



“TEN YEARS WORKING TOGETHER FOR A SUSTAINABLE FUTURE”

Construção em Madeira e Edificação Circular: potencialidades para a sustentabilidade

TAVARES, S. F. ^{a,b*}, INO, A. ^{a,b*}, OMETTO, A. R. ^{C*}

a. Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos - IAU, Universidade de São Paulo - USP

b. HABIS, IAU USP São Carlos

c. Departamento e Programa de Engenharia de Produção, EESC- USP

**Corresponding author, simonetavares83@gmail.com*

Resumo

A indústria da construção civil no Brasil é considerada como de grande impacto ambiental, consumo de materiais e desperdício. Trata-se, no entanto, de um dos mais importantes setores econômicos e sociais, responsável pela construção do nosso ambiente construído, geração de empregos e movimentação da economia. Diante de um cenário de esgotamento dos recursos naturais, aumento populacional e do aquecimento global resultado de ações antrópicas, é fundamental pensar em novas abordagens que promovam mudanças de paradigmas rumo à sustentabilidade na construção civil. Neste sentido, dentro do âmbito da Economia Circular, é proposto o Design para a Circularidade, através da Edificação Circular, a qual é projetada e desenvolvida visando alta durabilidade, flexibilidade, reciclabilidade e desmontagem, com uso de materiais de origem sustentável, sem toxicidade, de alto desempenho, e passíveis de reuso. Trata-se de projetar para a máxima permanência de materiais e construções, sem a perda de qualidade. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar qual é o potencial da madeira serrada enquanto material que contribua para o Design para a Circularidade e a Edificação Circular, através da análise de suas propriedades intrínsecas e relacionais, no sistema construtivo pilar-viga. O artigo possui abordagem metodológica qualitativa, de caráter exploratório, baseada na revisão sistemática da literatura. Os resultados encontrados demonstram que a madeira, através do sistema pila-viga, possui alto potencial para o design para a circularidade, contribuindo para uma edificação mais sustentável.

Palavras-chave: edificação circular, design para a circularidade, madeira maciça, sistema pilar-viga, sustentabilidade.

1. Introdução

Este artigo tem com tema a construção em madeira enquanto solução técnica potencial para edificações mais sustentáveis, sob o viés da Economia Circular e o Design para a Circularidade.

A indústria da construção civil é uma das mais importantes da economia, mobilizando diferentes setores em suas atividades diretas e indiretas, como a produção e a comercialização de materiais, e serviços técnicos da construção e do mercado imobiliário. Em 2015, num mercado desaquecido, foi responsável por 3,5 milhões de empregos e 15,6% do PIB brasileiro (Anonymous, 2015). Trata-se do setor que dá forma ao nosso ambiente construído, altera a natureza e garante espaços para o desenvolvimento de todas as nossas atividades produtivas, bem como para o repouso, lazer, e

“TEN YEARS WORKING TOGETHER FOR A SUSTAINABLE FUTURE”

São Paulo – Brazil – May 24th to 26th - 2017

deslocamento (CIB, 1999).

Pela sua abrangência, trata-se de uma indústria de alto impacto ambiental, responsável pelo consumo de 50% dos recursos mundiais (Edwards, 2013) sendo considerada uma das atividades menos sustentáveis do planeta. No Brasil, responde pelo consumo de 40% da energia produzida, com a liberação de 40% das emissões de poluentes (Motta e Aguilar, 2009). Aqui também é caracterizada, predominantemente, pela alta produção de resíduos sólidos, sem destinação adequada, proveniente de processos construtivos arcaicos, de baixa industrialização, com uso de mão de obra extensiva e pouco qualificada, em conjunto com projetos executivos incompletos e ineficientes. O resultado destes fatores colabora para que seja considerada como de alto grau de desperdício, e de baixa produtividade, baseada no modelo de produção fim de tubo, a qual visa mais a lucratividade do negócio que a qualidade do ambiente construído.

A questão da sustentabilidade na construção civil passou a ser tratada com mais afinco a partir de 1999, com o documento internacional *Agenda 21 for Sustainable Construction* (CIB, 1999), e também com o *Protocolo de Kyoto* (Brasil, 1997). Questões como produção mais limpa, relacionando baixas emissões de gases de efeito estufa, uso adequado e consciente dos recursos naturais, apropriação adequada das fontes de água, eficiência energética, passaram a ser pauta. E hoje estas discussões estão ainda mais presentes. Estudos científicos de alta qualidade e confiabilidade já comprovam que o aquecimento global é potencializado pelas ações antrópicas (Angelo, 2016; Marques, 2015; IPCC, 2014), tornando ainda mais urgente as mudanças de postura frente aos problemas gerados pelo nosso modo de viver.

