

Quantificação das emissões de CO₂ e geração de resíduos de diferentes sistemas de vedação externa

Quantification of CO₂ emissions and waste generation from different wall systems

Guilherme Fauth da Silva*, Bruno Luís Damineli**

*Universidade de São Paulo, Brasil, arq.guilhermefauth@gmail.com

**Universidade de São Paulo, Brasil, bruno.daminelli@usp.br

usjt

arq.urb

número 40 | abr - dez de 2025

Recebido: 11/06/2024

Aceito: 07/07/2025

DOI: [10.37916/arq.urb.vi40.742](https://doi.org/10.37916/arq.urb.vi40.742)



Palavras-chave:

Desempenho ambiental.
Indicadores ambientais.
Materiais.

Keywords:

Environmental performance.
Environmental indicators.
Materials.

Resumo

O desempenho ambiental dos edifícios tem sido um tema frequentemente abordado pelo setor da construção civil. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo comparar as emissões de CO₂ provenientes dos processos de fabricação dos materiais necessários para a construção, assim como a geração de resíduos sólidos de vedação externa e de alguns sistemas estruturais incorporados, durante o processo de projeto arquitetônico e na construção de edifícios. Foram considerados quatro cenários distintos de vedação externa: alvenaria convencional de bloco cerâmico; alvenaria de bloco de concreto; Light Wood Framing (LWF); e Light Steel Framing (LSF). Dessa forma, com base em diferentes estudos desenvolvidos por meio da estrutura metodológica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) disponíveis na literatura, as emissões e a geração de resíduos foram quantificadas, resultando em indicadores ambientais que podem servir de base para tomada de decisão em projetos de arquitetura.

Abstract

The environmental performance of buildings has been a frequently addressed topic in the construction sector. In this context, the present study aimed to compare CO₂ emissions from the manufacturing processes of the materials required for construction, as well as the generation of solid waste from external enclosures and some incorporated structural systems, during the architectural design and building construction processes. Four distinct external enclosure scenarios were considered: conventional masonry with ceramic blocks, concrete block masonry, Light Wood Framing (LWF), and Light Steel Framing (LSF). Thus, based on different studies developed using the methodological framework of Life Cycle Assessment (LCA) available in the literature, emissions and waste generation were quantified, resulting in environmental indicators that can serve as a basis for decision-making in architectural projects.

Introdução

Dentre os diferentes impactos ambientais, a busca pela redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂), bem como a mitigação da geração de resíduos sólidos, têm sido considerados grandes desafios nas últimas décadas. Uma vez que, conforme Silva, Santos e Araújo (2017) e Kozloski (2020), a indústria da construção é responsável por cerca de 51% a 70% da geração de resíduos sólidos urbanos e 39% das emissões mundiais de carbono, observa-se a necessidade de estabelecer mudanças nos métodos de produção de edificações, que devem ressignificar os fatores culturais, políticos, econômicos e tecnológicos.

O setor da construção civil apresenta o maior potencial econômico para mitigar os impactos ambientais (Costa, 2012). Para isso, é necessário que as políticas públicas, planos e programas sejam alinhados com as diretrizes da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), conforme estabelecido no Decreto nº 12.040, de 5 de junho de 2024 (Brasil, 2024), que cria o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima (CIM). O CIM tem como função articular e definir linhas de ação para o governo federal, no que tange à mitigação e adaptação às mudanças climáticas, assegurando a integração entre as políticas ambientais e as de desenvolvimento econômico, incluindo a promoção de uma economia de baixa emissão de gases de efeito estufa. A implementação eficaz dessas políticas será fundamental para garantir que a construção civil contribua de maneira significativa para os objetivos climáticos, como a neutralidade carbônica e o cumprimento das metas do Acordo de Paris.

Nesse contexto, a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) tem sido amplamente utilizada na análise de redução de impactos ambientais na construção civil. No entanto, de acordo com Bueno, Pereira e Fabrício (2018) e Sena (2019), os dados fornecidos pelos fabricantes sobre o ciclo de vida dos componentes do edifício, essenciais para a avaliação dos impactos ambientais da construção, não são considerados nas etapas iniciais do projeto, quando as decisões mais relevantes são tomadas. Quando realizadas, essas análises ocorrem de forma tardia e exigem o suporte de especialistas, devido à sua complexidade e à grande demanda de trabalho envolvida.

Com essa base, a presente pesquisa pretende contribuir com o processo de tomada de decisões na seleção de materiais, componentes e sistemas construtivos, por

meio de indicadores ambientais quantitativos fundamentados em uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) simplificada, permitindo o cálculo prévio das emissões de CO₂ e da geração de resíduos sólidos durante a fase de projeto.

Pelo motivo de que a envoltória da edificação ocupa uma grande parcela da massa de materiais utilizados em uma construção, optou-se pela quantificação de diferentes sistemas de vedação externa. Além disso, no que tange à construção, os sistemas construtivos pré-moldados, como o Light Steel Framing (LSF), apresentam vantagens que envolvem a velocidade e produtividade, limpeza, entre outros. Por outro lado, métodos construtivos moldados *in loco*, como o convencional de blocos cerâmicos e de concreto, proporcionam melhores condições de custos e acessibilidade de mão de obra. Por esse motivo, o desempenho ambiental pode se tornar um fator determinante na decisão do sistema construtivo a ser especificado no projeto de arquitetura.

Materiais e Métodos

Foram selecionados quatro sistemas de vedação para servirem como base de comparação, apresentados na Figura 1: 1) alvenaria convencional de bloco cerâmico; 2) alvenaria de bloco de concreto; 3) sistema Light Steel Framing (LSF); e 4) sistema Light Wood Framing (LWF).

É importante salientar que, neste estudo, a abordagem sobre as emissões de CO₂ está diretamente relacionada com a fase de fabricação dos materiais, enquanto a geração de resíduos sólidos corresponde às perdas e desperdícios de materiais durante a fase de construção. Portanto, inicialmente, foi conduzido um levantamento de dados quantitativos disponíveis tanto na literatura nacional quanto internacional, assim como em bancos de dados, acerca das emissões de CO₂ originadas nos processos de fabricação dos diferentes materiais e componentes que constituem os sistemas construtivos de vedação analisados. A maioria desses estudos (Punhagui, 2014; Oliveira, 2015; Caldas e Carvalho, 2018) seguem a estrutura metodológica da ACV, com uma abordagem conhecida como *cradle-to-gate*, ou seja, abrangendo desde a extração de matéria-prima até a conclusão da manufatura no portão da fábrica. Os dados obtidos estão caracterizados em termos de emissões mínimas e máximas.

