

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO

Gabriela Lotufo Oliveira

ESTRUTURAS DE MADEIRA ENGENHEIRADA:

a concepção arquitetônica orientada à
racionalização do processo construtivo

São Paulo

2023

GABRIELA LOTUFO OLIVEIRA

Estruturas de madeira engenheirada:

a concepção arquitetônica orientada à racionalização do processo construtivo

Versão corrigida

Tese apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutora em Ciências.

Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura

Orientadora: Profa. Dra. Fabiana Lopes de Oliveira

Exemplar revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade da autora e anuência da orientadora. A versão original, em formato digital, ficará arquivada na Biblioteca da Faculdade.

São Paulo, 24 de outubro de 2023.

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação
Serviço Técnico de Biblioteca
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo

Oliveira, Gabriela Lotufo

Estruturas de madeira engenheirada: a concepção arquitetônica orientada à racionalização do processo construtivo / Gabriela Lotufo Oliveira; orientadora Fabiana Lopes de Oliveira. - São Paulo, 2023.
250.

Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura.

1. Estruturas de Madeira Engenheirada. 2. Mlcc (madeira Lamelada Colada Cruzada). 3. Dfma (design For Manufacture And Assembly). 4. Projeto Arquitetônico. 5. Racionalização da Construção. I. Oliveira, Fabiana Lopes de, orient. II. Título.

OLIVEIRA, G. L. **Estruturas de madeira engenheirada: a concepção arquitetônica orientada à racionalização do processo construtivo**. 2023. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Profa. Dra. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Profa. Dra. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Profa. Dra. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Fabiana, pelo suporte, pelo acompanhamento e pela orientação ao longo de toda minha trajetória de pesquisa, nesses últimos oito anos.

Ao meu chefe, José Alberto, pelas discussões que possibilitaram a evolução da pesquisa e pela disponibilização de todo material necessário para sua conclusão.

À minha irmã, Beatriz, pelas correções e refinamentos dos textos, e ao meu marido, Bruno, pela companhia e suporte diário nesses últimos anos.

Aos meus pais, Desirée e Jorge, por me incentivarem, desde sempre, a chegar até aqui. E, especialmente, à minha mãe, que me ajudou de todas as formas, possíveis e impossíveis, na leitura, na escrita e nas reflexões, para que este trabalho fosse concluído.

RESUMO

OLIVEIRA, G. L. **Estruturas de madeira engenheirada: a concepção arquitetônica orientada à racionalização do processo construtivo**. 2023. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

A presente pesquisa traz como objeto central estruturas de madeira engenheirada, compostas por elementos construtivos de MLCC (Madeira Lamelada Colada Cruzada) e de MLC (Madeira Lamelada Colada). Intenciona-se aprofundar os estudos acerca do tema, com enfoque na relação entre o projeto arquitetônico e o processo construtivo, necessário para concretização da estrutura da edificação. Isso porque, entende-se que o desalinhamento entre projeto e execução leva ao emprego inadequado de recursos materiais e energéticos, acarretando maior desperdício de matéria-prima, maior tempo de fabricação e uma montagem mais longa ou até mais complexa das edificações. Assim, o objetivo principal da pesquisa consiste em demonstrar a influência do projeto arquitetônico na racionalização do processo construtivo da estrutura de madeira engenheirada. Para isso, desenvolve-se o estudo deste processo construtivo, detalhando mais especificamente as etapas que possuem maior implicação no projeto arquitetônico. São então analisados alguns orçamentos de estruturas de madeira engenheirada, de modo a constatar a associação entre precificação e projeto, demonstrando a influência da arquitetura na viabilidade potencial da estrutura. Na sequência, tem-se o estudo de dois casos de estruturas construídas para exemplificar a racionalização do processo construtivo. Como produto da tese, visando contribuir para a resolução da problemática identificada neste nicho de mercado, foram traçadas diretrizes que orientam o planejamento de um *plugin* que possa ser associado a uma ferramenta de modelagem pré-existente e utilizado como suporte na fase de criação inicial arquitetônica, de modo que sua concepção ocorra alinhada ao conceito DFMA (projeto para fabricar e montar). Para viabilizar este produto, são identificadas premissas de projeto que possam auxiliar arquitetos, engenheiros, projetistas e *designers* no desenvolvimento da concepção inicial do projeto. Também são definidos índices que permitam a mensuração do projeto da estrutura quanto à racionalização do processo construtivo, além de parâmetros, de projeto e da estrutura, a serem inseridos na ferramenta digital.

Palavras-chave: estruturas de madeira engenheirada; MLCC (Madeira Lamelada Colada Cruzada); DFMA (*Design for Manufacture and Assembly*); projeto arquitetônico; racionalização da construção.

ABSTRACT

OLIVEIRA, G. L. **Mass Timber Structures: architectural design oriented to the rationalization of the construction process**. 2023. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

The research focuses on engineered wood structures, composed of CLT (Cross-Laminated Timber) panels and Glulam (Glued Laminated Timber) elements. It is aimed to deepen the studies on the subject, focusing on the relationship between architectural design and the construction process required for the construction of the structural shape of the building. The reason for that is the understanding that the misalignment between design and construction leads to inadequate use of material and energy resources, resulting in greater waste of materials, longer manufacturing time and a longer or even more complex assembly of the structure. Thus, the main goal of the research is to demonstrate the influence of architectural design on the rationalization of the construction process for engineered wood structures. As part of the methodology, a study of this construction process is developed, specifically describing the steps that have the greatest implication on the architectural design. Also, quotes of timber-based structures were analyzed to understand the impact of design solution on the cost of a mass timber building, thus demonstrating the influence of architecture on the potential feasibility of the structure. Two cases of built structures are also studied to exemplify the execution and rationalization of the construction process. The final product of the thesis, in order to contribute to the resolution of the problem identified in this specific market, it to plan and organize a plugin that can be associated with an existing modeling tool and used as support in the initial architectural design phase, so that its conception aligns with the DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) approach. In order to make this product feasible, design guidelines are developed to assist architects, engineers, designers and planners in the conception of the initial design. Also indices to measure the rationalization of the architectural design regarding the construction process are defined, as well as design and structural parameters to be incorporated into the digital tool.

