

PROPOSTA DE ÍNDICES DE RACIONALIZAÇÃO DO PROCESSO CONSTRUTIVO DE ESTRUTURAS DE MASS TIMBER

PROPOSAL OF RATIONALIZATION INDEX OF THE CONSTRUCTION PROCESS OF MASS TIMBER STRUCTURES

PROPUESTA DE ÍNDICES DE RACIONALIZACIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE ESTRUCTURAS DE MADERA EN MASA

Gabriela Lotufo Oliveira¹, Fabiana Lopes de Oliveira¹

RESUMO:

Tendo em vista o processo de fabricação industrializado das tecnologias de *mass timber*, observa-se que uma problemática mencionada pela literatura é a falha na comunicação entre projeto e fabricação. Consequentemente, verificam-se desperdícios de matéria-prima e montagens mais complexas. Assim, o problema a ser abordado no presente artigo trata da otimização de estruturas de CLT (*Cross-Laminated Timber*) e MLC (Madeira Lamelada Colada) quanto ao processo construtivo. Propõe-se a determinação de índices que permitam mensurar quantitativamente a forma estrutural, resultante da forma arquitetônica, quanto à racionalização do processo construtivo de estruturas de *mass timber*. Para isso, inicialmente, busca-se identificar as variáveis inerentes ao processo construtivo da estrutura de CLT e MLC que possuem relação com o projeto arquitetônico. Como metodologia da pesquisa realizou-se o estudo do processo construtivo do primeiro fabricante nacional de painéis de CLT e dois estudos de casos de estruturas executadas por este produtor. Como resultado, tem-se a determinação de três índices, que buscam avaliar as etapas de fabricação e montagem das estruturas. Considera-se que estes devam ser incorporados desde o início da concepção arquitetônica, permitindo o nascimento de uma forma estrutural alinhada às premissas da tecnologia construtiva empregada. Nesse sentido, como desenvolvimentos futuros deste trabalho, almeja-se que tais índices possam ser inseridos em uma ferramenta digital parametrizada de projeto.

PALAVRAS-CHAVE: Cross-Laminated Timber (CLT); estrutura de madeira; otimização arquitetônica; construção industrializada.

¹Universidade de São Paulo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo

Fonte de Financiamento:
Não há.

Conflito de Interesse:
Declara não haver.

Submetido em: 17/05/2023
Aceito em: 22/03/2024

How to cite this article:

OLIVEIRA, L. G.; OLIVEIRA, F.L., Proposta de índices de racionalização do processo construtivo de estruturas de mass timber. **Gestão & Tecnologia de Projetos**. São Carlos, v19, n2, 2024. <https://doi.org/10.11606/gtp.v19i2.212148>



ABSTRACT:

Considering the industrialized manufacturing process of mass timber structures, an issue that is constantly mentioned in the literature is the failure of communication between design and manufacturing. Consequently, there are greater material waste and a more complex and time-consuming assembly than it would be necessary. Therefore, the problem addressed in this paper is the search for optimization of CLT (Cross-Laminated Timber) and Glulam (Glued Laminated Timber) structures regarding the construction process of these technologies. The authors propose to determine indexes to quantitatively measure the structural shape, because of the architectural shape, concerning the rationalization of the construction process. To do so, initially, the research aims to identify the variables inherent in the technology's construction process that interfere with the optimization of this process and simultaneously have a direct relationship with the architectural design. The research methodology involved the study of the construction process of the first national CLT manufacturer, as well as two case studies of structures designed, manufactured, and assembled by the same producer. Based on these studies and analysis, three indexes were defined to evaluate the manufacture and assemble process of the structures. It is considered that these should be incorporated from the beginning of the architectural conception, enabling the creation of a structural form aligned with the premises of the technology used. As future developments of this research, these indices could potentially be incorporated into a parameterized digital design tool.

KEYWORDS: Cross-Laminated Timber (CLT); wood structures; architectural optimization; industrialized construction.

RESUMEN:

Teniendo en cuenta el proceso de fabricación industrializado de las tecnologías de madera en masa, se observa que un problema mencionado en la literatura es la falla de comunicación entre el diseño y la fabricación. Como consecuencia, existe mayor desperdicio de materia prima y montajes más complejas. Por ello, el problema a abordar en este artículo trata sobre la optimización de las estructuras CLT (Madera Contralaminada) y MLE (Madera Laminada Encolada) con relación al proceso constructivo. Se propone determinar índices que permitan la medición cuantitativa de la forma estructural, resultante de la forma arquitectónica, con relación a la racionalización del proceso constructivo de estructuras de madera en masa. Para ello, inicialmente se busca identificar las variables inherentes al proceso constructivo de la estructura CLT y MLE que tienen relación con el proyecto arquitectónico. Como metodología de investigación se estudió el proceso constructivo del primer fabricante nacional de paneles CLT y se realizaron dos casos de estudio de estructuras ejecutadas por este productor. Como resultado, se han determinado tres índices que buscan evaluar las etapas de fabricación y montaje de estructuras. Se considera que estos deben ser incorporados desde el inicio de la concepción arquitectónica, permitiendo el nacimiento de una forma estructural alineada con los supuestos de la tecnología constructiva utilizada. En este sentido, como futuro desarrollo de este trabajo, se espera que dichos índices se puedan incluir en una herramienta de diseño digital parametrizada.

PALAVRAS-CHAVE: Madera Contralaminada (CLT); Estructura de madera; Optimización arquitectónica; construcción industrializada.

INTRODUÇÃO

Produtos de *mass timber* podem ser definidos como elementos estruturais de madeira sólidos e de grandes dimensões, produzidos por meio da colagem de lamelas de madeira maciça ou compósitos de madeira (BRENEMAN *et al*, 2022; GREEN; TAGGART, 2020). Dentre os produtos que se enquadram nessa categoria, aqueles de maior emprego no Brasil consistem no CLT (*Cross-Laminated Timber*) e Glulam (*Glued-Laminated Timber*).

Painéis de CLT são utilizados como lajes de piso, lajes de cobertura, paredes autoportantes internas e externas. Para sua fabricação, as lamelas de madeira são coladas umas sobre as outras em camadas ortogonais em prensas hidráulicas ou a vácuo, resultando em painéis de grandes dimensões, os quais, posteriormente, são cortados e usinados em fresadoras com CNC (Comando Numérico Computadorizado), nos tamanhos exatos dos elementos construtivos que compõem o projeto (BRANDNER, 2013; LOTUFO OLIVEIRA, 2018). Já os elementos de Glulam são, no Brasil, amplamente conhecidos pela sigla MLC (Madeira Lamelada Colada) e resultam da colagem das lamelas com veios orientados na direção paralela. São empregados como pilares, quando posicionados na vertical, ou vigas, quando na posição horizontal.

Tendo em vista o processo de fabricação industrializado das tecnologias de *mass timber*, incluindo técnicas de fabricação digital, com CNC, observa-se que uma problemática mencionada de forma recorrente na literatura estudada é a falha na comunicação entre projeto e fabricação. O desconhecimento, por parte de arquitetos e projetistas, acerca das capacidades de manufatura leva, constantemente, a projetos arquitetônicos inadequados frente ao processo construtivo destas tecnologias. Conseqüentemente, verifica-se maiores desperdícios de matéria-prima bem como etapas de montagem mais complexas e longas do que poderia ser necessário.

Vale ressaltar que o processo construtivo é aqui considerado como o conjunto de atividades necessárias para a concretização do esqueleto estrutural da edificação, englobando desde a escolha da matéria-prima até a conclusão da montagem da estrutura de *mass timber*. Entende-se que a maior racionalização deste processo ocorre quando a execução dessas atividades não acarreta grandes perdas de material e de energia, seja ela o tempo humano ou a energia despendida pela máquina. Compreende-se, ainda, que a consequência da máxima racionalização do processo construtivo será uma forma estrutural otimizada. Assim, o problema a ser abordado no presente artigo, que consiste no resultado parcial de uma pesquisa de Doutorado, trata da otimização de estruturas de CLT e MLC quanto ao processo construtivo.

Parte-se do pressuposto que a busca por maior racionalização do processo construtivo deva ocorrer desde o início do desenvolvimento do projeto arquitetônico. Dessa maneira, propõe-se aqui a determinação de índices que permitam mensurar quantitativamente a forma estrutural, resultante da forma arquitetônica, quanto à racionalização do processo construtivo de estruturas de *mass timber*.

Para isso, inicialmente, busca-se identificar as variáveis inerentes ao processo construtivo da estrutura de CLT e MLC que possuem direta relação com o projeto arquitetônico. Como metodologia da pesquisa realizou-se o estudo das práticas adotadas pelo primeiro fabricante nacional de painéis de CLT, localizado na cidade de Suzano (SP), assim como dois estudos de casos de estruturas projetadas, fabricadas e montadas por este mesmo produtor. O primeiro caso estudado consiste em uma edificação provisória, com área aproximada de 55 m², a qual foi montada e desmontada no interior de uma exposição de arquitetura e design de interiores na cidade de São Paulo (SP). A segunda estrutura analisada consiste em uma residência térrea montada na cidade de Bertioga (SP), com área de aproximadamente 280 m².

