

VALIDAÇÃO DE SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E ECONÔMICA EM CONSTRUÇÕES DE LIGHT WOOD FRAME

Giovana Cristina Kaseker¹

Suellen Katllen dos Santos Venancio²

Gabriel Ruiz de Oliveira³

RESUMO

Neste artigo são avaliados os aspectos de sustentabilidade ambiental e econômica em construções de light wood frame. A construção civil no Brasil é uma das indústrias com menor produtividade, grande produção de resíduos e desperdícios. O sistema construtivo light wood frame se propõe a melhorar esses parâmetros pela adoção de tecnologia, planejamento e pré-fabricação. Esta pesquisa aborda de que maneira as técnicas, materiais e processos deste sistema construtivo contribuem para o atendimento de parâmetros de sustentabilidade ambiental mensurados por estratégias bioclimáticas e de parâmetros de sustentabilidade econômica avaliados pelos princípios do Lean Construction. A partir do levantamento sistemático dos processos deste sistema, constatou-se a viabilidade do light wood frame como estratégia inovadora para a construção civil capaz de responder às demandas de sustentabilidade ambiental e econômica.

Palavras-chave: Estratégias Bioclimáticas. *Wood Frame*. *Lean Construction*. Sustentabilidade.

¹ Aluna do 4º período do curso de Engenharia de Produção da FAE Centro Universitário. Bolsista do Programa de Apoio à Iniciação Científica (PAIC 2023/2024). *E-mail:* giovanna.kaseker@mail.fae.edu

² Aluna do 7º período do curso de Engenharia Civil da FAE Centro Universitário. Bolsista do Programa de Apoio à Iniciação Científica (PAIC 2023/2024). *E-mail:* suellen.venancio@mail.fae.edu

³ Orientador da Pesquisa. Mestre em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de São Paulo. Professor da FAE Centro Universitário. *E-mail:* gabriel.ruiz@fae.edu

INTRODUÇÃO

O projeto surge da fusão de duas áreas de pesquisa distintas: estratégias bioclimáticas e o lean manufacturing aplicado ao Light Wood Frame (LWF). Essa integração foi motivada pela identificação de desafios em ambos os projetos e pelo reconhecimento da afinidade temática entre eles. Optou-se por abordá-los sob o amplo guarda-chuva da sustentabilidade, no qual as estratégias bioclimáticas são associadas à sustentabilidade ambiental, enquanto o lean manufacturing é contextualizado dentro da sustentabilidade econômica.

Para iniciar a pesquisa, é fundamental compreender o Light Wood Frame (LWF), foco principal da análise. Este sistema construtivo utiliza estruturas leves de madeira, projetadas especialmente para residências unifamiliares, destacando-se pela montagem rápida e fácil de peças pré-fabricadas de madeira no local da construção. Essa abordagem torna o processo de construção mais eficiente e sustentável em comparação com os métodos tradicionais de alvenaria. Ao adotar o LWF, serão investigados dois cenários-chave: a sustentabilidade econômica e a ambiental (Sotsek; Santos, 2018).

Ao explorar o âmbito da sustentabilidade ambiental, deparamo-nos com conceitos como o da arquitetura bioclimática. Esta abordagem, reconhecida por sua sustentabilidade na construção civil, busca reduzir o impacto ambiental das edificações e otimizar a eficiência energética ao utilizar de forma inteligente os recursos naturais disponíveis. Seu principal objetivo é criar ambientes habitáveis que reduzam a dependência de sistemas de iluminação, aquecimento e resfriamento artificial (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014).

Em paralelo, ao adentrar no escopo do Lean Manufacturing, encontra-se um sistema de gestão voltado para a maximização da produtividade industrial. Este sistema busca aprimorar o processo produtivo mediante a eliminação de desperdícios, com ênfase na otimização do processo de desenvolvimento através da redução de erros e redundâncias (Singla; Sharma, 2023).

Ao sintetizar ambos os temas, evidencia-se uma busca comum pela eficiência e pela redução de impactos negativos. Enquanto a arquitetura bioclimática visa à minimização do impacto ambiental das construções, o lean manufacturing almeja a maximização da eficiência produtiva. Ambos buscam estabelecer uma abordagem sustentável, promovendo a utilização de recursos naturais e a minimização de desperdícios.

Diante desse cenário, o objetivo geral do nosso trabalho concentra-se em avaliar aspectos de sustentabilidade ambiental e econômica em construções de light wood frame. Esse objetivo principal se subdivide em três objetivos específicos:

- Conceituar estratégias bioclimáticas e Lean Manufacturing como aspectos de sustentabilidade ambiental e econômica.
- Inventariar sistemas técnicos construtivos em light wood frame que atendam aos aspectos de sustentabilidade analisados.
- Validar a adequação das construções de light wood frame em relação aos aspectos de sustentabilidade ambiental e econômica.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste trabalho parte da definição de sustentabilidade na construção civil, destacando dois pilares essenciais: aspectos ambientais e econômicos. Em relação aos aspectos ambientais, serão apresentadas e discutidas estratégias bioclimáticas na construção. No que se refere aos aspectos econômicos, será abordada a metodologia Lean Construction, que visa reduzir desperdícios no processo produtivo. Esses pilares da sustentabilidade serão analisados à luz de um sistema construtivo ainda inovador no Brasil, o Light Wood Frame.