Keywords: engineered wood structures; CLT (Cross-laminated timber); DFMA (Design for Manufacture and Assembly); architectural design; construction rationalization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Painel de LVL (Laminated Veneer Lumber).	16
Figura 2: Esquema de confecção de painel de DLT (Dowel-Laminated Timber)	17
Figura 3: Esquema de confecção de painel de CLT (Cross-Laminated Timber)	18
Figura 4: Esquema de confecção de viga de Glulam (Glued-Laminated Timber)	20
Figura 5: Diagrama ilustrando a estruturação da tese.	28
Figura 6: Esquema de funcionamento de um equipamento de usinagem com cinco eixos.	35
Figura 7: Desenho gerado do modelo desenvolvido para.....	37
Figura 8: Fluxograma apresentado por Yuan et al (2017) para exemplificar o plugin concebido.....	50
Figura 9: Diagrama compilando os gabaritos para cada uso e tipo de edificação.	71
Figura 10: Edifício Stadthaus durante a montagem da estrutura.....	74
Figura 11: Edifício Stadthaus finalizado.....	74
Figura 12: Edifício Mjøstårnet durante a montagem da estrutura.....	76
Figura 13: Edifício Mjøstårnet finalizado.....	76
Figura 14: Edifício Brock Commons finalizado.	77
Figura 15: Edifício Brock Commons durante a montagem da estrutura.	77
Figura 16: Edifício Sara Kulturhus durante a montagem da estrutura.	79
Figura 17: Edifício Sara Kulturhus finalizado.	79
Figura 18: Interior do Edifício Hoho Wien.....	81
Figura 19: Edifício Hoho Wien finalizado.....	81
Figura 20: Exemplo esquemático de conexão colaborante entre estruturas de madeira e capa de concreto.	82
Figura 21: Moradias estudantis da Fundação Bradesco, construídas com pilares e vigas de MLC.....	85
Figura 22: Moradias estudantis da Fundação Bradesco, construídas com pilares e vigas de MLC.....	85
Figura 23: Edificação para clube construída com vigas de MLC, lajes de MLCC, pilares e vigas metálicos. .	87
Figura 24: Cobertura de escola municipal construída com estrutura de MLC.....	87
Figura 25: Loja conceito de fábrica de chocolates construída com painéis de MLCC e estrutura de MLC. .	88
Figura 26: Loja conceito de fábrica de chocolates construída com painéis de MLCC e estrutura de MLC. .	88
Figura 27: Imagem de divulgação do interior do apartamento do Edifício Aurora.	90
Figura 28: Imagem de divulgação da fachada frontal do Edifício Aurora.....	90
Figura 29: Residência localizada na cidade de Valinhos (SP) após a montagem do esqueleto estrutural. .	101
Figura 30: Residência localizada na cidade de Valinhos (SP) praticamente finalizada.	101
Figura 31: Diagrama ilustrando o desenrolar do processo construtivo das estruturas de madeira engenheirada conforme proposto pela presente pesquisa.	102
Figura 32: Etapa de prensagem dos painéis de MLCC, durante aplicação automática do adesivo estrutural acima de camada de lamelas dispostas na longitudinal.....	105
Figura 33: Lamelas de madeira após execução do corte para as emendas dentadas.	105
Figura 34: Usinagem de um painel de MLCC por meio da fresadora CNC com 5 eixos.....	107
Figura 35: Posicionamento de um painel de MLCC com o auxílio de um caminhão <i>munck</i>	107
Figura 36: Esquema ilustrando o planejamento do corte de pilares e vigas de MLC.	109
Figura 37: Esquema ilustrando o planejamento do corte de paredes de MLCC.....	110
Figura 38: Representação da direção das fibras da madeira.	113
Figura 39: Esquema de configuração estrutural fictícia representando o comportamento estrutural de elementos de MLC.....	114

Figura 40: Esquema de configuração estrutural fictícia representando o comportamento estrutural de lajes de MLCC.	115
Figura 41: Cobertura executada com lajes de MLCC apoiadas em pilares e vigas de MLC, para área esportiva escolar.	117
Figura 42: Cobertura de marquise executada com lajes de MLCC com formato curvo e orgânico para área esportiva escolar.....	117
Figura 43: Esquema de configuração estrutural fictícia representando o comportamento estrutural de lajes e paredes de MLCC.....	119
Figura 44: Pannel de MLCC de eucalipto.....	123
Figura 45: Pannel de MLCC de pinus.	123
Figura 46: Esquema de plano de corte para configuração estrutural fictícia com pé-direito equivalente a 2,80 m.....	126
Figura 47: Esquema de plano de corte para configuração estrutural fictícia com pé-direito equivalente a 3,20 m.....	128
Figura 48: Esquema de plano de corte para configuração estrutural fictícia com alturas variadas no pé-direito.....	130
Figura 49: Rasgos para eletrodutos e demais instalações, posicionados de forma alinhada à lamela externa dos painéis de MLCC (parede e laje).	133
Figura 50: Usinagem para caixinha elétrica com cantos arredondados.....	133
Figura 51: Transferência da carga para o caminhão <i>munck</i> para montagem da edificação.....	138
Figura 52: Içamento de painéis de MLCC localizados em uma pilha de estocagem em obra.....	138
Figura 53: Conexão entre uma viga de MLC e uma parede de MLCC por meio de parafusos autoperfurantes.	142
Figura 54: Conexão de um pannel de MLCC na fundação de concreto por meio de um perfil metálico.	142
Figura 55: Esquema comparativo entre as duas configurações estruturais fictícias das Figuras 46 e 47 quanto à montagem da estrutura.	144
Figura 56: Perspectiva retirada do modelo tridimensional confeccionado durante a elaboração do orçamento 9.....	157
Figura 57: Perspectiva retirada do modelo tridimensional confeccionado durante a elaboração do orçamento 10.....	158
Figura 58: Perspectiva retirada do modelo tridimensional confeccionado durante a elaboração do orçamento 13.....	159
Figura 59: Vista do interior da Casa Sustentável, do bloco dos dormitórios.....	165
Figura 60: Vista do interior da Casa Sustentável, do bloco da cozinha.	165
Figura 61: Esquema do plano de corte para o Caso 01.	167
Figura 62: Esquema do plano de corte para o Caso 02 (continua na próxima página).	170
Figura 63: Esquema do plano de corte para o Caso 02 (continuação).	171
Figura 64: Veículo de transporte com segunda carga, incluindo painéis de MLCC e vigas de MLC.	175
Figura 65: Içamento de pacote com vigas de MLC para transporte e montagem.....	175
Figura 66: Esquema ilustrando duas possibilidades para fabricação de uma parede de MLCC.	180
Figura 67: Fluxograma ilustrando a organização e o funcionamento do plugin planejado.....	207
Figura 68: Ilustração da configuração geométrica do objeto laje.....	214
Figura 69: Ilustração da configuração geométrica do objeto parede.....	214
Figura 70: Ilustração da configuração geométrica do objeto viga.....	215
Figura 71: Ilustração da configuração geométrica do objeto pilar.	215
Figura 72: Regra de modelagem para objetos paredes.....	218
Figura 73: Regra de modelagem para objetos lajes.....	218