CENÁRIO 1 BLOCOS CERÂMICOS

Bloco cerâmico (14x19x39 cm)

Argamassa de reboco (2,5 cm)

Argamassa de assentamento (1 cm)

CENÁRIO 2 BLOCOS DE CONCRETO

Argamassa de reboco (2,5 cm)

Bloco de concreto (14x19x39 cm)

Argamassa de assentamento (1 cm)

CENÁRIO 3 LSF

Guia metálica

Lã de rocha (duas camadas de 50 mm cada)

Perfil metálico (aço ZAR 275; L = 140 mm; E = 0.95 mm)

OSB (11,1 mm)

Membrana hidrófuga

Placa cimentícia (10 mm)

OSB (9,5 mm)

Gesso acartonado (12,5 mm)

INTERIOR

CENÁRIO 4 LWF

Guia de madeira (14x4 cm)

Lã de rocha (duas camadas de 50 mm cada)

OSB (11,1 mm)

Manta de impermeabilização transpirante

Ripa + borracha

Placa cimentícia (10 mm)

OSB (9,5 mm)

Gesso acartonado (12,5 mm)

INTERIOR

Também foi conduzido um levantamento de dados para a obtenção dos índices de perdas e desperdícios de materiais em fase de construção. Foi adotado um critério de corte que exclui os materiais que representam menos de 1% da massa (parafusos, tintas, membranas, entre outros). A unidade funcional declarada nos resultados é de 1m² de parede.

Simplificação do método de ACV

Devido a extensão e complexidade da estrutura metodológica de uma ACV tradicional, diversas pesquisas buscam simplificar essas análises. Entre as muitas encontradas na literatura, é possível citar, por exemplo, Lana e Pereira (2020), Punhagui (2014) e Oliveira (2015). Esta última autora desenvolveu um estudo baseado na

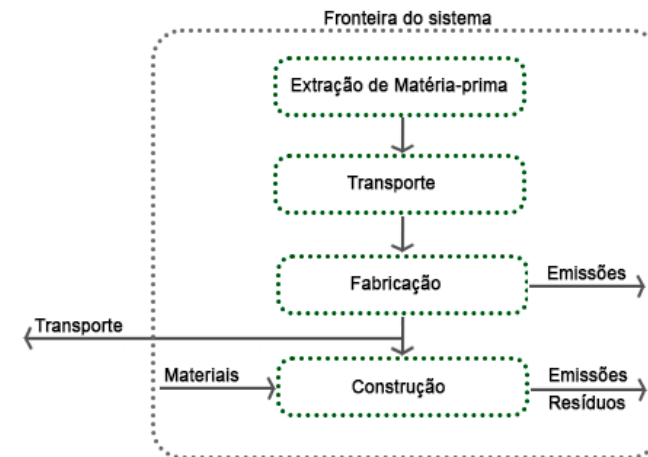


Figura 2. Fronteira do sistema. Fonte: autores

metodologia proposta pelo Conselho Brasileiro de Construção Sustentável¹ (CBCS), denominado Avaliação de Ciclo de Vida Modular (ACVm). Enquanto Punhagui (2014) menciona que a simplificação de ACV é frequentemente empregada devido à ausência de dados para avaliações completas. Além disso, o trabalho foca exclusivamente na categoria de Aquecimento Global, desconsiderando as demais categorias de impacto, como Toxicidade Aquática e Terrestre, Acidificação, entre outras.

Contudo, observa-se a necessidade de adaptar o método proposto pelas normas, a fim de direcionar a pesquisa de modo a cumprir os objetivos propostos. Apesar disso, buscou-se preservar a essência do método original, ainda que alguns critérios foram excluídos e outros adicionados ao longo do desenvolvimento do estudo.

No geral, a principal adaptação foi aplicada ao Inventário de Ciclo de Vida, que foi reduzido aos cálculos de massa dos materiais, ao levantamento de dados das emissões de CO₂ e às taxas de perda de materiais durante a fase de construção. Apesar das limitações inerentes, como o menor detalhamento e o escopo reduzido, o método proposto é beneficiado pela apresentação de informações que inserem a pesquisa em uma escala global, em contraste com o foco mais comum em produtos e co-produtos de fornecedores específicos. Dessa maneira, os dados são restritos aos títulos de entradas de materiais e componentes incorporados ao edifício, com o objetivo de analisar a variação nos títulos de saídas em forma de emissões de dióxido de carbono e resíduos gerados.

Fabricação dos materiais e emissões de CO₂

Alvenaria convencional de bloco cerâmico

Conforme Guimarães (2017), a extração da argila é responsável por diversos impactos ambientais, como o desmatamento de matas nativas, o assoreamento e erosão das margens dos rios, bem como as emissões de gases poluentes, entre eles o dióxido de carbono. As recentes alterações na norma brasileira de blocos e tijolos cerâmicos para alvenaria instituídas pelas atualizações na NBR 15270-1 (ABNT, 2017; ABNT, 2023), incluem a revisão dos critérios de controle de qualidade em todas as etapas do processo produtivo. Entre as principais mudanças, destacam-se

a adoção de parâmetros mais rigorosos na seleção e preparação das matérias-primas, o aperfeiçoamento dos métodos de moldagem, compactação e secagem, e a definição de tolerâncias dimensionais mais precisas para garantir a uniformidade dos produtos. Além disso, o processo de queima foi otimizado, visando não apenas aprimorar o desempenho mecânico e a durabilidade dos blocos, mas também reduzir o consumo energético e as emissões de poluentes.

Os dados apresentados por Martinez-Rocamora, Sólis-Guzmán e Marrero (2016), disponíveis em diferentes bancos de dados, apresentam variações entre 0,21 e 0,294 kg de CO₂/kg emitidos durante a manufatura do bloco cerâmico.

A argamassa de revestimento para um sistema de alvenaria convencional é composta basicamente por cimento, areia e cal, sendo o cimento o principal causador dos impactos ambientais. As emissões durante a produção da argamassa variam na faixa de 0,20 kg de CO₂/kg. O estudo de Brugnera (2018), por exemplo, apresenta o valor de 0,238 kg de CO₂/kg.

Alvenaria de bloco de concreto

Assim como a argamassa de reboco, o bloco de concreto também contém cimento em sua composição. De acordo com Oliveira et al. (2014), a produção desse material é responsável por 5% das emissões mundiais. A maior parte do carbono emitido na fase de fabricação do cimento ocorre pelo processo de queima das rochas de calcário para produzir o clínquer, bem como a queima de combustíveis. Damineli (2013) menciona que o processo fabricação do cimento é responsável por uma quantidade de emissões aproximadas de quase 1000 kg de CO₂/ton de clínquer (principal componente do cimento). Por esse motivo, a lacuna na literatura sobre a cadeia produtiva do concreto vem sendo preenchida por pesquisas que visam reduzir a quantidade de cimento utilizada nesse material.