Diante deste cenário, está havendo um esforço em toda a cadeia de produção da construção civil a fim de minimizar o seu impacto. Entre as principais discussões colocadas está a análise de ciclo de vida, metodologia que busca compreender toda a cadeia de produção dos materiais (extração da matéria prima, transformação, utilização, manutenção, disposição/demolição/reciclagem), e também todo o ciclo de produção da edificação (projeto, construção, uso e manutenção, desmontagem/demolição). Através desta ferramenta podemos analisar os impactos causados por uma edificação e realizar decisões conscientes em termos de materiais e projeto. Trata-se de uma metodologia ainda nova no Brasil, e de extrema complexidade, mas, os primeiros estudos já demonstraram a necessidade do uso adequado dos recursos naturais, aumentando a sua permanência enquanto material eficiente, e ao mesmo tempo, minimizando a geração de resíduos e de desperdícios no processo de produção e de demolição, bem como a emissão de poluentes e gases de efeito estufa, decorrentes também das extensivas etapas de transporte.

Neste sentido a inovação tecnológica se faz imprescindível no campo da construção civil, a qual proponha novas formas de consumir, de produzir e de fazer negócios, buscando alcançar justiça social, proteção ambiental e viabilidade econômica (Agopyan & John, 2011). E a industrialização da construção civil, através da pré-fabricação de componentes e sistemas, parece ir de encontro a este pensamento, pois garante a produção racional dos mesmos com qualidade e durabilidade. A integração com projetos bem desenvolvidos, e com uso de plataformas *Building Information Modelling* (BIM) contribui para o melhor entendimento das soluções construtivas, minimizando perdas no processo de montagem, tempo de construção, além de contribuir para a visão geral da vida da edificação, onde a questão da reutilização de peças e componentes, modulação e flexibilidade podem ser trabalhadas, aumentando a permanência do material em circulação. O nosso modelo, infelizmente, frisa apenas a redução dos custos com vista à máxima lucratividade, o que, geralmente, vem acompanhado de baixa qualidade. Trata-se da supremacia da economia sobre o meio ambiente e o desenvolvimento social.

1.2 A economia circular e a construção civil – o design para a circularidade

A economia circular é uma corrente de pensamento que busca repensar o nosso sistema produtivo e econômico. O nosso modelo atual se baseia no conceito linear de “extrair, transformar e descartar”, onde, para a fabricação de componentes e produtos, é utilizado grande volume de matéria prima e energia, geralmente extraída virgem do meio ambiente, e é gerado grande volume de resíduo (Ellen Macarthur Foundation, 2015). Desta maneira, num cenário mundial marcado pelo esgotamento de vários recursos naturais, aumento populacional, e aquecimento global com mudanças climáticas, faz-se imprescindível a busca por novas abordagens econômicas.

A economia circular, conforme definição da Ellen Macarthur Foundation (2015, p. 05), “(...) é regenerativa e restaurativa por princípio. Seu objetivo é manter produtos, componentes e materiais em seu mais alto nível de utilidade e valor o tempo todo”. Trata-se de um esforço em conciliar o desenvolvimento econômico global dissociado do consumo de recursos finitos. Desta maneira “(...) consiste em um ciclo de desenvolvimento positivo contínuo que preserva e aprimora o capital natural, otimiza a produção de recursos e minimiza riscos sistêmicos administrando estoques finitos e fluxos renováveis”.

A preocupação da economia circular, no entanto, não está apenas nas alterações na produção de bens e serviços. Ela busca estender um pensamento sistêmico da nossa situação. O planeta Terra é um sistema fechado e circular com capacidade de suporte limitada. Nossa economia deveria, desta maneira, coexistir em equilíbrio com o meio ambiente (Boulding, 1966, apud Geissdoerfer et al., 2016). Um dos pontos mais importantes trata da questão do valor. Hoje, nossa economia se estrutura na posse de um determinado produto pela sua compra. Seria possível mudarmos o valor para o uso de produtos, e adquirir o direito de uso? Os produtos oferecidos seriam desenhados, desta maneira, para design duradouro, para receber manutenção, reparos, serem reutilizados, remanufaturados, remodelados e reciclados (Geissdoerfer et al., 2016).

Segundo Ellen Macarthur Foundation (2015) a economia circular se fundamenta em três princípios:

- 1) Preservar e aprimorar o capital natural controlando estoques finitos e equilibrando os fluxos de recursos renováveis. Desta maneira projeta produtos e componentes pensando na possibilidade e efetividade de sua desmaterialização; prioriza o uso de recursos renováveis em seu maior desempenho, portanto, durabilidade; considera a regeneração por biodegradação dos materiais utilizados;
- 2) Otimizar a produção de recursos evitando a geração de resíduos e fazendo circular produtos, componentes e materiais no mais alto nível de utilidade em diferentes etapas de uso. Isso resulta de do um projeto pensado para remanufatura, reforma e reciclagem de componentes e materiais;
- 3) Fomentar a eficácia do sistema revelando as externalidades negativas e excluindo-as do projeto. Trata-se de evitar a degradação dos sistemas naturais devido às nossas escolhas.