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Percentual dos itens que compõe a categoria material no custo total da estrutura de madeira engenheirada.	151
Gráfico 2: Distribuição da porcentagem encontrada para a categoria Material dos 18 orçamentos analisados.	151
Gráfico 3: Percentual dos itens que compõem a categoria mão de obra no custo total da estrutura de madeira engenheirada.....	153
Gráfico 4: Relação entre distância da obra e porcentagem do valor de deslocamento em relação ao custo total da estrutura de madeira engenheirada.	153
Gráfico 5: Relação entre o índice de quantidade de peças utilizada por m ² construído da edificação com a porcentagem do subitem de serviços no custo total da estrutura de madeira engenheirada.	155
Gráfico 6: Relação entre o índice de volume de material utilizado por m ² construído da edificação com a porcentagem do subitem de madeira no custo total da estrutura de madeira engenheirada.	155
Gráfico 7: Custo do m ² encontrado para os orçamentos analisados.	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Modelos de veículos usualmente utilizados para transporte das peças estruturais.	136
Tabela 2: Dados coletados para os orçamentos 1 a 18.	149
Tabela 3: Índices calculados para os orçamentos 1 a 18.	156
Tabela 4: Características dos painéis fabricados para o Estudo de Caso 01.	168
Tabela 5: Características dos painéis fabricados para o Estudo de Caso 02.	172
Tabela 6: Resultados dos Índices definidos para os Estudo de Caso 01 e 02.	204
Tabela 7: Resultados dos Índices de fabricação e de tipologias por tipo de painel para o Estudo de Caso 02.	205
Tabela 8: Parâmetros compilados para os quatro tipos de objetos.	216

SUMÁRIO

1. APRESENTAÇÃO.....	15
1.1. INTRODUÇÃO	16
1.2. MOTIVAÇÃO	22
1.3. OBJETIVO	24
1.4. METODOLOGIA	25
1.5. ESTRUTURAÇÃO	27
2. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	31
2.1. PANORAMA DAS TECNOLOGIAS DIGITAIS	32
2.2. PANORAMA DAS PESQUISAS PRECEDENTES	42
2.3. PANORAMA DA PRECIFICAÇÃO DA ARQUITETURA.....	53
2.4. PANORAMA DA MADEIRA ENGENHEIRADA	64
2.5. CONSIDERAÇÕES PARCIAIS DA CONTEXTUALIZAÇÃO.....	84
3. DESENVOLVIMENTO.....	99
3.1. ESTUDO DO PROCESSO CONSTRUTIVO.....	100
3.2. ESTUDO DA RACIONALIZAÇÃO DO PROCESSO	112
3.3. ESTUDO DA PRECIFICAÇÃO DA ESTRUTURA.....	146
3.4. ESTUDO DE CASOS CONSTRUÍDOS	163
3.5. CONSIDERAÇÕES PARCIAIS DO DESENVOLVIMENTO	178
4. PRODUTO	185
4.1. DEFINIÇÃO DO PRODUTO.....	186
4.2. DEFINIÇÃO DAS PREMISSAS	193
4.3. DEFINIÇÃO DOS ÍNDICES.....	199
4.4. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS	207
4.5. CONSIDERAÇÕES PARCIAIS DO PRODUTO	224
5. CONCLUSÃO.....	229
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	241

01

APRESENTAÇÃO

A primeira parte da presente tese pretende introduzir o tema e objeto a ser abordado, isto é, estruturas de madeira engenheirada, especificamente no âmbito do projeto arquitetônico. Também será exposta a motivação inicial da pesquisa, os objetivos propostos, a metodologia adotada para condução do estudo e a estruturação da Tese de Doutorado.

1.1. INTRODUÇÃO

O uso da madeira como elemento estrutural na construção civil tem crescido significativamente nos últimos anos. Tal ascensão é fortemente associada à característica sustentável e renovável da matéria-prima madeira, a qual se justifica, principalmente, pela sua capacidade de absorção e retenção de carbono. No entanto, provavelmente, esse cenário não seria possível sem o desenvolvimento de tecnologias industrializadas que possibilitassem novas aplicações, maior precisão e produção em larga escala destas tipologias estruturais, de forma consciente e sem ocasionar danos ao meio ambiente.

Tais tecnologias consistem, basicamente, nos produtos de madeira engenheirada, que combinam a resistência natural da madeira com a engenharia moderna. A confecção destes se dá por meio de adesivos para a colagem de lamelas, partículas, fibras, lâminas ou placas de madeira de modo a configurarem um produto composto (Figura 1). A teoria por trás de todos os produtos de madeira engenheirada consiste na desagregação da madeira em pedaços menores para então se proceder com a colagem destes entre si novamente, obtendo um produto com resistência e dimensões muito superiores à madeira sólida original (DAWSON *et al*, 2022).



Figura 1: Painel de LVL (*Laminated Veneer Lumber*).

Fonte: GREEN;
TAGGART, 2020.

Alguns exemplos de produtos de madeira engenheirada são o OSL (*Oriented Strand Lumber*) e o LVL (*Laminated Veneer Lumber*).

Além desses, outros tipos de elementos estruturais maciços industrializados também se enquadram no grupo dos produtos de madeira engenheirada, mas, tendo em vista suas características em comum, reúnem-se em uma subcategoria específica, denominada como *mass timber*.

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. Dentre os produtos que se enquadram na categoria do *mass timber*, aqueles mencionados pelas referências estudadas consistem no CLT (*Cross-Laminated Timber*), NLT (*Nail-Laminated Timber*), DLT (*Dowel-Laminated Timber*) (Figura 2) e GLT ou *Glulam* (*Glued-Laminated Timber*) (WOODWORKS, THINKWOOD, 2021; DAWSON *et al*, 2022; BRENEMAN *et al*, 2022; GREEN, 2017).

No caso dos painéis de NLT e DLT, a associação das lamelas de madeira entre si ocorre de forma mecânica, por meio de pregos para o primeiro (em português, a sigla NLT pode ser traduzida como madeira laminada pregada) e através de cavilhas para o segundo (em português, a sigla DLT pode ser traduzida como madeira laminada cavilhada).