Além do cimento, esse componente construtivo possui agregados, que são constituídos por brita, pó de pedra e areia natural ou artificial. Apesar de não serem tão significativos quanto a fabricação do cimento, os processos de extração e produção de areia também são responsáveis por uma parte das emissões provenientes da manufatura dos blocos de concreto. Um método bastante eficaz para reduzir o

¹[http://acv.cbcs.org.br/website/acvs/show.asp?ppgCode=DD1EF02C-E7F8-46B7-AC49-](http://acv.cbcs.org.br/website/acvs/show.asp?ppgCode=DD1EF02C-E7F8-46B7-AC49-C3EF457768E7)

impacto ambiental desse agregado consiste na substituição da areia natural pela produzida a partir de Resíduos de Construção Civil (RCC). Borges e Agostinho (2015) analisaram as emissões de CO₂ provenientes da produção de areia de RCC em comparação com a natural e, em seus resultados, foi obtida uma redução de 0,034 para 0,016 kg de CO₂/kg.

No processo de produção dos blocos de concreto, o cimento é geralmente armazenado em silos específicos, enquanto os agregados são dispostos em baias. A dosagem do concreto ocorre após o transporte dos insumos até os misturadores, sendo que a água é adicionada para conferir à massa a consistência adequada para a moldagem. Uma vez pronta, a mistura é encaminhada para a vibro prensa (Oliveira, 2015). A autora estimou que esses processos podem emitir até 3,3 kg de CO₂ para produzir um único bloco.

O revestimento aplicado a esse sistema construtivo é a argamassa de reboco apresentada anteriormente.

Light Steel Framing (LSF)

A estrutura do sistema de vedação Light Steel Framing é constituída por guias e montantes de aço. Segundo o anuário estatístico publicado pelo Instituto Aço Brasil (IAB, 2023), o país produziu uma quantidade de 36,1 milhões de toneladas de aço no ano de 2021, enquanto o total mundial foi estimado em pouco mais de 1,96 bilhões. O consumo, de acordo com o relatório de sustentabilidade (IAB, 2018), é distribuído para a construção civil (38,1%), bens de capital (21,4%), setor automotivo (19,6%), unidades domésticas e comerciais (7,3%), embalagens e recipientes (3,7%), tubos com costura de pequeno diâmetro (4,6%), e outros setores (5,3%).

O aço consiste em uma liga metálica composta por ferro (>98%) e carbono (<2%), amplamente utilizado na construção civil devido suas propriedades de resistência a tração e flexão. Sua principal matéria-prima é o ferro primário (gusa ou esponja), obtido através do processamento do minério de ferro. Após essa etapa, o material é submetido a um processo de refino, onde as impurezas são retiradas e o teor de carbono é reduzido. Por fim, o produto semiacabado passa pela conformação mecânica, onde é laminado para atingir a forma desejada (Carvalho, Mesquita e Araújo, 2015). As guias e montantes utilizadas no sistema LSF são tratadas com uma camada de revestimento de zinco, tornando o material mais resistente à corrosão.

Durante os processos de fabricação mencionados, o material é exposto a altas temperaturas, resultando na liberação de CO₂. Entre os dados obtidos, foi possível identificar uma variação de 1,45 a 3,19 kg de CO₂/kg, presentes nas pesquisas de Caldas (2016) e Martinez-Rocamora, Sólis-Guzmán e Marrero (2016).

Com a estrutura da vedação montada, são fixados painéis de partículas orientadas OSB, que constituem a primeira camada de vedação do sistema LSF. Esses painéis são produzidos em larga escala a partir da madeira *Pinus taeda*; no entanto, estão surgindo pesquisas que visam incorporar outras espécies na produção. Além da madeira, os painéis OSB também são compostos por emulsão de parafina, resina fenólica, uréia, formol, melamina e água. Segundo Caldas (2016), as chapas de OSB são capazes de emitir até 0,62 kg de CO₂ para produzir um quilograma de material.

É bastante comum o emprego de placas de gesso acartonado no revestimento interno de um sistema LSF. Esse material é produzido a partir de rochas de gesso extraídas da pedreira. Na fábrica, as rochas são moídas em pó e aquecidas a 160° C. Durante esse processo, o gesso perde cerca de 70% de sua umidade, que se transforma em estuque. Após ser misturado com água e algumas substâncias químicas, obtém-se um material viscoso que é derramado sobre uma camada de celulose. Com o auxílio de máquinas, o material é moldado para a espessura adequada, estando pronto para passar pelo processo de corte. A última etapa leva o material para secar em fornos, retirando a umidade restante (Quintana, et al. 2018). Todo esse processo, segundo Caldas (2016), pode emitir até 0,47 kg de CO₂/kg.

No revestimento externo, é aplicada uma camada de membrana hidrófuga para posterior aplicação das placas cimentícias, que são constituídas de cimento, fio sintético, celulose e alguns aditivos. Os principais processos de produção desse material, de acordo com Speck (2014), consistem em: 1) preparação de mistura seca e líquida; 2) preparação de massa; 3) conformação; 4) decoração; 5) secagem; e 6) classificação. Esses processos são responsáveis por uma emissão que pode chegar a 1,24 kg de CO₂/kg de material (Caldas e Carvalho, 2018).

É comumente utilizada a lã de rocha como isolamento térmico e acústico em sistemas de vedação externas em LSF. A matéria-prima desse material são as fibras minerais feitas de rochas vulcânicas, que são fundidas a 1500°C para serem transformadas em filamentos. Taborianski e Prado (2012) estimaram uma emissão de

685 kg de CO₂ para produzir uma tonelada de lâ de rocha, enquanto Caldas e Carvalho (2018) apresentam o valor de 1,34 kg de CO₂/kg.

Light Wood Framing (LWF)

O sistema de vedação Light Wood Framing (LWF) analisado nesta pesquisa é constituído pelos mesmos materiais e componentes de revestimento e isolamento do sistema Light Steel Framing apresentados anteriormente, com substituição apenas dos perfis de aço pelos de madeira.

A madeira é bastante reconhecida por ser um material sustentável, pois as plantações que proporcionam a sua produção contribuem na captura de carbono através da fotossíntese. Ao contabilizar o estoque de carbono da madeira, Oliveira (2016) estimou um fator de emissão de -1,29 kg de CO₂/kg. Além disso, o fato de ser um material cultivável a torna uma fonte de recurso inesgotável.

A cadeia produtiva da madeira inicia nos processos florestais para o reflorestamento, que envolvem a produção de mudas, preparação do solo, plantio e condução da floresta, para posterior colheita da matéria-prima. Após a extração, as toras são transportadas até as madeireiras, onde se inicia o processo de beneficiamento. Dessa forma, é realizado o desdobro do material através do corte. Apesar de seus benefícios, o uso da madeira pode se tornar desvantajoso quando houver grandes impactos durante os processos florestais, como movimentações de solo, por exemplo (Oliveira, 2016).