O estudo de casos reais, previamente executados, permitiu a compreensão das relações existentes entre projeto e processo construtivo, possibilitando, assim, a definição de três índices, que buscam avaliar as etapas de fabricação e montagem das estruturas de madeira. No entanto, em um cenário ideal, considera-se que os índices aqui definidos devam ser incorporados desde o início da concepção arquitetônica, permitindo o nascimento de uma forma estrutural alinhada às premissas da tecnologia construtiva empregada. Nesse sentido, como desenvolvimentos futuros deste trabalho, almeja-se que tais índices possam ser inseridos em uma ferramenta digital parametrizada de projeto. Dessa maneira, será possível a avaliação do desempenho da forma arquitetônica da estrutura de CLT e MLC quanto à racionalização do processo construtivo e, inclusive, sua adequação durante o desenvolvimento do projeto arquitetônico.

PESQUISAS PRECEDENTES

No setor da arquitetura e construção, recentemente, tem-se observado exemplos reais de associação de ferramentas digitais, como projeto paramétrico e simulações numéricas computacionais, em processos de otimização do projeto arquitetônico, resultando em um campo de estudo denominado Otimização de Projeto Arquitetônico, ou *Architectural Design Optimization* (ADO) em inglês.

Otimização matemática refere-se à identificação do melhor elemento dentro de uma série de alternativas com base em critérios específicos. Com estes conceitos em mente, por meio de projetos paramétricos, projetistas e arquitetos podem gerar grande número de variantes arquitetônicas baseadas em regras e parâmetros pré-determinados, possibilitando a avaliação do desempenho de sua solução em diferentes aspectos, como emprego de material ou consumo energético (WORTMANN; NANNICINI, 2017).

Quanto aos estudos que abordam a prática do *Design Optimization*, observa-se que um objetivo comum entre os pesquisadores é solucionar a falha de comunicação existente entre projeto e construção, ou fabricação. Sobre essa questão, Krieg e Lang (2019) apontam que projetistas e arquitetos, em geral, não possuem domínio das capacidades de manufatura, passando a superestimar ou subestimar as possibilidades construtivas. Além disso, segundo Gbadamosi, *et al* (2020), os fornecedores, usualmente, contribuem muito pouco em estágios preliminares de projeto. Assim, Qi, *et al* (2021), que realizaram uma revisão bibliográfica com o objetivo de apresentar o cenário atual de pesquisa para a aplicação de tecnologias emergentes na construção industrializada, verificaram a busca recorrente pela criação de formas, métodos ou processos para garantir uma concepção do projeto adequada e associada aos conceitos de fabricação das estruturas, buscando encontrar as soluções projetuais que melhor otimizem o emprego de recursos.

Especificamente para as tecnologias de *mass timber*, Bianconi, *et al* (2019) entendem que o campo da construção com madeira, apesar de se caracterizar por grande inovação nos processos de manufatura, apresenta um baixo nível de colaboração entre designers e empresas produtoras. Dessa forma, desenvolvem uma pesquisa que aprofunda a possibilidade de usar modelos generativos, princípios evolucionários e inteligência artificial para auxiliar projetistas a tomar decisões conscientes em etapas ainda iniciais de concepção arquitetônica, o que pode resultar em economias consideráveis. Almejando um objetivo semelhante, Stroble (2016) identifica que a maioria das edificações construídas com madeira apresentam grande redundância estrutural e entende que, com a crescente adoção dessa tecnologia construtiva, mostra-se fundamental que ela se torne mais otimizada para reduzir custos e competir, de maneira efetiva, com estruturas de aço e concreto. Assim, o objetivo de sua pesquisa consiste em desenvolver diretrizes de otimização para edifícios de escritórios em Seattle (EUA).

Yazdi, *et al* (2021), também desenvolvem um trabalho na mesma linha dos anteriores, almejando integrar os processos de fabricação e montagem *off-site* no desenvolvimento preliminar de projeto de edificações construídas com painéis de CLT, atuando como vedação estrutural. Dessa forma, desenvolve um algoritmo que atua no projeto inicial modelado pela arquitetura, de modo a otimizar as dimensões das paredes e o planejamento de corte, reduzindo também as perdas de material.

Na prática, contudo, a aplicação de métodos de otimização a problemas inerentes aos campos da engenharia e arquitetura não é algo fácil. Apresenta dificuldades devido a dois principais motivos. O primeiro deles é a identificação da problemática da otimização em si, em termos de definição de variáveis para tomada de decisão, dos objetivos a serem alcançados e das restrições necessárias. O segundo é a expressão dessa problemática, após sua identificação, como fórmulas matemáticas, o que nem sempre é possível (WORTMANN; NANNICINI, 2017). Tem-se assim que o primeiro passo para a automatização de determinados processos ou etapas do projeto arquitetônico é, por meio da visão lógica e holística do projeto, a correta identificação das variáveis envolvidas e o entendimento de suas interdependências, além da compreensão clara da problemática a ser solucionada (CÔCO JR; CELANI, 2018).

ESTUDO DO PROCESSO CONSTRUTIVO

De modo a identificar as variáveis inerentes ao processo construtivo da estrutura de CLT e MLC que possuam direta relação com o projeto arquitetônico, inicialmente, considera-se fundamental o estudo global deste processo. Para alguns autores o processo construtivo de uma estrutura industrializada, ou construção *off-site*, se dá em quatro fases, que podem ser divididas em: (i) projeto e planejamento; (ii) fabricação; (iii) logística e transporte e (iv) montagem (GBADAMOSI, *et al*, 2020; QI, *et al*, 2021).

Na presente pesquisa, no entanto, o processo construtivo das estruturas de CLT e MLC, baseado nas práticas adotadas pela empresa considerada, será adaptado, englobando também uma etapa anterior, referente à escolha, classificação e secagem da matéria-prima. Este será, assim, dividido em cinco etapas, são elas: (i) matéria-prima; (ii) fabricação; (iii) logística; (iv) montagem e (v) planejamento. Cada uma destas macro etapas, por sua vez, divide-se em subetapas, as quais podem ser visualizadas no esquema da Figura 1.

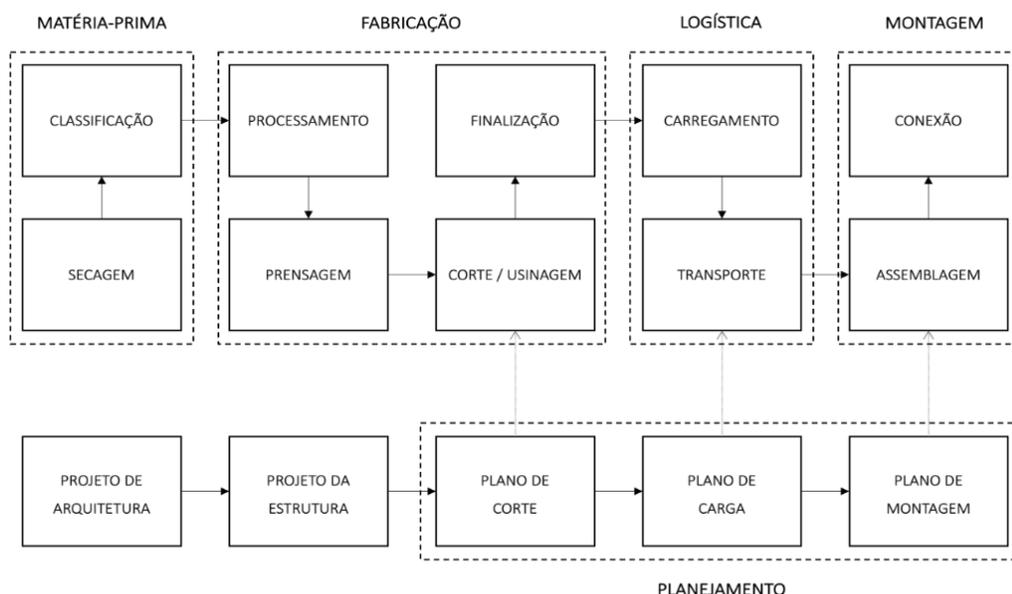


Figura 1. Diagrama ilustrando o desenrolar do processo construtivo das estruturas de CLT e MLC conforme proposto pela presente pesquisa.

Fonte: dos autores

De maneira geral, as quatro primeiras “macro etapas” deste processo construtivo podem ser resumidas em dez subetapas contemplando atividades práticas, associadas à macro etapa de planejamento, que apresenta três subetapas necessárias para o desenrolar das primeiras e baseadas no projeto de arquitetura. Esta, contudo, é uma visão bastante generalizada e resumida de toda a cadeia que envolve as estruturas de madeira engenheirada.

MATÉRIA-PRIMA

Painéis de CLT e elementos de MLC podem ser fabricados, tanto com madeira de pinus, quanto de eucalipto. Considerando as particularidades de cada um desses grupos vegetais, estas são matérias-primas que apresentam suas características e valores de referência próprios. Essas propriedades da matéria-prima, além dos fatores: carregamento, vão, vibração e resistência ao fogo, interferem de forma significativa no dimensionamento estrutural dos elementos construtivos. Em termos estruturais, pinus e eucalipto apresentam diferentes módulos de elasticidade e de ruptura. Dessa forma, os elementos construtivos confeccionados com pinus são menos resistentes e menos rígidos do que aqueles produzidos com eucalipto.