No âmbito da construção civil a economia circular vem sendo discutida por Geldermans (2016) como Edificação Circular, ou *Circular Building*, através do Design para a Circularidade. Trata-se de aumentar a durabilidade e permanência das construções, seu tempo de vida, pensando tanto em termos materiais quanto projetuais (espaço e uso), antecipando suas diferentes rotas de utilização. Coloca como desafio pensar e projetar quais são as pré-condições para o desempenho dos materiais, produtos, serviços e edificações, de acordo com as necessidades do cliente presente e futuro, aproximando-se de conceitos de design para adaptabilidade e reciclagem, e projeto flexível. Para o autor, a flexibilidade das edificações promove a sua não obsolescência, possibilitando a sua customização de acordo com o desejo do morador, bem como adicionando valor para o investimento inicial realizado.

Geldermans (2016) estabelece duas propriedades que devem ser garantidas quando se projeta para a circularidade: a intrínseca e a relacional. A propriedade intrínseca refere-se às garantias dos materiais e dos produtos as serem empregados, quais sejam: ter alto grau de qualidade, com desempenho funcional; ser de origem sustentável, voltando a ser sustentável após o seu uso; não possuir nenhum tipo de toxidade, a qual possa implicar em perda de saúde pelo usuário, ou impossibilitar sua reutilização, ou mesmo deposição final; ser consistente com o ciclo biológico e com o ciclo em cascata, ou seja, este material deve ter sua usabilidade garantida em diferentes ciclos de vida. A propriedade relacional define o modo de uso destes mesmos materiais e produtos, como eles se relacionam entre si no momento do projeto. Devem possuir dimensões que possibilitem atender diferentes demandas; conexões secas e lógicas; tempo de desempenho compatível com o tempo de vida da edificação. Mais uma vez trata-se da possibilidade de desmontagem de edificações sem a perda de qualidade do projeto e dos materiais utilizados.

As propriedades intrínsecas e relacionais devem ser pensadas em conjunto no momento projeto de

maneira dissociada. De maneira resumida, para Geldermans (2016), uma edificação circular deve:

- Utilizar materiais com composição conhecida, de alta performance e durabilidade, sustentável, não tóxico;
- Ter o conceito de projeto aberto e adaptável, de maneira que possíveis mudanças evitem a perda de material e de sua qualidade, bem como a qualidade da edificação.
- Pensar em padronização de materiais e sistemas, de maneira a garantir a montagem e a desmontagem de sistemas e elementos construtivos. Dimensões e conexões são essenciais para um design adaptativo, assim como a padronização. Como diz o autor "(...) if the connections between elements are standardized, the (dimensions of the) elements do not necessarily need to be" (Geldermans, 2016, p. 306).

A questão da demanda também é importante para a edificação circular. Antes de dar início a um novo projeto é preciso identificar a real necessidade de uma nova edificação através do estudo das necessidades do cliente. Por exemplo, será que a demanda trazida não pode ser suprida através da adaptação de uma edificação já existente? Trata-se de reduzir novas construções e reutilizar as existentes. Em relação aos materiais, atesta pelo uso daqueles que são locais, naturais ou reutilizáveis. Isso incentiva a economia local e evita o uso de transportes longos.

A viabilidade desta proposta depende de mudanças culturais, incentivos fiscais, governamentais, e principalmente conscientização sobre o valor, tanto para os usuários quanto para os investidores (empresas fabricantes de materiais, sistemas, construtoras). A proposta é que os edifícios e os materiais empregados sejam um recurso, e que o seu valor esteja na sua utilidade, e não no objeto em si.

Outra questão que nos parece fundamental, não aprofundada por Geldermans (2016) é o entendimento do que seriam produtos de origem sustentável. O impacto ambiental decorrente da extração de recursos na natureza é gigantesco. Em geral, alteram drasticamente a paisagem, e modificam todo o ecossistema local e regional. A extração de minérios como ferro, calcário e argila, além de modificarem permanentemente a paisagem, passam por processo de transformação e refinamento que demandam enorme gasto de energia e água, e liberam expressiva quantidade de gases de efeito estufa e poluentes. E, mais importante, são materiais não renováveis, finitos. Desta forma, o uso de fontes de recursos renováveis é um tema importante dentro da discussão da sustentabilidade. Mesmo que venhamos trabalhando no aprimoramento de materiais e sistemas construtivos, de modo a melhorar sua durabilidade, economizando materiais pelo melhor entendimento das reações químicas e físicas que garantem o seu desempenho, e minimizando a geração de resíduos e de poluentes durante todo o seu ciclo de vida, ainda assim são recursos finitos e de alto impacto. Ao optar por materiais de fontes renováveis contribuímos para a manutenção dos recursos não renováveis, os quais podem ser utilizados com cautela, onde realmente se fazem imprescindíveis.