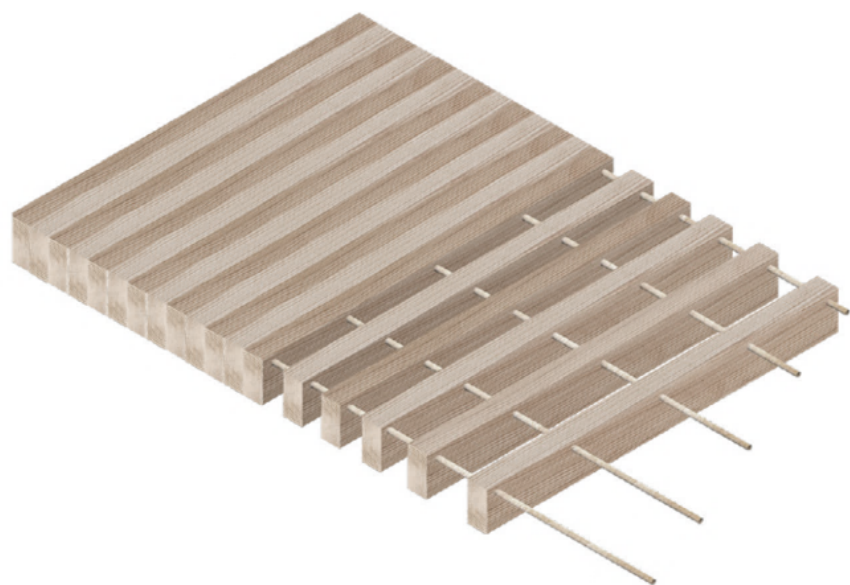


Figura 2: Esquema de confecção de painel de DLT (*Dowel-Laminated Timber*).

Fonte:
WOODWORKS,
THINKWOOD, 2021.

Dentre todas essas recentes tecnologias mencionadas, no entanto, aquele produto, que possivelmente pode ser considerado como o grande protagonista da nova era da construção com madeira, é o elemento estrutural denominado *Cross-Laminated Timber* (CLT), o qual consiste no principal objeto de estudo desta pesquisa (Figura 3).

CLT também é conhecido como *X-Lam*, *Brettsper Holz* (BSP), em alemão, ou madeira lamelada colada cruzada (MLCC), em português, nomenclatura esta apresentada pela recente publicação da revisão da norma NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira (2022). A inserção desta tecnologia construtiva na norma em questão data apenas de sua última revisão, publicada no ano de 2022. De acordo com o documento, CLT pode ser definido como “painéis com propriedades estruturais confeccionados com no mínimo três camadas de lamelas de madeira, as quais ao menos três são coladas de forma ortogonal, possuindo camadas de madeira maciça” (ABNT NBR 7190, 2022, Parte 07, p. 2).

O desenvolvimento original do CLT ocorre, de acordo com Crespell e Gagnon (2010), inicialmente na Suíça, nas cidades de Zurique e Lausanne, durante o início da década de 1990. Porém, a tecnologia, como se conhece atualmente, é resultado de um projeto de pesquisa iniciado em 1990 na Áustria e proveniente de uma parceria entre a indústria e a universidade.



Figura 3: Esquema de confecção de painel de CLT (*Cross-Laminated Timber*).

Fonte: da autora (2018).

Conforme apontam Brandner *et al* (2016), já em 1994, Schickhofer publicou sua tese sobre estruturas compostas lameladas rígidas ou flexíveis, com foco no CLT. O autor cita também outros trabalhos publicados em seguida a este e nesta mesma década, igualmente enfocados no estudo do CLT. Em paralelo a essas pesquisas, as primeiras indústrias foram instaladas na Europa Central, em especial na Áustria, Suíça e Alemanha, a princípio em pequena escala, e, nos últimos vinte anos, em escala industrial.

Costa (2013) afirma que uma das pioneiras na fabricação do CLT foi a empresa austríaca KLH Massivholz GmbH, fundada em 1998, após anos de pesquisa e estudos desenvolvidos em parceria com a Graz University of Technology (Áustria). Na mesma década, no ano de 1994, sabe-se, também, que a empresa alemã MERK Timber GmbH, integrante do grupo empresarial Ed. Zübling AG, inicia seu desenvolvimento para a fabricação de painéis de CLT (MERK, 2015).

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 comando numérico computadorizado (CNC), nos tamanhos exatos dos elementos construtivos que compõe o projeto (BRANDNER, 2013).

Atualmente, são produzidos e empregados em larga escala no continente Europeu (em especial em países como Alemanha, Áustria, Suíça e norte da Itália) e na América do Norte (Estados Unidos e Canadá), além de possuírem um mercado em constante ascensão também na Austrália. No Brasil o primeiro fabricante nacional iniciou a produção dos painéis em 2012, no Estado de São Paulo. No momento de conclusão da pesquisa (julho de 2023), sabe-se também da existência de, ao menos, mais três fabricantes, localizados na região Sul do país.

Entretanto, a técnica da colagem de lamelas para fabricação de elementos estruturais, em si, não é tão recente, sendo desenvolvida praticamente um século antes, para a confecção de peças lineares. Este conceito de união de lamelas origina-se na Europa Central, na região da Suíça e Alemanha, quando a escassez de árvores com grandes dimensões empregadas para uso estrutural levou à conexão de peças menores por meio de ligações metálicas. As lamelas eram empilhadas umas sobre as outras, formando elementos estruturais maiores e mais rígidos. No final do século XIX e início do século XX, a ligação metálica foi então substituída por cola, executada à base de uma proteína encontrada no leite (PEREIRA, 2014).

Estes elementos consistem no que hoje se conhece mundialmente como GLT ou *Glulam*. Já no Brasil este produto é amplamente conhecido pela sigla MLC (Madeira Lamelada Colada), que

resulta da tradução do termo em questão para o português. É um produto de madeira engenheirada, que também se enquadra na categoria de *mass timber*, e resulta da colagem das lamelas com veios orientados na direção paralela (Figura 4) (DAWSON *et al*, 2022).

Seu uso se encontra bastante consolidado globalmente, sendo este produto empregado na construção civil já há muitos anos, como pilares, quando posicionado na vertical, ou vigas, quando sua posição é horizontal. A primeira estrutura em MLC da qual se tem conhecimento, como apresentam Moody e Hernandez (1997), consiste em um auditório localizado em Basel, na Suíça, e construído em 1893. Contudo, recentemente, este produto tem ganhado maior destaque no mercado, tendo em vista sua aplicação como suporte de painéis de *mass timber* (DAWSON *et al*, 2022).