Além disso, consequência ainda dessa distinção entre ambas e de seu processo de corte e extração, são encontradas no mercado com diferentes bitolas, o que acarreta abordagens diversas na macro etapa de fabricação e mesmo no planejamento da composição de camadas durante a prensagem de painéis, vigas ou pilares. Em termos arquitetônicos é possível ainda mencionar que a escolha consciente da matéria-prima se mostra igualmente fundamental, tendo em vista as colorações distintas proporcionadas por cada espécie. Enquanto o pinus possui uma tonalidade bege, que varia de branco a amarelada, o eucalipto apresenta um tom avermelhado, que pode alternar entre um rosa claro e uma matiz mais bordô.

Em vista do exposto, entende-se a importância em se definir a matéria-prima a ser empregada na confecção dos elementos estruturais ainda nas etapas preliminares do desenvolvimento conceitual do projeto arquitetônico. Além disso, um importante parâmetro que garante a durabilidade dos elementos é definido nessa etapa: quais painéis obrigatoriamente devem ser tratados. Para isso, deve-se levar em consideração o que está estabelecido pela norma ABNT NBR 16143:2013 – Preservação de madeiras – Sistema de categorias de uso (Tabela 02), que estabelece seis categorias com base nas condições de exposição e uso do elemento de madeira.

Para que se dê início, de fato, à fabricação dos painéis de CLT, assim como para qualquer outra tecnologia construtiva encontrada no mercado, elabora-se o projeto arquitetônico da edificação, o qual leva em consideração, de antemão, as particularidades do componente construtivo em questão (LOTUFO OLIVEIRA, 2018)

FABRICAÇÃO

Na macro etapa da fabricação, considera-se importante tratar de duas subetapas específicas. São elas: a prensagem e o corte e a usinagem dos painéis de CLT, ambas orientadas pelo Plano de Corte. Será dado enfoque à produção dos painéis de CLT, tendo em vista sua maior complexidade e relação mais direta com o projeto arquitetônico, do que os elementos de MLC.

Inicialmente, é necessário ter em mente os limites dimensionais para a prensagem. O fabricante no qual se baseou esta pesquisa, dispõe de duas prensas a vácuo que permitem confecção de painéis com dimensões máximas de 2,95 m x 11,95 m e 2,95 m x 14,40 m.

Um segundo aspecto a ser considerado durante a prensagem dos painéis é a direção das lamelas. Paredes, usualmente, apresentam as lamelas externas, dispostas na vertical, ou na largura do painel (transversais). As lajes, por outro lado, possuem as lamelas externas

alinhadas ao comprimento do painel (longitudinais). Para a fabricação de um único painel contínuo, este será prensado sempre de forma longitudinal ou transversal, sendo impraticável atender simultaneamente às duas direções. Nesta mesma lógica, o painel irá possuir também uma única composição de camadas e, conseqüentemente, espessura.

Por esse motivo, para a subetapa de prensagem, as peças serão divididas em painéis de mesma matéria-prima, espessura, composição de camadas e direção. Assim, no caso de estruturas que possuem elementos de CLT empregados como lajes e paredes, usualmente existirão ao menos duas tipologias de painéis a serem prensadas, sendo uma longitudinal para lajes e outra transversal para paredes. Em exemplares que apresentam tanto lajes de piso quanto lajes de cobertura inacessíveis, sendo estas com espessuras diferentes, é possível que seja necessário prensar no mínimo três tipologias de painéis, tendo em vista as diferentes cargas aplicadas em lajes de piso ou cobertura. Dessas, uma será para paredes (transversal), outra para lajes de cobertura (longitudinal de menor espessura) e a última para laje de piso (longitudinal de maior espessura).

Cada painel diferente a ser prensado exigirá uma configuração distinta da prensa. Conclui-se, assim, que, quanto menor o número de tipologias de painéis a serem prensadas para uma mesma edificação mais otimizada será a subetapa de prensagem de sua estrutura. Este raciocínio é apontado também por Woodworks e Thinkwood (2021), que orientam para a busca por maximização das dimensões dos painéis visando minimizar a execução de cortes no centro de usinagem e a redução de perdas de material.

Para proceder com a prensagem dos painéis, elabora-se inicialmente o Plano de Corte, que nada mais é que o planejamento do corte das peças de CLT. Nessa etapa, as peças são distribuídas nos painéis a serem prensados, assim como ilustrado no esquema da Figura 2, que representa o Plano de Corte de uma edificação fictícia. Para que este planejamento ocorra da forma mais otimizada possível, devem ser consideradas todas as premissas estruturais, de logística e montagem, e restrições de fabricação, como dimensão máxima de prensagem.

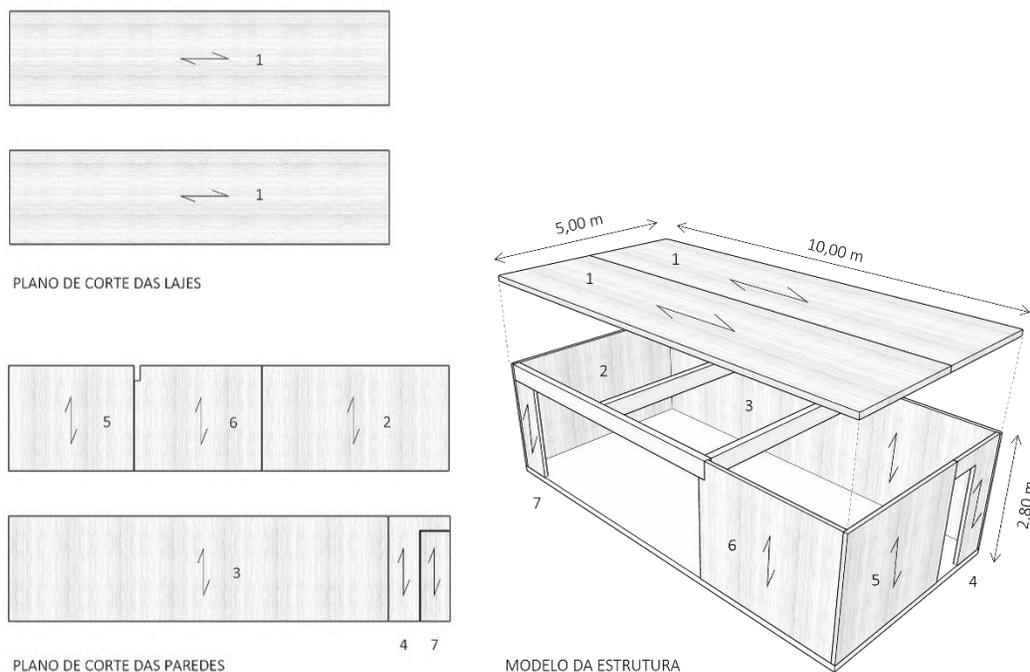


Figura 2. Plano de Corte para estrutura fictícia com pé-direito de 2,80 m.

Fonte: dos autores

Outra questão interessante de ser considerada no planejamento do corte é justamente a direção dos painéis. Como mencionado, vedações são confeccionadas painéis transversais, limitando a altura das paredes em até 2,95 m. Contudo, caso as vedações sejam dispostas de forma longitudinal durante o planejamento do corte, o limite para sua altura passa a ser superior aos 2,95 m, sendo que esta dimensão tornar-se-á o comprimento da parede. Esta situação é ilustrada no esquema da Figura 3, o qual representa a mesma edificação fictícia apresentada anteriormente, mas com alteração no seu pé-direito, que passaria de 2,80 m para 3,20 m. Esse ajuste pode não acarretar grandes modificações no projeto arquitetônico, mas, em contrapartida, demanda uma lógica bastante distinta para o Plano de Corte, além do número total de peças necessárias para a montagem da estrutura.