2. Objetivo do trabalho, metodologia e delineamento da pesquisa

Diante das discussões colocadas no capítulo anterior, este artigo tem como objetivo avaliar qual é o potencial da madeira serrada enquanto material e sistema construtivo que contribua para o Design para a Circularidade e a Edificação Circular, avaliando as características propostas por Geldermans (2016), em termos de propriedades intrínsecas e relacionais. Almeja, desta forma, a busca de um cenário de maior sustentabilidade para a construção civil.

A madeira maciça é obtida pelo desbaste das árvores em peças de sessão quadrada ou retangular. Da madeira serrada podemos propor elementos construtivos simples ou composto, este último pela junção de peças formando pilares ou vigas, por exemplo. O sistema construtivo analisado será o pilar-viga, ou *frame construction*, em madeira maciça, entendido como solução projetual de alto desempenho. Trata-se de um sistema hierarquizado que permite independência entre trama estrutural e vedação. A madeira empregada pode ser tanto de reflorestamento ou de manejo florestal. O fechamento será constituído painéis compostos por estrutura em madeira e placas.

Esta pesquisa possui uma abordagem qualitativa e se insere no universo das pesquisas exploratórias, as quais são classificadas por Gil (2002) como aquelas que proporcionam maior familiaridade com o problema, com o objetivo de aprimoramento de ideias. O procedimento técnico utilizado se baseou na análise sistemática da literatura, a qual permite ao pesquisador a “cobertura de uma gama de fenômenos muito mais ampla do que aquela que poderia pesquisar diretamente” (GIL, 2002, p.45), além de utilizar-se das contribuições de diversos autores sobre determinado assunto.

Desta maneira, foi desenvolvida seguindo as seguintes etapas: 1) Levantamento bibliográfico inicial sobre economia circular, design para a circularidade, edificação circular, madeira e construção em madeira; 2) Definição de critérios que definem a edificação circular (propriedades intrínsecas e relacionais); 3) Caracterização da madeira enquanto produto, material construtivo, e sistema construtivo; 4) Análise da construção em madeira em pilar-viga em relação às propriedades estabelecidas; 5) Discussão de resultados, e considerações finais.

3. Resultados

3.1 Critérios para a Edificação Circular – propriedades intrínsecas e relacionais

Os critérios para a aproximação de uma Edificação Circular foram definidos com base no artigo de Geldermans (2016), e estão divididos em propriedades intrínsecas, mais específicas do material, e propriedades relacionais, que remete ao sistema construtivo, portanto, solução projetual. Também foram adicionados novos itens, indicados na tabela com o símbolo (*), não desenvolvidos pelo autor de referência, mas entendidos como fundamentais de serem considerados. A tabela 1 apresenta estas propriedades selecionadas em conjunto com uma breve explicação:

Tabela 1: Propriedades intrínsecas e relacionais a serem analisadas, e sua definição. Adaptação de Geldermans (2016).

PROPRIEDADES	CRITÉRIOS ANALISADOS	DEFINIÇÃO
Intrínsecas – propriedades do material madeira	Biodegradabilidade	Se facilmente absorvido e transformado pela natureza após o seu descarte;
	Reciclabilidade	Se possui diferentes tipos de uso e funções durante a sua vida útil, sem grandes transformações (energia) e perdas;
	Toxicidade	Se possui elementos tóxicos em sua composição, para o usuário e para o meio ambiente;
	Durabilidade / qualidade	Se a vida útil é longa, e se sua qualidade é mantida durante este tempo;
	Desempenho	Se o desempenho é compatível com o uso e com a vida útil do material;
	Origem (*)	Se de origem renovável ou não; natural ou artificial;
	Emissão de CO ₂ (*)	Se há emissão de gases de efeito estufa durante sua transformação em material construtivo;
Consumo energético (*)	Se utiliza grande quantidade de energia na sua transformação de matéria prima para material construtivo;	
Relacionais – propriedades do sistema construtivo pilar-viga	Coordenação dimensional	Se existe relação entre as dimensões dos materiais e as dimensões dos ambientes projetados
	Padronização	Se os elementos, sistemas e materiais utilizados possuem um padrão, permitindo facilidade de alteração, sem grandes adaptações e perdas;
	Conexões secas	Se as conexões entre as partes da edificação podem ser separadas sem a sua destruição (conectores, parafusos);
	Durabilidade	Se a vida útil é longa, e se sua qualidade é mantida durante este tempo;
	Projeto aberto / adaptável / flexível	Se os espaços do projeto podem ser modificados com facilidade, sem obsolescência da edificação e dos materiais;
	Reciclabilidade	Se as partes da edificação podem ser reutilizadas, e se os espaços podem ser transformados facilmente;
	Facilidade de montagem e desmontagem	Se o projeto foi concebido para montagem e desmontagem através de sistemas conscientes de interfaces;
	Pré-fabricação / industrialização (*)	Se parte do processo construtivo é realizado em fábricas, ambiente de maior controle (qualidade, desperdício, etc.);

