Brazilian Journal of Development

Contexto para a utilização da madeira como sistema estrutural em edifícios habitacionais

Context for the use of wood as a structural system in housing buildings

DOI:10.34117/bjdv6n3-014
Recebimento dos originais: 29/02/2020
Aceitação para publicação: 03/03/2020

Rodrigo de Souza N. Giorgi
Mestrando em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Presbiteriana Mackenzie
Instituição: Universidade Presbiteriana Mackenzie. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Endereço: Rua da Consolação, 930 - São Paulo - SP, 01302-907
E-mail: rodrigo@rodrigogiorgi.com

Vinícius Algarte Quirino
Mestrando em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Presbiteriana Mackenzie
Instituição: Universidade Presbiteriana Mackenzie. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Endereço: Rua da Consolação, 930 - São Paulo - SP, 01302-907
E-mail: vinqui@gmail.com

Célia Regina Moretti Meirelles
Doutora em Engenharia Civil pela Universidade de São Paulo
Universidade Presbiteriana Mackenzie. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Rua da Consolação, 930 - São Paulo - SP, 01302-907
E-mail: morettimeirelles@gmail.com

RESUMO
Existem dois grandes desafios em relação ao ambiente global que a humanidade enfrentará no decorrer deste século: as mudanças climáticas e o crescimento urbano e demográfico nas cidades. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é apresentar um contexto para a utilização da madeira como elemento estrutural, em edifícios de múltiplos andares, para habitações, em centros urbanos, como alternativa à utilização de materiais construtivos de fontes de matéria-prima não renováveis, tais como o concreto e o aço. Busca-se demonstrar que a utilização de madeira pode impactar positivamente o meio ambiente, as economias locais e a cultura da construção civil, por ser matéria-prima de fonte renovável e de oferta ilimitada, desde que o seu crescimento, colheita e produção sejam geridos de forma sustentável. Para tanto, são apresentadas informações técnicas sobre o comportamento desse material, que apontam, por exemplo, grande resistência estrutural e alto grau de eficiência e de precisão no processo industrial de pré-fabricação de elementos, o que viabiliza construções mais leves, rápidas e limpas, reduzindo desperdícios.

Palavras-chave: Madeira, Sustentabilidade, Pré-fabricação, Tecnologia construtiva, Industrialização.

ABSTRACT
There are two major challenges in relation to the global environment that humanity will face over the course of this century: climate change and urban and demographic growth in cities. Therefore, the objective of this work is to present a context for the use of wood as a

structural element, in multi-storey buildings, for housing, in urban centers, as an alternative to the use of construction materials from non-renewable raw material sources, such as like concrete and steel. It seeks to demonstrate that the use of wood can positively impact the environment, local economies and the culture of civil construction, as it is a raw material from a renewable source and of unlimited supply, as long as its growth, harvest and production are managed. in a sustainable way. For this purpose, technical information about the behavior of this material is presented, which indicate, for example, great structural resistance and a high degree of efficiency and precision in the industrial process of prefabrication of elements, which enables lighter, faster and cleaner constructions, reducing waste.

Keywords: Wood, Sustainability, Prefabrication, Constructive technology, Industrialization.

1 INTRODUÇÃO

Desde o início do Século XX a população mundial tem crescido em taxas alarmantes, de acordo com "Perspectivas da População Mundial: Revisão de 2012", relatório desenvolvido pela ONU entregue no mesmo ano, a prospecção é de que a população mundial deva atingir 9,6 bilhões de habitantes no ano de 2050. Nos dias de hoje, mais da metade da população global residem em centros urbanos e um estudo encomendado pela *London School of Economics* e o *Deutsche Bank Alfred Herrhausen Society* afirma que essa porcentagem vai se aproximar a 65% no ano de 2050.

Esses dados representam que em um curto período de tempo, a demanda habitacional em cidades vai necessitar abrigar cerca de três bilhões de pessoas. Atualmente, os dois principais materiais utilizados na construção civil são o aço e concreto, no entanto esses materiais consomem muita energia e emitem uma grande quantidade de gás carbônico em seu processo de produção. O Aço representa 3% da emissão humana de gás carbônico, e o concreto acima de 5%. Se levarmos em conta a indústria da construção como um todo, quase metade dos gases de efeito estufa estão relacionados com a indústria da construção civil (GREEN, 2017).

As cidades são responsáveis por contribuir para as mudanças climáticas antropogênicas, uma vez que as emissões de CO2 nas regiões urbanas são geralmente mais altas do que nas áreas rurais. No entanto, de acordo com Rogers (2011) as emissões de dióxido de carbono são fortemente baseadas em padrões de uso e ocupação do território, o que significa que cidades compactas e densas exibem níveis de emissão per capita mais baixos do que as cidades com a malha urbana mais dispersa.

Brazilian Journal of Development

A fim de reverter esse cenário futuro, novos meios construtivos devem ser estabelecidos, e a madeira surge como uma alternativa potencial para essa situação. Uma árvore é capaz de liberar oxigênio e reter o dióxido de carbono, ou seja, quando utilizada como material construtivo, a madeira tem capacidade de absorver gases poluentes da atmosfera (HAFNER; TAKANO; WINTER; 2012). Desde a antiguidade a madeira é utilizada como material construtivo, no entanto, devido a suas propriedades físicas, o material ficou restrito a limitados campos construtivos. Com a evolução da indústria e a busca por novas alternativas, foram desenvolvidos produtos de alta resistência mecânica que utilizam a madeira como matéria prima, tais como elementos laminados colados, painéis LVL (*Laminated Venner Lumber*), CLT (*Cross Laminated Timber*), e outros.