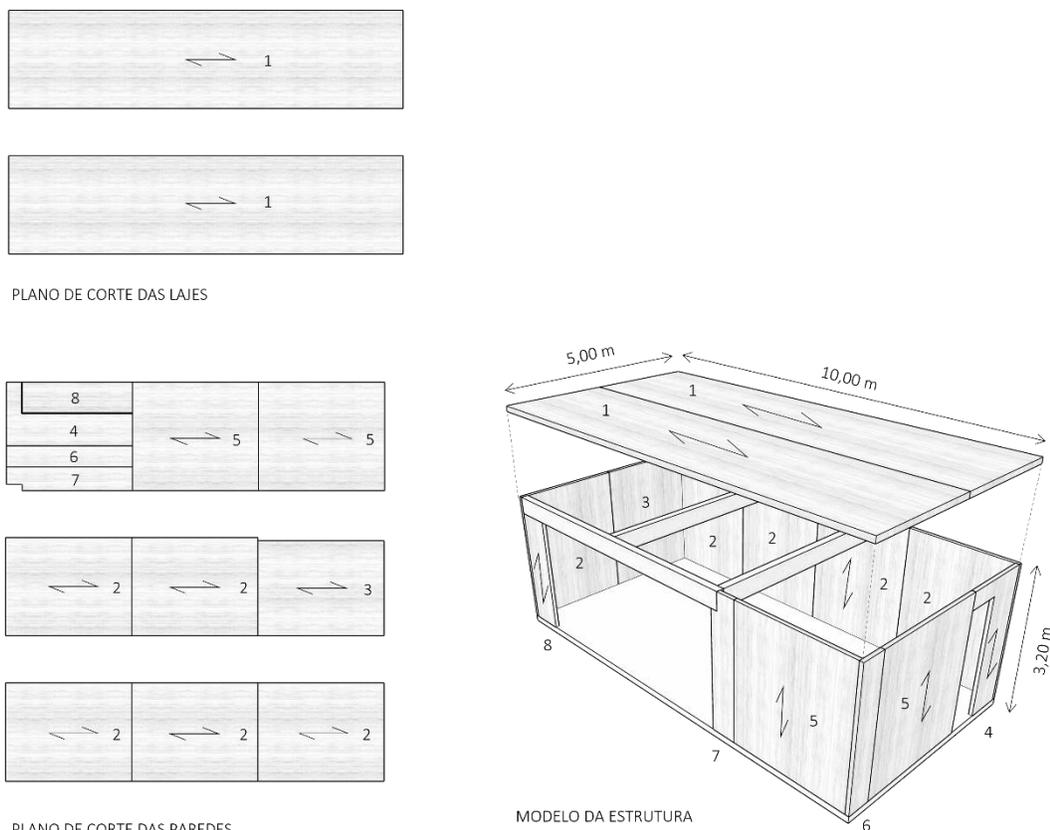


Figura 3. Plano de Corte para estrutura fictícia com pé-direito de 3,20 m.

Fonte: dos autores

Dessa maneira, depreende-se que a etapa de planejamento do corte dos elementos construtivos pode gerar algumas perdas de materiais, as quais poderiam ser minimizadas desde a concepção do projeto da edificação. Deduz-se, assim, que, quando se busca máxima otimização do processo construtivo como um todo, torna-se indispensável conceber a edificação considerando o planejamento dos cortes dos painéis.

LOGÍSTICA

A macro etapa de logística inicia-se ainda em fábrica, com o carregamento das peças finalizadas no veículo que irá transportá-las ao local de montagem. Contudo, antes de se proceder com qualquer mobilização logística, a primeira questão que deve ser verificada é a possibilidade de acesso do veículo ao canteiro de obras. O acesso pode restringir os modelos ou tamanhos dos veículos que poderão ser utilizados, sendo que veículos menores são capazes de transportar peças com dimensões reduzidas e em menor quantidade, sendo a recíproca também válida.

Os limites regulamentados para transporte de cargas no território brasileiro constam na Resolução nº 210, de 2006, do Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN (CONTRAN, 2006). Neste documento, fica estabelecido que as dimensões máximas autorizadas para veículos com ou sem carga são: largura de 2,60 m, altura de 4,40 m e comprimento total, para o caso de veículos não-articulados, de 14,00 m. Essa última dimensão é variável, podendo chegar a 19,80 m para veículos articulados com mais de duas unidades.

Dentre as opções de veículos disponíveis para utilização no mercado, aqueles modelos mais frequentemente utilizados pelo fabricante em questão são: a carreta convencional e o caminhão *truck*. O primeiro possui dimensões maiores e, conseqüentemente, uma maior capacidade de carga, permitindo o transporte de peças com até 12,00 m de comprimento. Contudo, por conta de sua maior dimensão, apresenta dificuldade para acessar, por exemplo, vias com largura reduzida, como ruas urbanas locais, ou mesmo vias demasiadamente íngremes, além de não ser capaz de realizar curvas muito sinuosas.

O caminhão *truck*, por sua vez, possui dimensões menores, restringindo-se ao transporte de peças com comprimento máximo de 8,00 m. Conseqüentemente, é um veículo mais adequado aos locais com as limitações de acesso mencionadas anteriormente a título de exemplo. Contudo, por conta de sua menor dimensão, possui também uma capacidade de carga reduzida.

Quando não se verifica restrição alguma para o acesso do veículo ao canteiro de obra, os fatores determinantes para a escolha do transporte relacionam-se aos elementos construtivos em si. Assim, a quantidade, o tamanho (largura e comprimento) e o peso das peças, além da possibilidade de armazenamento delas no canteiro de obras, definirão o tamanho e o modelo do veículo, bem como o número de viagens que se farão necessárias.

O planejamento das etapas de carregamento e transporte denomina-se Plano de Carga, o qual se inicia apenas após as validações de acesso mencionadas anteriormente. O Plano de Carga irá determinar o modelo de veículo para cada frete, a disposição das peças neste, a seqüência das cargas, a quantidade de viagens e as datas de cada carregamento. É possível que para uma única obra, quando não há limitações de acesso, sejam utilizados tanto carretas quanto caminhões *truck*, visando dispor as peças da forma mais otimizada possível e de modo a acompanhar o cronograma da montagem dos elementos estruturais, espaçando a chegada das cargas no canteiro com alguns dias de diferença.

MONTAGEM

Como visto, os elementos construtivos de CLT ou MLC podem atingir grandes dimensões. A densidade média considerada para o pinus empregado como matéria-prima é de 550 kg/m³, enquanto para peças de eucalipto é equivalente a 650 kg/m³. Por esse motivo, devido às grandes dimensões e ao elevado peso dos elementos construtivos, sua movimentação durante a macro etapa de montagem da estrutura é realizada com o auxílio de equipamentos hidráulico mecânicos de grande porte, a exemplo de guias, guindastes ou guindautos.

Aquele utilizado com maior frequência nas edificações brasileiras é o caminhão *muncck*, que consiste em um guindauto. Este é um tipo de caminhão no qual é acoplado um maquinário com sistema hidráulico, associado a um braço articulado capaz de fazer a movimentação e içamento de cargas no canteiro de obras. Os guindastes, por sua vez, são veículos especiais de maior porte, projetados para elevar, movimentar e abaixar materiais de elevado peso e dimensão, podendo ser autopropelidos ou montados sobre caminhão (DNTI, 2016).

Assim, da mesma forma como ocorre na macro etapa de logística, um dos primeiros pontos a ser verificado é a possibilidade tanto de acesso quanto de permanência de equipamentos desse tipo no canteiro de obras. Contextos que apresentem vegetação muito fechada em terrenos

extremamente acidentados ou ausência de vias por onde possam trafegar caminhões, podem impossibilitar a montagem ou inviabilizá-la frente a outros métodos de construção. O mesmo ocorre para locais de implantação afastados da rua e posicionados atrás de edificações pré-existentes, por exemplo.

Em situações desse tipo, nas quais o acesso ou permanência não é possível, pode-se adotar equipamentos menores, como empilhadeiras, ou mesmo realizar a movimentação das peças apenas com operários. Entretanto, ressalta-se que, o artigo 198 da Consolidação das Leis do Trabalho, Decreto-Lei nº 5.452 de 01/05/1943, determina como sendo de 60 kg o peso máximo que um empregado pode remover individualmente. Dessa forma, para esses casos, os elementos construtivos devem ser dimensionados de modo a possuir peso compatível àquele definido na legislação brasileira.

A macro etapa da montagem desenvolve-se inicialmente com a subetapa de assemblagem, na qual os elementos construtivos são içados da pilha pelo guindauto ou guindaste e posicionados no local planejado e indicado pelo Plano de Montagem. Posteriormente, na subetapa de conexão, estes são fixados entre si, às peças adjacentes, e, se for o caso, nos demais sistemas da edificação, como fundação, lajes de concreto, vigas metálicas, dentre outros, por meio de parafusos autoperfurantes ou conectores metálicos.

Como citado, tanto a subetapa de assemblagem quanto a de conexão são orientadas pelo Plano de Montagem, o qual tem como objetivo primário definir a sequência de montagem dos elementos estruturais, possibilitando mais eficiência e rapidez no desenrolar desse processo. Quando devidamente planejada, a macro etapa de montagem é, no geral, extremamente rápida e pode, inclusive, ser dimensionada em dias. Os fatores que influenciam o tempo total de montagem das peças estruturais são, principalmente, a quantidade de elementos construtivos, sejam eles de MLC ou CLT, a gestão de montagem, ou seja, as condições de içamento e posicionamento das peças, e o número de funcionários que a executam – além, naturalmente, da capacitação técnica que estes apresentam.

O número de peças necessárias para configurar a estrutura mostra-se como fator preponderante no dimensionamento do tempo de montagem, tendo em vista que o processo de içamento, posicionamento e conexão é o mesmo tanto para um elemento grande quanto para um pequeno. Todavia, a quantidade de conexões necessárias em estruturas compostas, majoritariamente, por peças pequenas é muito maior do que se as peças tivessem, predominantemente, maiores dimensões.