3.2 A madeira serrada maciça enquanto material construtivo – propriedades intrínsecas

A madeira está entre os materiais mais antigos utilizados pela humanidade. Para entender um pouco de sua importância, as discussões sobre sustentabilidade tiveram início com a necessidade da manutenção das florestas, no campo da silvicultura, em 1560, na Província da Saxônia, na Alemanha. A madeira era utilizada para todos os fins: edificações, mobiliários, utensílios, combustível, construção de equipamentos, meios de transporte, como os barcos. Pelo seu impacto na sociedade era fundamental se preocupar com o seu uso racional, de forma que as florestas pudessem se regenerar e se manter permanentemente (Boff, 2015). Ainda há grandes edificações, milenares, construídas em madeira, as quais atestam a sua qualidade, durabilidade e permanência.

Apesar de muito utilizada em edificações de países de clima temperado, como Estados Unidos, Finlândia, Alemanha, não encontra grande aceitação no Brasil, sendo aqui, considerado um material de segunda categoria, a despeito da grande disponibilidade deste recurso no país, a existente e a potencial. Isso acaba por influenciar todo o setor produtivo da madeira, o qual se mantém pouco explorado no âmbito da construção civil. No entanto é um material recomendado para áreas de terremotos, por sua capacidade estrutural de absorver deformações sem entrar em colapso. Apresenta bom desempenho térmico, pois possui transmitância baixa. Além disso, peças estruturais largas tendem a ter melhor comportamento ao fogo que estruturas em concreto e em aço, o que garante maior tempo de escoamento de edificações, devido à sua combustão lenta (Howe, 2015).

A madeira é um material de origem natural, renovável, reciclável e biodegradável, com alta capacidade de absorção de CO₂, um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa. Dados apontam que 1m³ de madeira chega a estocar uma tonelada de CO₂, fazendo com que construções em madeira também sejam depósitos de gás de efeito estufa (Lehmann, 2013). Isso porque o processo de crescimento de uma árvore é decorrente do ciclo biológico de absorção de água, CO₂, nutrientes do solo, e energia solar (fotossíntese). A presença de CO₂ é essencial para o seu crescimento, já que cerca de 50% de uma árvore é composta por carbono (Howe, 2015). O CO₂ armazenado só volta à atmosfera se esta madeira for queimada ou degradada. Por ter energia incorporada no seu processo de formação, a madeira pode ser utilizada também enquanto combustível. Num processo que tende a circularidade, a madeira é utilizada em diferentes ciclos de vida, por exemplo, a madeira serrada pode ser particulada e utilizada para a fabricação de chapas, e estas, ao final do seu ciclo de vida, podem ser incineradas para a geração de energia.

The use of wood products is part of an ongoing natural life cycle. Solid wood products can be reused indefinitely, and once they are no longer needed for their original purpose they can form the basis of other products. At the end of their life cycle, the solar energy stored in them can become a source of energy for people's use. By embracing a comprehensive life cycle approach to the carbon storage potential of forests and wood, there are more opportunities to provide climate protection benefits (Howe, 2015, p. 12).

Para a incineração da madeira é necessário um processo controlado, devido à liberação de gases tóxicos provenientes dos produtos utilizados para a sua proteção, como os fungicidas e os inseticidas, e também tintas e vernizes. Estes produtos, estáveis na madeira, são liberados com o seu aquecimento. A indústria da madeira vem trabalhando no desenvolvimento de novos produtos de proteção, a base de materiais naturais e não tóxicos, os quais permitam a reciclagem, a biodegradação natural, e mesmo a queima da madeira de maneira menos impactante.

Outro ponto importante está no processo de transformação da madeira, de matéria prima (árvore) em material construtivo. Neste processo não é utilizada tanta energia quanto a dispendida por outros materiais, como aço e cimento (Lehmann, 2013), nas etapas de extração e processamento. Segundo Kolb (2008), comparando pilares de três metros de altura, com a mesma resistência, feitos em madeira, concreto, aço e tijolos, a madeira necessita 3,7, 9,3 e 1,8 vezes menos energia que o de concreto, aço, e tijolo, respectivamente. Por este motivo é classificada como um material de baixa energia incorporada. Kolb (2008) também apresenta dados comparativos sobre o seu peso: a madeira pesa 5, 1,3, e 7 vezes menos que o concreto armado, aço, e tijolo, respectivamente, o que propicia fundações menos robustas para a edificação gerada, promovendo economia de materiais, e também facilitando processos de pré-fabricação e transporte. Takano (2015), Garcia (2014) e Marques (2008) apresentam mais dados comparativos entre madeira, aço e concreto, demonstrando que o uso da

madeira é vantajoso também em relação ao potencial de aquecimento global, reuso e reciclagem, e durabilidade.