Outro ponto negativo é a possibilidade do material ser originado do desmatamento de florestas nativas, uma vez que a extração ilegal da madeira pode gerar impactos ambientais relativamente altos. Punhagui (2014) estimou uma emissão máxima de 697 quilogramas de CO₂ para produzir uma tonelada de madeira serrada quando proveniente de reflorestamento. No entanto, em situações de desmatamento, esse valor pode aumentar drasticamente, chegando a 44.382 kg de CO₂ por tonelada.

Fatores de emissões

A figura 3 sintetiza os valores de emissões de CO₂ dos materiais acima descritos, para permitir uma comparação mais objetiva entre seus impactos em termos de emissões de CO₂ relacionadas ao seu processo produtivo. Em um primeiro

momento, optou-se por manter a fidelidade às fontes, apresentando os dados levantados conforme suas unidades funcionais originais.

Material	Emissão			
	Mín.	Fonte	Máx.	Fonte
Aço	1,45 kg de CO ₂ /kg	Caldas (2016)	3,19* kg de CO ₂ /kg	Martinez-Roca- mora <i>et al.</i> (2016)
Argamassa	0,16 kg de CO ₂ /kg	Caldas (2016)	0,238 kg de CO ₂ /kg	Brugnera (2018)
Bloco cerâmico	0,111 t de CO ₂ /t	Costa (2012)	0,294* kg de CO ₂ /kg	Martinez-Roca- mora <i>et al.</i> (2016)
Bloco de concreto	0,128 kg de CO ₂ /kg	Brugnera (2018)	3,3 kg de CO ₂ /bloco	Oliveira (2015)
Placa de gesso	0,197 kg de CO ₂ /kg	Brugnera (2018)	0,47 kg de CO ₂ /kg	Caldas (2016)
Lã de rocha	685 kg de CO ₂ /t	Taborianski e Prado (2012)	1,34 kg de CO ₂ /kg	Caldas e Car- valho (2018)
Madeira	-1,29** kg de CO ₂ /kg	Oliveira (2016)	697 kg de CO ₂ /t	Punhagui (2014)
OSB	0,331 t de CO ₂ /t	Costa (2012)	0,62 kg de CO ₂ /kg	Caldas (2016)
Placa cimentícia	0,491 t de CO ₂ /t	Silva <i>et al.</i> (2022)	1,24 kg de CO ₂ /kg	Caldas e Car- valho (2018)

*Nota: dados retirados pelos autores do banco de dados Base Carbone.

**Nota: considera o estoque de carbono.

Figura 3. Fatores de emissão de CO₂ disponíveis na literatura. Fonte: autores

Construção e geração de resíduos

A geração de resíduos sólidos durante a fase de construção ocorre devido às perdas e desperdícios de materiais ocasionados por erros durante os processos. Portanto, foram estabelecidos os fatores de perda de cada material com base nos

dados utilizados por Caldas (2016) e Caldas e Carvalho (2018). Ambos os autores se apoiaram nas composições do SINAPI, bem como na Tabela de Composição de Preços para Orçamentos (TCPO, 2012). Para o LSF (vedações externas), Caldas (2016) consultou as orientações descritas na Diretriz Técnica do SINAT nº 003 de 2012. Os fatores de perda dos blocos de concreto e da madeira foram retirados do estudo de Evangelista (2017), que se baseou em dados disponíveis na literatura. A figura 4 apresenta estes dados de forma a facilitar comparações.

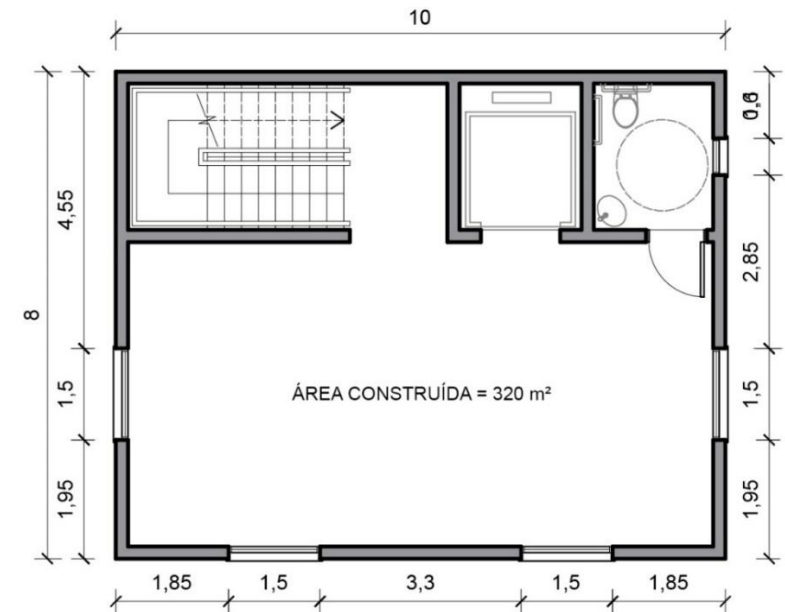
Material	Emissão			
	Mín.	Fonte	Máx.	Fonte
Aço	3%	Caldas e Carvalho (2018)	10%	Caldas (2016)
Argamassa	10%	Caldas e Carvalho (2018)	20%	Caldas (2016)
Bloco cerâmico	5%	Caldas e Carvalho (2018)	26%	Caldas (2016)
Bloco de concreto	3%	Evangelista (2017)	8%	Evangelista (2017)
Placa de gesso	5%	Caldas e Carvalho (2018)	9%	Caldas (2016)
Lã de rocha	0%	Caldas e Carvalho (2018)	0%	Caldas (2016)
Madeira	5%	Evangelista (2017)	15%	Evangelista (2017)
OSB	5%	Caldas e Carvalho (2018)	9%	Caldas (2016)
Placa cimentícia	0%	Caldas e Carvalho (2018)	9%	Caldas (2016)

Figura 4. Fatores de perda na fase de construção. Fonte: autores

Modelo de análise

Esta etapa da metodologia compreende o desenvolvimento de um modelo que serviu como referência para os cálculos. Dessa forma, foi projetado um edifício ilustrativo de quatro pavimentos, cada um com 80 m², totalizando uma área construída de 320 m², 390,51 m² de parede, 3 metros de pé-direito e 36 metros de perímetro. Foram contabilizadas apenas as vedações externas e as aberturas foram

projetadas com base no critério de ocupação de 1/8 da área útil. A planta baixa tipo do edifício modelo é apresentada na figura 5.



PLANTA BAIXA PAV. TIPO

Figura 5. Planta baixa do edifício em análise. Fonte: elaboração própria.

Cálculos

Durante o processo de cálculo, foram estimadas as massas de cada material por metro quadrado (m²) a partir de dados obtidos de fabricantes.