A título de exemplo, é apresentado o mesmo esquema de edificação fictícia utilizado anteriormente, com 10,00 m de comprimento por 5,00 m de largura e pé direito de 2,80 m (Figura 4 – esq.). Neste caso seriam necessários 8 elementos de CLT para executar essa montagem, resultando em um total de 10 linhas de conexão. No entanto, caso essa mesma edificação tivesse um pé direito de 3,20 m (Figura 4 – dir.), o cenário seria um pouco diferente. Conforme mencionado, o tamanho máximo útil de fabricação dos painéis é de 2,95 m por 14,40 m. Consequentemente, se essa mesma edificação possuísse pé direito 40 cm maior, ter-se-iam 14 elementos de CLT e 16 linhas de conexão. Tratando-se da mesma quantidade de funcionários e condições de implantação da edificação, o tempo total de montagem da segunda aumentaria em comparação ao da primeira, chegando a quase dobrar de uma para a outra.

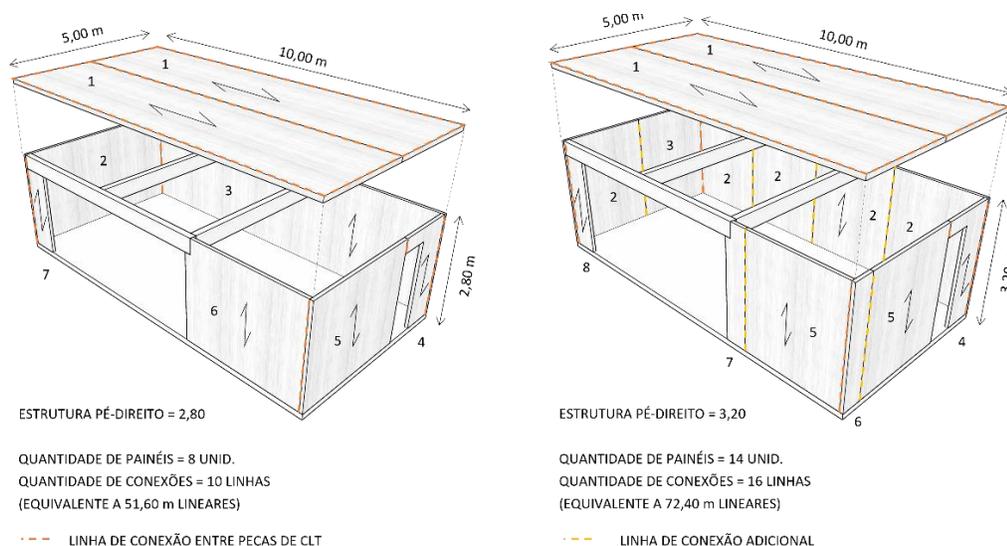


Figura 4. Plano de Corte para estrutura fictícia com pé-direito de 3,20 m.

Fonte: dos autores

ESTUDOS DE CASO

Visando ilustrar, com maior profundidade, o desenrolar do processo construtivo apresentado, para além da mera suposição, isto é, para situações reais que de fato aconteceram, serão analisados dois casos de estruturas executadas pelo fabricante em estudo. As análises pretendem focar na etapa de planejamento de corte dos painéis de CLT confeccionados, como também, na lógica de montagem adotada para cada situação.

CASO 01

No primeiro caso estudado, o maior esforço para acesso e montagem se apresentou desde o início do desenvolvimento do projeto, tendo em vista que o ambiente provisório deveria ser montado – e também desmontado – dentro de uma residência pré-existente e com suas vedações externas tombadas. Por esse motivo, não era possível realizar nenhuma alteração na configuração de suas portas ou janelas.

Em seu interior, a casa, originalmente, não possuía nenhuma divisória. Estas ocorriam apenas nos espaços do banheiro e área de serviço. Além disso, eventuais vedações a serem instaladas não poderiam ocasionar qualquer dano ao piso interno original da edificação. Assim, o conceito do projeto foi desenvolvido de tal forma a criar um ambiente que não interferisse na casa pré-existente, permitindo uma montagem e desmontagem simples, sem ocasionar danos.

Partindo desse pressuposto, para configurar o ambiente interno do espaço, que deveria simular um uso residencial, de uma casa sustentável, foram concebidos módulos internos dispostos de forma destacada da estrutura existente (Figura 5). Para isso, deveriam ser autoportantes, exigindo assim um material estrutural que os configurasse. Ademais, o bloco idealizado para os dormitórios, localizado aos fundos da casa, possuía uma laje, criando um mezanino acessível, considerando o pé-direito mais elevado na linha central da edificação. Ressalta-se que este estudo de caso não se trata de um mobiliário (design de interior), mas sim, de um elaborado projeto com painéis estruturais independentes da estrutura da edificação existente.

Tendo em vista as características estruturais necessárias para o material que configuraria este espaço, além da premissa de escolha de materiais com características sustentáveis, especificou-se o emprego de painéis de CLT para todas as vedações que configuraram os

módulos, bem como a laje acessível acima dos dormitórios. Dessa forma, a totalidade da estrutura se configurou por peças de CLT, confeccionadas com pinus como matéria-prima (Figura 6). A estrutura era de pequeno porte, sendo que o volume dos elementos de CLT utilizados correspondeu a 4,09 m³, distribuídos em 39 peças e em uma área de 55 m².



Figura 5. Estrutura do Caso 01 finalizada, sendo o módulo dos dormitórios à esquerda e o módulo da entrada à direita.

Fonte: Rafael Luvizetto

Para viabilizar a montagem dos painéis de CLT, que possuíam altura de 2,75 m, estes foram divididos em larguras pré-determinadas, de até 80 cm, que possibilitassem peso máximo de 80 kg e permitissem que duas pessoas pudessem realizar o transporte e assemblagem manual das peças. Por esse motivo verifica-se uma quantidade de peças bastante elevada para um volume reduzido de material. No que diz respeito à fabricação, para executar esta estrutura foram confeccionados três painéis de CLT, representados na Figura 6 e aqui nomeados P01, P02 e P03. Cada um consistia em uma tipologia única, respectivamente T01, T02 e T03.

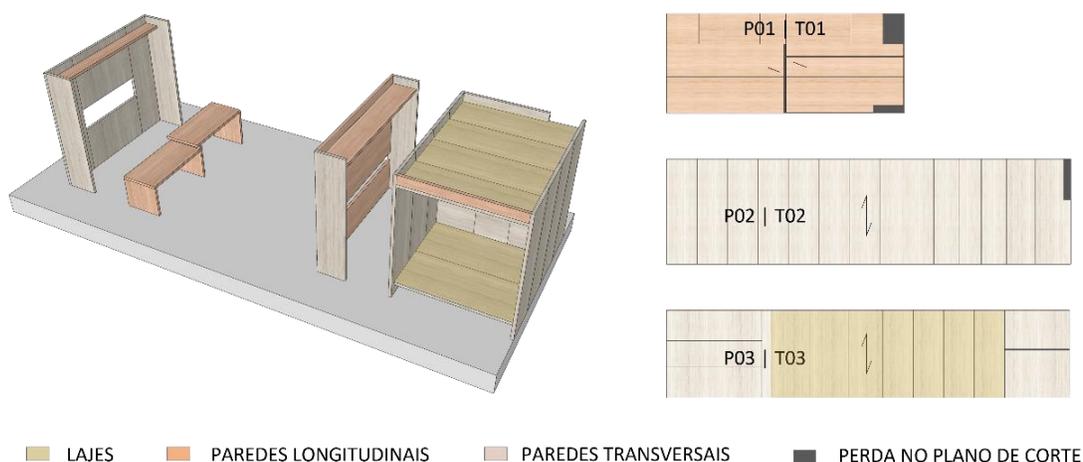


Figura 6. Modelo tridimensional da estrutura (esq.) e Plano de Corte dos painéis de CLT a serem confeccionados (dir.) para o Caso 01.

Fonte: dos autores

As características dos três painéis, incluindo o número de peças confeccionadas a partir destes, assim como a soma do volume individual de cada peça por painel e o volume total do painel produzido constam na Tabela 1. O volume total de painéis produzidos foi de 4,18 m³, enquanto o volume individual de todas as peças de CLT somadas foi de 4,09 m³, como mencionado.

Painel	Dimensão (m)	Tipologia	Uso	Direção	Nº peças	Volume peças (m ³)	Volume painel (m ³)
P01	2,60 x 6,20	T01	parede	long.	11	0,92	0,97
P02	2,75 x 10,60	T02	parede	trans.	15	1,72	1,75
P03	2,30 x 10,60	T03	parede e laje	trans.	13	1,45	1,46

Tabela 1. Características dos painéis fabricados para o Estudo de Caso 01.

Fonte: dos autores

CASO 02

O segundo caso estudado, que consistia em uma residência térrea, dividia-se em dois blocos estruturais. O bloco dos fundos comporta os ambientes sociais e de serviços e é configurado por paredes de CLT, pilares de MLC, vigas e terças de MLC, que apoiam uma telha metálica termoacústica de cobertura. O bloco da frente, onde se localizam três dormitórios, estrutura-se com paredes e lajes de CLT e vigas de MLC. A estrutura foi confeccionada com eucalipto como matéria-prima, sendo que volume dos elementos de CLT utilizados corresponde a 33,64 m³ e o volume de vigas ou pilares de MLC representa 10,84 m³. A quantidade de peças total, somando paredes, lajes, pilares e vigas, é de 113 unidades, distribuídas em 280 m².