1.1 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Em todas as áreas de estudo, existem maneiras de pensar em um estilo de vida sustentável, e a indústria da construção civil não fica de fora desse contexto. Segundo Agopyan e John (2011), os principais desafios para exercer a sustentabilidade na construção civil estão em reduzir os impactos ambientais causados nos ambientes naturais, devido à capacidade dessa indústria de movimentar e alterar completamente a estrutura do local. A indústria da construção civil é o setor que mais utiliza recursos naturais no mundo. Dentro desse contexto, mais de 50% dos resíduos gerados pela atividade humana estão relacionados à construção civil (Agopyan e John, 2011).

Em 1999, foi criada a Agenda 21 para a sustentabilidade na construção civil, que descreveu os principais desafios enfrentados pelo setor. Entre esses desafios estão o processo de gestão, o consumo exacerbado de materiais, a execução das obras, o gasto de energia e água, os impactos no meio ambiente urbano e rural, além de diversas questões sociais, culturais e econômicas. Na busca por reduzir os impactos negativos ao meio ambiente, surge o conceito de sustentabilidade na construção civil. De acordo com Nascimento, Moraes e Lopes (2022, p. 4), a sustentabilidade envolve garantir que, antes, durante e após o processo de construção, sejam tomadas ações para reduzir

os impactos ambientais, preservando e conservando os recursos naturais, de modo a assegurar que as gerações futuras também possam desfrutá-los.

Dessa forma, surge a necessidade de criar técnicas e estratégias que utilizem inteligentemente os recursos naturais, promovendo um desenvolvimento sustentável e reduzindo a poluição e o desperdício de recursos.

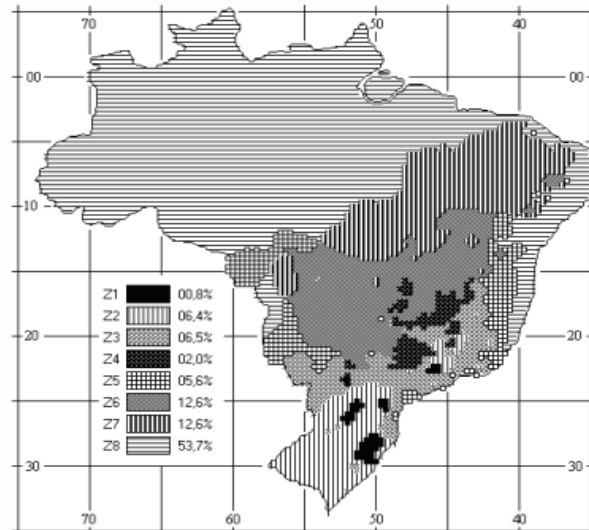
1.2 ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS

Na década de 1960, surgiu o conceito de projeto bioclimático, uma nova metodologia desenvolvida pelos irmãos Olgyay (Lamberts et. al, 1997). Esse conceito buscava aplicar a bioclimatologia na arquitetura, a fim de satisfazer as condições de conforto ambiental por meio da análise das condições climáticas de um determinado local de acordo com sua temperatura e umidade relativa do ar.

A interligação entre bioclimatologia e bem-estar humano deu origem ao conceito de arquitetura bioclimática. Essa disciplina visa a conservação de energia por meio do design arquitetônico e da utilização eficiente dos recursos naturais disponíveis no ambiente. Projetos alinhados com a arquitetura bioclimática frequentemente incorporam ventilação e iluminação natural, preocupam-se com o isolamento térmico, utilizam materiais que impedem a alta incidência solar e aderem aos padrões de sustentabilidade e certificações disponíveis (Frota, Schiffer, 1999).

Diante desse cenário, nasce a NBR 15220, norma que visa compreender o desempenho térmico das edificações em diferentes regiões do país. A norma divide o Brasil em oito regiões bioclimáticas e avalia as recomendações técnico-construtivas que melhor se adequam às condições climáticas de cada zona. A carta bioclimática utilizada para embasar a NBR foi adaptada por Givoni, em 1992, corrigindo limitações encontradas na versão original de Olgyay (ABNT, 2005).

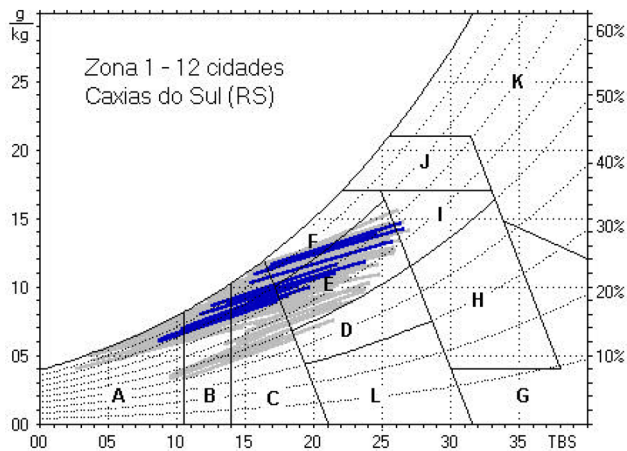
FIGURA 1 — Zoneamento bioclimático brasileiro



FONTE: ABNT (2005, p. 2)

A carta bioclimática é dividida em dois eixos: temperatura e umidade do ar. A inter-relação entre esses dois parâmetros é representada no gráfico, indicando em qual zona bioclimática determinada região se encaixa. Essa classificação permite identificar as condições climáticas predominantes e apontar as estratégias mais recomendadas para otimizar o conforto térmico e reduzir o consumo energético nas edificações.

