

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE A SUSTENTABILIDADE DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL COM FOCO NOS MATERIAIS DE TRÊS SISTEMAS CONSTRUTIVOS DIFERENTES: ALVENARIA CONVENCIONAL, PAREDES DE CONCRETO E *WOOD-FRAME*¹

COMPARATIVE STUDY BETWEEN THE SUSTAINABILITY OF SOCIAL HOUSING FOCUSING ON MATERIALS FROM THREE DIFFERENT CONSTRUCTION SYSTEMS: CONVENTIONAL MASONRY, PRECAST CONCRETE HOUSE AND *WOOD-FRAME*

Cristian Moreira de Souza*  E-mail: cristian.moreira.souza@posgrad.ufsc.br

María Ángeles Lobo Recio**  E-mail: maria.lobo@ufsc.br

*Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Araranguá, SC, Brasil.

Resumo: Construir habitações de interesse social sustentáveis para uma população crescente desafia as políticas públicas e a indústria da construção civil. O governo federal visa zerar o déficit habitacional até 2026, fornecendo dois milhões de unidades habitacionais. Nesse contexto, uma pesquisa bibliográfica em bases de dados foi planejada para propor, do ponto de vista da sustentabilidade, o sistema construtivo mais adequado para a construção das habitações de interesse social: *Wood-Frame*, Paredes de Concreto ou Alvenaria Convencional. Foram estudados parâmetros sociais, ambientais e econômicos. Os parâmetros sociais foram estudados qualitativamente, onde foram levados em consideração a limitação geográfica, aceitação social, durabilidade, manutenção, conforto térmico e acústico, segurança contra o fogo e tempo de execução. Entre os aspectos ambientais, foram quantitativamente calculados o CO₂ emitido e a energia incorporada para cada material, e qualitativamente a renovabilidade, desperdício, resíduos, descarte, reciclagem e impactos ambientais. Em seguida foram elaboradas tabelas de score dos parâmetros estudados numa tentativa de estabelecer a sustentabilidade. O estudo econômico foi quantitativo. Por fim, o sistema construtivo mais sustentável foi o Alvenaria Convencional. Com o custo de 2 milhões de habitações em Alvenaria Convencional, poderiam ser atendidas apenas 1.051.490 famílias com habitações em *Wood-Frame* (53%). Também foi possível concluir em quais parâmetros cada material destaca-se menos, para o possível desenvolvimento futuro de soluções para melhorar o atendimento dessa elevada demanda de materiais.

Palavras-chave: Sustentabilidade. Habitação de interesse social. Sistemas construtivos.

¹ Estudo inédito. Pesquisa financiada pelo Programa de Assistência Financeira Estudantil do Ensino Superior de Santa Catarina. Resultado de dissertação de mestrado acadêmico em Energia e Sustentabilidade.

Abstract: Providing sustainable social housing for a growing population challenges public policies and the construction industry. The federal government aims to eliminate the housing deficit by 2026, providing two million housing units. In this context, a bibliographic research in databases was planned to propose, from the point of sustainability, the most suitable construction system for building social interest housing: *Wood-Frame*, Precast Concrete House, or Conventional Masonry. Social, environmental, and economic parameters were studied. The social parameters were qualitatively and quantitatively analyzed: geographical limitation, social acceptance, durability, maintenance, thermal and acoustic comfort, fire safety, and construction time. Among the environmental aspects, the CO₂ emitted and the energy incorporated for each material were quantitatively calculated, and the renewability, waste, residues, disposal, recycling, and environmental impacts were qualitatively assessed. Subsequently, score tables of the studied parameters were created in an attempt to establish sustainability. The economic study was quantitative. In the end, the most sustainable construction system was found to be Conventional Masonry. With the cost of 2 million houses in Conventional Masonry, only 1,051,490 families could be served with *Wood-Frame* houses. It was also possible to conclude which parameters each material stands out the least, for the possible future development of solutions to improve the service of this high demand for materials.

Keywords: Sustainability. Social housing. Construction systems.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, uma demanda grande de materiais de construção é gerada pelo programa Minha Casa, Minha Vida (MCMV), que é crucial para a redução do déficit habitacional no país. A rápida urbanização intensificou os déficits habitacionais globais (Moghayedi, 2023) enquanto o acesso à moradia digna é um direito humano fundamental (Omer, 2020). O Minha Casa, Minha Vida (MCMV) representou 78% das unidades vendidas em 2018, segundo a Fundação Getúlio Vargas (FGV) para a Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias (Abrainc). A entrega de dois milhões de unidades e R\$ 105,65 bilhões em investimentos é a meta que governo brasileiro estabeleceu, em 2023, para zerar o déficit habitacional até 2026 (Governo Federal, 2023).

Em 2020, o consumo global de materiais de construção foi significativo: 10¹⁰ ton de concreto, 10⁹ ton de madeira estrutural e 10⁹ ton de alvenaria (Ashby, 2021). No Brasil, em 2021, foram vendidas 64,7 milhões de toneladas de cimento para concreto (ABCP, 2022), a produção média de madeira foi de 40,5 m³/há em 7,8 milhões de hectares (Shigue, 2018) e as indústrias de cerâmica vermelha produziram cerca de 5,9 bilhões de blocos cerâmicos (ANICER, 2024).

Internacionalmente, as construções atuais, embora cada vez mais eficientes, carecem de uma análise comparativa numa perspectiva holística (Marrero, 2024).

Segundo o mesmo autor, os esforços centram-se na atualidade em minimizar o consumo de água e energia através da concepção de sistemas mais eficientes; porém, outra grande parcela deste consumo, causada indiretamente pelos processos de produção dos materiais de construção, é geralmente desconsiderada.

No Brasil, o programa Minha Casa, Minha Vida (MCMV) gera emissões de CO₂ e consome energia incorporada durante sua produção à medida que requer somas de grande porte de materiais. Segundo Ashby (2021), a produção de materiais é uma fonte importante de poluição, liberando cerca de 20% das emissões globais de CO₂, causando danos globais por provocar a intensificação do efeito estufa e as consequentes mudanças climáticas. A energia incorporada é a energia utilizada durante a fase de fabricação de uma construção, compreendendo o conteúdo energético de todos os materiais utilizados na construção do mesmo (Ramesh; Prakash; Shukla, 2010). À medida que os edifícios se tornam mais eficientes energeticamente e emitem menos dióxido de carbono (CO₂) durante o seu funcionamento, é cada vez mais urgente concentrar-se mais na energia incorporada, o que inclui a produção de materiais (Lu *et al.*, 2024).

As construções também têm amplo impacto econômico, ambiental e social ao longo de seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até a demolição, passando por todas as etapas de produção, transporte, elaboração de projetos, execução e manutenção (Invidiata; Lavagna; Ghisi, 2018). O impacto ambiental do setor da construção é enorme, sendo responsável pela utilização de 40% dos recursos naturais extraídos nos países industrializados, pelo consumo de 70% da energia elétrica e de 12% da água potável, e pela produção de 45–65% dos resíduos depositados em aterros (Omer, 2020).

Nesse sentido, para mitigar esses problemas, o setor da construção civil precisa se reinventar em direção a modelos mais sustentáveis (Marques, 2022). O conceito de sustentabilidade abrange ações presentes que não limitem as futuras opções econômicas, sociais e ambientais. Significa utilizar os recursos naturais sem esgotá-los, garantindo-os para as próximas gerações (Brundtland, 1991). Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas

(ONU), criados em 2015, incentivam as empresas a abordarem os desafios da sustentabilidade (Omer, 2020).

Em países como Canadá, EUA e Chile o sistema construtivo Wood Frame é comumente utilizado – 90% no Canadá, 75% nos EUA e 60% no Chile (Zanoto; Rotter; Campos, 2018). No Japão e nos países escandinavos, a construção pré-fabricada em concreto ocupa uma posição vantajosa, sendo possível conferir seu avanço tecnológico nos últimos anos (ABCIC, 2020). Na construção civil brasileira, o sistema construtivo Alvenaria Convencional é o método mais empregado.