Para a fabricação desta estrutura foram confeccionados 13 painéis de CLT, divididos em 5 tipologias. Para as lajes de maior dimensão, com comprimento total de 11,60 m e largura de 2,70 m, foi possível produzir 4 unidades de uma única tipologia. No entanto, tendo em vista a existência de mais duas lajes com menor dimensão, mostrou-se necessária a produção de uma tipologia a mais, diferenciada, para essa mesma espessura, de modo a atender essas peças menores. Totalizaram-se, dessa forma, duas tipologias para confecção das lajes, ambas com direção longitudinal.

Já para os elementos construtivos que configuravam as paredes da residência, planejou-se uma tipologia com 6 repetições e direção transversal, da qual foi retirada a grande maioria das peças, que possuíam altura de 2,80 m, equivalente ao pé-direito da edificação. Uma unidade de uma segunda tipologia de painel, também com direção transversal, mostrou-se necessária para aquelas paredes que possuíam menor altura. Para as bandeiras de CLT foi necessário ainda a confecção de uma unidade de uma terceira tipologia desta vez com direção longitudinal. Ao todo, foram elaboradas três tipologias de painéis de paredes, sendo duas transversais e uma longitudinal. Para a presente análise, os painéis foram nomeados de P01 a P13 e as diferentes tipologias de T01 a T05, conforme representado na Figura 7.

As informações relativas às dimensões de cada painel, à tipologia, ao uso (laje ou parede), direção (longitudinal ou transversal) e ao número de peças confeccionadas a partir dele constam na Tabela 2. Também estão indicados nesta mesma tabela a soma do volume individual de cada peça por painel e o volume total do painel produzido. O volume total de painéis produzidos foi de 34,41 m³, incluindo lajes e paredes, enquanto o volume individual de todas as peças de CLT somadas foi de 33,64 m³.

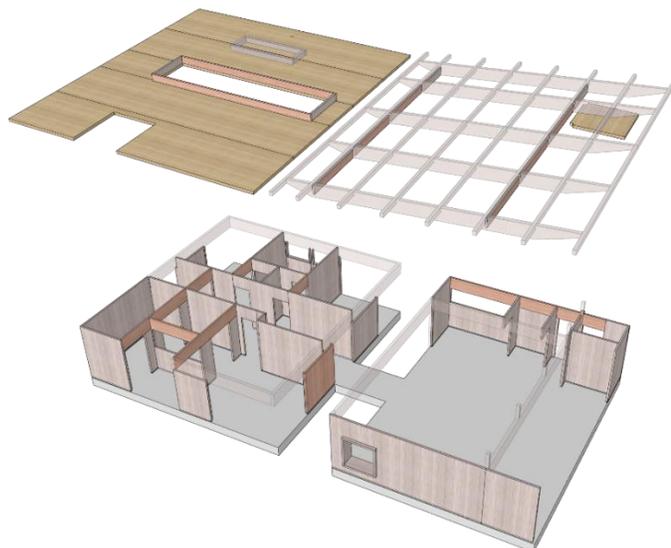


Figura 7. Modelo tridimensional da estrutura (esq.) e Plano de Corte dos painéis de CLT a serem confeccionados (dir.) para o Caso 02. (continua a seguir)

Fonte: dos autores

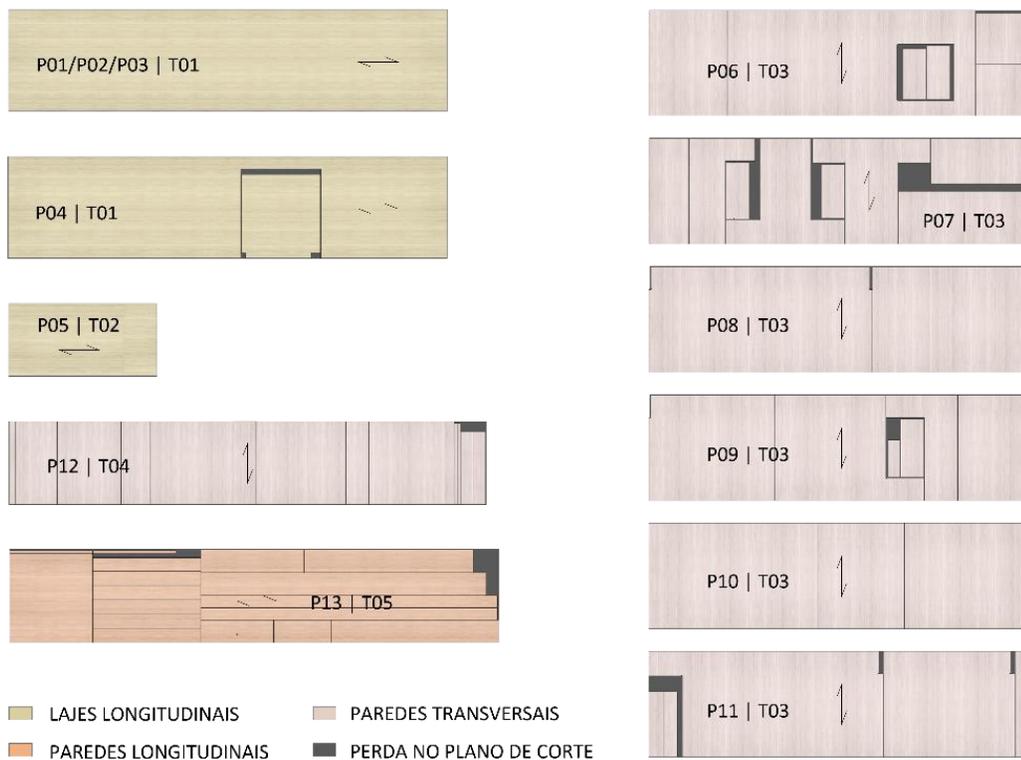


Figura 7. (continuação) Modelo tridimensional da estrutura (esq.) e Plano de Corte dos painéis de CLT a serem confeccionados (dir.) para o Caso 02.

Fonte: dos autores

Painel	Dimensão (m)	Tipologia	Uso	Direção	Nº peças	Volume peças (m³)	Volume painel (m³)
P01	2,70 x 11,60	T01	laje	long.	1	3,75	3,75
P02	2,70 x 11,60	T01	laje	long.	1	3,75	3,75
P03	2,70 x 11,60	T01	laje	long.	1	3,75	3,75
P04	2,70 x 11,60	T01	laje	long.	2	3,70	3,75
P05	1,92 x 3,95	T02	laje	long.	2	0,90	0,91
P06	2,80 x 10,20	T03	parede	trans.	6	2,18	2,28
P07	2,80 x 10,20	T03	parede	trans.	8	2,06	2,28
P08	2,80 x 10,20	T03	parede	trans.	7	2,26	2,28
P09	2,80 x 10,20	T03	parede	trans.	7	2,22	2,28
P10	2,80 x 10,20	T03	parede	trans.	3	2,27	2,28
P11	2,80 x 10,20	T03	parede	trans.	5	2,21	2,28
P12	2,20 x 12,60	T04	parede	trans.	14	2,18	2,22
P13	2,50 x 13,00	T05	parede	long.	17	2,41	2,60

Tabela 2. Características dos painéis fabricados para o Estudo de Caso 02.

Fonte: dos autores

Para a logística e montagem, inicialmente, verificou-se a possibilidade de acesso de veículos ou equipamentos de grande porte. Isso porque o conjunto da estrutura continha lajes com comprimento de 11,60 m por 2,70 m de largura e vigas com 10,70 m de comprimento. Assim, o transporte das peças ocorreu em carreta e as peças foram divididas em duas cargas, sendo a primeira com as peças do bloco dos fundos e a segunda com a estrutura da frente (Figura 8). A montagem em si se deu com o auxílio de um caminhão *munck*.



Figura 8. Veículo de transporte (esq.) e içamento das peças (dir.) para montagem da estrutura do Caso 02.

Fonte: dos autores

É interessante apontar, que, para a montagem do bloco dos fundos, já no dia da chegada da primeira carga, foram instaladas todas as peças de maior porte e peso, incluindo paredes de CLT, pilares e vigas principais de MLC. As peças restantes, para se completar a estrutura do bloco dos fundos, foram posicionadas nos dias que sucederam a chegada da carga. Tendo em vista que estas possuíam menor peso, sendo que a mais pesada tinha 80 kg, o posicionamento e instalação dessas peças ocorreu sem o auxílio do caminhão *munck*.

Percebe-se, no entanto, que o rendimento do serviço sem o equipamento em questão torna-se muito inferior. Enquanto no dia da chegada da carga foi possível posicionar 30 peças de maior porte, no dia seguinte, sem o emprego do *munck*, o número de peças de menor porte instaladas passou para 16. Isso representa, praticamente, uma redução pela metade em relação ao dia anterior.