A manufaturação desses produtos passou a tornar viável a aplicação da madeira em situações construtivas que antes não eram realizadas por limitações de suporte de carga, dimensão, estabilidade e proteção contra incêndios. O emprego da madeira também se mostra eficiente em relação ao conforto ambiental interno das construções, estando de acordo com normas acústicas e térmicas de desempenho. Questões de eficiência construtiva também favorecem a implementação do uso da madeira em larga escala, sendo possível construir de maneira mais rápida e limpa, sem que se tenha grande desperdício no canteiro de obras.

Sendo assim, como a maior parte do crescimento da população mundial estará concentrada nas cidades, o desenvolvimento urbano sustentável precisará focar nos usos de energia e de recursos renováveis, na redução de emissões e na criação de ambientes saudáveis para habitações (DANGEL, 2017). O uso da madeira como material construtivo em ambientes urbanos ainda está em um estágio inicial, entretanto com um desenvolvimento contínuo de tecnologias de construção, acompanhado por atualizações de normas e legislações, a madeira pode servir como alternativa para atender a futura demanda habitacional.

2 OBJETIVO

O presente artigo tem como objetivos apresentar um contexto para a utilização da madeira como elemento estrutural, em edifícios de múltiplos andares, para habitações, em centros urbanos, como alternativa ao emprego de materiais construtivos de fontes de matéria-prima não renováveis, exibindo novos produtos que têm a madeira como matéria-prima, e que oferecem um desempenho adequado para a sua aplicação em edifícios habitacionais.

3 METODOLOGIA

Brazilian Journal of Development

Para o desenvolvimento do artigo, optou-se pela revisão bibliográfica sobre construções de múltiplos pavimentos em madeira com enfoque em edifícios habitacionais. A pesquisa se baseou em dados e prospecções futuras sobre a demanda habitacional em grandes centros urbanos, bem como em seu impacto ao meio ambiente. Também foi necessária a consulta a catálogos técnicos de fabricantes de produtos madeireiros engenheirados, para obter informações de desempenho e de aplicação na construção civil, sendo possível, assim, compreender o processo de implementação de uma edificação em estrutura de madeira.

4 A MADEIRA COMO RECURSO SUSTENTÁVEL

Conforme introduzido, a maior parte do crescimento da população mundial estará concentrada nas cidades, o desenvolvimento urbano sustentável terá de se concentrar nos usos de energia e de recursos renováveis, na redução de emissões de gases nocivos e na criação de ambientes saudáveis para se viver e trabalhar. Retomando um breve histórico da construção de cidades, a madeira sempre esteve presente como material construtivo, no entanto, foi largamente substituída durante o século XIX pelo aço que, por sua vez, foi substituído pelo concreto no início do século XX.

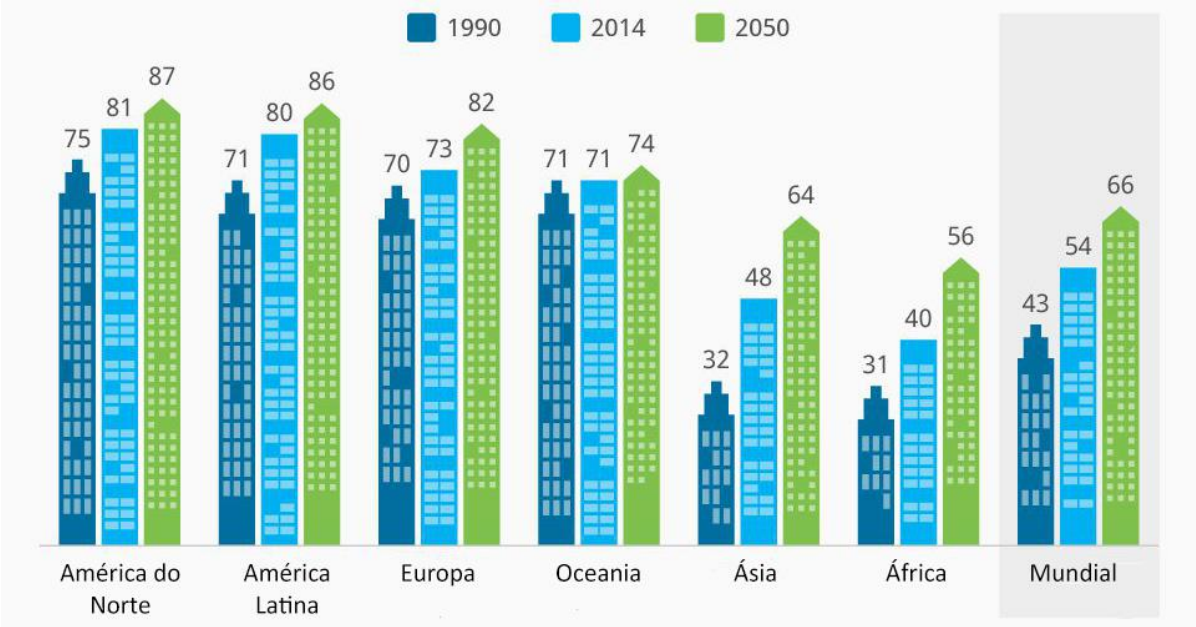


Figura 01: Porcentagem da populacional global vivendo em áreas urbanas. Fonte: Mashable: Presente em "54% of the World's Population Now Lives in Cities", Petronzio, 2014.