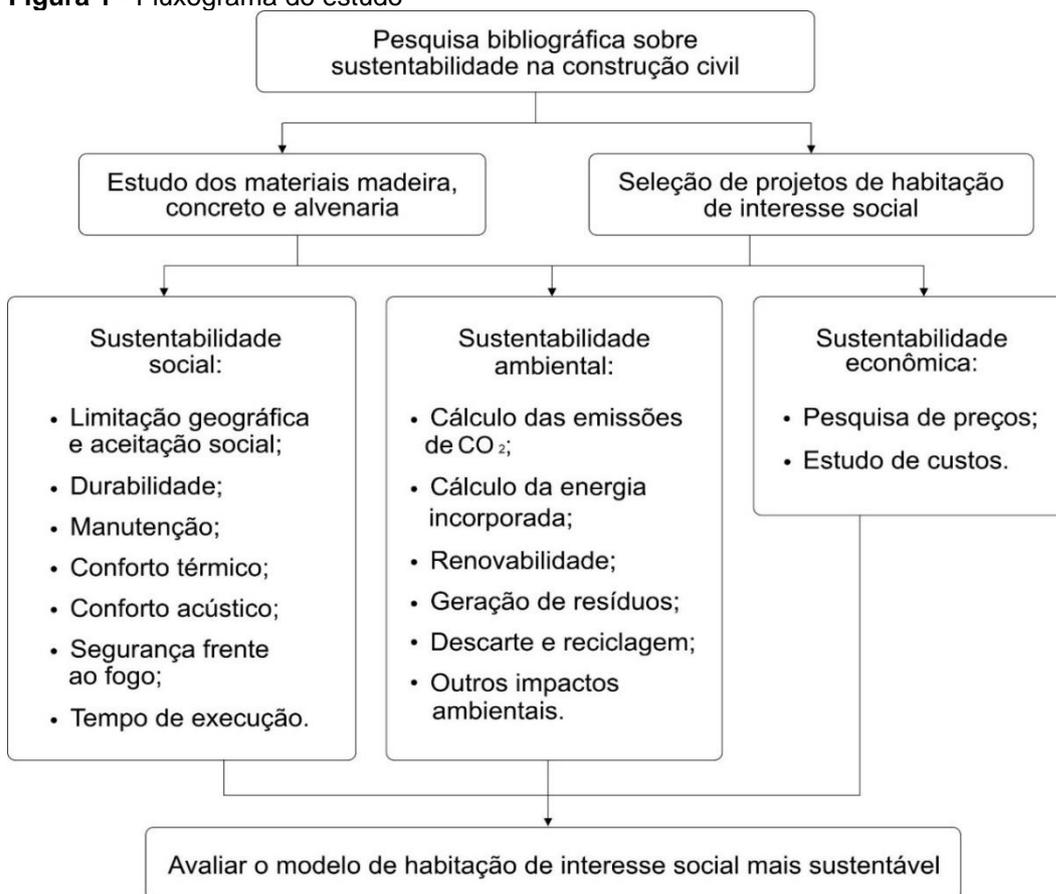
Sendo assim, a presente pesquisa propõe uma análise abrangente de diferentes sistemas construtivos utilizados na construção de habitações de interesse social no Brasil: Alvenaria Convencional, *Wood-Frame* e Paredes de Concreto, considerando não apenas os custos de construção, mas também os aspectos de sustentabilidade social e ambiental. Esses aspectos relacionados aos materiais e aos sistemas construtivos são parâmetros centrais que precisam ser conhecidos para o processo de tomada de decisão.

Dessa forma, a presente pesquisa busca oferecer subsídios para formuladores de políticas públicas, profissionais da construção civil, universidades, escolas e demais partes interessadas na promoção de soluções habitacionais sustentáveis.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As informações sobre sustentabilidade foram coletadas de diversas bases de dados, como Periódicos Capes, Google Acadêmico e ScienceDirect, focando qualitativamente na análise social. A análise ambiental incluiu cálculos quantitativos de CO₂ e energia incorporada, e outros fatores avaliados qualitativamente. A avaliação econômica foi quantitativa. O fluxograma do estudo está na Figura 1, que é apresentada a seguir.

Figura 1 - Fluxograma do estudo

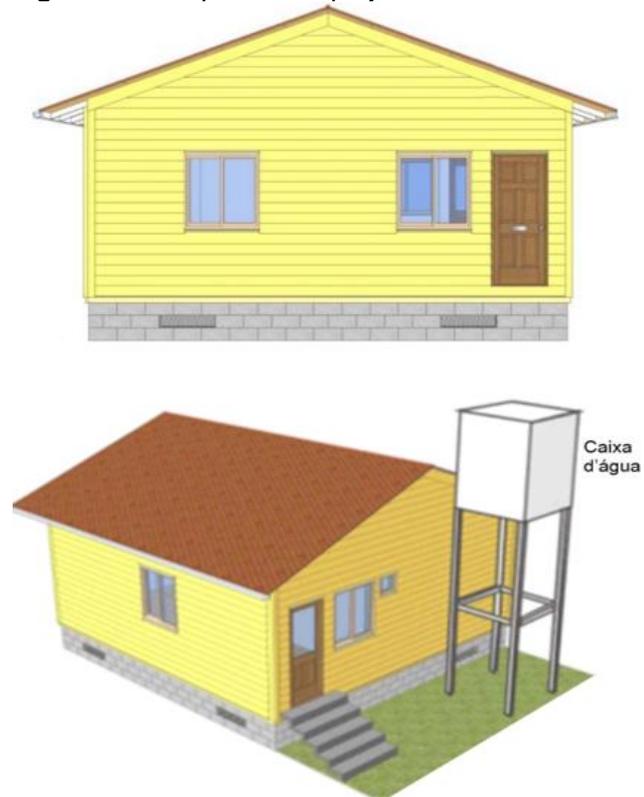


Fonte: Autor (2024).

2.1 Habitações de interesse social selecionadas

Como modelo de habitação de interesse social em *Wood-Frame*, foi selecionado o projeto de Espíndola (2009). A escolha se baseou no fato de tratar-se de uma habitação de interesse social que é muito utilizada no Canadá, EUA e Chile (Zanoto; Rotter; Campos, 2018). Além disso, a sua área é similar as de outros sistemas construtivos encontrados, o que possibilitou a comparação. O trabalho de Espíndola trouxe também o quantitativo de materiais, o que foi essencial para os cálculos dos volumes de madeira e massas que são necessários para os cálculos de emissão de CO₂ e de energia incorporada. As perspectivas e a planta baixa do projeto, com área de 46,24 m², estão nas Figuras 2 e 3, que são apresentadas a seguir.

Figura 2 – Perspectiva do projeto em *Wood-Frame*



Fonte: Espíndola (2009).

Figura 3 - Planta baixa do projeto em *Wood-Frame*



Fonte: Espíndola (2009).