De forma geral, este renascimento das estruturas de madeira, como é conhecido atualmente, acontece com a transição dos sistemas lineares para sistemas compostos por painéis, especialmente aqueles de *mass timber* mencionados (SALVADORI, 2021). Ou seja, ocorre justamente com a ampliação do emprego de elementos de MLC, englobando também produtos de *mass timber*, de origem ainda relativamente nova.



Figura 4: Esquema de confecção de viga de *Glulam* (*Glued-Laminated Timber*).

Fonte: da autora (2018).

A recente e crescente disseminação das estruturas de madeira, é, inclusive, apontada pela publicação *Timber Trends de 2022*, divulgada pela organização *Think Wood*. O documento em questão apresenta o resultado de uma pesquisa realizada entre arquitetos e demais agentes da construção civil, a qual busca compreender quais eram as tendências mais esperadas pelos profissionais ao longo do ano de 2022 para o setor da construção civil. Dentre os cinco tópicos mais mencionados, encontra-se o termo *mass timber*.

Todas essas terminologias apresentadas, de ampla adoção internacional, originam-se, naturalmente, da língua inglesa. No Brasil, são utilizados por diversos autores em sua denominação original em inglês ou por meio da sua tradução para o português. Neste trabalho, para designação das estruturas de *mass timber* será adotado o nome “estruturas de madeira engenheirada”, que englobam tanto painéis de MLCC quanto pilares ou vigas de MLC. Estas últimas serão as siglas aqui utilizadas, referenciando painéis de *Cross-Laminated Timber* (CLT ou MLCC) e vigas ou pilares de *Glulam* (GLT ou MLC), respectivamente.

Acrescenta-se ainda que, para o desenvolvimento da presente pesquisa, fez-se necessário realizar um recorte temático das tipologias de edificações consideradas. Assim, os resultados a serem alcançados enquadram-se para edificações residenciais com até dois pavimentos com configuração estrutural panelizada, compostas majoritariamente por painéis de MLCC atuando como vedações autoportantes, lajes de piso ou lajes de cobertura, e associadas, eventualmente, a vigas e pilares de MLC. Ambos consistem nos elementos estruturais, dentre aqueles apresentados na subcategoria do *mass timber*, empregados com maior assiduidade no setor da construção civil brasileiro.

Este mercado nacional, por sua vez, mesmo diante do contexto global de crescente ascensão das estruturas de madeira, não se mostra ainda integralmente consolidado, sendo o número de edificações estruturadas com madeira engenheirada no Brasil bastante tímido em relação ao cenário internacional. Entende-se, no entanto, que a maior disseminação do emprego das estruturas de madeira engenheirada no país deva ocorrer de forma consciente e coerente, alinhada ao conceito de sustentabilidade intrínseco a essa matéria-prima, garantindo maior racionalização de todo o processo construtivo da tecnologia escolhida e possibilitando maior viabilidade financeira potencial para a real concretização das estruturas. Para que isso ocorra, depreende-se ser necessário que o conceito arquitetônico se desenvolva com este objetivo, ou seja, almejando a criação de uma estrutura otimizada, coerente, adequada à tecnologia construtiva e sustentável em todos os aspectos.

1.2. MOTIVAÇÃO

Essa busca pela sustentabilidade como justificativa amplamente veiculada e muitas vezes até banalizada para o emprego das estruturas de madeira engenheirada pode ser, contudo, questionada quando a estrutura é compreendida de forma holística, isto é, para além dos benefícios proporcionados pela matéria-prima individualmente, mas englobando também a maior racionalização de todo seu processo construtivo. Como uma das vertentes do conceito de sustentabilidade pressupõe-se o uso consciente e coerente dos recursos naturais, sejam eles materiais ou energéticos. Assim, por racionalização do processo construtivo, entende-se aqui seu desenrolar de forma eficiente e otimizada, com emprego dos recursos materiais e energéticos da forma mais racional e econômica possível.

Em paralelo, verifica-se que o caráter inovador das estruturas de madeira engenheirada e sua tímida e recente propagação em território nacional acarretam a natural ausência de um conhecimento acurado sobre a tecnologia por parte daqueles que atuam na concepção do projeto da edificação. O conhecimento, aqui, não é entendido de forma superficial, ou seja, simplesmente o ato de saber sobre o que é o MLCC ou o MLC. Mas sim, deve-se tratar do conhecimento de forma profunda, isto é, do entendimento de todo o processo construtivo e dos impactos, positivos ou negativos, de cada decisão projetual neste processo.

Logo, no desenvolvimento da forma estrutural, como resultado direto do desenho arquitetônico, quando da ausência desse conhecimento, nem sempre é possível atingir máxima racionalização das estruturas dimensionadas e adequação desta a seu processo construtivo. Esta constatação é frequentemente identificada pela autora em sua atuação profissional já há alguns anos, tendo em vista sua especialização na concepção, compatibilização e detalhamento de estruturas de MLCC e MLC.

O desalinhamento do projeto às premissas da tecnologia pode levar ao emprego inadequado de recursos materiais e energéticos. Em outras palavras, possivelmente, acarretará maior desperdício de matéria-prima, maior tempo de fabricação, demandas ineficientes do maquinário utilizado e uma montagem mais longa ou até mais complexa. Assim, aponta-se para uma relação direta entre o desenvolvimento do conceito arquitetônico adequado ao processo construtivo da tecnologia especificada e o emprego coerente e consciente de recursos naturais. Isto é, ao se especificar estruturas de madeira engenheirada, pressupõe-se que a busca pela sustentabilidade

no projeto arquitetônico deve estar vinculada à busca pela racionalização do processo construtivo da tecnologia em questão.

Além disso, sabe-se que, não apenas para essas estruturas específicas, mas tratando-se de qualquer tecnologia construtiva, uma das consequências mais perceptíveis de um projeto desalinhado às premissas básicas da tecnologia construtiva empregada é o aumento no custo final da estrutura. O fator custo, por sua vez, para a grande maioria dos usuários, consiste no principal quesito para a escolha do método de construção que irá concretizar sua edificação. Consequentemente, entende-se que estruturas mais caras são mais difíceis para se viabilizarem.