As crises do petróleo e de energia nos anos 1970 levaram à percepção de que avanços técnicos na indústria da construção tinham surgido às custas do meio ambiente, e tornou-se

Brazilian Journal of Development

aparente a necessidade de desenvolvimento de estratégias mais sustentáveis. Isso aumentou o interesse no uso de energia e de materiais renováveis, permitindo que a construção de madeira se apresentasse como uma solução possível (MAYO, 2015). Nos últimos trinta anos, a evolução da indústria madeireira melhorou significativamente a qualidade da madeira utilizada nas construções, enquanto surgiram novos produtos e adesivos de alto desempenho. Essas inovações tecnológicas levaram arquitetos, engenheiros e clientes a aceitar construções de madeira cada vez mais como uma solução viável.

A madeira tem capacidade de desempenhar um papel fundamental para o equilíbrio das emissões de gases nocivos ao meio ambiente, seja por meio da retenção de gás carbônico, seja quando utilizada em produtos para a construção civil, ou ainda, em bens de consumo duráveis, como móveis. Os componentes de madeira armazenam carbono e atrasam sua liberação até que o componente seja descartado. Portanto, é seguro dizer que quanto mais madeira for utilizada como material construtivo, maior será o tempo de retenção de carbono.

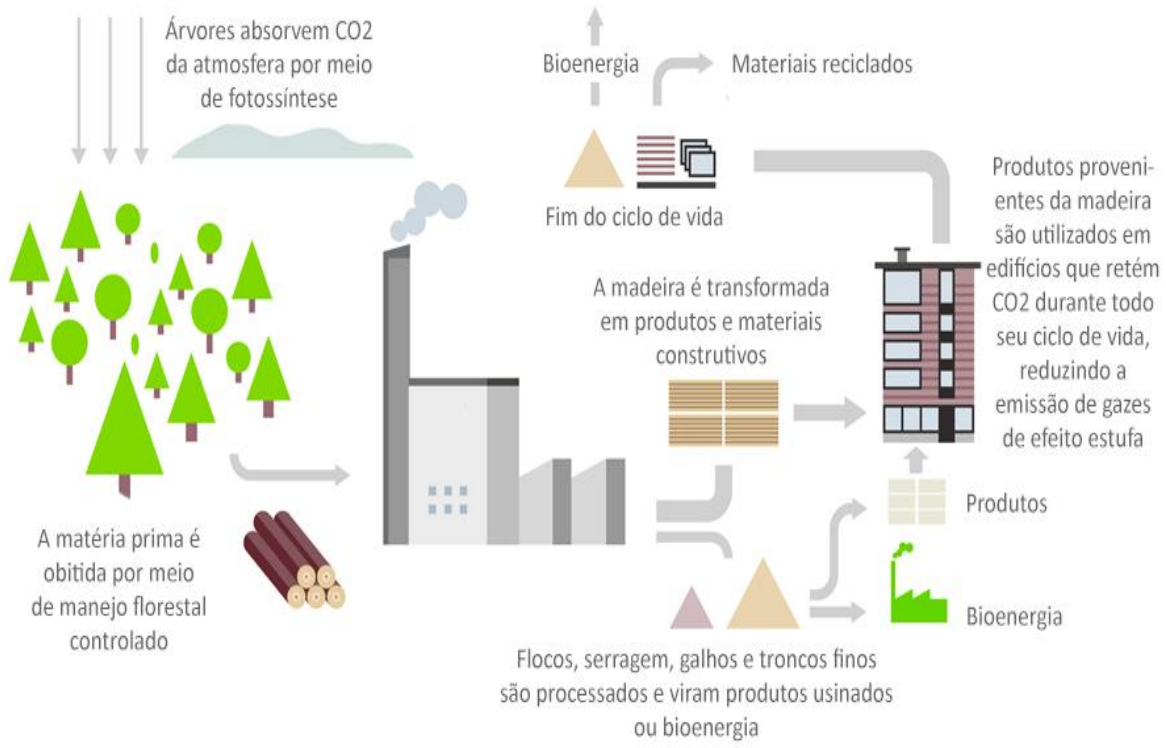


Figura 02: Armazenamento de carbono durante a vida útil de um edifício. Fonte: Metsä Wood - Presente em "*Wood Construction Battles Climate Change Through Carbon Storage*" (tradução livre).

Apesar de se apresentar como solução possível e de ser mais sustentável do que o aço e o concreto, a madeira, até pouco tempo atrás, não era considerada como recurso estrutural

para demandas de edifícios de alto e médio porte para habitações. No decorrer do século XX, mais especificamente durante o modernismo, grandes cidades ao redor do mundo tiveram o aço e o concreto como material base para suas construções, quando um conhecimento considerável do desempenho estrutural desses materiais, incluindo suas exposições a altas cargas sísmicas e de vento, foi adquirido, juntamente com uma compreensão de como protegê-los em caso de incêndio. É nesse cenário em que esses materiais foram explorados ao máximo, permitindo que os edifícios alcançassem maiores alturas, redefinindo o conceito de "arranha-céu".