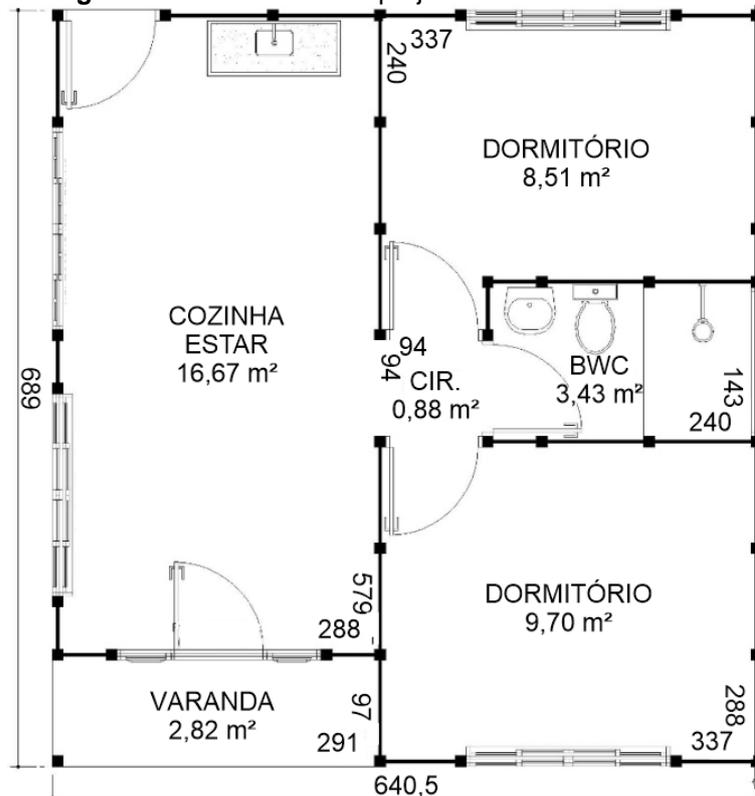
Para Paredes de Concreto, foi selecionado o modelo da Construtora Contempla, que é apresentado nas Figuras 4 e 5 a seguir, com área de 44,13 m², e para Alvenaria Convencional, foi selecionada a mesma planta baixa da Construtora Contempla.

Figura 4 – Projeto em Paredes de Concreto



Fonte: Construtora Contempla (2023).

Figura 5 – Planta baixa do projeto em Paredes de Concreto



Fonte: Construtora Contempla (2023).

2.1.1 Aspectos de Sustentabilidade

Uma pesquisa bibliográfica foi realizada sobre os materiais madeira, concreto e alvenaria cerâmica, abordando aspectos sociais, emissões de CO₂, energia incorporada e outros aspectos ambientais.

A partir das informações obtidas, foram elaboradas tabelas de score dos parâmetros ambientais e sociais estudados, com sinais mais (+) e menos (-), numa tentativa de estabelecer qualiquantitativamente a sustentabilidade dos sistemas construtivos objeto de estudo. Quanto mais sinais mais (+), mais sustentável o sistema é. De acordo com Ashby (2021), no que diz respeito a avaliação de ciclo de vida simplificada, é possível se concentrar nos fatores energia incorporada e emissão de CO₂, que são os que provocam o maior impacto ambiental. Desse modo, foi decidido dar um peso maior aos três fatores que mais contribuem à sustentabilidade da construção: emissões de CO₂, energia incorporada e caráter renovável. Assim, a estes três fatores foi dado peso 2 e aos outros, peso 1.

A determinação de emissão de CO₂ e energia incorporada baseou-se na aplicação de coeficientes específicos, que são apresentados na Tabela 1 a seguir, às massas calculadas dos materiais, obtidas a partir de suas dimensões e quantidades, que constam nas Tabelas 2, 3, 4, as quais são apresentadas a seguir. Foram comparados apenas os materiais diferentes para os três modelos apresentados, já que os demais componentes podem ser compostos por materiais semelhantes.

Tabela 1 – Coeficientes de CO₂ emitido e de energia incorporada para diferentes materiais de construção

Material	CO ₂ emitido (kg/kg)	Energia incorporada (MJ/kg)	Referência
Bloco de concreto	0,061	0,94	Ashby, 2021
Madeira serrada tratada	0,77	8,26	Fischer, 2020
Madeira OSB	1,34	14,32	Fischer, 2020
Placa de gesso acartonado	0,33	6	Ashby, 2021
Concreto armado	0,21	2,49	Ashby, 2021
Concreto	0,095	1,3	Ashby, 2021
Bloco cerâmico	0,22	2,8	Ashby, 2021
Argamassa	0,061	0,94	Ashby, 2021

Fonte: Autor (2024).

Tabela 2 – Estimativa de materiais para a habitação de interesse social em *Wood-Frame* (continua)

Fundação			
Material		Quantidade	
Blocos de concreto estrutural 19 cm x 19 cm x 39 cm		158	un.
Blocos canaleta de concreto 19 cm x 19 cm x 39 cm		24	un.
Piso			
Material		Quantidade	
Soleira 5 cm x 15 cm		27,20	m
Vigas I banzo 3 cm x 6 cm		51,20	m
suporte alma OSB 18mm x 20cm		12,80	m
Vigas I piso banzo 3cm x 6cm		486,00	m
alma OSB 18mm x 20cm		121,50	m
Fecham. lateral OSB 25mm x 20cm		27,20	m
Enrijecedores 5 cm x 7 cm		17,34	m
Chapa OSB piso 15,5 mm		46,50	m ²
Paredes			
Meio painel fechado (60 cm)		5	un.
Montante 4 cm x 9 cm		8,15	m
Travessa 4 cm x 9 cm		1,20	m
Chapa OSB parede 12 mm 59,7 cm x 271,7 cm		1	un.
Gesso acartonado 12 mm 59,7 cm x 271,7 cm		1	un.
Meio painel janela (60 cm)		1	un
Montante 4 cm x 9cm		11,87	m
Travessa 4 cm x 9 cm		1,20	m
Verga 4 cm x 9 cm		0,52	m
Contra-verga 4 cm x 9 cm		0,44	m
Chapa OSB parede 12mm 59,7 cm x 271,7 cm		1	un.
Gesso acartonado 12 mm 59,7 cm x 271,7 cm		1	un.
Janela madeira basculante 40 cm x 60 cm		1	un.
Painel fechado (120 cm)		3	un.
Montante 4 cm x 9 cm		10,87	m
Travessa 4 cm x 9 cm		2,40	m
Chapa OSB parede 12 mm 119,7 cm x 271,7 cm		1	un.
Gesso acartonado 12 mm 119,7 cm x 271,7 cm		1	un.
Painel janela (120 cm)		3	un.
Montante 4 cm x 9cm		12,83	m
Travessa 4 cm x 9 cm		2,40	m
Verga 4 cm x 9 cm		1,20	m
Contra-verga 4 cm x 9 cm		1,04	m
Chapa OSB parede 12 mm 119,7 cm x 271,7 cm		1	un.
Gesso acartonado 12 mm 119,7 cm x 271,7 cm		1	un.
Janela madeira 94 cm x 104 cm duas folhas abrir		1	un

Painel porta (120 cm)	5	un.
Montante 4 cm x 9cm	16,22	m
Travessa 4 cm x 9 cm	2,54	m
Verga 4 cm x 9 cm	0,88	m
Chapa OSB parede 12 mm 119,7 cm x 271,7 cm	1	un.
Gesso acartonado 12 mm 119,7 cm x 271,7 cm	1	un.
porta madeira interna 74 cm x 214 cm	3	un
porta madeira externa 74 cm x 214 cm	2	un
Painel duplo fechado e fechado (240 cm)	8	un.
Montante 4 cm x 9cm	19,02	m
Travessa 4 cm x 9 cm	4,80	m
Chapa OSB parede 12 mm 119,7 cm x 271,7 cm	2	un.
Gesso acartonado 12 mm 119,7 cm x 271,7 cm	2	un.
Painel duplo fechado e janela (240 cm)	2	un.
Montante 4 cm x 9cm	18,93	m
Travessa 4 cm x 9 cm	4,79	m
Verga 4 cm x 9 cm	1,14	m
Contra-verga 4 cm x 9 cm	1,06	m
Chapa OSB parede 12 mm 119,7 cm x 271,7 cm	2	un.
Gesso acartonado 12 mm 119,7 cm x 271,7 cm	2	un.
Janela madeira 94 cm x 104 cm duas folhas abrir	1	un
Travessa superior dupla 4 cm x 9 cm	41,6	m
Revestimento externo		
Impermeabilizante <i>tyvek</i>	84	m ²
Ripas 4 cm x 5 cm	68	m
<i>Siding</i> 20 cm x 2,5 cm	216	m

Fonte: Espíndola (2019).