FIGURA 2 — Carta bioclimática da zona 1



FONTE: ABNT (2005, p. 3)

Para o artigo, foi realizada a análise de uma aplicação prática na cidade de Curitiba, localizada na zona bioclimática 1. Essa região enfrenta desconforto térmico em aproximadamente 77% do ano, está em conforto térmico em cerca de 15% do ano e sofre com desconforto de calor durante 8% do ano (Projeteo, 2024).

Diante dessas circunstâncias e seguindo as diretrizes normativas, conclui-se que as melhores estratégias para residências em Curitiba incluem o design adequado da forma, a orientação correta da edificação, o posicionamento estratégico das superfícies envidraçadas para maximizar a incidência solar, a adoção de paredes internas pesadas para conservar o calor e a ventilação apropriada dos ambientes para reduzir a umidade e promover a troca de ar interno e externo (ABNT, 2005).

Entre as estratégias bioclimáticas, pode-se listar algumas que auxiliam os moradores de Curitiba a alcançar o conforto térmico utilizando recursos naturais e materiais que melhoram o desempenho térmico.

O aquecimento solar passivo é uma técnica que utiliza a radiação solar direta para o aquecimento ambiental de edificações, podendo ser classificado em aquecimento direto ou indireto. No aquecimento solar direto, a radiação solar de inverno é admitida diretamente nos ambientes internos através de aberturas ou superfícies envidraçadas. Este processo proporciona um aquecimento imediato, resultante do efeito estufa. A radiação solar atravessa as superfícies envidraçadas e é absorvida pelas superfícies internas, sendo reemitida como radiação de onda longa. Tal fenômeno fica retido no interior da edificação, pois o vidro é opaco a esse tipo de radiação (Pinto, Dias, 2017).

Durante o período noturno, quando as temperaturas externas caem, é essencial minimizar a perda de calor acumulado. Para isso, podem ser utilizadas janelas com maior resistência térmica, como as que possuem vidros duplos, além de cortinas e isolamento térmico externo nas paredes (Duffie; Beckman, 2013).

A inércia térmica se refere ao atraso e à redução dos picos de calor, considerando o comportamento de uma edificação em armazenar e liberar calor (Papst, 1999 *apud* Oliveira et al., 2015). Segundo Frota e Schiffer (1999), os graus de inércia térmica podem ser avaliados de acordo com a capacidade específica dos fechamentos da edificação. Edifícios com pouca inércia térmica sofrem variações de temperatura diretamente influenciadas pela temperatura externa. Em contrapartida, edificações com alta inércia térmica mantêm a temperatura interna com menor amplitude térmica.

Para promover o atraso térmico, é essencial estudar os materiais que compõem as vedações, analisando suas características físicas, como condutividade térmica, calor específico, densidade absoluta e espessura (Papst, 1999 *apud* Oliveira et al., 2015). Dessa forma, é possível obter melhores resultados e garantir conforto térmico na edificação.

A ventilação natural ocorre devido às diferenças de pressão e temperatura entre o interior e o exterior da edificação, promovendo o movimento do ar. Para aproveitar a ventilação natural, são planejadas esquadrias que permitem a entrada do vento no

ambiente, direcionando o fluxo de ar de maneira eficiente (Costa, 2009). Segundo o autor, a ventilação cruzada é a principal técnica para proporcionar conforto térmico aos moradores, pois uma boa ventilação é essencial para a higiene geral e reduz o excesso de calor urbano.

Costa (2009) acrescenta que a ventilação natural é especialmente importante em locais frios, onde é necessário cumprir uma taxa mínima de renovação de ar, tornando os ambientes mais saudáveis e diminuindo os riscos de infecções virais. Além disso, a utilização da ventilação natural reduz a necessidade de sistemas de refrigeração artificial, contribuindo para a diminuição do consumo de energia elétrica.

1.3 LEAN CONSTRUCTION

A filosofia Lean é inspirada no sistema Toyota de Produção (conhecida por ferramentas como o *just in time* e *kanban*), que começou a ganhar força após a derrota do Japão na Segunda Guerra Mundial em 1945 e da crise do petróleo em 1975. Também conhecido como Produção Enxuta, o Lean Manufacturing busca otimizar a produção, com somente o necessário, na quantidade necessária e quando necessário, garantindo eficácia e qualidade (Lean Institute, 2011 *apud* Paiva, Papandrea, Baisso, Chagas e Silva, 2020).