O uso de madeira serrada na construção não demanda grandes transformações do material, apenas a sua adequação. As madeiras extraídas das florestas seguem para serrarias, onde são cortadas, secadas, pré-protegidas e então distribuídas. Podem ser utilizadas da forma mais natural possível, sem composição com outros materiais, através de sistemas de encaixe ou conexões.

Também apresenta alta durabilidade e desempenho, ao mesmo nível que o concreto e o aço (Marques, 2008), se utilizada da maneira correta e com proteções adequadas. O uso correto da madeira é determinado pela sua classe de resistência e grau de umidade, o que varia de acordo com a sua espécie. Zenid (2009), em conjunto com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), fez um apanhado das espécies de madeiras brasileiras e as classificou de acordo com a sua aplicabilidade, sendo madeiras estruturais ou não, informações que devem sempre ser consideradas. Grau de umidade, tipo de proteção contra fungos e insetos, defeitos naturais da peça também influenciam na sua durabilidade.

Cabe destacar que a madeira só tende a ser sustentável e a promover a estocagem de carbono quando proveniente de manejo florestal adequado, seja aquelas advindas de áreas de florestas nativas ou plantadas. Isso pressupõe a atividade de plantio e corte sempre constantes, respeitando a capacidade de suporte do meio ambiente. Quando a madeira é explorada sem o manejo adequado, o grande poder de retenção de CO₂ é desequilibrado pela mudança de uso do solo. O relatório McKinsey, de 2009, aponta que o desmatamento é responsável pela emissão de 55% dos gases de efeito estufa produzidos no Brasil. Grandes áreas da floresta desaparecem rapidamente para dar lugar a espaços para o agronegócio ou novas cidades. Grande parte desta madeira é simplesmente queimada.

A distância entre o local de exploração da madeira e o seu local de uso final também pode impactar na questão da estocagem de carbono. Quanto mais eles se distanciam, maior a quantidade de combustíveis fósseis utilizados no transporte do material. Desta maneira, o crédito de carbono dado pela árvore acaba sendo compensado, de maneira negativa, pelo seu transporte. A pesquisadora Garcia (2014) desenvolveu um trabalho de referência sobre as madeiras plantadas no Brasil através de sua análise de ciclo de vida, boa referência neste campo. Uma solução às distâncias percorridas pela madeira seria o incentivo ao plantio de novas florestas, próximas às áreas consumidoras. O que é factível visto a quantidade de espécies existentes no Brasil, adaptadas aos seus diferentes climas.

3.3 O sistema construtivo em pilar-viga de madeira – propriedades relacionais

O pilar-viga é, provavelmente, um dos sistemas construtivos mais antigo ainda empregado. Com a modernização das ferramentas e materiais o sistema ganhou novos aspectos, como grandes aberturas em vidro. E a sua combinação com o aço e o concreto permitiu novos níveis de desempenho e durabilidade. Fundações em concreto permitem afastar o sistema em madeira do solo, evitando contato com umidade constante e proliferação de fungos. O aço, utilizado em conectores e fixadores, facilita o processo de montagem e desmontagem da estrutura principal, estrutura secundária e sistemas de vedação, aumentando a rapidez de construção.

O sistema pilar-viga, ou *frame construction*, é formado por uma estrutura principal de pilares e vigas, a qual é responsável pela transferência de todos os esforços sofridos pela edificação para a fundação. O sistema secundário é composto por vigas para barroteamento de pisos e lajes, e sistemas de cobertura. Todos os fechamentos verticais são independentes da estrutura principal, exercendo apenas a função de vedação. O sistema estrutural primário, pilar-viga, é posicionado tendo como base uma malha espacial, ou um *grid*, determinado de acordo com os vãos necessários para o projeto, através das decisões arquitetônicas, conjugado com o máximo desempenho do material através de seus aspectos construtivos (Kolb, 2008). Este grid é determinado de acordo com uma coordenação dimensional, determinada pelo projetista, ou segue a coordenação modular estabelecida para a madeira com o módulo de 625mm. Se seguida a coordenação modular padrão para a madeira o grid assume dimensões como 1250 x 1250mm, 2500 x 2500mm, 5000 x 5000mm, 6250 x 6250mm, 7500 x 7500mm, etc (Kolb, 2008). Em geral, o mesmo grid dimensional assumido no plano horizontal da edificação também é empregado em seu plano vertical. Se a edificação é projetada através de um grid,

os elementos construtivos e suas conexões passam a ter um padrão, o que contribui para a pré-fabricação de todos os elementos e facilita a sua montagem em canteiro de obras, bem como a posterior ampliação da edificação. Elementos padronizados podem vir prontos e identificados de fábrica e apenas posicionados e solidarizados em canteiro, diminuindo tempo de obra e desperdícios decorrentes de ajustes.