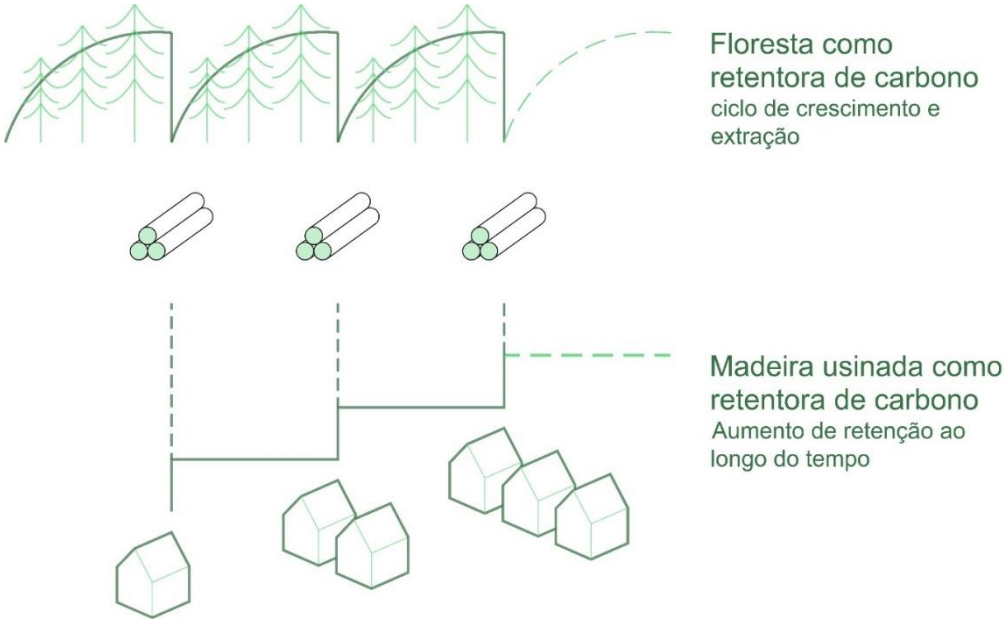
Edifícios de múltiplos andares e de grandes alturas representam uma composição de morfologia urbana dúbia, pois apresentam pontos positivos e negativos para cidades (DANGEL, 2017). Por um lado, eles representam a capacidade de aumento de densidade habitacional em grandes centros, utilizando o mínimo de área do solo para gerar o máximo número de moradias; a relação entre taxa de ocupação do lote *versus* o número de residências unifamiliares permite que sejam mais eficientes em termos de energia, pois concentram em si grande demanda energética; além disso, eles podem ser conectados a sistemas de infraestrutura que fornecem energia de forma mais eficiente a um grande número de habitantes em núcleos urbanos.

Em contrapartida, existe uma maior emissão de gases de efeito estufa proporcionados pela produção de materiais utilizados na construção de edifícios altos de múltiplos andares. Em uma edificação, a estrutura é o sistema responsável pela maior parte de energia incorporada durante a construção, e quanto mais alto for a edificação, maior a utilização de elementos estruturais e, consequentemente, suas pegadas de carbono também tendem a ser substancialmente maiores do que aquelas de prédios baixos.

O aumento de densidade de grandes cidades têm sido uma alternativa bastante aplicada para combater os gastos energéticos excessivos de todo o sistema da vida contemporânea e, para que se consiga um adensamento maior, é necessário aumentar as alturas das construções. Neste contexto, a madeira, com sua capacidade de sequestrar grandes quantidades de carbono, representa uma solução para a construção de estruturas altas que podem transformar as cidades, pouco a pouco, em locais de armazenamento de carbono.

Brazilian Journal of Development

Figura 03: Escala progressiva de Figura 03: Escala progressiva de armazenamento de carbono em construções com madeira ao longo do tempo. Fonte: Technische Universität München - presente em "Bauen mit Holz = Aktiver Klimaschutz", 2014 (ilustração realizada pelos autores, baseada na imagem do artigo).



5 A MADEIRA COMO MATERIAL CONSTRUTIVO

Uma das maiores preocupações em construções de múltiplos pavimentos feitos com estrutura de madeira é a questão de segurança contra incêndios. Inicialmente, é importante diferenciar dois tipos de construção: o primeiro são construções leves realizadas com madeira, o segundo são sistemas utilizados para construções de edifícios altos. As partes estruturais nas construções leves possuem seções e tamanhos pequenos, o que as torna mais propensa a sofrer com o fogo e desmoronar em um incêndio, portanto, esses elementos estruturais devem estar protegidos com uma barreira mais resistente ao fogo.

Por sua vez, as construções que utilizam elementos industrializados como vigas e pilares de laminado colado, ou painéis estruturais com grande massa, não apresentam as mesmas configurações dos edifícios de estrutura leve. Esses elementos têm um desempenho extremamente satisfatórios no combate ao fogo devido à sua natureza sólida, o que os torna inerentemente capazes de resistir a altas temperaturas de chamas sem qualquer proteção adicional (GREEN, 2017). Sua massa substancial permite que uma camada de carvão se forme na superfície, isolando a madeira restante da penetração de calor. Embora a parte carbonizada não tenha mais nenhuma resistência estrutural, a seção não carbonizada retém sua capacidade estrutural durante um longo período de exposição ao fogo.