RESULTADO: DEFINIÇÃO DOS ÍNDICES

Como é bastante comum para estruturas de madeira em geral, tanto para o primeiro quanto para o segundo estudo de caso, a escolha pelo uso dos elementos de *mass timber* deu-se pelos benefícios proporcionados por uma montagem simples e rápida, associados à característica sustentável da matéria-prima madeira. Enquanto para o segundo caso estudado a velocidade de montagem consistiu em condição preponderante para essa decisão, no primeiro caso foi justamente a simplicidade de montagem que levou a esta escolha. Isto porque a tecnologia em questão permitiu uma montagem e desmontagem simples, sem ocasionar danos na edificação pré-existente, a qual foi levantada como uma das premissas iniciais de projeto. Acrescenta-se a esse ponto que, após desmontagem, as peças de CLT não foram descartadas. Foram, na realidade, devolvidas ao fabricante e, na fábrica, receberam novo uso.

No entanto, ainda no que diz respeito à montagem, verificou-se maior dificuldade no primeiro caso, tendo em vista a impossibilidade de acesso para equipamentos de grande porte. Assim, ao se recortar de forma demasiada as peças para permitir seu posicionamento de forma manual, tem-se o aumento significativo da quantidade de cortes na etapa de fabricação e de linhas de conexão durante a montagem. A maior quantidade de peças, como visto, relaciona-se diretamente ao tempo de montagem.

Com o segundo caso estudado, pôde ser verificado que no primeiro dia de posicionamento dos elementos construtivos, com a presença do caminhão *munck*, foram assembladas 30 peças de maior peso. No segundo, sem o equipamento em questão, foram posicionadas 16 peças de menor peso. Com isso, constata-se que, por mais que o peso total das peças permita sua movimentação e posicionamento sem o auxílio de qualquer equipamento adicional, essa decisão impacta diretamente no tempo da montagem. O emprego do trabalho braçal apenas, mesmo em circunstâncias permitidas, compromete a produtividade desta etapa, pois a

complexidade e o esforço demandado àqueles que estão atuando diretamente no serviço, acarretam a queda de rendimento individual, influenciando no resultado total.

Todos esses fatores impactam também no custo da estrutura de *mass timber*, como apresentado por LOTUFO OLIVEIRA, et al (2023). Neste estudo, os autores identificam os itens que interferem na valoração da estrutura e comprovam a relação direta entre o projeto arquitetônico e o maior ou menor custo para fornecimento e montagem da estrutura. Por esse motivo, entende-se que um projeto arquitetônico adequado à tecnologia construtiva empregada apresenta maior viabilidade financeira para sua concretização, em especial no que diz respeito às estruturas de *mass timber*.

Visando mensurar quantitativamente esta adequação, são propostos três índices que analisam a forma estrutural, resultante da forma arquitetônica, quanto à racionalização do processo construtivo de estruturas de *mass timber*,

O primeiro índice aqui definido diz respeito à etapa de montagem, considerando todos os elementos de madeira que compõem a estrutura, incluindo aqueles de CLT e de MLC, e considera a quantidade de peças, relacionada ao tamanho da estrutura, como um parâmetro para avaliar a adequação do projeto no que diz respeito a essa macro etapa. Este é calculado pela seguinte fórmula:

- Índice de montagem = A / Q

Onde:

A é a área construída da estrutura de madeira

Q é a quantidade de elementos estruturais empregados, equivalente à soma dos diferentes elementos de madeira, como lajes, paredes, vigas e pilares, considerando-se os limites dimensionais estabelecidos pelas etapas de prensagem, logística e montagem da estrutura.

Vale ressaltar que a área construída da estrutura de madeira (A) corresponderá à área da projeção ocupada por esta. Caso a estrutura apresente dois pavimentos, então a área total será a soma da área de projeção individual de cada pavimento.

Acrescenta-se, ainda, que o resultado esperado com esse índice é verificar a área construída para cada peça de madeira que irá compor a estrutura. Assim, entende-se que quanto maior o valor encontrado, então menor será a quantidade de peças necessárias para a edificação total, potencialmente resultando em uma montagem mais rápida e eficiente.

No que diz respeito à fabricação, especificamente em relação aos painéis de CLT, verificou-se que nos dois casos há uma diferença de volume entre os painéis brutos fabricados e a soma do volume total de peças empregadas, tanto como paredes, quanto como lajes. Essa diferença é consequência direta da perda de material resultante da subetapa de corte e usinagem dos painéis, orientada pelo Plano de Corte. Entende-se, portanto, que o aproveitamento dessa subetapa possa ser representado por meio de uma porcentagem, calculada através da relação entre o volume líquido das peças utilizadas na montagem e o volume bruto de painéis de CLT fabricados. Assim, o segundo índice aqui definido é calculado pela fórmula:

- Índice de fabricação = VP / VT

Onde:

VP é o volume total de peças de CLT empregadas no projeto, resultante da soma dos volumes individuais de cada peça de CLT utilizada

VT é o volume total de CLT empregada, ou seja, de painéis a serem fabricados, já considerando as perdas de material resultantes da etapa de planejamento de corte dos painéis

Para este segundo índice, vale lembrar que a elaboração do Plano de Corte pressupõe o atendimento simultâneo de dois pré-requisitos: a busca pelo menor desperdício possível de material e a necessidade de prensagem do maior número possível de tipologias idênticas.

Assim, inicialmente, no que diz respeito às paredes, destaca-se que elas podem ser tanto transversais como longitudinais, a depender da sua disposição na estrutura, mas sempre com lamela externa alinhada à transmissão da carga. Já as peças utilizadas como lajes, majoritariamente, possuirão direção longitudinal. Para estes elementos, contudo, deve-se estabelecer duas categorias a depender de sua forma de emprego, que pode ser tanto como piso quanto como cobertura, tendo em vista que na grande maioria das edificações, lajes de piso, por estarem sujeitas a cargas mais elevadas, apresentarão espessuras maiores do que aquelas empregadas como coberturas. Entende-se, portanto, que o Índice de fabricação deverá ser calculado também de forma separada para os diferentes itens que compõem a estrutura. Dessa forma, serão obtidos até quatro resultados: para paredes longitudinais, para paredes transversais, para lajes de piso e para aquelas de cobertura.

Da mesma forma, haverá um número de tipologias para cada uma dessas categorias. Portanto, o número mínimo de tipologias global da estrutura será sempre 2, caso a edificação seja composta apenas por paredes transversais e lajes de cobertura, por exemplo. Contudo, em casos em que existam dois tipos diferentes de parede (longitudinal e transversal), ou dois tipos de lajes (piso e cobertura), o número de tipologias a serem prensadas irá aumentar.

Por esse motivo, vale também estabelecer um terceiro índice, que diz respeito às tipologias de painéis de CLT fabricados, representado pela fórmula:

- Índice de tipologias = NT / NP

Onde:

NT é o número total de tipologias de painéis a serem fabricados

NP é o número total de painéis a serem fabricados

Para este índice específico, contudo, o valor final não corresponderá a uma porcentagem, mas sim à fração real da fórmula. Ou seja, o usuário irá visualizar o número total de tipologias e o número total de painéis. Isso porque, considera-se que, para este índice específico, a porcentagem resultante da equação poderia mascarar a informação que se pretende extrair, tendo em vista que o objetivo é justamente verificar o número bruto das tipologias de painéis a serem fabricados. Da mesma forma como ocorre índice anterior, este também poderá ser visualizado individualmente para cada tipo de elemento estrutural empregado. Isto é para lajes de piso, lajes de cobertura, paredes longitudinais ou paredes transversais.

APLICAÇÃO DOS ÍNDICES

De modo a ilustrar a aplicação dos índices definidos, estes foram calculados para os dois casos estudados, com base nos dados coletados nas etapas de fabricação e montagem de ambos. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 3.

Para o segundo caso, que apresenta maior volume e área construída, é possível ainda calcular os índices relacionados à macro etapa de fabricação também de maneira isolada, conforme emprego do elemento construtivo e direção do painel fabricado, ou seja, para painéis de lajes de cobertura, paredes transversais e paredes longitudinais. Estes resultados são apresentados na Tabela 4.

	Caso 01	Caso 02
Índice de montagem	1,41 m ² (55 / 39)	2,48 m ² (280 / 113)
Índice de fabricação	97,85 % (4,09 / 4,18)	97,76 % (33,64 / 34,41)
Índice de tipologias	3 / 3	5 / 13

Tabela 3. Resultados dos Índices definidos para os Estudo de Caso 01 e 02.

Fonte: dos autores

Painel	Tipologia	Uso	Direção	Soma volume peças (m ³)	Soma volume painel (m ³)	Índice de fabricação	Índice de tipologias
P01	T01	laje	long.	15,85	15,91	99,51 %	2 / 5
P02	T01	laje	long.				
P03	T01	laje	long.				
P04	T01	laje	long.				
P05	T02	laje	long.				
P06	T03	parede	trans.	15,38	15,90	96,74 %	2 / 7
P07	T03	parede	trans.				
P08	T03	parede	trans.				
P09	T03	parede	trans.				
P10	T03	parede	trans.				
P11	T03	parede	trans.				
P12	T04	parede	trans.				
P13	T05	parede	long.	2,41	2,60	92,69 %	1 / 1

Tabela 4. Resultados dos Índices de fabricação e de tipologias por tipo de painel para o Estudo de Caso 02.