O arranjo dos pilares e vigas no sistema pilar-viga pode ser realizado de diferentes maneiras. Conforme nos mostra Kolb (2008) diferentes detalhes de encaixes, conexões, junções de peças acaba por determinar um aspecto plástico para a edificação, sendo esta uma característica da qual se deve tomar partido. Por exemplo, podemos compor o sistema através de um pilar e vigas duplas, ou pilar composto com uma única viga. Podemos fazer com que o pilar seja contínuo, passando por todos os pavimentos da edificação, com a viga articulada em topo. A interface entre os diferentes elementos construtivos propicia soluções criativas, resultando em diferentes soluções plásticas para modulação que, a princípio, parece colaborar para a monotonia e repetição. O mesmo pode se dizer do sistema de contraventamento necessário neste tipo de construção.

Sistemas construtivos onde a estrutura principal é independente do sistema de vedação permitem ampla liberdade de projeto, tanto na conformação espacial dos ambientes internos, quanto nos desenhos de fachadas. Como as paredes, ou sistema de vedação, não possuem função estrutural, ou seja, não são responsáveis pela transferência dos esforços, elas podem ser construídas de materiais mais diversos, e podem ser alteradas conforme a necessidade de uso e adequação do espaço, resultando em um projeto flexível e adaptável. No entanto, para que as mesmas sejam “móveis”, elas também devem ser construídas com materiais leves e desmontáveis, podendo ser sistemas de painéis, de preferência, também pré-fabricados. Sistema de fechamento em painéis compostos, com uma estrutura central e placas, podem ser articulados com os subsistemas de elétrica e hidráulica, bem como caixilharias e sistemas de isolamento térmico e acústico, evitando processos de quebras e ajustes em canteiro de obras, e contribuindo para melhor desempenho ambiental da edificação.

O sistema pilar-viga por si só demanda a padronização dos elementos, a modularidade, e as conexões e ligações secas como propriedades chave para que se configure enquanto uma construção racionalizada e viável. Estas propriedades colaboram para a sua pré-fabricação e industrialização, caracterizadas pelo maior controle de qualidade, de desperdício, e de destinação de resíduos, tornando o edifício resultante menos impactante. E isso não seria possível sem uma concepção projetual adequada. A viabilidade do projeto em madeira começa em suas primeiras decisões, na determinação de dimensões e funcionalidades. E é o projeto que garante a qualidade e a durabilidade do sistema ao considerar a correta escolha da espécie de madeira e as suas conexões, seu teor de umidade, e os tipos de proteções contra fungos, insetos, acúmulo de água, sol, e incêndio. As principais patologias em construção em madeira são decorrentes de deficiências no projeto. Entre as principais recomendações estão:

- Evitar o contato direto da madeira com o solo, para que a umidade advinda do mesmo não favoreça a proliferação de fungos, e o apodrecimento da madeira em sua base. Estruturas em madeira devem ser apoiadas distante de superfícies de alvenaria ou de concreto, se estas não foram impermeabilizadas.

- Proteger juntas, gretas, fendas, interfaces entre sistemas de acúmulo de água e de umidade. Por isso o projeto deve garantir boa circulação de ar em áreas sujeitas à umidade, e todo o cuidado de construção deve ser tomado para que esta mesma umidade, por condensação, não penetre em painéis sanduíche, ou estruturas ocas.

- Projetar beirais e calhas de maneira eficiente, protegendo as paredes de umidade em excesso.

Garantindo a durabilidade do sistema construtivo em pilar-viga através de um bom projeto executivo e de proteção dos materiais empregados, os mesmos se tornam passíveis de reciclagem e reutilização. A madeira utilizada na estrutura pode ser desmontada e adaptada a novas edificações, com a facilidade de adquirir aparência renovada com processos simples de lixamento e pintura.

3.4 Potencial do sistema pilar-viga em madeira maciça

A tabela 2 traz um resumo sobre as propriedades intrínsecas e relacionais do sistema construtivo pilar-viga em madeira maciça. Cada um dos critérios foi classificado de acordo com o seu potencial, podendo este ser alto, médio e baixo. Esta classificação é baseada nos dados apresentados no texto.

Tabela 2: Potencial das propriedades da madeira.

PROPRIEDADES	CRITÉRIOS ANALISADOS	POTENCIAL
Intrínsecas – propriedades do material madeira	Biodegradabilidade	médio
	Reciclabilidade	alto
	Toxidade	médio
	Durabilidade / qualidade	alto
	Desempenho	alto
	Origem (*)	-
	Emissão de CO2 (*)	baixo
	Consumo energético (*)	baixo
Relacionais – propriedades dos sistema construtivo em madeira serrada	Coordenação dimensional	alto
	Padronização	alto
	Conexões secas	alto
	Durabilidade	alto
	Projeto aberto / adaptável / flexível	alto
	Reciclabilidade	alto
	Facilidade de montagem e desmontagem	alto
	Pré-fabricação / industrialização (*)	alto

4. Considerações Finais

Conforme apresentado por este trabalho o sistema construtivo pilar-viga em madeira maciça possui alto potencial para o Design para a Circularidade, atendendo de maneira efetiva todos os critérios relacionados às propriedades intrínsecas e relacionais destacadas por Geldermans (2016). Conclui-se, então, o seu potencial para a sustentabilidade dentro do setor da construção civil, através da construção de Edificações Circulares. Cabe destacar que estes pontos positivos são válidos mediante o emprego de madeira de reflorestamento ou de manejo adequado, com áreas de exploração próximas aos centros consumidores.