Brazilian Journal of Development

Como resultado, a classificação de resistência ao fogo pode ser determinada durante o processo de projeto, por meio das grandes dimensões exigidas de membros de madeira, uma vez que a espessura da camada de sacrifício de proteção pode ser calculada usando taxas de carbonização estabelecidas por testes de fogo. Essa característica única também torna a madeira sólida mais previsível em um incêndio do que o aço, que se deforma e colapsa rapidamente acima de limites de temperatura específicos, e embora seja considerado um material não combustível, o aço deve ser coberto por meio de proteção contra fogo adicional (KAUFMANN, 2018).

Como uma alternativa à confiança no comportamento de carbonização descrito acima, os membros de madeira em massa podem ser protegidos através de envelopamento com placa de gesso resistente ao fogo ou outros materiais não combustíveis para satisfazer os regulamentos de código de construção. A adição de sistemas automáticos de suspensão de incêndios, como *sprinklers*, alarmes de incêndio e detectores de fumaça, pode muitas vezes satisfazer os requisitos de combate ao fogo sem a necessidade de encapsulamento, permitindo assim superfícies expostas que exibem as qualidades naturais da madeira.

Figura 04: Teste de carbonização de um elemento estrutural em madeira laminada colada.
Fonte: David Barber, ARUP.

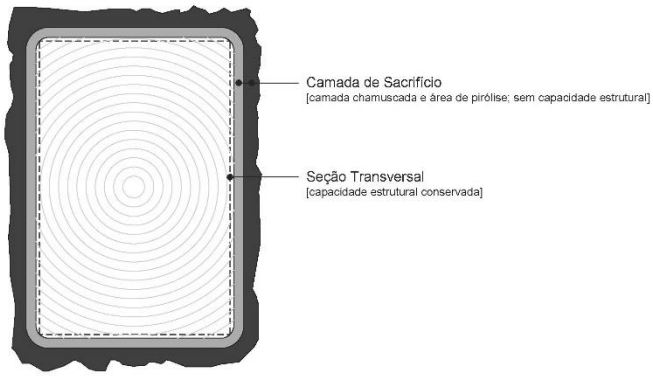


Figura 05: seção de uma estrutura de madeira maciça carbonizada.
Fonte: Autores.

Brazilian Journal of Development

Levando em conta questões de acústica, nos edifícios de múltiplos andares em madeira direcionados a unidades habitacionais, os componentes de construção como pisos e paredes devem fornecer isolamento acústico suficiente contra fontes de ruído externas e internas (GREEN, 2017). Devido à sua maior massa e espessura, a construção de madeira engenheirada geralmente oferece melhor controle acústico tanto da transmissão de som aérea quanto de impacto. No entanto, o uso de elementos de madeira, por si só, não é suficiente para responder aos requisitos acústicos necessários, devendo-se, assim, adicionar camadas de isolamento entre elementos para obter uma solução acústica que se enquadre nas normas de desempenho.

O peso de uma estrutura em madeira é relativamente menor do que o do aço e o do concreto quando analisamos suas capacidades de resistências mecânicas. Isso quer dizer que uma edificação feita em madeira é mais leve, ou seja, se coloca menos carga nas estruturas e nas fundações, tornando-a particularmente adequada para solos com baixa capacidade de carga. Edifícios verticais sofrem com a ação de cargas laterais originadas pelo vento, sendo crucial a criação de um sistema lateral resistente à carga horizontal aplicada na construção. Os sistemas de painéis de madeira sólida, como o CLT (*Cross Laminated Timber*), mostram-se apropriados para tal situação pois possuem rigidez e estabilidade dimensional.

Testes estabeleceram que o uso da madeira como estrutura também apresenta um bom desempenho em terremotos e são adequados para áreas sismicamente sensíveis. Embora os componentes de madeira engenheirada tendam a apresentar características frágeis nessas situações, é possível utilizar conectores de metal para que alcancem um comportamento dúctil que realiza, assim, a dissipação de energia necessária para um desempenho seguro durante eventos sísmicos (DANGEL, 2017).

Diversos edifícios de múltiplos andares, com estrutura de madeira, direcionados a habitações foram realizados nos últimos anos, iniciando uma nova cultura na construção civil. Isso tem aumentado também o desenvolvimento de uma investigação sobre os mais variados produtos provenientes da indústria madeireira, além de também terem sido realizadas revisões de códigos de construção, melhorias no desempenho de conforto termoacústico e estrutural. Esses novos projetos apresentam variadas técnicas construtivas como o uso de elementos modulares, de painéis, ou de sistema híbrido combinando madeira com concreto e aço, que se adaptam às distintas tipologias de edificações.

Atualmente, existem edifícios com mais de 15 pavimentos de altura executados em estrutura de madeira. Há no momento uma busca por uma verticalização cada vez maior de

edificações com esse material, o que, de certo modo, é uma positivo, pois, assim, são desenvolvidos cada vez mais materiais e pesquisas sobre o tema. Na indústria da construção civil, a crescente conscientização sobre as emissões de carbono e sua contribuição para as mudanças climáticas continuará a explorar os limites da construção com madeira para conservar energia, reduzir as emissões de dióxido de carbono e criar ambientes mais saudáveis.