Para tornar a produção mais enxuta, o Lean Manufacturing propõe uma filosofia de gestão de produção na qual os desperdícios são reduzidos ao mínimo. De acordo com Paiva, Papandrea, Baisso, Chagas e Silva (2020), os tipos de desperdícios identificados dentro da filosofia Lean e que devem ser eliminados são:

- Superprodução: produção de itens sem demanda, sem necessidade, o que ocasiona desperdício de todas as partes envolvidas (transporte, equipe e matéria-prima);
- Espera: tempo desperdiçado pela espera para a próxima ação, processamento, ferramenta, suprimento, peça, entre outros, devido a uma falta de estoque, atrasos no processamento, interrupção do funcionamento de equipamentos e gargalos de capacidade;
- Transporte ou movimentação desnecessária: movimentação excessiva de materiais e criação de transporte sem eficácia são bons exemplos para este desperdício;
- Superprocessamento: o uso de ferramentas inadequadas pode gerar trabalho desnecessário para o produto, assim como um plano de projeto deficiente, esses fatores geram prejuízos quando há necessidade de se aplicar uma qualidade maior do que a necessária;

- Excesso de estoque: além de causar trabalho extra dos funcionários, pode gerar uma produção mais poluída, custos de transporte e armazenagem e atrasos;

Sobre a questão do estoque, Taiichi Ohno (1996, p. 39) afirma que “no Sistema Toyota de Produção devemos produzir apenas a quantidade necessária [...] liberando assim, a força de trabalho extra”.

- Movimentos desnecessários: pode-se caracterizar como movimento desnecessário atos inúteis durante a produção, tais como procurar, pegar ou empilhar peças, até mesmo caminhar;
- Defeitos: retrabalhar uma peça, ou gerar um defeito, realizar uma correção, substituição ou descarte atrapalha o processo de produção, gerando mais desperdício de tempo e esforços.
- Podemos associar esse desperdício com uma passagem do livro de Ohno, “Estabelecer a Sincronização é Condição Básica”, onde relata que o uso assíncrono do Kanban pode gerar atrasos e defeitos na produção (Ohno, 1996);
- Desperdício de criatividade dos funcionários: não ouvir os funcionários, falta de comunicação assertiva, perda de habilidades promissoras e oportunidades de aprendizagem também colabora com o desperdício na produção (Paiva, Papandrea, Baisso, Chagas e Silva, 2020).

Na figura abaixo, podemos ver as etapas do Lean Construction e como ele faz referência na ajuda à construção civil e também serve como ferramenta de gestão da melhoria na qualidade, desde então, o Lean passou a melhorar as fábricas e manufaturas em geral, como aconteceu com a Toyota, que conseguiu se reerguer em meio a uma gigantesca crise (Ohno, 1996).

O Lean pode ser associado à construção civil no quesito de otimizar a obra (Ganut et al., 2022), com alguns passos, sendo eles:

- Identificar os elementos repetitivos e não repetitivos: caso não sejam identificados, podem causar ociosidade, uma vez que eles entram somente em momentos específicos da obra;
- Identificação das unidades de construção: permite definir onde os ritmos serão implementados e estudar os lotes adequados;
- Definir a unidade de construção em lote: onde irão passar todas as atividades de trabalho dentro do canteiro;
- Definição da sequência construtiva: realizada a partir do plano de projeto, fase de suma importância pois irá definir também o ritmo de construção;
- Definir o conteúdo de trabalho de cada serviço: identificar os recursos envolvidos em cada atividade da sequência;

- Gráfico de balanceamento: atividade necessária para nivelar as atividades, impedindo que uma se sobreponha a outra, e outras acabem ficando ociosas;
- Preparação do cronograma: ajuda a enxergar de forma mais gerencial as atividades e vagões de trabalho na produção, e também de ter uma visão mais ampla do planejamento puxado.

FIGURA 3 — Fundamentos do lean construction



FONTE: Lean Bim Solutions

1.4 LIGHT WOOD FRAME NO BRASIL

O sistema construtivo Light Wood Frame (LWF) representa 90% dos modelos de construção em uso hoje em dia pelos americanos (Thallon, 2008), consiste basicamente em estruturas de madeira pré fabricadas, formando painéis com resistência e rigidez aplicadas tanto no plano do painel quanto perpendicular a ele (NBR - 16.396), diferente da alvenaria de blocos, sistema predominante no Brasil até hoje, por conta da ideia fixa de que sua durabilidade seria superior, embora muitos autores questionem essa afirmação (Nascimento, 2004). Consiste basicamente em construções feitas de quadros (*frames*) de madeira, que saem direto da fábrica com suas estruturas já prontas.

Houve iniciativas do LWF por parte de empresas internacionais nas décadas de 1970 (por Gypsum) na região Nordeste do país, com foco em específico no uso de gesso, e 2000 pelo americano e especialista Alfred Lee Edgar, no estado do Rio Grande do Sul.

Em 2013, uma obra em Light Wood Frame foi financiada pelo programa “Minha Casa, Minha Vida” pela primeira vez, em parceria com a TecVerde, empresa fabricante de kits em LWF (Araújo *et al.*, 2016).