Os blocos cerâmicos empregados na análise possuem dimensões de 14x19x39 cm e um peso de 7,2 kg por bloco, com uma quantidade de 13 blocos por metro quadrado, totalizando 93,6 kg/m². Os blocos de concreto possuem as mesmas dimensões e quantidades de blocos, porém, com um peso de 12 kg por componente, totalizando 156 kg/m².

A partir da espessura da argamassa de reboco (2,5 cm), foram calculados os volumes dos revestimentos externo e interno a serem aplicados nos sistemas

construtivos com blocos cerâmicos e de concreto. O mesmo procedimento foi realizado para estimar o volume de assentamento, com base em 1 cm de espessura. Ambos os volumes foram multiplicados pela densidade de 1.900 kg/m³, conforme indicado por Freitas *et al.* (2023). Assim, obteve-se a quantidade de 95 kg/m² para o reboco, 16,17 kg/m² para a argamassa de assentamento do sistema convencional de bloco cerâmico e 9,10 kg/m² para a argamassa de assentamento da alvenaria de blocos de concreto.

A massa da madeira foi calculada tomando como base o perímetro da edificação de 36 metros, que, multiplicado por 3, resulta na quantidade de guias horizontais por pavimento. Para quantificar os montantes verticais, o perímetro foi dividido pela modulação de 40 centímetros, resultando em 90 montantes por pavimento. O comprimento dos perfis segue a altura do pé-direito (3 m) para os montantes verticais e o perímetro da edificação (36 m) para as guias, com espessura de 4 cm e largura de 14 cm. A densidade adotada no cálculo é de 379 kg/m³, conforme indicado por Aurélio *et al.* (2016) para a espécie *Pinus taeda*. Sendo assim, a massa total do sistema de vedação do edifício resultou em 8,21 kg/m².

Da mesma forma que com a madeira, a massa do aço utilizada no sistema Light Steel Framing também foi calculada com base no perímetro da edificação, considerando a mesma quantidade e comprimento das guias e montantes, totalizando em 1.512 metros lineares de aço. Esse valor foi multiplicado pelo peso do metro linear (ml) de um perfil de 140 mm de largura, aço zar 275, 0,95 mm de espessura e peso de 1,748 kg/ml. Ao dividir a quantidade total pela área de parede, obteve-se 6,76 kg/m².

Os dados disponíveis em catálogos de diferentes fornecedores para os materiais e componentes de revestimento e isolamento consistem nos seguintes valores: 1) OSB para revestimento interno (9,5 mm de espessura e 6,07 kg/m²); 2) OSB para revestimento externo (11,1 mm e 7,11 kg/m²); 3) Placa de gesso (12,5 mm e 9,72 kg/m²); 4) Placa cimentícia (10 mm e 17 kg/m²); e 5) lã de rocha (duas camadas de 50 mm, totalizando em 3,56 kg/m²).

Após os cálculos de massa, todos os dados de emissões de CO₂ apresentados na figura 3 foram convertidos para a mesma unidade (kg de CO₂/kg), conforme apresentado na figura 6, que reúne todos os dados utilizados nos cálculos.

Por fim, adotou-se a equação de Caldas (2016), que foi adaptada para fornecer os resultados diretamente na unidade de 1 m² de parede, conforme a Equação 1, utilizada para quantificar as emissões de CO₂. Caldas e Carvalho (2018) utilizaram uma equação bastante semelhante, sendo diferenciada pelo termo “FGWP” ao invés de FCO₂. Já a quantidade de resíduos gerados foi determinada pela Equação 2, que segue uma sequência lógica de regras de três, considerando a massa de cada material e componente, bem como sua respectiva taxa de perda. Em ambas as equações, os resultados foram inicialmente calculados para cada material discriminado, sendo posteriormente somados de acordo com a quantidade de materiais utilizados em cada sistema construtivo. Todos os materiais foram avaliados duas vezes: primeiro considerando os fatores mínimos e, em seguida, os fatores máximos.

$$ECO_2I = \sum_{i=1}^n m_i \times FCO_2 \times \left(1 + \frac{P_i}{100}\right) \quad (1)$$

Onde:

ECO₂I – emissões de CO₂ (kg/m²)

i – material discriminado

n – número de materiais

m – massa do material por m² (kg/m²)

FCO₂ – fator de emissão de CO₂ (kgCO₂/kg)

P – fator de perda dos materiais (%)

$$GRS = \sum_{i=1}^n \frac{m_i \times P_i}{100} \quad (2)$$

Onde:

GRS = Geração de resíduos sólidos (kg/m²)

i = material discriminado

n = número de materiais

m = massa do material (kg/m²)

P = fator de perda dos materiais (%)

Material	Massa (kg/m²)	Perda (%)		Fator de emissão (kg de CO2/kg)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Sistema Convencional de Blocos Cerâmicos					
Bloco cerâmico	93,6	5	26	0,111	0,294
Argamassa (assentamento)	16,17	10	20	0,16	0,23
Argamassa (reboco)	95	10	20	0,16	0,23
Alvenaria de Blocos de Concreto					
Bloco de concreto	156	3	8	0,128	0,275
Argamassa (assentamento)	9,10	10	20	0,16	0,23
Argamassa (reboco)	95	10	20	0,16	0,23
Light Steel Framing (LSF)					
Aço	6,76	3	10	1,45	3,19
OSB	13,18	5	9	0,331	0,62
Placa de gesso	9,72	5	9	0,197	0,47
Placa cimentícia	17	0	9	0,491	1,24
Lã de rocha	3,56	0	0	0,685	1,34
Light Wood Framing (LWF)					
Madeira	8,21	5	15	-1,29*	0,697
OSB	13,18	5	9	0,331	0,62
Placa de gesso	9,72	5	9	0,197	0,47
Placa cimentícia	17	0	9	0,491	1,24
Lã de rocha	3,56	0	0	0,685	1,34

*Nota: considera o estoque de carbono da madeira.

Figura 6. Dados utilizados nos cálculos. Fonte: autores

Resultados e Discussões

A figura 7 apresenta os dados da avaliação de impacto obtidos para a categoria de aquecimento global. A unidade funcional declarada é de 1 m² de parede.

Sistema Construtivo	Material	Emissão (kg de CO ₂ /m ²)		Total (kg de CO ₂ /m ²)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Bloco cerâmico	Bloco	10,90	34,67	30,46	65,35
	Assentamento	2,84	4,46		
	Reboco	16,72	26,22		

Bloco de concreto	Bloco	20,56	46,33	38,88	75,06
	Assentamento	1,60	2,51		
	Reboco	16,72	26,22		
LSF	Aço	10,09	23,72	27,45	65,33
	OSB	4,58	8,90		
	Placa de gesso	2,01	4,97		
	Placa cimentícia	8,34	22,97		
	Lã de rocha	2,43	4,77		
LWF	Madeira	-11,12	6,58	6,24	48,19
	OSB	4,58	8,90		
	Placa de gesso	2,01	4,97		
	Placa cimentícia	8,34	22,97		
	Lã de rocha	2,43	4,77		

Figura 7. Emissões de CO₂ (kg de CO₂/m²). Fonte: autores

Observa-se que os resultados da análise revelaram variações relativamente altas em todos os sistemas construtivos. Isso pode ser atribuído à consideração de diversas variáveis nos cálculos, tais como diferentes métodos e processos produtivos. É importante ressaltar que o desempenho de cada sistema de vedação externa contempla as etapas do ciclo de vida que vão desde a extração de matéria-prima até a construção, podendo apresentar vantagens ou desvantagens ao considerar outras fases, como uso e demolição.