6 PRODUTOS INDUSTRIALIZADOS PROVENIENTES DA MADEIRA

Com o processo de industrialização da madeira, diversos novos produtos de alta resistência mecânica tem sido desenvolvida para atender à demanda do setor da construção civil. A manufaturação desses produtos passou a tornar viável a aplicação da madeira em fases construtivas em que antes era impossível, tanto por limitações de suporte de carga ou de dimensões, quanto porque não era competitiva, financeiramente, contra outros materiais.

Os produtos provenientes da madeira engenheirada apresentam propriedades técnicas distintas, tanto na sua composição, quanto em sua utilização. Geralmente, são fabricados por meio da união de pequenas seções de madeira maciça coladas, micro laminações de toras, pequenos flocos processados, ou outras formas de fibras de madeira, compondo uma unidade integral, de maior dimensão e rigidez, o que lhes confere maior resistência (GREEN, 2017).

De acordo com Green (2017), um dos fatores que potencializa a industrialização da madeira é o fato de que a composição dos produtos pode provir de fontes primárias mais distintas e com menor tempo de vida, ou seja, de árvores mais jovens e de menor porte. Outro fator que intensifica a industrialização da madeira é o percentual de utilização da matéria-prima, enquanto se tem muita perda de produto com a madeira serrada, a madeira engenheirada consegue otimizar a capacidade de uso da matéria-prima, gerando menos perdas. Uma maior estabilidade e controle final do produto também pode ser alcançado, uma vez que o controle da secagem da madeira é realizado em estufas, e o processo industrializado garante a fabricação precisa.

Na atualidade, o setor da construção civil tem uma ampla gama de produtos à sua disposição que podem ser aplicados nas edificações. O processo de industrialização do setor madeireiro tenta atender aos requisitos específicos de desempenho de uma edificação, formulando produtos que podem ser aplicados nas mais variadas etapas da construção do projeto arquitetônico. No entanto, é essencial que o arquiteto compreenda quais as diferenças entre os mais variados produtos encontrados no mercado para entender suas potencialidades e limitações, otimizando seus usos e direcionando-os à uma aplicação específica e correta.

Brazilian Journal of Development

6.1 MADEIRA LAMINADA COLADA

Madeira laminada colada é produzida pelo processo de colagem de peças de madeira individuais com dimensões reduzidas a fim de gerar um elemento linear de tamanho maior. Essas peças individuais se assemelham a caibros com seções que variam de acordo com o elemento a ser produzido, mas geralmente possuem uma dimensão de 25 a 34 mm de altura, por 80 a 170 mm de largura; o seu comprimento é de 3 metros, em média, podendo ser maior. (GREEN, 2017). Essas peças compridas são unidas, umas às outras, em suas extremidades longitudinais, por meio de *finger-joints*, até que se obtenha a altura desejada para, posteriormente, serem coladas face a face sobre pressão com auxílio de gabaritos manuais ou hidráulicos, podendo até gerar curvaturas no produto final.

A madeira laminada colada pode ser fabricada nos mais variados tamanhos, permitindo que seja usada para vencer grandes vãos, ou suportar altas taxas de carga, sendo propícia a sua utilização tanto para vigas quanto para pilares.

6.2 MADEIRA MICRO LAMINADA

Madeira Micro Laminada ou LVL (sigla do inglês para *Laminated Veneer Lumber)* é fabricada pelo processo de colagem de finas lâminas de madeira, orientadas umas sobre as outras na mesma direção e prensadas em grande pressão, podendo gerar produtos de diversas dimensões e de alto desempenho, desde vigas até painéis estruturais.

Uma das potencialidades desse produto é o fato de que, durante sua produção, nós e outras imperfeições da madeira acabam sendo dispersos por todo o elemento, garantindo melhor desempenho quanto a rachaduras e empenamentos. Caso seja necessário que o produto final possua resistência maior ao esmagamento, é possível que sejam assentadas cerca de 1/5 das lâminas em sentido cruzado, para que seja, desse modo, suprida tal necessidade.

6.3 MADEIRA LAMINADA CRUZADA

O painel CLT (*Cross Laminated Timber*) – conhecido no Brasil como Madeira Laminada Cruzada – é gerado a partir de tábuas de madeira, coladas e dispostas de maneira intercalada, em sentidos opostos, prensadas hidraulicamente, com um agente adesivo entre as camadas. A laminação cruzada melhora as propriedades estruturais dos painéis pela distribuição de forças ao longo das fibras da madeira, em ambos os sentidos. Isso elimina, praticamente, qualquer retração significativa ou deformação dos painéis, permitindo-lhes, assim, suportar grandes cargas, viabilizando construções com vários pavimentos.

Brazilian Journal of Development

As camadas externas dos painéis de parede CLT são geralmente orientadas com a fibra correndo verticalmente na direção das cargas aplicadas. Da mesma forma, a fibra nas camadas superior e inferior dos painéis do piso e do telhado é geralmente orientado paralelamente à maior extensão.

As dimensões dos painéis são limitadas de acordo com a capacidade do maquinário e transporte. Quando processados pelo sistema CNC (*Computer Numerical Control*), os painéis podem conceber diversas formas e aberturas, em alta precisão, facilitando a compatibilização de diversas partes do projeto.

O painel de CLT pode ser utilizado nos mais diversos setores de uma construção, podendo exercer a função de grandes painéis estruturais, bem como lajes que conseguem vencer grandes vãos. Por ter uma aparência visual mais atrativa, em alguns casos o painel é deixado exposto em áreas protegidas contra intempéries.