Porém, encontram-se alguns desafios para a difusão desse modelo construtivo, como por exemplo, o preconceito com o material madeira, por ter sido explorada por vários anos e ser usada muitas vezes de maneira não tão vantajosa, é considerada um material de pouca qualidade. Há também o medo por parte dos brasileiros de degradação biológica da madeira (mesmo com tratamento) (Molina; Calil Jr., 2010) e de existir o desmatamento de florestas nativas.

FIGURA 4 — Sistema construtivo light wood frame



Fonte: AECweb

Com a publicação da norma técnica “ABNT NBR 16.936: Edificações em Light Wood Frame” no segundo semestre de 2023, espera-se que a norma estimule o desenvolvimento de políticas públicas de financiamento de moradia popular neste sistema construtivo, bem como o fortalecimento de toda a cadeia produtiva. Bastante aguardada pelo setor da construção civil, a norma técnica de LWF contribui com a popularização do sistema construtivo e a difusão de métodos mais sustentáveis e industrializados no Brasil.

2 METODOLOGIA

Nesta pesquisa foi adotada uma abordagem qualitativa, na qual os conceitos e princípios do wood frame e da arquitetura bioclimática são avaliados por meio de um levantamento bibliográfico abrangente, incluindo artigos, livros, monografias, relatórios

e bancos de dados relevantes. Busca-se, assim, estabelecer relações entre os conceitos e estratégias de eficiência de produção e desempenho ambiental, aplicados a uma técnica construtiva inovadora. Essas relações serão detalhadamente descritas e organizadas em um gráfico de síntese comparativa, fornecendo uma visão abrangente das interações entre os diferentes elementos estudados nesta pesquisa.

A representação gráfica ilustra em um dos eixos analisados as estratégias bioclimáticas aplicadas ao Light Wood Frame, realizando uma análise de viabilidade ambiental. Paralelamente, são examinados os conceitos do Lean Construction aplicados ao Light Wood Frame, a fim de realizar uma análise de sustentabilidade econômica no processo. Em seguida, uma análise crítica dos pontos convergentes em ambas as áreas de pesquisa é proposta, concluindo e validando a sustentabilidade ambiental e econômica da técnica construtiva estudada.

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção, serão apresentados os resultados dos dados e as análises qualitativas realizadas na pesquisa. Os resultados da pesquisa consistem na sistematização das informações inventariadas sobre como os sistemas construtivos em light wood frame atendem aos aspectos de sustentabilidade econômica e ambiental, validando a hipótese de pesquisa sobre o bom desempenho deste sistema na situação proposta. Os resultados serão apresentados em três blocos, sendo o primeiro, a demonstração da viabilidade ambiental no sistema *wood frame*, em seguida, de que maneira o LWF contribui com a redução de desperdícios e sustentabilidade econômica. Por fim, são apresentadas características deste sistema construtivo inovador que contribuem positivamente para o atendimento simultâneo das dimensões ambiental e econômica da sustentabilidade na construção civil.

3.1 SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL NO SISTEMA DE *WOOD FRAME*

De acordo com a análise da carta bioclimática, pode-se afirmar que as estratégias mais eficientes e aplicáveis à cidade de Curitiba, localizada na Zona Bioclimática 1, são: o aquecimento solar passivo direto, a inércia térmica para aquecimento e a ventilação natural. Ao aplicar essas estratégias ao sistema construtivo *wood frame*, é possível otimizar o desempenho térmico da edificação, respeitando suas particularidades.

O aquecimento solar passivo direto é uma estratégia bioclimática simples que consiste em projetar edifícios bem isolados, com vãos de janela orientados ao norte, permitindo a entrada direta de raios solares durante o inverno. Esse sistema utiliza

a massa térmica, como paredes sólidas e chão maciço isolados pelo exterior, para conservar o calor por mais tempo (Goulding, 1992 *apud* Pinto et al., 2016).

É crucial dimensionar adequadamente a massa térmica em relação ao espaço ou edifício a ser aquecido para que o calor armazenado durante o dia seja suficiente para manter a temperatura à noite. Pinto e Dias (2016) reforçam a importância de considerar o sombreamento nos dias quentes e garantir isolamento nos dias nublados ou durante as noites frias, a fim de evitar a dissipação rápida do calor. Grandes panos de vidro permitem ganhos solares e boa iluminação natural, mas também apresentam perdas térmicas significativas e riscos de danos por raios ultravioleta nos materiais interiores.

O dimensionamento dos vãos no sistema *wood frame* deve considerar a quantidade e tipo de aberturas, características do vidro e materialidade das caixilharias para o funcionamento eficiente do sistema solar passivo. Diferentes tipos e espessuras de vidro podem melhorar a performance térmica, mas devem ser escolhidos com base na orientação das fachadas, uma vez que os ângulos e intensidades de radiação mudam ao longo do ano (Phillips, 2004 *apud* Pinto et al., 2016).

Considerando todos os parâmetros citados acima, conclui-se que a estratégia de aquecimento solar passivo direto é passível de ser aplicada com eficácia no sistema construtivo de wood frame uma vez que esse sistema pressupõe a necessidade do planejamento prévio de aberturas para receber elementos que permitam a entrada de luz e a limitação dos vãos para garantir a estabilidade estrutural da edificação, equilibrando os ganhos solares e o conforto térmico.

No que diz respeito ao isolamento térmico o método de vedação adotado envolve paredes compostas por uma face interna de chapas de drywall Standard, uma face intermediária de placas OSB ou compensado estrutural para apoio, montante estrutural de madeira pinus, outra face intermediária com chapa OSB e uma face externa com chapa cimentícia para acabamento (ABNT, 2023). Para melhorar o desempenho térmico, podem ser incluídos revestimentos externos de aço, madeira ou PVC, que auxiliam no controle da umidade e no isolamento térmico eficiente da residência.

Para maximizar o isolamento térmico, recomenda-se o uso de materiais como lã de rocha e lã de vidro, conhecidos por suas excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico. A lã de vidro é produzida a partir de sílica e sódio, submetidos a altas temperaturas. Suas principais vantagens incluem conforto acústico, facilidade de instalação, capacidade de reciclagem e eficiência em manter a temperatura interna do ambiente (Catai et al., 2006, *apud* Fernandes, 2019). Similarmente, a lã de rocha é derivada do basalto aglomerado com resina sintética, destacando-se pelo conforto térmico e acústico, resistência ao fogo e custo-benefício favorável.

Portanto, conclui-se que o uso de materiais isolantes no sistema de *wood frame* é indispensável. A madeira, que é a principal matéria-prima desse sistema construtivo, possui baixa condutividade térmica, o que significa que ela não é capaz de conduzir o calor, o dissipando rapidamente (Ribeiro; Vasconcelos, 2018). A adoção de materiais isolantes nas paredes da edificação permite que o calor fique retido, viabilizando a aplicação dessa estratégia e afirmando a eficácia do sistema.

A utilização de técnicas que favorecem a ventilação natural, como a ventilação cruzada, é promovida através do posicionamento correto de esquadrias e aberturas, garantindo uma boa ventilação no ambiente e proporcionando resfriamento para manter uma temperatura confortável (Andreasi, 2007 *apud* Marquiori et al., 2021).

Inicialmente, realiza-se um estudo para identificar a direção predominante do vento no local, possibilitando o planejamento adequado do posicionamento de portas e janelas nessa direção. Com esses pontos definidos estrategicamente, a técnica de ventilação apresenta um melhor desempenho, permitindo que o ar quente, que é mais leve, suba e saia do ambiente, enquanto o ar frio, mais denso, permaneça abaixo, entrando na edificação e renovando o ar (Endepro, 2016).

Cabe destacar que a ventilação cruzada pode ocorrer tanto de forma horizontal quanto vertical, com aberturas em sentidos opostos na mesma altura ou em alturas diferentes. Para definir a altura, projeta-se para que o vento frio entre por uma janela mais baixa e que o ar quente saia por uma janela mais alta.

Assim, podemos concluir que o uso da ventilação natural, combinado com a iluminação natural, garante uma economia de energia elétrica de até 31,9% em comparação com residências que utilizam aparelhos artificiais para atingir o conforto térmico (Rupp e Ghisi, 2013 *apud* Marquiori et al., 2021).

Segundo as orientações dos autores, conclui-se que a aplicação de estratégias de ventilação é eficaz no sistema de *wood frame*, pois este requer um planejamento prévio das aberturas e possui limitações de vãos que garantem a estabilidade estrutural. Dessa forma, é possível obter um ambiente interno mais saudável e sustentável, respeitando as características e limitações específicas do *wood frame*.

3.2 SUSTENTABILIDADE ECONÔMICA NO SISTEMA DE WOOD FRAME

A industrialização da construção civil a partir dos painéis pré-fabricados e do sistema de montagem do Light Wood Frame permite um ganho de eficiência com relação aos oito tipos de desperdícios do Lean Construction.

O controle da superprodução consiste em não produzir mais do que é necessário ou antes do necessário, levando a excessos de estoque, aumento de custos e atrasos na detecção de defeitos (Paiva, Papandrea, Baisso, Chagas e Silva, 2020). Como o LWF tem como base a construção das suas estruturas em fábrica, ou seja, tudo dentro da demanda requisitada, esse tipo de desperdício pode ser evitado pela especificação da quantidade de painéis necessários para serem produzidos.

A redução do tempo de espera é uma vantagem no Light Wood Frame, pois seu tempo de construção pode ser concluído em poucos meses, de acordo com a matéria de Juliana Nakamura para a revista *Techné* (Nakamura, 2009), uma construção de uma casa completa com 200m² pode ser feita em cerca de 60 dias.

A redução do processamento excessivo, do movimento de pessoas e do transporte de materiais é uma característica das construções industrializadas com pré-fabricação de componentes em fábrica. No caso do light wood frame, a maior parte da movimentação em fábrica é estabelecida a partir do layout da linha de produção, com grande impacto do planejamento prévio na eficiência do processo. Além disso, na montagem dos painéis no canteiro de obras pode-se destacar como a leveza dos frames de madeira e a pré-furação do fechamento entre os painéis demandam menos esforços dos trabalhadores, uma vez que a montagem é muito mais intuitiva e diminui o excesso de processamento em obra (Nakamura, 2009).