Tabela 3 – Volumes de concreto para a habitação de interesse social em Paredes de Concreto

Item	Quantidade	Volume unitário (m ³)	Volume total (m ³)
Pilar (uni)	42	0,032	1,34
Fundação (uni)	32	0,28	4,45
Viga superior (m)	41,3	0,01	0,41
Placas (uni)	-	-	3,42
Viga inferior (m)	47	0,057	2,68
Contrapiso (m ²)	44,5	0,05	2,23

Fonte: Adaptado de Construtora Contempla (2024).

Tabela 4 – Coeficientes de estimativa de materiais por área de construção para habitação de interesse social em Alvenaria Convencional

Item	Unidade	Coeficiente
Estrutura de concreto	m ³ / m ²	0,15
Alvenaria externa	m ² / m ²	0,90
Alvenaria interna	m ² / m ²	1,20
Revestimento externo	m ² / m ²	0,75
Revestimento interno	m ² / m ²	2,90

Fonte: Adaptado de Daré (2023).

2.1.2 Estudo Econômico

O estudo abordou custos de materiais e mão de obra para cada sistema construtivo. Foram coletados três orçamentos por sistema, analisando preços médios a partir do metro quadrado. A durabilidade e manutenção também foram consideradas para avaliar a meta governamental de entregar dois milhões de habitações de interesse social.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Aspectos sociais

Em relação aos aspectos sociais, a pesquisa foi a respeito da aceitação social dos sistemas construtivos, limitação geográfica das empresas, durabilidade, manutenção, isolamento térmico e acústico, segurança frente ao fogo e tempo de execução da obra. Desta maneira, foi possível obter uma visão de conjunto das vantagens e desvantagens do uso de cada material na construção civil, bem como de sua sustentabilidade.

Nesse sentido, é amplamente aceito socialmente o sistema construtivo Alvenaria Convencional por parte dos usuários, arquitetos e engenheiros, que podem oferecer resistência aos demais sistemas por falta de conhecimento (SIENGE, 2019). Diferentemente, o *Wood-Frame* e o Paredes de Concreto enfrentam desafios de aceitação social e limitação geográfica que pode ser determinante, pois nem toda localidade é atendida por empresas desses sistemas construtivos.

Quanto à durabilidade, o Alvenaria Convencional e o Paredes de Concreto são os mais sustentáveis, com vida útil de até 100 anos para o Alvenaria Convencional (Gonçalves e Lacerda, 2022) e mínima de 50 anos para o Paredes de Concreto (Lopes; Oliveira; Cascudo, 2022), em contraste com o *Wood-Frame*, cuja durabilidade máxima é de 50 anos (Prazeres; Alberti; Arakawa, 2022). Além disso, em uma consulta elaborada pelo autor, diversos fornecedores de chapa de madeira OSB² deram garantia do produto por apenas 20 anos enquanto outros fornecedores de madeira serrada tratada, em caso de uso exterior, fora de contato com o solo, e sujeitas às intempéries, deram prazo de 5 anos de garantia contra fungos apodrecedores e 15 anos contra cupins. Por outro lado, o concreto é extremamente durável, resistindo a fatores como fogo, umidade e pragas, resultando em construções com maior longevidade em relação a madeira e menor manutenção. (Khan; McNally, 2023).

Embora melhor conforto térmico e acústico seja proporcionado pelo *Wood-Frame*, sua resistência ao fogo é inferior (Roza; Favretto, 2023). Em termos de tempo de execução, o Paredes de Concreto e o *Wood-Frame* são mais eficientes que Alvenaria Convencional. As estruturas pré-fabricadas do sistema Paredes de Concreto podem reduzir o prazo de execução entre 25% a 50% e o *Wood-Frame* tem como vantagem a pré-construção em ambiente industrializado, reduzindo relativamente o tempo de obra (ABCIC, 2024; Gomes; Lacerda, 2014;).

A Tabela 5, que é apresentada a seguir, foi elaborada com os scores relacionados aos parâmetros sociais. O Alvenaria Convencional é visto como a mais sustentável socialmente, devido à sua durabilidade e menor necessidade de manutenção, essenciais para a sustentabilidade a longo prazo. A durabilidade e manutenção foram importantes na avaliação, destacando a superioridade da Alvenaria Convencional sobre o *Wood-Frame*, que exige mais manutenção e tem metade da durabilidade, o que limita enormemente o conceito de sustentabilidade, que prioriza o uso dos recursos para as gerações futuras.

² A norma ABNT NBR 16143 (2013, p. 3) define painel OSB como chapa de partículas ou painel formada por camadas de partículas ou feixes de fibras com resinas fenólicas, que são orientados em uma mesma direção e então prensados para sua consolidação.

Tabela 5 - Parâmetros de sustentabilidade social para os três sistemas construtivos

Fatores	Paredes de Concreto	Wood-Frame	Alvenaria Convencional
Limitação geográfica e aceitação social	-1	-1	+1
Durabilidade e manutenção	+1	- 2	+ 2
Desempenho térmico e acústico	-1	+1	-1
Segurança frente ao fogo	+1	-1	+1
Tempo de execução	+1	+1	-1
Total (+)	+3	+2	+4
Total (-)	-2	-4	-2
Total	+1	-2	+2

Fonte: Autor (2024).

3.2 Aspectos ambientais de sustentabilidade

No que diz respeito aos aspectos ambientais, a pesquisa focou na emissão de CO₂, energia incorporada, caráter renovável (ou não) dos materiais, desperdício e resíduos da construção, reciclagem, descarte e impactos ambientais dos materiais selecionados. Desta maneira, foi possível obter uma visão de conjunto das vantagens e desvantagens do uso de cada material na construção civil, bem como de sua sustentabilidade.

3.2.1 Determinação das emissões de CO₂ e da energia incorporada dos materiais

Para o modelo de habitação de interesse social em *Wood-Frame* as quantidades totalizaram 4.169,25 kg de CO₂ emitido e 48.947 MJ de energia incorporada. Os cálculos de massas, volumes de madeira e blocos de concreto, além da energia incorporada e CO₂ emitido para materiais como madeira serrada, OSB e gesso, estão detalhados na Tabela 6, que é apresentada a seguir.

Tabela 6 - Cálculo das massas, emissão de CO₂ e energia incorporada para a habitação de interesse social em *Wood-Frame*

Material	Densidade (kg/m ³)	Volume total (m ³)	Massa total (kg)	Emissões de CO ₂ (kg)	Energia incorporada (MJ)
Madeira OSB	500	2,745	1.375,00	1.842,5	19.690
Madeira serrada	500	4,374	2.185,00	1.682,45	18.048
Gesso acartonado	1000	1,400	1400,00	462	8.400
Blocos de concreto*	-	-	2.988,60	182,30 kg	2.809,28 MJ
Total				4.169,25	48.947,28

*158 blocos de 16,5kg e 24 de 15,9kg

Fonte: Autor (2024).

Em relação ao modelo em Paredes de Concreto, as quantidades totalizaram 59.088,75 MJ de energia incorporada e 4.628,55 kg de CO₂ emitido. Os cálculos necessários foram realizados de maneira análoga ao modelo anterior como detalhados na Tabela 7, que é apresentada a seguir.

Tabela 7 – Cálculo das massas, emissão de CO₂ e energia incorporada da habitação de interesse social em Paredes de Concreto

Item	Volume Total (m ³)	Densidade (kg/m ³)	Massa (kg)	Emissões de CO ₂ (kg)	Energia incorporada (MJ)
Pilar (uni)	1,34				
Viga Superior (m)	0,41				
Concreto Armado		2.500	11.075	2.325,75	27.576,75
Viga Inferior (m)	2,68				
Total	4,43				
Fundação (uni)	4,45				
Concreto		2.400	24.240	2.302,80	31.512,00
Placas (uni)	3,42				
Contrapiso (m ²)	2,23				
Total	10,1			4.628,55	59.088,75

Fonte: Adaptado de Construtora Contempla (2024).