Fonte: dos autores

DISCUSSÃO

No que diz respeito à etapa de montagem, como era de se esperar, os dois casos resultaram em índices significativamente diferentes. Enquanto para o primeiro verifica-se que é possível montar 1,41 m² para cada peça que compõe a estrutura, para o segundo esse valor corresponde a 2,48 m² por peça. Em outras palavras, o segundo caso, naturalmente, representa uma montagem mais rápida e eficiente do que o primeiro. Assim, constata-se que, de fato, quanto maior o resultado encontrado para este índice específico, maior será a eficiência potencial do projeto quanto à etapa de montagem.

Vale acrescentar, contudo, que valores mais baixos já eram esperados para o primeiro caso, em vista da dificuldade verificada desde o início do projeto para a assemblagem dos elementos de madeira nesse caso, a qual levou à confecção de peças com dimensões e peso reduzidos, de modo a permitir seu manuseio sem equipamentos de maior porte. Sabe-se que essa prática de reduzir a dimensão dos painéis não é a forma mais otimizada de montagem. Porém, tratando-se da escolha pelos painéis de CLT, esta foi a maneira que viabilizou seu uso nesse caso específico. Isto é, a construção de um espaço com caráter estrutural no interior de uma edificação tombada com menor impacto possível à estrutura pré-existente.

No que diz respeito à etapa de fabricação, observa-se que ambas as estruturas estudadas apresentaram bons índices de aproveitamento de corte, de aproximadamente 98%. Em outras palavras, a perda observada foi de 2% de todo material fabricado. Para este índice de fabricação, tem-se que quanto maior o valor encontrado para a porcentagem de aproveitamento, maior será, conseqüentemente, a otimização do projeto arquitetônico.

Contudo, como visto, a racionalização de corte em si não é o único ponto importante para se garantir maior otimização da etapa de fabricação. Quanto às tipologias de painéis prensados, verifica-se que o segundo caso estudado alcançou melhor resultado, ao possibilitar a confecção da maior parte dos painéis com apenas duas tipologias, uma para lajes replicada 4 vezes e outra

para paredes replicada 6 vezes. O primeiro caso, por outro lado, não obteve nenhum painel replicável no planejamento do corte, sendo que dos três painéis fabricados, todos consistiram em tipologias únicas.

Quando da análise dos índices por uso das peças de CLT especificamente para o Caso 02, constata-se que maiores perdas ocorreram nos painéis de paredes, em especial naquele de direção longitudinal. Para as lajes, os índices de fabricação obtidos foram bastante altos, muito próximos de 100%. Isto porque estes elementos são, usualmente, confeccionados em painéis únicos, de maiores dimensões, resultando, naturalmente, em perdas mínimas ou até nulas de recursos materiais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em se tratando de estruturas de *mass timber*, observa-se a profunda relação existente entre todas as etapas de planejamento da estrutura, incluindo Plano de Corte, Plano de Carga e Plano de Montagem, e a implicação direta dessas no projeto de arquitetura e vice-versa. No que diz respeito à otimização da montagem da estrutura, isso ocorre principalmente quanto ao tempo total desta macro etapa. Isso se deve, fortemente, à quantidade de peças a serem empregadas na edificação, sendo esse número, assim como a implantação da edificação, também consequência direta do projeto arquitetônico. Fatores como o pé-direito do edifício, por exemplo, podem influenciar nessa quantidade, como visto no esquema descrito anteriormente.

Dessa maneira, conclui-se que a máxima racionalização do processo construtivo será alcançada quando o traço inicial do projeto arquitetônico levar em consideração a busca por maior facilidade para se estruturar, fabricar, transportar e montar a arquitetura a ser concretizada. Como resultado, ter-se-á uma estrutura mais otimizada, que garanta o desenrolar de um processo fluido e concatenado para sua execução, com consequente economia de recursos materiais e energéticos.

Entende-se, portanto, que os índices, conforme acima definidos, contemplam os principais aspectos abordados e identificados no processo construtivo da estrutura. Sua aplicação, na prática, poderá ocorrer em uma ferramenta digital parametrizada de projeto, por meio do desenvolvimento de algoritmos que possibilitem seu cálculo e apresentação dos resultados a serem avaliados pelos projetistas e arquitetos, auxiliando na tomada das decisões projetuais. Quando de seu emprego já no início do desenvolvimento do conceito arquitetônico, potencialmente permitir-se-á a concepção de uma edificação adequada às premissas da tecnologia construtiva em estudo, ou seja, de uma forma estrutural e arquitetônica mais otimizada.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa que fabricou os elementos estruturais dos estudos de caso considerados, pela autorização formal para uso dos dados dos estudos de casos realizados, além da disponibilização das informações referentes ao processo construtivo das estruturas de CLT e MLC.

Referências Bibliográficas

BIANCONI, Fabio; FILIPPUCI, Marco; BUFFI, Alessandro. **Automated design and modeling for mass-customized housing**. A web-based design space catalog for timber structures. *Automation in construction*, v. 103, p. 13-25, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.002>> Acesso em: setembro de 2022.

BRANDNER, R. **Production and Technology of Cross-Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report**. 2013. Disponível em: <http://costfp1004.holz.wzw.tum.de/fileadmin/tu/wz/costfp1004/Theme_I_Product_and_Testing.pdf>. Acesso em: abril de 2017.

BRENEMAN, Scott; TIMMERS, Matt; RICHARDSON, Dennis. **Tall Wood Buildings in the 2021 IBC: Up to 18 Stories of Mass Timber**. WoodWorks, 2022. Disponível em: <https://www.woodworks.org/wp-content/uploads/wood_solution_paper-tall-wood.pdf> Acesso em julho de 2022.

CÔCO JÚNIOR, Verley Henry; CELANI, Gabriela. **From the automated generation of layouts to fabrication with the use of BIM: a new agenda for Architecture in the 21st century**. In: Proceedings of XXII Congresso Da Sociedade Iberoamericana De Gráfica Digital. v. 5. n. 1, p. 23-30. São Paulo: Blucher, 2018.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN. **Resolução Nº 210**. Brasília: Diário Oficial da União (D.O.U.), 2006.

CONSOLIDAÇÃO DAS LEIS DO TRABALHO (CLT). **Decreto-Lei no 5.452** de 01/05/1943. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Decreto-Lei/Del5452.htm>. Acesso em setembro de 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Resolução Nº 1**. Brasília: Diário Oficial da União (D.O.U.), 2016. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/sistema-de-gerenciamento-de-autorizacao-especial-de-transito-siaet/RESOLUO012016DNITCargasIndivisveis.pdf>>. Acesso em: setembro de 2018.

GBADAMOSI, Abdul-Quayyum; OYEDELE, Lukumon; MAHAMADU, Abdul-Majeed; KUSIMO, Habeeb; BILAL, Muhammad; DELGADO, Juan Manuel Davila; MUHAMMED-YAKUBU, Naimah. **Big data for Design Options Repository: Towards a DFMA approach for offsite construction**. Automation in Construction. v. 120. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.113>> Acesso em: setembro de 2022.

GREEN, Michael; TAGGART, Jim. **Tall wood buildings: Design, construction and performance**. Birkhäuser, 2020.

KRIEG, O. D.; LANG, O. **Adaptive automation strategies for robotic prefabrication of parametrized mass timber building components**. In: Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2019), p. 521–528. Banff, 2019.

LOTUFO OLIVEIRA, Gabriela. **Cross-Laminated Timber (CLT) no Brasil: processo construtivo e desempenho**. Recomendações para o processo de projeto arquitetônico. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2018.

LOTUFO OLIVEIRA, Gabriela; OLIVEIRA, Fabiana Lopes de; VILELA, Ramon. **O projeto arquitetônico e os custos das estruturas de madeira engenheirada**. Revista Projetar - Projeto e Percepção do Ambiente, v. 8, n. 3, p. 121-136. Natal, 2023.

QI, Bing; RAZKENARI Mohamad; COSTIN, Aaron; KIBERT, Charles; FU, Meiqing. **A systematic review of emerging technologies in industrialized construction**. Journal of building engineering, v. 39, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102265>> Acesso em: setembro de 2022.

STROBLE, Kristen. **(Mass) Timber: Structurally Optimized Timber Buildings**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - University of Washington. Seattle, 2016.

WORTMANN, Thomas; NANNICINI, Giacomo. **Introduction to Architectural Design Optimization**. In: KARAKITSIOU, A.; MIGDALAS, A.; RASSIA, S.; PARDALOS, P. (org). City Networks - Collaboration and Planning for Health and Sustainability. Springer International Publishing, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-65338-9_14> Acesso em: setembro de 2022.

WOODWORKS, THINKWOOD. **Mass Timber Design Manual**. 2021. Disponível em: <<https://info.thinkwood.com/masstimberdesignmanual>> Acesso em: setembro de 2022.

YAZDI, Alireza Jalai; FINI, Alireza Ahmadian Fard; FORSYTHE, Perry. **Mass-customisation of cross-laminated timber wall systems at early design stages**. Automation in Construction. v. 132, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103938>> Acesso em: setembro de 2022.

Gabriela Lotufo Oliveira
gabriela.lotuffo.oliveira@usp.br

Fabiana Lopes de Oliveira
floliveira@usp.br