Transporte e movimentação desnecessários também são otimizados na construção com wood frame, pois como os frames de madeira são mais leves que os blocos de alvenaria (Nakamura, 2009), tornando o transporte acaba sendo mais rápido e seguro. O beneficiamento prévio do material utilizado (pinus e eucalipto) reduz a necessidade de ajustes e retirada de entulho durante a montagem na obra.

Armazenar mais materiais ou produtos do que o necessário em estoque pode levar a custos adicionais, espaço desperdiçado e obsolescência, como o Light Wood Frame é feito sob demanda e planejamento, há uma redução considerável de estoque e desperdício, além de uma obra muito mais limpa, (Nakamura, 2009).

Ao adotar o sistema wood frame para a construção de habitações, aumenta-se o nível de precisão de montagem e de fabricação dos componentes, reduzindo assim a necessidade de ajustes no canteiro de obra, recorrentes de regularidades e defeitos. Não pode ser descartada a possibilidade de erros, porém com o planejamento adequado da geometria dos componentes e das condições de montagem é possível obter melhorias a longo prazo (Finch; Marriage, 2018). A pré-fabricação e o planejamento do sistema de montagem de uma edificação em light wood frame também torna possível a reutilização dos seus componentes após o término da vida útil do imóvel, reduzindo a geração de

resíduos e o descarte de material (Diyamandoglu; Fortuna, 2015). Por analogia, pode-se expandir essa característica do método construtivo para o caso de reformas e ampliações de residências, demonstrando a flexibilidade do sistema e o reaproveitamento de componentes com menor descarte de peças defeituosas ou despadronizadas.

Um dos principais ganhos de eficiência do light wood frame está na padronização de unidades em escala. Nesse modelo, dedica-se um tempo significativo às etapas de planejamento e discussão de cenários de obra, buscando a melhor sequência de operação de processos executivos e a antecipação dos gargalos que possam prejudicar os prazos de construção. Assim, busca-se minimizar a ociosidade da mão de obra e dedicar uma maior proporção do tempo de trabalho às atividades que de fato agregam valor à produção (Ganut et al., 2022). De forma objetiva, a lógica de montagem do wood frame é intuitiva e requer uma curva de aprendizagem rápida de capacitação de carpinteiros (Nakamura, 2009).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração dos princípios da arquitetura bioclimática com as práticas do lean construction representa um avanço significativo no setor da construção civil, promovendo não apenas eficiência operacional, mas também sustentabilidade ambiental. Este estudo explorou a sinergia entre esses dois campos, destacando suas interações positivas e os benefícios mútuos que podem ser alcançados quando aplicados de maneira integrada.

Ao longo da pesquisa, observou-se que as soluções bioclimáticas podem ser aplicadas em construções de *wood frame* para oferecer uma redução do consumo de energia e a melhoria do conforto dos ocupantes. Por outro lado, os princípios do lean construction focam na eliminação de desperdícios, na otimização do fluxo de trabalho e na melhoria contínua dos processos construtivos, aspectos muito coerentes com aqueles que buscam ser alcançados na adoção de um sistema construtivo industrializado como o wood frame.

A combinação dessas abordagens pode ser vista como uma resposta eficaz aos desafios contemporâneos enfrentados pela indústria da construção, tais como a necessidade de reduzir o impacto ambiental das edificações, atender às demandas por maior eficiência energética e garantir a entrega de projetos dentro do prazo e do orçamento estabelecidos.

Neste estudo foi possível identificar de maneira objetiva a aplicação de aspectos de sustentabilidade ambiental e econômica em construções de light wood frame por meio da adoção das estratégias e princípios de construção bioclimática e lean construction.

Esse levantamento detalhado das soluções técnicas que permitem o atendimento dos aspectos de sustentabilidade valida o sistema construtivo estudado como uma possibilidade promissora para a construção civil.

A colaboração entre projetistas, construtores e gestores é fundamental para explorar todo o potencial entre estas abordagens. Percebe-se que, mesmo diante dos benefícios potenciais de adoção do sistema construtivo wood frame, ainda faltam capacitação e incentivos financeiros que promovam essas práticas colaborativas podem acelerar a adoção generalizada dessas abordagens inovadoras.

Portanto, conclui-se que a aplicação conjunta de aspectos da arquitetura bioclimática e dos princípios do lean construction não apenas promove a eficiência e sustentabilidade na construção civil, mas também contribui significativamente para o desenvolvimento de ambientes construídos mais saudáveis, econômicos e resilientes às mudanças climáticas globais. Essa integração representa um caminho promissor para o futuro da construção sustentável e eficiente.