Para o modelo em Alvenaria Convencional, as quantidades totalizaram 72.444,28 MJ para energia incorporada e 5.816,43 kg para a emissão de CO₂. Os cálculos foram realizados de maneira semelhante aos anteriores conforme podem ser vistos na Tabela 8, que é apresentada a seguir. A Tabela 9 a seguir resume o total de energia incorporada e CO₂ para os três tipos de habitações de interesse social.

Tabela 8 – Cálculo das massas, emissão de CO₂ e energia incorporada da habitação de interesse social em Alvenaria Convencional

	Volume Total (m³)	Densidade (kg/m³)	Massa (kg)	Emissões de CO₂ (kg)	Energia incorporada (MJ)
Concreto armado da estrutura	6,98	2500	17.437,5	3.661,87	43.419,38
Alvenaria externa e interna*	-	-	7.075,7	1.556,65	19.811,96
Revestimento externo e interno	4,67	2100	9.801	597,91	9.212,94
Total				5.816,43	72.444,28

*3.537,86 tijolos de 2kg cada

Fonte: Autor (2024).

Tabela 9 – Resumo da energia incorporada e da emissão de CO₂ para os três tipos de habitação de interesse social

Sistema Construtivo	Emissão de CO₂ (kg)	Energia incorporada (MJ)
Alvenaria Convencional	5.816,43	72.444,28
Paredes de Concreto	4.628,55	59.088,75
<i>Wood-Frame</i>	4.169,25	48.947,28

Fonte: Autor (2024).

Ao avaliar a sustentabilidade através da Tabela 9, verifica-se que *Wood-Frame* tem a menor emissão de CO₂ e energia incorporada, seguido por Paredes de Concreto, com Alvenaria Convencional apresentando os maiores índices. Segundo Fischer (2020), a secagem é a etapa mais intensiva em energia na produção da madeira, onde aproximadamente 78% da energia incorporada provém de fontes renováveis, como a biomassa lenhosa. O processo de tratamento da madeira serrada tratada representa cerca de 5% da energia total incorporada e aproximadamente 2% das emissões de CO₂.

3.2.2 Outros parâmetros de sustentabilidade

No que diz respeito aos aspectos ambientais, o sistema construtivo *Wood-Frame* destaca-se por sua renovabilidade e potencial para uso sustentável de florestas, contrastando com a limitação de outros materiais extraídos de jazidas finitas (John, 2017). Embora a madeira amazônica enfrente desafios de sustentabilidade devido à dificuldade de recuperação florestal após sua extração conforme alguns

autores, a madeira plantada oferece uma alternativa com infraestrutura produtiva mais desenvolvida no Brasil (Punhagui, 2014). Contudo, a elevada demanda por materiais de construção implica na continuidade do uso de vários materiais como concreto e alvenaria.

Em termos de resíduos, o sistema de Paredes de Concreto é o mais eficiente, reduzindo em 81% a geração de resíduos comparado a métodos tradicionais (Zeule; Serra, 2015). As desvantagens do uso do Alvenaria Convencional neste quesito são grandes, principalmente durante a construção da habitação e na desconstrução (quebra de paredes para reparos), as quais geram desperdício e aumento significativo dos resíduos da construção (Gomes; Lacerda, 2014).

No que diz respeito a reciclagem e descarte, o sistema construtivo Paredes de Concreto e o Alvenaria Convencional são os mais sustentáveis (Matuti; Santana, 2019; Nóbrega, 2022). A madeira se destaca negativamente em diversos pontos como, por exemplo, seus resíduos serem combustíveis e conterem materiais tóxicos, bem como existirem poucos incineradores que possuem o licenciamento adequado para essa prática (Candaten, 2021).

Em relação aos impactos ambientais, todos os sistemas construtivos destacaram-se negativamente. Estudos sobre a madeira tratada com CCA mostram que a exposição aos seus componentes – Cobre, Cromo e Arsênico – pode causar sérios problemas ao meio ambiente e a saúde dos seres humanos como câncer de pulmão, leucemia, afetar o fígado e provocar queda de cabelos e unhas, anemia, dermatites, tumores malignos e defeitos genéticos. (Souza; Demenigui, 2017). Na maioria dos países da Comunidade Europeia o mesmo já foi banido. A indústria cimenteira também é uma fonte poluidora e por sua vez geradora de impactos ao meio ambiente e à saúde. Seus impactos vão desde a poluição do ar, na britagem, até a contaminação do solo, água e doenças pulmonares graves, além da irritação dos olhos, ouvidos e fossas nasais (Maury; Blumenschein, 2012). Também é possível destacar diversos pontos negativos nas etapas do processo produtivo dos blocos cerâmicos como a degradação do solo, a poluição do ar pela emissão de CO₂ e os desperdícios em diversas etapas (Freitas; Maciel, 2013).

A análise, considerando a durabilidade de 50, 75 e 100 anos (ver Seção 3.1) para *Wood-Frame*, Paredes de Concreto e Alvenaria Convencional, respectivamente, e para habitações individuais (não em larga escala), está representada na Tabela 10 a seguir. Nesse caso, considerando os aspectos ambientais, ela indica o sistema construtivo *Wood-Frame* como o mais sustentável, seguido do Paredes de Concreto e do Alvenaria Convencional.

Tabela 10 - Indicadores de sustentabilidade ambiental para cada sistema construtivo, considerando a durabilidade de cada sistema construtivo ou considerando a todos com durabilidade de 100 anos

Indicadores	Durabilidades de 50, 75 e 100 anos			Durabilidades de 100 anos		
	<i>Wood-Frame</i>	Paredes de Concreto	Alvenaria Convencional	<i>Wood-Frame</i>	Paredes de Concreto	Alvenaria Convencional
Caráter Renovável	+2	-2	-2	+2	-2	-2
Emissão de CO ₂	+2	0	-2	-2	+2	+2
Energia Incorporada	+2	0	-2	-2	+2	+2
Desperdício	+1	+ 2	-1	+1	+2	-1
Resíduos	+1	+1	-1	+1	+1	-1
Reciclagem e Descarte	-1	+1	+1	-1	+1	+1
Total (-)	-1	-2	-8	-5	-2	-4
Total (+)	+8	+4	+1	+4	+8	+5
Total	+7	+2	-7	-1	+6	+1

Fonte: Autor (2024).

A sustentabilidade dos sistemas construtivos foi avaliada somando os scores ambientais e sociais das Tabelas 5 e 10, conforme a Tabela 11, que é apresentada a seguir. Enfocando a durabilidade de 50, 75 e 100 anos para *Wood-Frame*, Paredes de Concreto e Alvenaria Convencional, respectivamente, e para habitações individuais, o *Wood-Frame* é o mais sustentável, seguido pelo sistema Paredes de Concreto, com o Alvenaria Convencional em terceiro.

Tabela 11 - Indicadores de sustentabilidade social e ambiental para cada sistema construtivo, considerando a durabilidade de cada sistema construtivo ou considerando a todos com durabilidade de 100 anos

Fatores de Sustentabilidade	Durabilidades de 50, 75 e 100 anos			Durabilidades de 100 anos		
	Paredes de Concreto	Wood-Frame	Alvenaria Convencional	Paredes de Concreto	Wood-Frame	Alvenaria Convencional
Social	1	-2	+2	+1	-2	+2
Ambiental	+2	+7	-7	+6	-1	+1
Total	+3	+5	-5	+7	-3	+3

Fonte: Autor, 2024.

Por outro lado, considerando a durabilidade variada dos sistemas construtivos e a construção em larga escala, a análise muda significativamente. Com durabilidades otimistas de 100 anos para Alvenaria Convencional, 75 anos para Paredes de Concreto, e 50 anos para *Wood-Frame*, ajustes na Tabela 9 indicam a necessidade de construir pelo menos duas casas em *Wood-Frame* e 1,33 em Paredes de Concreto para cada casa em Alvenaria ao longo de 100 anos. Nesse sentido, ajustadas pelas durabilidades de 100 anos, a emissão de CO₂ e a energia incorporada, a análise da Tabela 12, que é apresentada a seguir, mostra que o Alvenaria Convencional lidera, seguido por Paredes de Concreto, com *Wood-Frame* em último.