Os resultados das emissões de CO₂ demonstram que, entre os diferentes sistemas de vedação analisados, o menor impacto foi registrado pelo sistema LWF, com um valor mínimo de apenas 6,24 kg de CO₂/m², devido ao estoque de carbono da madeira, enquanto o valor máximo assumiu o valor de 48,19 kg de CO₂/m². Embora o desempenho do LWF seja positivo quando comparado aos demais cenários, alguns autores destacam impactos negativos de plantações de pinus e eucalipto, principais matérias primas para o LWF. Segundo Ferro et al. (2018), o reflorestamento para produção industrial de madeira em tora de pinus no Brasil gera impactos ambientais, com o preparo do solo e a colheita florestal se destacando como os principais fatores críticos nesse contexto. Além disso, Ferraz, et al. (2024) identificaram impactos negativos em plantações de eucalipto para comercialização da madeira, como o esgotamento dos recursos hídricos e erosão.

A segunda posição é ocupada pelo LSF, com uma variação de 27,45 a 65,33 kg de CO₂/m². Isso demonstra que, mesmo com as altas emissões provenientes dos processos de fabricação do aço, a leveza desse sistema construtivo compensa o impacto ambiental gerado quando comparado aos dois sistemas construtivos de blocos. Além disso, o aço pode apresentar vantagens, uma vez que possui uma alta taxa de reciclabilidade. Vefago (2012) realizou uma comparação das emissões de CO₂ entre o aço galvanizado virgem e reciclado e encontrou uma redução de 12,36 para 5,26 kg de CO₂/m².

As emissões do sistema convencional de blocos cerâmicos ficaram ligeiramente acima das do LSF, apresentando um mínimo de 30,46 e um máximo de 65,35 kg de CO₂/m². Grande parte do CO₂ emitido pelo sistema convencional de blocos cerâmicos ocorre devido ao alto índice de perda de materiais (26% para os blocos e 20% para a argamassa). Enquanto ao sistema de blocos de concreto, apresentou o pior resultado, visto que a quantidade de cimento empregada é elevada, tanto na confecção dos blocos quanto na argamassa de revestimento. Esse fator, juntamente com as perdas, resultou em um mínimo de 38,88 e um máximo de 75,06 kg de CO₂/m².

Ao observar os fatores de emissões utilizados nos cálculos (figura 6), expressos em kg de CO₂ por kg de material, nota-se que os valores dos blocos cerâmicos e de concreto variam na mesma faixa. No entanto, nos resultados obtidos para a unidade em kg de CO₂ por m² (figura 7), os blocos de concreto ultrapassaram os cerâmicos devido à maior massa desse material. Mesmo assim, as variações entre ambos não são muito significativas em comparação com os demais cenários.

Nos estudos que embasam o levantamento de dados, não foram identificadas distinções entre as argamassas de assentamento e reboco, como na pesquisa de Caldas e Carvalho (2018), por exemplo. Dessa forma, foram adotados os mesmos fatores de emissão e as mesmas taxas de perda para ambas, sendo a massa de cada material a principal diferença para os impactos ambientais de cada tipo de aplicação. Além disso, a pesquisa não se concentra em materiais específicos, mas sim em um contexto global. A principal justificativa para a utilização de valores mínimos e máximos nos resultados está diretamente relacionada à dificuldade de prever dados para traços e composições específicas, sendo, portanto, a variação o foco da análise.

A figura 8 apresenta os dados obtidos para a geração de resíduos de construção de cada sistema analisado, também para a unidade de 1m² de parede.

Sistema Construtivo	Material	Geração de Resíduo (kg/m ²)		Total (kg/m ²)	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Bloco cerâmico	Bloco	4,68	24,33	15,79	46,56
	Assentamento	1,61	3,23		
	Reboco	9,5	19		
Bloco de concreto	Bloco	4,68	12,48	15,09	33,30
	Assentamento	0,91	1,82		
	Reboco	9,5	19		
LSF	Aço	0,20	0,67	1,34	4,25
	OSB	0,66	1,18		
	Placa de gesso	0,48	0,87		
	Placa cimentícia	0	1,53		
	Lã de rocha	0	0		
LWF	Madeira	0,41	1,23	1,55	4,81
	OSB	0,66	1,18		
	Placa de gesso	0,48	0,87		
	Placa cimentícia	0	1,53		
	Lã de rocha	0	0		

Figura 8. Geração de resíduos de construção (kg/m²). Fonte: autores

Na quantificação dos resíduos gerados, o sistema de vedação em Light Steel Framing alcançou o melhor resultado, seguido pelo Light Wood Framing, com valores bastante próximos. O fato de ambos os sistemas construtivos serem leves e pré-fabricados contribui para a redução das perdas e desperdícios de materiais. Isso resultou em uma variação entre 1,34 e 4,25 kg/m² para o LSF e entre 1,55 e 4,81 kg/m² para o LWF. Além disso, a alta taxa de reciclabilidade do aço o torna vantajoso não só no quesito de emissões de CO₂, mas também para a geração de resíduos.

Ao contrário dos resultados obtidos para as emissões de CO₂, nos quais o sistema convencional de blocos cerâmicos apresentou um melhor desempenho quando

comparado aos blocos de concreto, na quantificação da geração de resíduos, esse sistema apresentou o pior resultado, atingindo a quantidade máxima de 46,56 kg/m². Além deste aspecto negativo, a informalidade na produção dos blocos cerâmicos assume valores significativos, pois, de acordo com o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS, 2014), somente os processos de extração da argila para esta cadeia já ultrapassam 55% de informalidade. Isso implica em diversos problemas, como a gestão de resíduos inadequada e a falta de controle de processos.

Pouco abaixo do sistema convencional de blocos cerâmicos, o sistema de blocos de concreto alcançou um máximo de 33,30 kg/m². A menor quantidade de resíduos gerados pelos blocos de concreto em comparação com os blocos cerâmicos, mesmo sendo mais pesado, ocorre devido ao cimento utilizado em sua produção, que torna o componente mais resistente.