O design de produtos para a circularidade é um dos pontos fundamentais para a viabilidade da Economia Circular, em busca de modos mais sustentáveis de interação homem – natureza. Desta forma todos os estudos dentro deste campo são de importância fundamental, seja como resultados consolidados, ou conteúdos geradores de discussão, em busca de novas abordagens para a resolução dos nossos problemas.

Este artigo não se ateu aos aspectos sociais e econômicos, os quais mereceriam ser detalhados dentro do trabalho. O bem estar social deve ser meta de qualquer proposta que busque a sustentabilidade, melhorando as oportunidades, acesso à informação e a direitos essenciais como habitação. Por outro lado, a economia não se faz menos importante, pois muitas das nossas decisões são realizadas tendo-a por base.

5. Referências bibliográficas

Agopyan, V.; John, V. M., 2011. O desafio da sustentabilidade na construção civil. Blucher, São Paulo.

Angelo, C., 2016. A espiral da morte. Companhia das letras, São Paulo.

Anonymous, 2015. A Importância da Construção Civil no Brasil. Construfacil RJ. <http://construfacilrj.com.br/importancia-da-construcao-civil/>, acessado em janeiro de 2017.

Boff, L., 2015 (4ed). Sustentabilidade: o que é, o que não é. Editora Vozes, Petrópolis.

Brasil, Ministério de Ciência e tecnologia, 1997. Protocolo de Quioto. Disponível em: http://www.mct.gov.br/upd_blob/0012/12425.pdf, acessado em abril de 2016.

CIB, 1999. Agenda 21 on sustainable construction. CIB Report Publication, 237.

Edwards, B., 2013. O guia básico para a sustentabilidade. Gustavo Gili, Barcelona.

Ellen Macarthur Foundation, 2015. Rumo à economia circular. Ellen Macarthur Foundation. www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Rumo-à-economia-circular_Updated_08-12-15.pdf, acessado em dezembro de 2016.

Garcia, K. R. P., 2014. Potencial de reducción de las emisiones de CO₂ y de la energía incorporada en la construcción de viviendas en Brasil mediante el incremento del uso de la madera. Tese (doutorado em Arquitetura) – Universidad Politécnica de Cataluña: Barcelona e Universidade de São Paulo: São Paulo.

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Brocken, N. M. P., Hultink, E. J., 2016. Circular Economy – a new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*. 1 – 12.

Geldermans, R. J., 2016. Design for change and circularity – accommodating circular material & product flows in construction. *Energy Procedia* 96, 301 – 311.

Gil, A. C., 2002 (4ed). Como elaborar projetos de pesquisa. Editora Atlas, São Paulo.

Howe, J., 2015. Building with Wood: Proactive Climate Protection. Dovetail Partners, Inc. http://www.dovetailinc.org/reports/Building+with+Wood+Proactive+Climate+Protection_n656?prefix=%2Freports, acessado em janeiro de 2017.

Kolb, J., 2008. Systems in timber engineering. Birkhauser, Germany.

Lehmann, S., 2013. Low carbon construction systems using prefabricated engineered solid wood panels for urban infill to significantly reduce greenhouse gas emissions. *Sustainable Cities and Society*. 6, 57 – 67.

Marques, L. E. M., 2008. A papel da madeira na sustentabilidade da construção. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Marques, L., 2015. O capitalismo e o colapso ambiental. Editora da Unicamp, Campinas.

Mckinsey & Company, 2009. Caminhos para uma economia de baixa emissão de carbono no Brasil. McKinsey & Company, São Paulo. http://www.mckinsey.com.br/sao_paulo/carbono.pdf, acessado em maio de 2016.

Motta, S. R. F., Aguilar, M. T. P., 2009. Sustentabilidade e processos de projetos de edificações. *Gestão e Tecnologia de Projetos*. São Paulo, v.04, n.01, 84-119. <http://www.revistas.usp.br/gestaodeprojetos/article/view/50953>, acessado em setembro de 2015.

Takano, A., 2015. Wood in sustainable construction – a material perspective. Tese (Doctor of Science in Technology). School of Chemical Technology, Department of Forest Products and Technology, Aalto University, Espoo, Finland.

Zenid, G. J., 2009. Madeira: uso sustentável na construção civil. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo.