), o aço e o compensado utilizado nas fôrmas da parede de TP.

Ao analisar isoladamente as paredes em ambos os sistemas, verifica-se que a escolha do sistema construtivo condiciona diretamente os impactos ambientais. No Sistema AEC, o bloco cerâmico contribui com mais de 50% dos impactos nas três categorias analisadas. Em contraste, no Sistema TP, os materiais utilizados na mistura (terra argilosa, areia e cimento Portland)

apresentam uma influência significativamente menor, inferior a 12% em todas as categorias avaliadas. Esses resultados sugerem que a substituição do sistema construtivo das paredes pode potencialmente melhorar a eficiência ambiental do sistema como um todo.

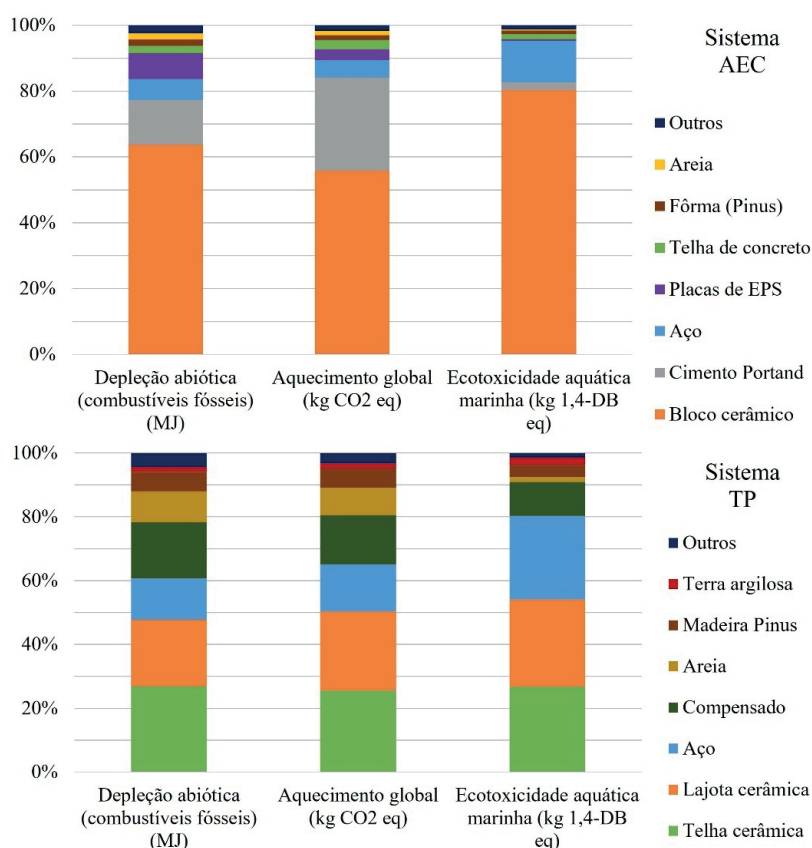


Figura 3 - Impactos dos materiais de construção na fase de pré-operação da construção para os sistemas em AEC e TP. Fonte: Adaptado pelos autores de Castilho, 2022.

No quadro 3, apresenta-se um resumo do processo produtivo dos materiais que mostraram maior representatividade nas três categorias de impacto analisadas. O impacto significativo do aço nas categorias ambientais citadas se deve principalmente ao processo de produção intensivo em energia e recursos naturais. A produção de aço é responsável por uma parte considerável das emissões globais de CO₂, o que a torna uma importante contribuição para o Aquecimento Global. Além disso, a extração de minério de ferro e carvão, essenciais para a produção de aço, resulta na depleção de recursos naturais não renováveis, classificando o aço como um material com alto impacto na Depleção Abiótica. Por fim, os resíduos e efluentes gerados durante a produção e processamento do aço podem contaminar os ecossistemas aquáticos, elevando seu impacto na ecotoxicidade aquática marinha. Esses fatores justificam a relevância do aço nas discussões sobre sustentabilidade ambiental e a necessidade de buscar alternativas ou processos mais eficientes e menos poluentes na sua produção e uso.

Material	Aquecimento Global	Depleção abiótica	Ecotoxicidade aquática marinha
Telha, lajota e bloco cerâmico	A produção de blocos cerâmicos envolve a queima de argila em altas temperaturas, um processo que consome grandes quantidades de energia e resulta na emissão de dióxido de carbono (CO ₂), contribuindo para o aquecimento global.	O uso de combustíveis fósseis durante o processo de queima consome recursos não renováveis.	Durante a extração e processamento da argila, podem ocorrer emissões de poluentes para o ambiente aquático, afetando negativamente os ecossistemas marinhos.
Cimento Portland	A fabricação do cimento Portland é uma das principais fontes de emissão de CO ₂ na indústria da construção, devido ao processo de calcinação do calcário e ao uso intensivo de combustíveis fósseis nos fornos.	A extração de calcário e a alta demanda por energia na produção de cimento esgotam recursos abióticos.	A produção de cimento pode liberar resíduos sólidos e efluentes líquidos que, se não tratados adequadamente, podem contaminar corpos d'água, afetando a vida marinha.
Aço	A produção de aço é uma das principais fontes de emissões de dióxido de carbono (CO ₂) na indústria, especialmente devido ao uso de altos-fornos e fornos elétricos a arco, que consomem grandes quantidades de energia elétrica e combustíveis fósseis. A combustão de coque (um derivado do carvão) no processo de fundição também contribui significativamente para o aumento das emissões de gases de efeito estufa.	A produção de aço depende de recursos minerais não renováveis, como minério de ferro e carvão. A extração intensiva desses recursos esgota as reservas naturais, contribuindo para a depleção abiótica. Além disso, o uso de grandes quantidades de energia no processo de produção também esgota recursos energéticos fósseis.	A produção de aço pode gerar efluentes industriais contendo metais pesados e outros poluentes que, se não tratados adequadamente, podem contaminar corpos d'água e afetar os ecossistemas marinhos. A deposição de resíduos sólidos industriais, como escória, também pode contribuir para a degradação ambiental.
Terra e areia	Embora a extração de terra e areia não seja tão intensiva em termos de emissões de CO ₂ quanto a produção de cimento ou blocos cerâmicos, o transporte desses materiais e sua incorporação em misturas cimentícias podem gerar emissões.	A extração de grandes volumes de areia pode esgotar as reservas naturais e afetar ecossistemas, especialmente em áreas costeiras e fluviais.	A extração não controlada de areia pode levar à sedimentação e à degradação de habitats aquáticos, influenciando a biodiversidade marinha.

Quadro 3 – Resumo dos impactos dos materiais nas categorias destacadas.

5.3 Impactos das etapas construtivas

A análise dos impactos dos materiais empregados na pré-operação de residências, abrangendo as fases de subestrutura, superestrutura, revestimento e cobertura, está delineada na Figura 4.

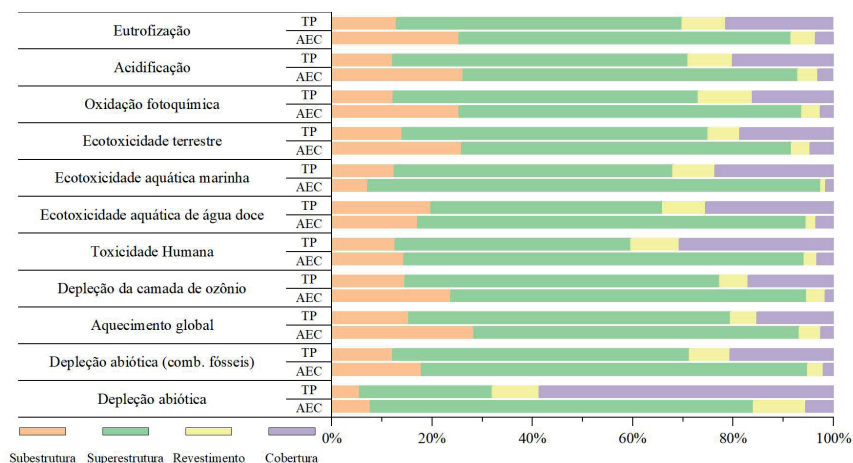


Figura 4 - Impactos das etapas da construção na habitação para os sistemas em AEC e TP.

Fonte: Adaptado pelos autores de Castilho, 2022.

No contexto do sistema em AEC, destaca-se a superestrutura (composta por elementos como alvenaria, vergas, contravergas e laje) como a principal fonte de impacto, representando aproximadamente 90% da ecotoxicidade aquática marinha. Por outro lado, a cobertura, materializada na forma de telhas de concreto, registrou contribuições mínimas, com destaque para a depleção abiótica, correspondendo a 5,6% do total. No que concerne ao revestimento, observou-se que esta etapa exerce uma influência mais significativa na categoria de aquecimento global, contribuindo com cerca de 28% do impacto total.

Para o sistema em TP, considerando tanto a fase de pré-operação quanto de operação da residência, constatou-se que a superestrutura (composta pela parede de TP, vergas, contravergas e laje) emerge como a etapa de maior impacto nas categorias avaliadas, com exceção da depleção abiótica, na qual a cobertura (telha cerâmica) registrou cerca de 59%. Destaca-se que a categoria mais relevante para a superestrutura é o aquecimento global, com 64%. A subestrutura (fundação) alcançou uma contribuição máxima de cerca de 20% para a ecotoxicidade aquática de água doce. Por outro lado, o revestimento (verniz acrílico) é a etapa de menor contribuição, representando aproximadamente 11% para a oxidação fotoquímica.

5.4 Impactos totais dos sistemas construtivos

A Tabela 1 apresenta as contribuições das residências para as categorias de impacto consideradas, abrangendo tanto o sistema em AEC quanto em TP. Entre as onze categorias analisadas, o sistema em AEC demonstrou uma influência maior nos impactos em oito delas. O aquecimento global foi a categoria que apresentou a maior discrepância entre os sistemas construtivos investigados (149%), considerando a AEC como referência, seguida pela depleção da camada de ozônio (114%). Por outro lado, o sistema em TP registrou a maior contribuição para a depleção abiótica, atingindo uma diferença de aproximadamente 48% em relação ao AEC.

Categorias de impacto	Unidade	AEC	TP	Diferença (%)
Aquecimento global	kg CO2 eq	1,98E+04	7,92E+03	149%
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	1,30E-03	6,06E-04	114%
Ecotoxicidade aquática marinha	kg 1,4-DB eq	2,34E+07	1,34E+07	75%
Depleção abiótica (combustíveis fósseis)	MJ	1,69E+05	9,84E+04	72%
Acidificação	kg SO2 eq	5,71E+01	3,82E+01	49%
Oxidação fotoquímica	kg C2H4 eq	3,75E+00	2,82E+00	33%
Eutrofização	kg PO4 eq	1,60E+01	1,26E+01	27%
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq	1,86E+01	1,55E+01	20%
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	7,39E+03	7,50E+03	-2%
Ecotoxicidade aquática de água doce	kg 1,4-DB eq	5,72E+03	6,43E+03	-11%
Depleção abiótica	kg Sb eq	1,01E-01	1,94E-01	-48%

Tabela 1 – Comparativo entre os dados de caracterização das residências em AEC e TP.

A partir dos resultados obtidos, observa-se que o perfil ambiental da AEC é mais nocivo, uma vez que apresenta uma maior quantidade de emissões para a maioria das categorias de impacto analisadas. Entretanto, é importante ressaltar que o sistema em TP demonstrou um desempenho ambiental inferior para as categorias Toxicidade Humana, Ecotoxicidade aquática de água doce e Depleção abiótica. Embora este último sistema registre menores impactos nessas categorias específicas, é fundamental evitar qualquer juízo de valor entre elas, uma vez que cada categoria deve ser analisada individualmente, mesmo havendo variação de valores que variam da ordem milhões de kg equivalentes à décimos de milésimo, como mostrado na Tabela 1.

A análise comparativa dos impactos totais normalizados foi realizada com o objetivo de converter os valores dos indicadores de categoria de impacto em uma mesma unidade, a fim de identificar sua significância relativa. Consta-se que, para os valores normalizados, a AEC apresenta uma maior contribuição nos impactos ambientais totais para as categorias avaliadas, totalizando $1,28 \times 10^{-7}$, enquanto a TP alcança $7,63 \times 10^{-8}$. Portanto, os impactos causados pelo sistema em AEC são aproximadamente 68% maiores do que os causados pelo sistema em TP.

6. Conclusões

A fase operacional no sistema em TP apresentou maior relevância nos impactos analisados. Dessa forma, para otimizar o desempenho ambiental nesta fase, são necessários estudos sobre o comportamento dos insumos básicos que compõem a parede de TP, bem como dos componentes do sistema, a exemplo do revestimento, visando aumentar sua durabilidade.

Em relação à análise das etapas construtivas, observou-se que a superestrutura apresenta maior contribuição nos impactos por categoria, para ambos os sistemas. Além disso, ao examinar detalhadamente a contribuição de cada material, notou-se que alguns deles apresentam impacto mais significativo do que outros. Esse resultado destaca a importância da especificação criteriosa dos materiais de construção durante a fase de projeto.

A exemplo do sistema em TP, que demanda um volume considerável de terra impactando mais acentuadamente na Depleção Abiótica, a preferência pelo uso de terra de reuso, como materiais provenientes de escavações ou de atividades de cortes e aterros, pode consolidar uma alternativa menos prejudicial em termos ambientais, em consonância com o observado por Caldas *et al.* (2020). Assim, os estudos do perfil ambiental permitem ao projetista otimizar o sistema construtivo escolhido, por meio da revisão dos materiais, processos e equipamentos previstos dentro do sistema de produto. Nesse contexto, a ACV emerge como uma ferramenta projetual potencial, fornecendo suporte ao projetista em relação a possíveis substituições de insumos considerados mais prejudiciais ao meio ambiente.

Referências

ACV BRASIL. **SimaPro**. Disponível em: <https://acvbrasil.com.br/software/simapro>. Acesso em: 15 ago. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044** - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida — Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-2**: Componentes cerâmicos - blocos e tijolos para alvenaria - parte 2: métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2017.

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

BALDAUF, Alexandra Staudt Follmann. **Contribuição à Implementação da Coordenação Modular da Construção no Brasil**. 2004. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/4885>. Acesso em: 15 ago. 2024.

BASTOS, Paulo Sérgio. **Sapatas de fundação**. Notas de Aula do Curso de Estruturas de Concreto III. UNESP. Bauru, 2016. Disponível em: <https://wwwp.feb.unesp.br/pbastos/concreto3/Sapatas.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2024.

BRASILEIRO, Luzana L.; MATOS, José M. E.. Revisão Bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p.178—189, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132015613581860>.

CALDAS, Lucas Rosse; CARVALHO, Michele Tereza Marques; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Avaliação de estratégias para a mitigação dos impactos ambientais de revestimentos argamassados no Brasil. **Ambiente Construído**, v. 20, p. 343-362, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300433>.

CALDAS, Lucas Rosse; MARTINS, Adriana Paiva de Souza; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Construção com terra no Brasil: avaliação ambiental da taipa de pilão. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 12, n. 01, p. e021015, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/parc.v12i00.8656279>.

CALDAS, Lucas Rosse; PAIVA, Rayane de Lima Moura; MARTINS, Adriana Paiva de Souza; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. Argamassas de terra versus convencionais: avaliação do desempenho ambiental considerando o ciclo de vida. **Mix Sustentável**, v. 6, n. 4, p. 115—128, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n4.115-128>.

CALDAS, Lucas Rosse; SPOSTO, Rosa Maria. Emissões de CO2 referentes ao transporte de materiais de construção no Brasil: estudo comparativo entre blocos estruturais cerâmicos e de concreto. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 91—108, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212017000400187>.

CAMACHO, Jefferson Sidney. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. Ilha Solteira, SP: Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural (Notas de aula). NEPAE, 2006. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-civil/nepae4636/downloads/>. Acesso em: 15 ago. 2024.

CASTILHO, Bruna da Cunha. **Avaliação do Ciclo de Vida entre edificações de alvenaria estrutural e taipa de pilão**: estudo de caso. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2022.

CAVALETT, Otávio; CHAGAS, Mateus Ferreira; SEABRA, Joaquim E. A.; BONOMI, Antônio. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, p. 647-658, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0465-0>.

CORDEIRO, Carol Cardoso Moura; BRANDÃO, Douglas Queiroz; DURANTE, Luciane Cleonice; CALLEJAS, Ivan Júlio Apolonio. Construções vernáculas em terra: perspectiva histórica, técnica e contemporânea da taipa de mão. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 10, p. e019006, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8651212>.

CORRÊA, Lásaro Roberto. **Sustentabilidade na construção civil**. 2009. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

COELHO FILHO, Osmar; SACCARO JUNIOR, Nilo Luiz; LUEDEMANN, Gustavo. **A avaliação de ciclo de vida como ferramenta para a formulação de políticas públicas no Brasil**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Brasília, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/6685>. Acesso em: 15 ago. 2024.

ECOINVENT. **Geographies names coordinates shortcuts overlaps**, 2022.

HEIJUNGS, Reinout; SUH, Sangwon. **The computational structure of life cycle assessment**. London: Springer, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-015-9900-9>.

KULSHRESHTHA, Yask; MOTA, Nelson J. A.; JAGADISH, Kaup S.; BREDENOORD, Jan; VARDON, Philip J.; VAN LOOSDRECHT, Mark C. M.; JONKERS, Henk M. The potential and current status of earthen material for low-cost housing in rural India. **Construction and Building Materials**, v. 247, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118615>.

LOPES, Wilza Gomes Reis; CARVALHO, Thaís Márjore Pereira de; MATOS, Karenina Cardoso; ALEXANDRIA, Sandra Selma Saraiva de. A taipa de mão em Teresina, Piauí, Brasil: a improvisação e o uso de procedimentos construtivos. **digitAR-Revista Digital de Arqueologia, Arquitetura e Artes**, n. 1, p. 70-78. 2013. Disponível em: https://doi.org/10.14195/2182-844X_1_8.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO (MDA). **Portaria nº 959, de 18 de maio de 2021**. Estabelece requisitos para implementação de empreendimentos habitacionais no âmbito da linha de atendimento Aquisição subsidiada de imóveis novos em áreas urbanas, integrante do Programa Casa Verde e Amarela. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 19 de maio de 2021. Seção 1: 155-174.

MINKE, Gernot. **Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra**. Forschungslabor für Experimentelles Bauen Universidad de Kassel, 2001.

MOHAMAD, Gihad. **Construções em Alvenaria Estrutural**: materiais, projeto e desempenho. São Paulo: Editora Blucher, 2021.

MOHAMAD, Gihad; MACHADO, Diego W. N.; JANTSCH, Ana *Claudia* A.. **Alvenaria estrutural**: Construindo conhecimento. São Paulo: Editora Blucher, 2017.

NEVES, Célia; FARIA, Obede Borges. **Técnicas de construção com terra**. Bauru: FEB-UNESP/PROTERRA, 2011. Disponível em: [http://www. redproterra.org](http://www.redproterra.org). Acesso em: 15 ago. 2024.

PACHECO-TORGAL, Fernando.; JALALI, Said. Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 512-519, 2012. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/j. conbuildmat.2011.10.054](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054).

RANGEL, Bárbara; PINHEIRO, Levi; SILVA, Adeílido; GUIMARÃES, Ana. Panorama da produção de obras em terra crua com design contemporâneo nos últimos 60 anos no Brasil. *In*: Congresso internacional de história da construção luso-brasileira, Porto, 2016. **Anais [...]**. Porto: CEAU-FAUP, 2016. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/86343>. Acesso em: 15 ago. 2024.

PILZ, Thaisa Lana; MACENO, Marcell Mariano C.. Avaliação do ciclo de vida e construção civil: uma revisão da literatura acerca da avaliação de residências unifamiliares. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 6, n. 1, p. 49-55, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.18540/jcecvl6iss1pp0049-0055>.

PISANI, Maria Augusta J.. Taipas: a arquitetura de terra. **Revista Sinergia**, v. 5, n. 1, p. 09-15, 2004. Disponível em: [https://ojs.ifsp.edu.br/index.php/sinergia/ issue/view/38](https://ojs.ifsp.edu.br/index.php/sinergia/issue/view/38). Acesso em: 15 ago. 2024.

RAMALHO, Marcio Antônio; CORRÊA, Marcio R. S. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. 2003.

RIBEIRO, Paulo Henrique. Contribuição ao banco de dados brasileiro para apoio à avaliação do ciclo de vida: fertilizantes nitrogenados. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade de São Paulo, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.2009.tde-31032010-114700>.

ROY, Poritosh; NEI, Daisuke; ORIKASA, Takahiro; XU, Qingyi; OKADOME, Hiroshi; NAKAMURA, Nobutaka; SHIINA, Takeo. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. **Journal of Food Engineering**, v. 90, n. 1, p. 1-10, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.016>.

SAMPAIO, Marliane B.. **Fissuras em edifícios residenciais em alvenaria estrutural**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2010.

SANTOS, Mauro Joel Friederich dos. **Análise da resistência de prismas e pequenas paredes de alvenaria estrutural cerâmica para diferentes tipos de argamassas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. Disponível em: [http://repositorio. ufsm.br/handle/1/7709](http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7709). Acesso em: 15 ago. 2024.

SANTOS, Carol Ferreira Rezende. **Avaliação numérica da interação de paredes de alvenaria estrutural submetidas às ações verticais**. 2016. 187 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/7986>. Acesso em: 15 ago. 2024.

SANTOS, Maria Fernanda Nóbrega dos; BATTISTELLE, Rosane Aparecida Gomes; HORI, Clara Yoshiko; JULIOTI, Plínio Silvio. Importância da avaliação do ciclo de vida na análise de produtos: possíveis aplicações na construção civil. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, v. 2, n. 57, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.15675/gepros.v0i2.882>.

SATO, Márcia Helena Yamamoto. **Análise de estruturas em taipa de pilão**. 2011. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3144/tde-26082011-140706/en.php>. Acesso em: 15 ago. 2024.

SILVA, André Luiz R. T.. **Desenvolvimento de fatores de normalização de impactos ambientais regionais para avaliação do ciclo de vida de produtos no estado de São Paulo**. 2010. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-04102010-160708/>. Acesso em: 15 ago. 2024.

SIMAPRO. **New release**: SimaPro 9.1.1 is here!. 2020. Disponível em: <https://simapro.com/2020/whats-new-in-simapro-9-1-1/>. Acesso em: 15 ago. 2024.

SOUZA, Danielle Maia de; BRAGA, Tiago; FIGUEIRÊDO, Maria Cléa Brito de; MATSUURA, Marília I. S. Folegatti; DIAS, Fernando Rodrigues Teixeira; UGAYA, Cássia Maria Lie. Life cycle thinking in Brazil: challenges and advances towards a more comprehensive practice. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 3, p. 462—465, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1234-2>.

TAUIL, Carlos Alberto; NESE, Flávio José M.. **Alvenaria estrutural**. São Paulo: Pini, 2010.

TEIXEIRA, Marcelo da Costa. **Proposta para análise da resistência de telhas de barro, fibrocimento, cerâmica e de concreto quando submetidas a chuvas de granizo**, 2017. 86 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Patologias das Construções) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/19800>. Acesso em: 15 ago. 2024.

UNEP. **Life Cycle Assessment**: What it is and how to do it. 1. ed. Paris: United Nations Environmental Programme — Industry and Environment, 1996.

YEMAL, José Alberto; TEIXEIRA, Nieves Orosa Vilariño.; NÄÄS, Irenilza de Alencar. Sustentabilidade na construção civil. *In*: 3rd International Workshop Advances in Cleaner Production: cleaner production initiatives and challenges for a sustainable world, 2011, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo, 2011.