REFERÊNCIAS

- AGOPYAN, V.; JOHN, V. M.. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. São Paulo: Blucher, 2011.
- ARAÚJO, V. de et al. **Wood frame**: light framing houses for developing countries. *Revista de la Construcción*, v. 15, n. 2, p. 78-87, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS — ABNT. **NBR 15220-3**: desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS — ABNT. **NBR 16963**: edificações em light wood frame. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- COSTA, L. C. N. **Aproveitamento da ventilação natural nas habitações**: um estudo de caso na cidade de Aracaju- SE. 2009. 272 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) — Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- DIYAMANDOGLU, V; FORTUNA, L. Deconstruction of wood-framed houses: Material recovery and environmental impact. **Researchgate**, jul. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/276853433_Deconstruction_of_wood-framed_houses_Material_recovery_and_environmental_impact. Acesso em: 26 set. 2024.
- DO NASCIMENTO, E. R.; DE MORAIS, D. P. F.; LOPES, S. C.. **Sustentabilidade na construção civil no Brasil: Uma revisão da literatura**. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 14, p. e524111436611-e524111436611, 2022.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- ENDEPRO ENGENHARIA. **Dicas de como aproveitar a ventilação natural quando se está projetando uma casa**, 2016. Disponível em: <https://endepro.com.br/dicas-de-como-aproveitar-a-ventilacao-natural-quando-se-esta-projetando-uma-casa/>. Acesso em: 15 jun. 2024.
- FERNANDES, D; ZARDO, C. R.; BELLEI, P. **Eficiência acústica: lã de vidro e de lã de rocha como isolantes para o sistema drywall**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso - UCEFF – Engenharia Civil, Chapecó, v. 1, n. 1, p. 1-1,.
- FILIPPI, G. A.; MELHADO, S. B. Um estudo sobre as causas de atrasos de obras de empreendimentos imobiliários na região Metropolitana de São Paulo. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 161-173, jul./set. 2015.
- FINCH, G.; MARRIAGE, G. Reducing building waste through light timber frame design: geometric, assembly and material optimisations. **International Conference on Passive and Low Energy Architecture (Plea)**, Hong Kong, v. 34, p. 244-249, dez. 2018.
- FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. T. R. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Studio Nobel, 1999.
- GANUT, M. et al. **Aplicação de ferramentas lean na construção civil**. Belo Horizonte: Alvarez & Marsal: Prevision, 2022.
- LabEEE; UFSC. **Plataforma ProjetEEE**. Disponível em: [<http://www.mme.gov.br/projeteee>] acesso: 01/04/2024

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW Editores, 1997.

LEAN Construction. **Leanbim Solutions**, Cidade do México, 2020. Disponível em: <https://www.leanbim.solutions/lean-construction/>. Acesso em: 26 set. 2024.

MARQUIORI, A. et al. **Ventilação cruzada**: melhoria do conforto térmico em residências. 2021. 18 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) — Multivix, Espírito Santo, 2021.

MOLINA, Julio Cesar e CALIL JUNIOR, Carlito. **Sistema construtivo em wood frame para casas de madeira**. Semina : ciências exatas e tecnológicas, v. 31, n. 2, p. 143-156, 2010.

NAKAMURA, J. Light wood frame: sistema estrutural em madeira ganha espaço como solução construtiva de habitações. **Revista Techné**, São Paulo, v. 148, p. 48-43, jul. 2009.

NAKAMURA, J. Como e por que construir com light wood frame? **Aecweb**, São Paulo, 18 mar. 2020. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/revista/materias/como-e-por-que-construir-com-light-wood-frame/19826>. Acesso em: 26 set. 2024.

NASCIMENTO, O. L. **Alvenarias**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBS; CBCA, 2004. (Série Manual de Construção em Aço).

OLIVEIRA, W. M. et al. **Inércia térmica como estratégia bioclimática**. Universidade de Passo Fundo; Anais de resumos, p. 29, 2009.

OHNO, Taiichi. Sistema Toyota de Produção: Além da Produção em Larga Escala. **Bookman**, p. 1-150, jan. 1997.

PINTO, A. R.; DIAS, B. D. Aquecimento solar passivo: ganhos diretos, indiretos e isolados. **Revista Arquitetura Lusíada**, Lisboa, n. 7, p. 77-92, 2016. Disponível em: <https://revistas.lis.ulusiada.pt/index.php/ral/article/view/2331>. Acesso em: 6 jun. 2024.

RIBEIRO, U. G.; VASCONCELOS, R. P. DE. **Estudo de propriedades térmicas e mecânicas de compósitos cimentícios produzidos com resíduos da indústria madeireira de Porto Velho**. Matéria (Rio de Janeiro), v. 23, n. 4, p. e12241, 2018.

SILVA JUNIOR, A. R.; FREITAS, J. L. **Sustentabilidade na construção civil**: histórico, conceito, algumas técnicas e tecnologias utilizadas no Brasil. 2022. 19 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) — Ages, Senhor do Bonfim, 2022.

SOTSEK, N. C.; SANTOS, A. P. L. Panorama do sistema construtivo light wood frame no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 309-326, 2018.

SINGLA, V.; SHARMA, S. (2023), "Assessing the moderating role of the extent of implementation of lean methods in predicting productivity improvement", **RAUSP Management Journal**, São Paulo, SP, Vol. 58 No. 3, pp. 219-232.

PAIVA, D.M; PAPANDREA, P.J; BAISSO, A.C; CHAGAS, C.A.G; , SILVA, R.G. Lean manufacturing: Redução de desperdícios e a padronização do processo. **Journal Of Open Research**, Itajubá, v. 5, n. 1, p. 1-9, jan. 2020.

THALLON, R. Graphic Guide to Frame Construction Newtown: Taunton, 2008.