Tabela 12 – Resumo da energia incorporada e da emissão de CO₂ para os três tipos de habitação de interesse social, considerando as suas durabilidades de 100 anos

Sistema Construtivo	Emissão de CO ₂ (kg)	Energia incorporada (MJ)
Alvenaria Convencional	5.816,43	72.444,28
Paredes de Concreto	6.171,40	78.785,00
<i>Wood-Frame</i>	8.338,50	97.894,56

Fonte: Autor (2024).

Em virtude da consideração das durabilidades de 100 anos, além dos ajustes na Tabela 9, que deram origem à Tabela 12, foram necessários ajustes também nos scores ambientais, por conta dessa mudança dos valores de emissão de CO₂ e de energia incorporada de cada sistema. Essa modificação nos scores ambientais é apresentada na Tabela 10. Sendo assim, com esse ajuste, nota-se que Paredes de Concreto é o sistema mais sustentável, com Alvenaria Convencional e *Wood-Frame* em segundo e terceiro lugares, respectivamente. Além disso, quando somados os parâmetros sociais e ambientais, percebe-se que Paredes de Concreto ainda é o

sistema mais sustentável, seguido por Alvenaria Convencional e *Wood-Frame*, conforme apresentado na Tabela 11.

Além disso, a identificação dos materiais que se destacam menos em cada aspecto de sustentabilidade é importante para o possível desenvolvimento futuro de soluções que os aprimorem, possibilitando assim um melhor atendimento à elevada demanda de materiais pelos sistemas Paredes de Concreto e *Wood-Frame*.

Mesmo no cenário otimista, onde materiais de *Wood-Frame* são substituídos a cada 20 anos e considerando o ciclo de corte de 15 anos do pinus, eventualmente a madeira disponível seria usada somente para manutenção de habitações existentes, não para novas construções. Para otimizar o uso da madeira frente à alta demanda construtiva, seria benéfico desenvolver novos preservativos que prolonguem sua durabilidade, possibilitando seu uso em novas habitações e reduzindo emissões de CO₂ e energia incorporada a longo prazo. Também é crucial enfrentar desafios como a necessidade de construtoras em todas localidades, a aceitação social desse sistema e o uso de preservativos não perigosos, que contrastam com os riscos à saúde do CCA e a escassez de incineradores adequados para descarte.

Neste estudo, combinando aspectos sociais e ambientais, o sistema de Paredes de Concreto foi o mais sustentável, apesar da não-renovabilidade. Os seus desafios incluem superar a limitação geográfica e melhorar a aceitação social para a produção em larga escala. Além disso, é importante aprimorar o desempenho térmico e acústico e incentivar o uso desse sistema através de políticas governamentais, como programas sociais e redução de taxas.

A Alvenaria Convencional se destacou como o sistema mais sustentável socialmente e o segundo no geral para habitações de interesse social, limitada pela baixa sustentabilidade ambiental devido ao uso de lenha, poluição das cinzas, CO₂ da queima de tijolos, e o impacto da produção de concreto da estrutura. Melhorias também são necessárias em desempenho térmico, acústico, tempo de construção, e resíduos.

O Quadro 1, que é apresentado a seguir, detalha os parâmetros de sustentabilidade social e ambiental dos sistemas construtivos que necessitam serem aprimorados.

Quadro 1 - Parâmetros de sustentabilidade social e ambiental dos sistemas construtivos que necessitam serem aprimorados

Fatores de sustentabilidade	Indicadores de sustentabilidade	Paredes de Concreto	Wood-Frame	Alvenaria Convencional
Social	Limitação geográfica e aceitação social	x	x	
	Durabilidade e manutenção		x	
	Desempenho térmico e acústico	x		x
	Segurança frente ao Fogo		x	
	Tempo de execução			x
Ambiental	Caráter Renovável			
	Emissão de CO ₂		x	x
	Energia Incorporada		x	x
	Desperdício			x
	Resíduos			x
	Reciclagem e Descarte		x	

Fonte: Autor (2024).

3.3 Aspecto econômico de sustentabilidade

Quando se trata de habitações de interesse social, a análise de custos é muito importante, tendo em vista o número de habitações em larga escala que são construídas com dinheiro público. Por isso o orçamento deve ser determinado, a fim de indicar se a escolha de determinado sistema construtivo é viável ou não. Além disso, a escolha de um método construtivo relativamente mais sustentável em termos econômicos pode possibilitar a maximização do número de unidades habitacionais construídas, atendendo a um maior número de pessoas em situação de vulnerabilidade social.

Os custos do metro quadrado para cada modelo, baseados em consultas a três empresas, são detalhados na Tabela 13, que é apresentada a seguir, e que também resume os custos correspondentes para uma habitação de 40 m² de área. Considerando a durabilidade de 50, 75 e 100 anos para *Wood-Frame*, Paredes de Concreto e Alvenaria Convencional, respectivamente, e para habitações individuais (não em larga escala), o *Wood-Frame* é o mais sustentável economicamente, apesar das pequenas diferenças de preço entre os sistemas. Por outro lado, quando considerado durabilidades de 100 anos para todos, ajustes novamente são

necessários conforme a Tabela 13, que é apresentada a seguir, em que Alvenaria Convencional é o mais sustentável, seguido por Paredes de Concreto e *Wood-Frame*.

Tabela 13 - Valor médio do m² por sistema construtivo e da habitação correspondente de 40 m² de área, considerando a durabilidade de cada sistema construtivo ou considerando a todos com durabilidade de 100 anos

Sistema Construtivo	Durabilidades de 50, 75 e 100 anos		Durabilidades de 100 anos	
	Valor Médio do m ² ± desvio padrão (R\$)	Valor da habitação de 40 m ² (R\$)	Valor Médio do m ² ± desvio padrão (R\$)	Valor da habitação de 40 m ² (R\$)
<i>Wood-Frame</i>	2.315,0	92.600,00	4.630,00	185.200,00
Paredes de Concreto	2.401,99	96.079,60	3.194,65	127.786,00
Alvenaria Convencional	2.434,20	97.368,00	2.434,20	97.368,00

Fonte: Autor (2024).

Comparando o custo para construir dois milhões de unidades de 40m², o sistema construtivo Alvenaria Convencional é o sistema economicamente mais sustentável, permitindo construir dois milhões de unidades com o investimento mais baixo. Com o mesmo orçamento, seriam possíveis apenas 1.523.923 unidades no Paredes de Concreto e 1.051.490 no *Wood-Frame*, representando reduções de 23,80% e 47,43%, respectivamente, no número de famílias atendidas. Os dados estão na Tabela 14, que é apresentada a seguir.

Tabela 14 – Investimento para 2 milhões de unidades de 40m² por sistema, considerando a durabilidades de 100 anos

Sistema Construtivo	Preço da Habitação (R\$)	Número de famílias atendidas	Total de Investimento (R\$)
<i>Wood-Frame</i>	185.200,00	2 milhões	370.400.000.000
Paredes de Concreto	127.786,00	2 milhões	255.572.000.000
Alvenaria Convencional	97.368,00	2 milhões	194.736.000.000

Fonte: Autor (2024).

A durabilidade influencia significativamente o custo, variando o investimento total em R\$ 185,2 bilhões em relação ao sistema construtivo *Wood-Frame* e aproximadamente R\$ 63 bilhões em relação ao Paredes de Concreto como mostrado a seguir na Tabela 15, apresentada a seguir. Sendo assim, a identificação dos

sistemas construtivos que se destacam negativamente nesse parâmetro é muito importante. Desse modo, poderá ser possível o desenvolvimento futuro de soluções que aprimorem esses respectivos parâmetros, possibilitando um atendimento mais econômico à elevada demanda de materiais por meio também dos sistemas construtivos *Wood-Frame* e Paredes de Concreto. Esta avaliação é fundamental como subsídio para orientar políticas públicas, pesquisas, escolas, profissionais da construção civil e demais partes interessadas em habitações mais sustentáveis.

Tabela 15 – Diferença econômica total associada à consideração das durabilidades de 100 anos na construção de 2 milhões de habitações

	Wood-Frame (R\$)	Paredes de Concreto (R\$)	Alvenaria Convencional (R\$)
Valor total, considerando durabilidades de 50, 75 e 100 anos	185.200.000.000	192.159.200.000	194.736.000.000
Valor total, considerando a durabilidades de 100 anos	370.400.000.000	255.572.000.000	194.736.000.000
Diferença total	185.200.000.000	63.412.800.000	0

Fonte: Autor (2014).

3.4 Compilação dos resultados

A avaliação dos indicadores sociais, ambientais e econômicos revela a sustentabilidade global dos modelos habitacionais, considerando a durabilidade de 50, 75 e 100 anos para *Wood-Frame*, Paredes de Concreto e Alvenaria Convencional, respectivamente, e para habitações individuais (não em larga escala). Desse modo, conforme a Tabela 16, apresentada a seguir, que classifica a sustentabilidade com base nas tabelas 5, 10 e 13, o *Wood-Frame* é identificado como o modelo mais sustentável, destacando-se por sua sustentabilidade ambiental e econômica, rapidez na construção e custo menor, apesar de necessitar de manutenção constante.

Tabela 16 - Fatores de sustentabilidade para cada sistema construtivo, considerando a durabilidade de 50, 75 e 100 anos para *Wood-Frame*, Paredes de Concreto e Alvenaria Convencional, respectivamente, e para habitações individuais (não em larga escala)

Fator de Sustentabilidade	Parede de Concreto	Wood-Frame	Alvenaria Convencional
Social	2º	3º	1º
Ambiental	2º	1º	3º
Econômico	2º	1º	3º
Classificação de Sustentabilidade	2º	1º	3º

Fonte: Autor (2024).

Por outro lado, considerando as durabilidades de 100 anos e a construção em larga escala de habitações de interesse social, os resultados mudam significativamente, conforme a Tabela 17, que é apresentada a seguir, com a classificação baseada nos resultados das tabelas 5, 10 e 14. Conforme a Tabela 17, o *Wood-Frame* é o menos sustentável social, ambiental e economicamente, principalmente devido à sua menor durabilidade. Para habitações com vida útil de cem anos, seria necessário construir o dobro de unidades em *Wood-Frame* em comparação à Alvenaria Convencional para atender ao mesmo número de famílias. A durabilidade influencia diretamente o custo, a sustentabilidade ambiental e os indicadores sociais. No entanto, com melhorias em parâmetros como aceitação social, disponibilidade de construtoras, durabilidade e reciclagem e descarte, *Wood-Frame* tem potencial para ser o mais sustentável no futuro.

Tabela 17 - Fatores de sustentabilidade para cada sistema construtivo considerando a durabilidade de 100 anos

Fator de Sustentabilidade	Parede de Concreto	Wood-Frame	Alvenaria Convencional
Social	2º (~1º)	3º	1º
Ambiental	1º (↑↑)	3º	2º
Econômico	2º	3º	1º
Classificação de Sustentabilidade	2º (1º)	3º	1º (2º)

Fonte: Autor (2024).

O Alvenaria Convencional é o sistema mais sustentável para a construção de habitações de interesse social, graças a primeira colocação em sustentabilidade social e econômica e a segunda posição em ambiental conforme a Tabela 17. Entretanto,

uma análise detalhada revela que Alvenaria Convencional e Paredes de Concreto têm escores sociais próximos, com Paredes de Concreto excedendo Alvenaria em sustentabilidade ambiental (Tabelas 11). Isso também posiciona Paredes de Concreto potencialmente como o sistema mais sustentável.

Porém, Alvenaria é imediatamente viável para a meta de construção de dois milhões de unidades até 2026, beneficiando-se de aceitação generalizada pela população e custos reduzidos, sendo até aproximadamente 50% mais econômica a longo prazo quando comparada aos outros sistemas. No entanto, necessita melhorar em parâmetros como desempenho térmico e acústico, tempo de execução, emissões de CO₂, energia incorporada, desperdício e resíduos.

Paredes de Concreto, também se apresenta como uma escolha promissora para o futuro. Desafios como a aceitação social, disponibilidade em todas as localidades, e aprimoramentos em durabilidade e desempenho térmico/acústico precisam ser superados. Diante da segunda colocação global, pode ser definido o papel importante do governo na superação dos obstáculos identificados. Isso pode ser realizado por meio de várias medidas, incluindo o investimento em pesquisas adicionais para aprimorar os parâmetros necessários desse sistema. Além disso, o desenvolvimento de novos programas sociais que ofereçam incentivos às empresas que adotam esse sistema construtivo pode estimular também a sua adoção em larga escala. Outra medida significativa seria a redução das taxas e encargos associados à construção. Isso não apenas tornaria essa opção mais atrativa para os construtores, mas também incentivaria os proprietários a optarem por esse método construtivo.

4 CONCLUSÕES

O sistema construtivo mais sustentável para a construção de habitações de interesse social é o Alvenaria Convencional. Para a construção de 2 milhões de habitações o seu custo será menor em aproximadamente R\$ 176 bilhões (50%) em relação ao sistema *Wood-Frame*. Esse sistema também resulta em menores emissões de CO₂ e energia incorporada, especialmente devido à durabilidade.

Além disso, o sistema construtivo Paredes de Concreto tem o potencial de se tornar futuramente a opção mais sustentável, desde que ocorra um aprimoramento dos parâmetros de aceitação social e de disponibilidade de construtoras em todas as localidades.

Também, embora o *Wood-Frame* seja individualmente (não em larga escala) o mais sustentável devido ao custo inicial mais baixo e rapidez, ele requer manutenção constante. Em larga escala, sua sustentabilidade depende da superação de desafios como disponibilidade de construtoras, aceitação social, durabilidade e reciclagem e descarte.

Dada a elevada demanda de materiais de construção voltados às habitações de interesse social, será difícil dispensar quaisquer materiais aqui estudados. A identificação dos materiais que se destacam menos em cada aspecto de sustentabilidade é crucial para o possível desenvolvimento futuro de soluções que aprimorem esses respectivos parâmetros, possibilitando assim futuramente um melhor atendimento à elevada demanda de materiais também por meio dos sistemas construtivos Paredes de Concreto e *Wood-Frame*.

Por fim, a indústria da construção civil desempenha um papel vital no desenvolvimento do país. A moradia é reconhecida como direito fundamental dos brasileiros. A seleção criteriosa de materiais de construção civil pode aliviar o sofrimento da população afetada pelo déficit habitacional, e contribuir para mitigar os diversos impactos da indústria da construção. Portanto, é crucial que autoridades públicas, universidades, escolas, o setor privado, associações profissionais, comunidades locais, ONGs, meios de comunicação e outras partes interessadas em soluções habitacionais adotem medidas mais responsáveis, com foco prioritário desde o início na sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ABCIC – Associação Brasileira de Construção Industrializada e Concreto. Disponível em: <https://abcic.org.br/>. Acesso em: 20 nov. 2023.

ABCP — Associação Brasileira de Cimento Portland. **Vendas de cimento crescem 6,6% em 2021**. São Paulo, 22 de janeiro de 2022. Disponível em:

Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 24, n. 2, e-5254, 2024.

<https://abcp.org.br/vendas-de-cimento-crescem-66-em-2021/#:~:text=Com%20esse%20resultado%2C%20o%20setor,comercializa%C3%A7%C3%A3o%20de%20dezembro%20de%202015>. Acesso em: 6 jun. 2023.

Abrainc - Associação Brasileira de Incorporadoras Imobiliárias. **Déficit habitacional é recorde no País**. Disponível em: <
<https://www.abrainc.org.br/noticias/2019/01/07/deficit-habitacional-e-recorde-no-pais/>. Acesso em: 10 out. 2023.

AGÊNCIA GOV. **Serviços e Informação do Brasil**. Disponível em:
<https://www.gov.br/pagina-interna-noticias-ebc>. Acesso em: 10 dez. 2023.

ANICER – Associação Nacional da Indústria Cerâmica. Disponível em:
<https://anicer.com.br/anicer/setor/>. Acesso em 20 de abril de 2024

ASHBY, M. F. **Materials and the Environment: Eco-informed Material Choice**. 3 ed. United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2021.

BRUNDTLAND, G. H. *et al.* **Our common future; by world commission on environment and development**. Oxford: Oxford University Press. 198.

CANDATEN, Luana. **Alternativas de uso de resíduos de madeira através da extração de metais e manufatura de painéis MDP**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Piracicaba: 2021.

Construtora Comtempla. Disponível em: <https://contempla.eng.br>. Acesso em: 19 jan. 2024.

DARÉ, Monica. **Custos e orçamentos**. 2016. Notas de aula.

ESPÍNDOLA, Luciana da Rosa. **Habitação de interesse social em madeira conforme os princípios de coordenação modular e conectividade**. Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – PPGEC (Mestrado em Engenharia Civil). Florianópolis: 2010.

FREITAS, Lúcia Santana; MACIEL, Dayanna dos Santos Costa. Análise do processo produtivo de uma empresa do segmento de cerâmica vermelha à luz da produção mais limpa. **Revista Produção Online**, Florianópolis, SC, v.13, n. 4, p. 1355-1380, out./dez. 2013.

GOMES, Jefferson de Oliveira; LACERDA, Juliana Ferreira Santos Bastos. Uma visão mais sustentável dos sistemas construtivos no Brasil: análise do estado da arte. **Revista E-tech**, Florianópolis, v.7, n.2, p. 167-186, nov. 2014.

GONÇALVES, Maíza Steffany Duarte; LACERDA, Italo Mannuel. Uma análise comparativa das vantagens e desvantagens entre a alvenaria estrutural e a alvenaria convencional: uma revisão de literatura. **Revista FT**, Rio de Janeiro, edição 117, dez. 2022.

Revista Produção Online. Florianópolis, SC, v. 24, n. 2, e-5254, 2024.

INVIDIATA, Andrea; LAVAGNA, Monica; GHISI, Enedir. Selecting design strategies using multi-criteria decision making to improve the sustainability of buildings. **Building and Environment**, v. 139, p. 58-68, jul. 2018.

JOHN, Vanderle M. Sustentabilidade Materiais Construção. In: ISAIA, G. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3 ed. São Paulo, IBRACON, 2017.

LU, Hongyou; YOU, Kairui; FENG, Wei. ZHOU, Nan; FRIDLEY, David. PRICE, Lynn. CAN, Stephane de la Rue du. Reducing China's building material embodied emissions: Opportunities and challenges to achieve carbon neutrality in building materials. **iScience**, v. 27, n. 3, p. 15, mar. 2024.

LOPES, Rayane Campos; OLIVEIRA, Andrielli Morais de; CASCUDO, Oswaldo. Modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à iniciação da corrosão de armaduras por cloretos: contribuição ao estado da arte por meio de revisão sistemática da literatura – Parte 1. **Revista Matéria**, v.27, n.2, p.1-20, 2022.

KHAN, Mehran; MCNALLY, Ciaran. A holistic review on the contribution of civil engineers for driving sustainable concrete construction in the built Environment. **Developments in the Built Environment**, v.16, 2023.

MAURY, Maria Beatriz. BLUMENSCHNEIN, Raquel Naves. Produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente. **Sustentabilidade em Debate**, Brasília, v. 3, n. 1, p. 75-96, jan./jun. 2012.

MARRERO, Madelyn. Holistic assessment of the economic, environmental, and social impact of building construction. Application to housing construction in Andalusia. **Journal of Cleaner Production**, v. 434, 2024.

MARQUES, Cristian Teixeira. Indicadores de Avaliação da Sustentabilidade na Construção Civil. **Revista IMPACT Projects**. Santana do Araguaia. v. 1, n. 1, p. 75-88, 2022.

MATUTI, Bruna Barbosa; SANTANA, Genilson Pereira. Reutilização de resíduos de construção civil e demolição na fabricação de tijolo cerâmico – uma revisão. **Scientia Amazonia**, v. 8, n.1, E1-E13, 2019.

MOGHAYEDI, Alireza. Towards a net-zero carbon economy: A sustainability performance assessment of innovative prefabricated construction methods for affordable housing in Southern Africa. **Sustainable Cities and Society**, v. 99, dez, 2023.

NÓBREGA, Érica Silva da. **Tratamento de agregado reciclado de concreto para produção de concreto com função estrutural**. Dissertação (mestrado em estruturas e construção civil). Universidade de Brasília. Brasília: 2022.

OMER, Mohamed. A conceptual framework for understanding the contribution of building materials in the achievement of Sustainable Development Goals (SDGs). **Sustainable Cities and Society**, v.52, jan. 2020.

PFEIFER, M. Passos para cumprir uma agenda verde. **Valor Setorial: Construção Civil**, v.9, p.8-14, 2011.

PRAZERES, Fabiano da Silva dos, ALBERTI, Eduarda Grobe, ARAKAWA, Flávia Sayuri. Sistema construtivo em wood frame como alternativa inovadora para o desenvolvimento sustentável no Brasil. **Revista Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.8, n.3, p. 20360-20380, 2022.

PUNHAGUI, Katia Regina Garcia. **Potencial de redução das emissões de CO₂ e da energia incorporada na construção de moradias no Brasil mediante o incremento do uso de madeira**. 2014. 422f. Tese (Doutorado em Arquitetura) Barcelona: Universidade Politecnica da Catalunha e Universidade de São Paulo, 2014.

RAMESH, Thillaigovindhan; PRAKASH, Ravi; SHUKLA, Karunesh Kumar. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1592-1600, out. 2010

ROZA, Érico Clévio da; FAVRETO, Julia. Estudo avaliativo do sistema wood-frame em comparação ao sistema de alvenaria convencional para residências populares. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar**. v.4, n.7, 2023.

SHIGUE, Erich Kazuo. **Difusão da construção em madeira no Brasil: Agentes, ações e produtos**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (Mestrado em Ciências). São Carlos: 2018.

SIENGE. **5 Vantagens e Desvantagens das Casas Pré-fabricadas**. Disponível em: <https://www.sienge.com.br/blog/capa-casa-pre-fabricada/>. Acesso em: 10 dez. 2023.

SOUZA, Rodrigo Vargas; DEMENIGHI, Alexandra Lima. Tratamentos preservantes naturais de madeiras de floresta plantada para a construção civil. **Mix Sustentável**, v.3, n.1, 2017.

ZANOTO, Camila; ROTTER, Lucas Cardoso Simão; CAMPOS, Heloisa Fuganti. Análise comparativa de desempenho entre os sistemas construtivos em concreto armado, alvenaria estrutural e Light Wood Frame. **Revista Principia**. João Pessoa, n. 57, 76-85, 2018.

ZEULE, Ludimila de Oliveira; SERRA, Sheyla M. B. A sustentabilidade aplicada aos pré-moldados de concreto. **Revista Industrializar em Concreto**. 2015.

Autores

Cristian Moreira de Souza

Mestre em Energia e Sustentabilidade pela Universidade Federal de Santa Catarina. Professor da Secretaria do Estado da Educação de Santa Catarina. Área de interesse: Sustentabilidade.

María Ángeles Lobo Recio

Doutora em Química pela Universidade Complutense de Madrid-Espanha. Professora dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e em Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal de Santa Catarina. Áreas de interesse: Sustentabilidade, Tratamento de água e efluentes, Valorização de resíduos.



Artigo recebido em: 28/04/2024 e aceito para publicação em: 27/05/2024
DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v24i2.5254>