Questiona-se, ainda, como se compõe esta precificação de uma estrutura. Isso porque, partindo do pressuposto que o custo se relaciona à adequação do projeto às premissas da tecnologia, ou seja, à maior ou menor racionalização do processo construtivo da estrutura, é possível afirmar que a métrica da valoração comumente adotada no setor da construção civil para estimativa orçamentária por área construída da edificação não é passível de replicação quando se trata de estruturas de madeira engenheirada.

Por fim, por meio das reflexões acima, levantam-se as seguintes hipóteses a serem comprovadas ou discutidas ao longo do desenvolvimento da presente pesquisa:

- Uma forma estrutural otimizada é aquela que possibilita maior racionalização do processo construtivo da tecnologia empregada para sua concretização e está totalmente relacionada ao conceito arquitetônico, sendo consequência direta deste. Uma estrutura deve nascer coerente para que possa se desenvolver e se consolidar de forma adequada;
- A racionalização do processo construtivo, por sua vez, influencia diretamente no custo de fornecimento e montagem da estrutura, sendo responsável por sua viabilidade econômica potencial;
- Esta viabilidade econômica, constatada na forma do custo da estrutura de madeira engenheirada, não pode ser calculada unicamente pela área construída da edificação, por meio de um índice fixo que se aplique indiscriminadamente a qualquer projeto, tendo em vista que está diretamente relacionada ao projeto arquitetônico, desde a concepção até a conclusão da edificação;
- Custo e sustentabilidade, tratando-se de estruturas de madeira engenheirada, são conceitos relacionados, pois a forma estrutural otimizada ou adequada, por ser aquela que emprega menos recursos materiais e energéticos para sua concretização, consequentemente possui maior viabilidade financeira potencial.

1.3. OBJETIVO

Diante das reflexões levantadas, o presente trabalho pretende, inicialmente, comprovar as hipóteses apresentadas. Ou seja, o objetivo principal desta pesquisa é demonstrar a influência do projeto arquitetônico na racionalização do processo construtivo de estruturas de madeira engenheirada, a qual se relaciona diretamente com sua viabilidade econômica potencial. Além disso, intenciona-se contribuir para a resolução da problemática identificada neste nicho específico de mercado, quanto à ausência de conhecimento profundo acerca das tecnologias construtivas objeto deste estudo por parte dos profissionais que atuam na concepção de projetos de edificações. Assim, busca-se, também, auxiliar na concepção de projetos arquitetônicos de madeira engenheirada de forma eficiente e otimizada, ou seja, orientada à racionalização do processo construtivo da estrutura.

Para isso, são estabelecidos três objetivos secundários específicos, a seguir listados:

- identificar premissas de projeto que possam orientar arquitetos, engenheiros, projetistas e *designers* no desenvolvimento da concepção inicial do projeto;
- definir índices que permitam a mensuração do projeto da estrutura quanto à racionalização do processo construtivo;
- definir e organizar parâmetros a serem implementados em uma ferramenta de modelagem digital que assessore e oriente a criação de modelos conceituais das edificações em questão.

Deste modo, como produto da tese, foram traçadas diretrizes para o planejamento de um *plugin* que possa ser associado a uma ferramenta de modelagem pré-existente a ser utilizado como suporte na fase de criação inicial arquitetônica, incorporando tanto as premissas como os índices previamente definidos. Terá como finalidade possibilitar que cada traçado arquitetônico a ser concebido permita maior racionalização do processo construtivo da tecnologia, resultando em uma estrutura otimizada e alinhada aos conceitos de sustentabilidade. ¹

¹ Este estudo não adentrará em especificidades que competem a outras áreas profissionais. Sendo assim, não faz parte do escopo da pesquisa desenvolver códigos em linguagem de programação para viabilizar de maneira prática o *plugin* proposto. Por esse motivo, o planejamento desta ferramenta será apresentado na forma de um fluxograma, de modo a permitir sua futura tradução por um profissional especializado.

1.4. METODOLOGIA

O presente trabalho se configura como uma pesquisa exploratória. Para seu desenvolvimento, pesquisas dessa natureza podem basear-se no levantamento bibliográfico, em entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com a problemática levantada e análise de estudos de casos (GIL, 2002). Os três métodos exemplificados para o desenvolvimento de uma pesquisa exploratória foram aqui empregados para atingir os objetivos propostos pela presente tese.

Em um primeiro momento, procedeu-se com o levantamento bibliográfico, por meio do estudo de fontes bibliográficas adequadas, a exemplo de artigos acadêmicos, teses e dissertações que abordem as temáticas que circundam o objeto definido para esta pesquisa. Tendo em vista ainda ser esta uma tese desenvolvida no campo da Arquitetura e Urbanismo, considerou-se fundamental um breve estudo de referências projetuais icônicas, nacionais e internacionais, que representem as diferentes tipologias estruturais de madeira engenheirada. Ao final do levantamento bibliográfico, define-se como recorte tipológico as estruturas de madeira engenheirada panelizadas, compostas por painéis de MLCC atuando como lajes de piso, cobertura ou vedações, associadas a elementos lineares (pilares ou vigas) de MLC. Nesse sentido, painéis de MLCC são o principal objeto de estudo do trabalho, sendo que elementos de MLC são estudados de forma secundária, por sua eventual utilização em estruturas panelizadas.

Além disso, para a formulação da problemática, foram incorporadas à pesquisa indagações e conjecturas identificadas pela autora durante sua formação acadêmica, tendo em vista a temática referente aos painéis de MLCC ter sido também abordada na sua dissertação de mestrado. Ademais, contribuíram para a formulação desta pesquisa, ponderações quanto às reais experiências práticas vivenciadas pela autora ao longo de sua extensa atuação profissional junto ao fabricante de estruturas de madeira engenheirada, o qual foi estudado neste trabalho. Esta vivência profissional inclui desenvolvimento de projetos de estruturas de madeira engenheirada, desde a concepção até a fabricação das peças, eventuais acompanhamentos de montagens de estruturas, compatibilização de projeto arquitetônico e de instalações prediais com o projeto da estrutura.

Após definição da problemática, para o desenvolvimento da pesquisa em si, adotou-se, como método, a elaboração de estudos de casos. Para isso, adotou-se como caso estudado pela pesquisa o primeiro fabricante de painéis de MLCC do Brasil, a empresa Crosslam Brasil, localizada na cidade de Suzano (SP), a qual disponibilizou e autorizou a divulgação dos dados em questão. Quando do

início do desenvolvimento da pesquisa, este era o único fabricante de painéis de MLCC que se tinha conhecimento no Brasil. Dessa maneira, os resultados alcançados pelo trabalho, assim como as discussões realizadas, enquadram-se, especificamente, no cenário brasileiro, que consiste na realidade da empresa aqui estudada.