7 PRÉ-FABRICAÇÃO E INDUSTRIALIZAÇÃO EM LARGA ESCALA

A facilidade e leveza da madeira como material de trabalho torna o produto adequado para o emprego de construções pré-fabricadas. A construção de madeira pré-fabricada oferece alternativas às práticas convencionais de construção, que são frequentemente afetadas por condições meteorológicas adversas, orçamentos excedentes, atrasos crônicos e má qualidade na execução da construção (DÖRRHÖFER; ROSENTHAL; STAIB, 2008).

A pré-fabricação permite que processos da construção sejam realizados simultaneamente, ao invés de serem realizados de modo linear, levando a uma redução do trabalho de montagem no local e do tempo total de construção. A preparação do local de trabalho e a execução da fundação, por exemplo, podem ser concluídas enquanto os componentes estruturais estão sendo fabricados na indústria.

A fabricação em local protegido elimina a possibilidade de interrupção do trabalho devido ao clima e garante a entrega no prazo, com isso, a conclusão e a ocupação antecipadas do projeto podem trazer um retorno mais rápido do investimento. Ademais, o ambiente seco e seguro cria melhorias às condições do trabalhador, reduzindo o risco de lesões no local de trabalho.

Com a pré-fabricação é possível a utilização de gabaritos e de equipamentos de manuseio para a montagem de elementos de parede, teto e piso, com grande precisão, garantindo a qualidade do serviço. Em elementos pré-fabricados podem ser instalados

Brazilian Journal of Development

componentes frágeis, evitando soluções improvisadas em obra, reduzindo a possibilidade de danos aos produtos acabados.

Um dos benefícios ambientais da fabricação em indústrias é o uso mais eficiente do material e a diminuição significativa do lixo e do desperdício no canteiro de obra, reduzindo a quantidade de material a ser descartado. Por fim, a rápida instalação de componentes no canteiro de obra minimiza a poluição sonora e a interrupção das operações do dia-a-dia para vizinhos adjacentes, particularmente em áreas urbanas densas.

O processo de pré-fabricação muitas vezes depende de onde o produto final será instalado. Componentes como vigas e pilares em Madeira Laminada Colada muitas vezes são escolhidos por serem elementos de fácil transporte e instalação, pois permitem ajustes em obra e podem receber uma grande variedade de conectores de metais para montagem final.

Por sua vez, os painéis fabricados envolvem a produção de elementos de maior dimensão. Geralmente os painéis são utilizados para compor paredes ou pisos que são embalados e transportados para o local de obra quase finalizados, muitas vezes já com isolamento acústico, barreiras de ar, retardadores de vapor, janelas, portas, acabamentos internos e revestimento externo já executados.

Os módulos pré-fabricados podem ser montados inteiros em uma fábrica, incluídos acabamentos internos e externos, bem como todo o sistema de infraestrutura já instalado, sendo que, em alguns casos, já são transportados até com mobiliário. Em relação ao transporte, suas dimensões são geralmente limitadas pelos regulamentos de transporte rodoviário aplicáveis localmente.

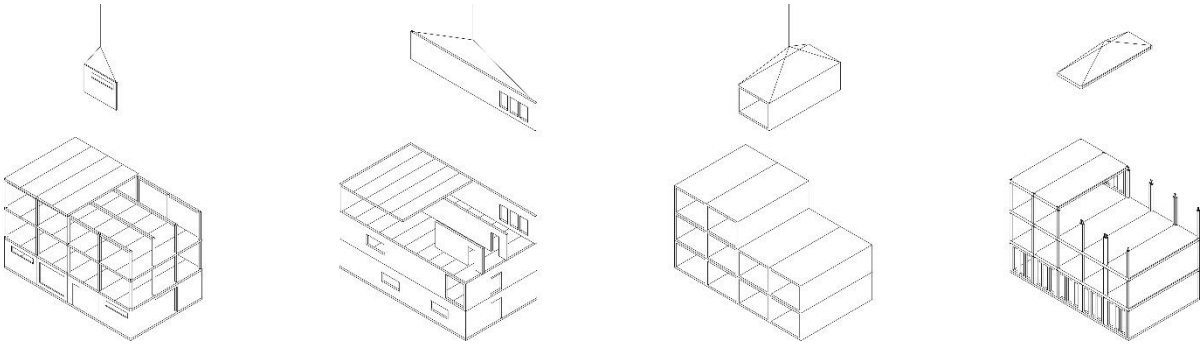


Figura 06: Sistemas de pré-fabricação: (1) Aporticados com fechamento independente; (2) Painéis portantes; (3) Módulos volumétricos; (4) Misto. Fonte: Autores.

Quanto maior o grau de pré-fabricação, maior o custo de mão-de-obra e de materiais envolvidos no processo (DANGEL, 2017), no entanto, esse valor muitas vezes consegue ser

Brazilian Journal of Development

abatido com a economia conquistada pelas logísticas de entrega e de montagem eficientes, fazendo com que ocorra a diminuição do tempo de obra. Quanto maior e mais complexo for o elemento produzido em fábrica, menor o número de problemas que possam ocorrer em juntas e menor a quantidade de conexões a serem feitas em obra. As despesas de logística e transporte devem ser consideradas, mas também deve-se levar em conta que o valor final pode ser reduzido pois há uma necessidade menor de permanência no local da obra. Como não é fácil realizar alterações em elementos pré-fabricados no local de obra, é necessária uma fase de planejamento detalhada para garantir a coordenação adequada entre todos os elementos envolvidos.