As medidas geralmente adotadas para reduzir as perdas em um sistema convencional de blocos cerâmicos, bem como em blocos de concreto, incluem a capacitação de mão de obra, o uso de escoramento metálico, a coordenação modular, entre outras. No entanto, observa-se que, mesmo ao adotar os valores mínimos de perdas para esses sistemas construtivos, a quantidade de resíduos gerados é consideravelmente superior quando comparada com os sistemas construtivos pré-fabricados.

As figuras 9 e 10 sintetizam os resultados obtidos de emissões de CO₂ e geração de resíduos sólidos em forma gráfica.

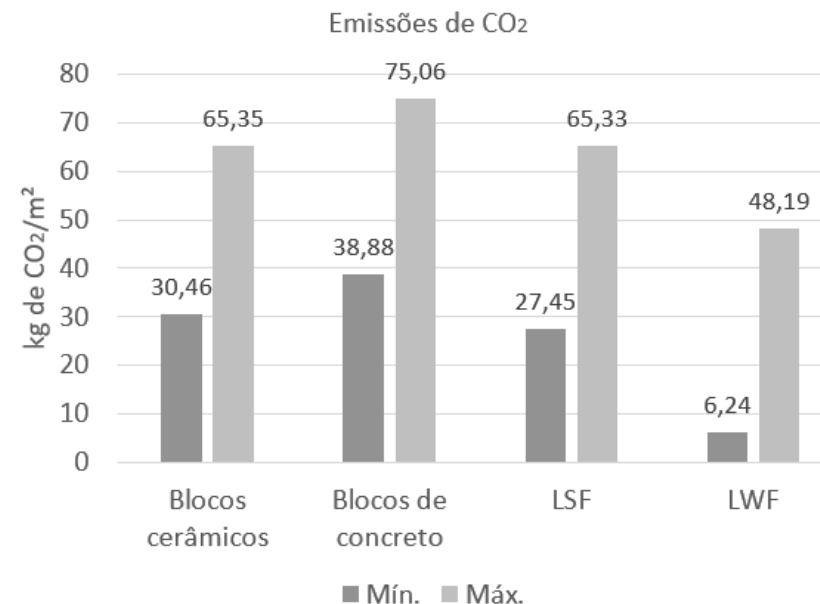


Figura 9. Gráfico das emissões de CO₂. Fonte: autores

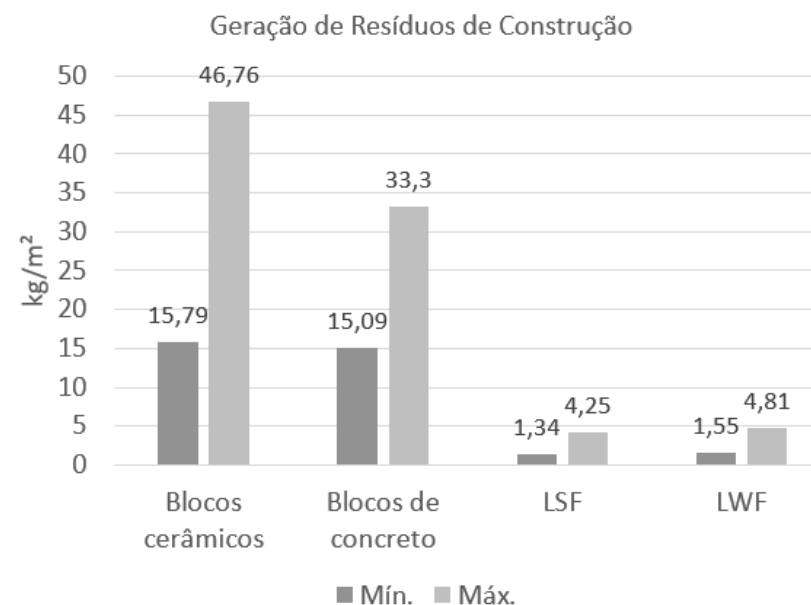


Figura 10. Gráfico da geração de resíduos de construção. Fonte: autores

Ao multiplicar os resultados obtidos pela área de parede, foram encontradas as emissões totais e a quantidade total de resíduos gerados pelo edifício, conforme a figura 11. As variações entre as quantidades mínimas e máximas resultaram em valores maiores que 100% em todos os cenários.

Sistema Construtivo	Emissão (t de CO ₂)		Geração de Resíduos (t)	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Bloco cerâmico	11,89	25,51	6,16	18,18
Bloco de concreto	15,18	29,31	5,89	13,00
LSF	10,71	25,51	0,52	1,65
LWF	2,43	18,82	0,60	1,87

Figura 11. Emissões e geração de resíduos totais para a construção do edifício. Fonte: autores

Conclusão

Observa-se que a madeira desempenhou um papel importante na análise, tornando o sistema Light Wood Framing capaz de reduzir consideravelmente as emissões de CO₂, bem como a geração de resíduos sólidos. Isso faz do reflorestamento em larga escala uma alternativa viável para diminuir os impactos causados pelo sistema produtivo da indústria da construção civil. Conforme demonstrado na Tabela 6, um único edifício desse porte construído com o sistema LWF emite, em média, 2,43 toneladas de CO₂ ao empregar madeira de reflorestamento e, ao mesmo tempo, gera uma quantidade de resíduos que varia entre 600 e 1.870 quilogramas. Isso pode ser bastante significativo quando comparado aos demais sistemas construtivos, como a alvenaria de blocos de concreto, por exemplo, que apresentou uma variação de 15,18 a 29,31 toneladas de CO₂ e de 5,89 a 13 toneladas de resíduos gerados. Entretanto, para a eficácia da aplicação do sistema LWF, é necessário que os profissionais estejam cientes da procedência da madeira e dos métodos de produção associados. Isso é essencial para evitar o uso de matéria-prima com grandes impactos durante os processos florestais anteriores à construção.

No geral, torna-se nítido que os sistemas construtivos pré-fabricados apresentam desempenho significativamente maiores que os sistemas construtivos artesanais. Isso destaca a importância de investimento na implementação desses métodos de construção, incluindo a qualificação da mão de obra e medidas para reduzir os

custos desses materiais, uma vez que as alvenarias de blocos ainda apresentam vantagens ao contabilizar esses aspectos.

Observa-se, por fim, que o aumento do desempenho ambiental dos edifícios depende de uma maior transparência sobre os processos de fabricação e do acesso a indicadores ambientais relacionados aos materiais, ações fiscais mais rigorosas, investimento em reflorestamento e redução das perdas e desperdícios na fase construção. Muitos desses fatores podem ser considerados durante o processo de projeto de edificações para que seja possível realizar um planejamento estratégico do uso de materiais e, assim, produzir edificações mais sustentáveis.

Referências

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270-1: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria – Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270-1: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria – Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

AURÉLIO, M.; et. al. Mapeamento densitométrico e caracterização da densidade básica de Pinus taeda: estudo de caso fazenda guará no planalto catarinense. In: PULP AND PAPER INTERNATIONAL CONGRESS, 49. São Paulo, 2016. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 2016.