No que diz respeito aos procedimentos empregados pela pesquisa, inicialmente, levantou-se o processo construtivo adotado pela Crosslam Brasil por meio de visitas periódicas à fábrica e do acompanhamento da etapa de montagem de determinadas estruturas, além da vivência profissional da autora no desenvolvimento de projetos dessa natureza. Efetuou-se também uma busca documental em orçamentos elaborados para o fornecimento e execução de estruturas de madeira engenheirada no Brasil, com o intuito de compreender as relações entre projeto arquitetônico e viabilidade econômica das estruturas. A determinação do número de casos para este fim específico decorreu dos dados disponibilizados pelo fabricante estudado, que cedeu um total de 18 orçamentos para análise. A análise dos dados coletados foi, a princípio, quantitativa. Posteriormente, procedeu-se uma análise qualitativa específica para aqueles casos que se distanciaram das médias encontradas.

Na sequência, ainda no desenvolvimento da pesquisa, a análise qualitativa também foi adotada para estudo de dois casos específicos de estruturas construídas, visando ilustrar em maior profundidade as constatações realizadas previamente nos estudos do processo construtivo e dos orçamentos. Os dois casos em questão consistiram em estruturas executadas pelo fabricante analisado, sendo que os dados coletados foram oriundos do acompanhamento do projeto e da montagem das estruturas por parte da presente autora.

As informações coletadas, assim como as constatações realizadas no decorrer da pesquisa, embasaram, ao final, a elaboração de premissas para projetos arquitetônicos estruturados com madeira engenheirada. Da mesma forma, orientaram a definição de diretrizes para o planejamento de um *plugin* com o intuito de auxiliar a criação arquitetônica dessas edificações específicas. Os estudos do processo construtivo e dos casos, de orçamentos ou estruturas construídas, são, assim, a base para a fundamentação teórica do *plugin* que é planejado como produto final desta pesquisa. A organização da ferramenta é apresentada, ao final da tese, na forma de um fluxograma, o qual descreve seu funcionamento em seis passos. Além disso, foram definidos também parâmetros para criação de objetos inteligentes que representem digitalmente a tecnologia construtiva estudada e contenham as premissas para a adequada concepção da forma arquitetônica.

1.5. ESTRUTURAÇÃO

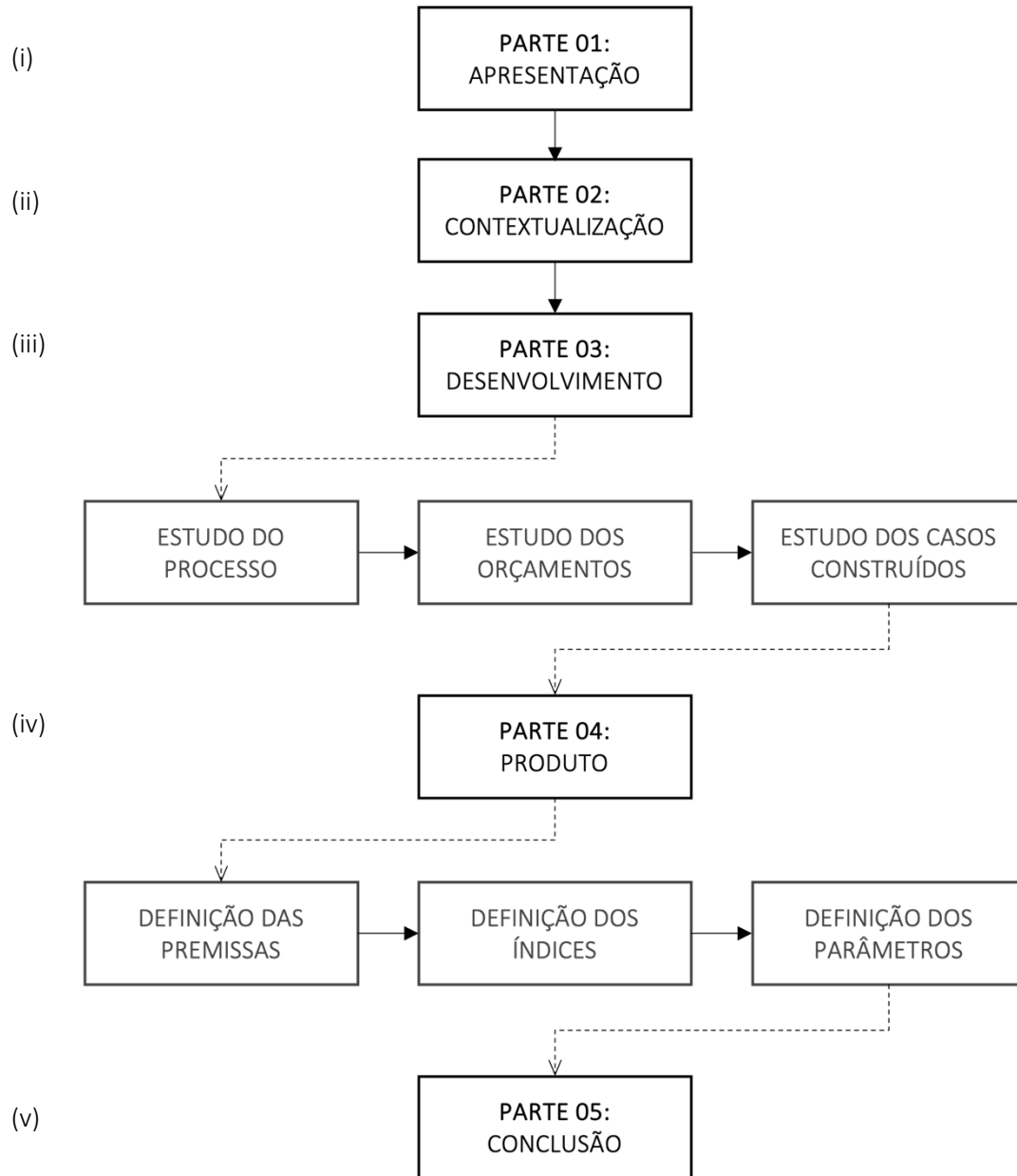
Para concretização dos objetivos propostos e comprovação das reflexões levantadas, a presente tese se estrutura em cinco partes. São elas: (i) apresentação, (ii) contextualização, (iii) desenvolvimento, (iv) produto e (v) conclusão, conforme apresentado no diagrama a seguir (Figura 5).