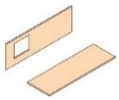
	Componente de construção	Pré-fabricação	Dimensões	Complexividade	Construção
CONSTRUÇÃO EM LOCO	produtos de construção	grau de pré-fabricação baixo	sem limitações de tamanho	formas únicas e complexas	fase de construção longa
CONSTRUÇÃO COM ELEMENTOS	elementos bidimensionais 	grau de pré-fabricação alto	ampla possibilidade de dimensões	repetição de paineis e lajes	fase de construção curta
CONSTRUÇÃO COM ELEMENTOS MODULARES	elementos tridimensionais	grau de pré-fabricação extremamente alto	dimensão limitada	repetição de unidades modulares	fase de construção extremamente curta

Figura 07: Comparação de sistemas de pré-fabricação. Fonte: Autores.

Muitos conceitos iniciais de pré-fabricação foram baseados em sistemas que consistem em peças altamente uniformes com dimensões padronizadas, que podem ser combinadas em várias configurações para satisfazer uma infinidade de aplicações. Embora isso permitisse a construção eficiente em termos de custo por meio da produção em larga escala de componentes, na maioria das vezes, os prédios não tinham identidade própria. O desenvolvimento de sofisticados equipamentos de fabricação controlados por computador nos últimos anos aumentou as opções de soluções customizadas.

Embora uma abordagem sistemática e integrada ainda seja usual, a pré-fabricação moderna é menos focada na uniformidade das peças do que na divisão de projetos em unidades gerenciáveis que podem ser facilmente manuseadas e transportadas. Isso evita uma aparência

monótona e permite que os edifícios sejam personalizados, aproveitando as vantagens da pré-fabricação. Um sistema abrangente baseado nesse conceito fornece componentes principais padronizados, conexões e montagens que garantem economia, consistência e controle de qualidade, mas também permite modificações para obter edifícios personalizados que atendam às diversas e variáveis necessidades dos clientes.

8 CONCLUSÃO

O desenvolvimento de novas tecnologias construtivas que utilizam a madeira como sistema estrutural demonstram potencial para a implementação em edifícios habitacionais de múltiplos pavimentos, tanto por suas características de pré-fabricação e industrialização, quanto por questões ligadas à sustentabilidade.

Do ponto de vista da sustentabilidade, a madeira oferece uma vantagem significativa em relação aos produtos construtivos com origem em fontes não renováveis por ter a capacidade de estocar carbono e de utilizar menos energia durante as fases de fabricação e de construção, apresentando, portanto, menor impacto ambiental.

Em relação às questões de pré-fabricação e de industrialização, construções em madeira possibilitam maior controle e eficiência do processo construtivo, criando um cenário onde as obras são realizadas de maneira mais rápida e limpa, tendo uma redução considerável do desperdício no canteiro de obra.

Sendo assim, o artigo buscou contextualizar o panorama atual em que novos produtos industrializados, provenientes da madeira, têm sido aplicados para construções de edifícios de múltiplos pavimentos e quais são os processos de implementação para que se torne viável a aplicação desses produtos e de seus sistemas construtivos em centros urbanos.

REFERÊNCIAS

BURDETT, Ricky; SUDJIC, Deyan. **Living in the Endless City**. Londres: Phaidon, 2011.

DANGEL, Ulrich. **Turning Point in Timber Construction: A New Economy**. Basileia: Birkhäuser, 2017.

DÖRRHÖFER, Andreas; ROSENTHAL, Markus; STAIB, Gerald. **Components and Systems: Modular Construction – Design, Structure, New Technologies**. Basileia: Birkhäuser, 2008.

FEDERATION OF THE FINNISH WOODWORKING INDUSTRIES. **LVL Handbook**. Helsinki: Punamusta, 2019.

GREEN, Michael; TAGGART, Jim. **Tall Wood Buildings: Design, Construction and Performance**. Basileia: Birkhäuser, 2017.

GUMUCHDJIAN, Philip; ROGERS, Richard**. Cidades Para Um Pequeno Planeta**. Barcelona: Gustavo Gili, 2011.

HAFNER, Annette; WINTER, Stefan; TAKANO, Atsushi. **Wooden products - Positive material in life-cycle analysis**. Conference: Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems: Proceedings of the Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, 2012.

KARACABEYLI, Erol; DOUGLAS, Brad. **CLT Handbook: Cross Laminated Timber**. Vancouver: Forintek Canada Corporation, 2013.

KAUFMANN, Hermann; KRÖTSCH, Stefan; WINTER, Stefan. **Manual of Multistorey Timber Construction**. Munique: Birkhäuser, 2018.

KOLB, Josef. **Systems in Timber Engineering**. Basileia: Birkhäuser, 2008.

MAYO, Joseph. **Solid Wood: Case Studies in Mass Timber Architecture, Technology and Design**. Abingdon: Routledge, 2015.

SMITH, Ryan. **Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction**. Nova Jersey: Wiley, 2011.

UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME (UN-Habitat). **State of the World's Cities 2010/11: Cities for All: Bridging the Urban Divide**. Abingdon: Routledge, 2010.