BORGES, R. F. M.; AGOSTINHO, F. Avaliação das eficiências energética, global, e emissões de CO₂ da produção de areia a partir de resíduos da construção civil. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 5, 2015, São Paulo, **Anais...** São Paulo: ACADEMIC WORKS, 2015.

BRASIL. Decreto nº 12.040, de 5 de junho de 2024. Altera o Decreto nº 11.550, de 5 de junho de 2023, que dispõe sobre o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 108, p. 1 - 6, 2024.

BUENO, C.; PEREIRA, L. M.; FABRICIO, M. M. Life cycle assessment and environmental-based choices at the early design stages: an application using building information modeling. **Architectural Engineering and Design Management**, v. 14, n. 5, p. 332 – 346, 2018.

BRUGNERA, R. R.; **Análise integrada de desempenho energético, impacto ambiental e custo: estudo de soluções de fachada para edifícios de escritórios no Brasil**. 2018, 282 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

CALDAS, L. R. **Avaliação do ciclo de vida energético e de emissões de CO₂ de uma edificação habitacional unifamiliar de light steel framing**. 2016, 174 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Nacional de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em:

CALDAS, L. R.; CARVALHO, M. T. M. Avaliação do desempenho de vedações verticais utilizando o Processo de Análise Hierárquica na tomada de decisão. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 9, n. 2, p. 109-121, 2018.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D. ARAÚJO, E. D. G. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. **BNDES Setorial**, v. 41, p. 181 – 236, 2015.

CBCS – Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (2014) – **Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas: subsídios para a promoção da construção civil Sustentável**. Brasil, versão 1, p. 1 – 110, 2014.

COSTA, B. L. C. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. 2012, 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

DAMINELI, B, L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. 2013, 237 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

EVANGELISTA, P. P. A. **Desempenho ambiental na construção civil: parâmetros para aplicação da avaliação do ciclo de vida em edificações residenciais brasileiras**. 2017. 255 f. Tese (Doutorado em Energia e Ambiente) – Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017.

FERRAZ, C.; DA SILVA, M. M.; CHAVES, J.; AIELLO, L.; DA SILVA, G.; DE MEDEIROS, G.; RIBEIRO, A. Environmental Impacts of Mechanized Timber Harvesting in Eucalyptus Plantations in Brazil. **Forests**, v. 15, n. 1291, 9. 1 – 17, 2024

FERRO, F.; SILVA, D.; ICIMOTO, F.; LAHR, F.; GONZÁLEZ-GARCÍA, S. Environmental Life Cycle Assessment of industrial pine roundwood production in Brazilian forests. **The Science of the total environment**, v. 640-641, p. 599 – 608, 2018.

FREITAS, A. R.; et al. Análise de desempenho acústico de soluções em paredes de geminação aplicadas em obras de alvenaria estrutural cerâmica. In: **ENCONTRO DA SOBRAC**, 30, Natal, 2023 Anais... Natal: SOBRAC, 2023.

GUIMARÃES, K. R. L. **Análise do atendimento aos requisitos ambientais: um múltiplo estudo de caso nas indústrias de cerâmica vermelha do estado de Pernambuco**. 2017. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, 2017.

IAB – Instituto Aço Brasil. Anuário Estatístico (2023) – 1. Siderurgia – estatística – Brasil. ISSN 1806-3195, 84 p. Rio de Janeiro – Brasil, 2023.

IAB – Instituto Aço Brasil. Relatório de Sustentabilidade (2018) – 1. Equipe técnica do Instituto Aço Brasil, Rio de Janeiro – Brasil, 2018.

KOZLOSKI, C. L. **Emissão de CO₂ de materiais de construção civil no Brasil: estimativa na etapa projetual de edificações**. 2020, 273 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo) Programa de pós-graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

LANA, T. A. C.; PEREIRA, A. F. ACV simplificada e análise de emissões de CO₂ em sistemas de vedação arquitetônica. **Mix Sustentável**. Florianópolis, v. 6, n. 1, p. 145 – 162, 2020.

MARTINEZ-ROCAMORA, A. M.; SÓLIS-GUZMÁN, J.; MARRERO, M. LCA data-bases focused on construction materials: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 565 – 573, 2016.

OLIVEIRA, E. **Contribuição para análise do ciclo de vida no ambiente construído visando a energia e o CO₂ embutidos no sistema construtivo wood frame**. 2016, 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia da Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

OLIVEIRA, L. S. **Avaliação do ciclo de vida de blocos de concreto do mercado brasileiro: alvenaria e pavimentação**. 2015, 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

OLIVEIRA, V. C. H. C.; et. al. Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 167-181, 2014.

PUNHAGUI, K. R. G. **Potencial de reducción de las emisiones de CO₂ y de la energía incorporada en la construcción de viviendas en Brasil mediante el incremento del uso de la madera**. 2014. 291 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa Ámbitos de Investigación en la Energía y el Medio Ambiente en la Arquitectura, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2014.

QUINTANA, A. et. al. Comparative Life Cycle Assessment of gypsum plasterboard and a new kind of bio-based epoxy composite containing different natural fibers. **Journal of a Cleaner Production**, v. 185, p. 408 – 420, 2018.

SENA, P. C. P. **Automação de processos de projeto e programação em BIM: dynamo, python e C#**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

SILVA, H. C.A.; SANTOS, V. F.; LOPES, S. C. Estudo comparativo da emissão de CO₂ e energia embutida entre estruturas em alvenaria e em steel frame. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 14, n. 4, p. 164 – 175, 2022

SILVA, W. C.; SANTOS, G. O.; ARAÚJO, W. E. L. Resíduos sólidos da construção civil: caracterização, alternativas de reuso e retorno econômico. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**. Florianópolis, v. 6, n. 2, p. 286 – 301, 2017.

SPECK, J. A. **Análise do desempenho de placas cimentícias através da adição de fibras e telas, visando a redução de deformações térmicas e patologias**. 2014, 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

TABELA DE COMPOSIÇÃO DE PREÇOS PARA ORÇAMENTOS (TCPO). TCPO 14. 14 ed. São Paulo: Pini, 2012.

TABORIANSKI, V. M.; PRADO, R. T. A. Methodology of CO₂ emission evaluation in the life cycle of office building façades. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 33, n. 1, p. 41-47, 2012.

VEFAGO, L. H. M. **El concepto de reciclabilidad aplicado a los materiales de construcción y a los edificios: propuesta de índices para evaluar la reciclabilidad de los sistemas constructivos**. Tesis (Doctorado en Arquitectura) – Programa Àmbits de Recerca en l'Energia i el Medi Ambient a l'Arquitectura del Departament de Construccions Arquitectòniques I, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2012. Disponível em: <<https://www.tdx.cat/handle/10803/83639#page=1>>