A primeira delas apresenta o trabalho em si, introduzindo o tema a ser tratado, a motivação da pesquisa, objetivos, metodologia adotada e estruturação da Tese de Doutorado.

A segunda parte, intitulada Contextualização, visa justamente apresentar um panorama mais abrangente dos temas abordados pela pesquisa, por meio do levantamento bibliográfico, conforme mencionado anteriormente. Discorre, a princípio, sobre o atual cenário de desenvolvimento tecnológico no que diz respeito à elaboração de projetos e métodos de construção que empreguem processos de fabricação digital. Na sequência, apresenta algumas pesquisas já realizadas acerca da otimização de estruturas industrializadas e de madeira engenheirada. Ademais, discute as relações entre custo e arquitetura, além da métrica de precificação verificada para estruturas de madeira engenheirada. Por fim, enfoca o estágio de desenvolvimento e difusão dessas estruturas em escala global e, mais especificamente, no Brasil, trazendo também referências projetuais icônicas selecionadas em âmbito nacional e internacional. Esta contextualização inicial mostra-se de extrema importância para a clara delimitação da problemática, do recorte temático estabelecido, além do levantamento de pesquisas anteriores com objetivos semelhantes.

Na sequência, a terceira parte, denominada Desenvolvimento, aprofunda-se nas estruturas de madeira engenheirada e nas etapas de pesquisa que possibilitaram a elaboração do produto final em si. Assim, esta parte específica, baseada no método de estudos de caso, conforme descrito no item anterior, será constituída por: estudo do processo construtivo, estudo dos orçamentos e estudo dos casos construídos de estruturas de madeira engenheirada. Para isso, inicia-se com estudo do processo construtivo da tecnologia de forma mais ampla. Em seguida, são detalhadas, mais especificamente, aquelas etapas deste processo que possuem maior implicação no projeto arquitetônico, discutindo as conexões verificadas entre projeto e execução. De forma a aprofundar nessas relações, são então analisados alguns orçamentos realizados pelo fabricante estudado neste trabalho, de modo a constatar a associação pressuposta entre custo e

Figura 05: Diagrama ilustrativo da estruturação da tese.



Fonte: da autora (2023).

projeto, além da magnitude dessas influências. Ao final, ainda nesse capítulo, são estudados dois casos de estruturas construídas para exemplificar a concretização e a racionalização do processo construtivo em situações reais e de forma mais detalhada.

Reitera-se que os estudos desenvolvidos nesta terceira parte são primordiais para elaboração da fundamentação teórica do *plugin* planejado, além de possibilitarem a comprovação das hipóteses levantadas inicialmente. A ausência das discussões, das reflexões e das conclusões alcançadas durante o Desenvolvimento desta pesquisa, por meio dos estudos do processo, dos orçamentos e dos casos construídos, impossibilitaria a proposição de uma ferramenta que possa incorporar as premissas da tecnologia construtiva. O planejamento deste *plugin* exige o conhecimento profundo da tecnologia para a qual ele se intenciona, conhecimento este justamente abordado e debatido durante esta terceira parte da pesquisa.

Dessa maneira, com base nestes estudos, a quarta parte, designada como Produto, pretende consolidar os propósitos da pesquisa, por meio da apresentação de uma proposta organizacional de um *plugin*, que possa auxiliar a concepção de um projeto arquitetônico orientado à racionalização do processo construtivo da tecnologia em questão, de modo a garantir maior adequação a esse processo, menor desperdício de recursos e, conseqüentemente, maior viabilidade potencial da estrutura. Com essa finalidade, em um primeiro momento são definidas as premissas a serem incorporadas durante a concepção e desenvolvimento dos projetos arquitetônicos. Em seguida, compilam-se determinados índices – que serão introduzidos preliminarmente nos estudos dos orçamentos e dos casos construídos, durante a terceira parte – para mensuração quantitativa da racionalização da forma arquitetônica quanto ao processo construtivo. Por último, são apresentados os parâmetros estabelecidos para introdução nos objetos inteligentes presentes na ferramenta digital de modelagem, assim como o planejamento do *plugin* em si, o qual, por sua vez, é representado na forma de um fluxograma que organiza suas etapas de funcionamento.

Posteriormente, a quinta parte apresenta as conclusões finais da pesquisa, reunindo as considerações parciais expostas ao longo do trabalho e as possibilidades de pesquisas futuras que se delineiam tendo a presente como ponto de partida. Também engloba determinadas reflexões pessoais da autora, no que diz respeito ao papel do profissional arquiteto frente aos temas abordados nesta tese.

02

CONTEXTUALIZAÇÃO

A segunda parte da tese visa apresentar um panorama mais abrangente dos temas abordados, discorrendo sobre o atual cenário de desenvolvimento tecnológico no que diz respeito aos processos de fabricação digital e acerca de pesquisas precedentes que tratam da otimização de estruturas industrializadas e de madeira engenheirada. Discute também sobre as relações entre custo e arquitetura e apresenta o estágio atual de desenvolvimento e difusão dessas estruturas em escala global e nacional. Esta contextualização inicial mostra-se de fundamental importância para a clara delimitação da problemática, do recorte temático e tipológico estabelecido pela pesquisa.

2.1. PANORAMA DAS TECNOLOGIAS DIGITAIS

Durante a maior parte da nossa história como sociedade, a única forma de confeccionar artefatos residia na manufatura manual. Nesses tempos, hoje vistos como remotos, quando os objetos eram feitos manualmente, a busca por economia no gasto dessa energia ocorria naturalmente. O *designer* era frequentemente o próprio fabricante do objeto e, conseqüentemente, o ato de confeccionar estava alinhado às leis da economia (KIERAN; TIMBERLAKE, 2004).

No campo da construção, essa figura consistia no que Kieran e Timberlake (2004) e Kolarevic (2003) denominam como *master builder*, ou seja, uma pessoa que combinava os papéis de arquiteto, engenheiro, construtor e cientista. Ao longo da Idade Média e meados do Renascimento, a maior parte das edificações eram desenhadas e erguidas por *master builders*. Um dos nomes marcantes que atuou nesse papel foi Filippo Brunelleschi, que viveu entre a segunda metade do século XIV e a primeira do século XV em Florença, onde foi o responsável pela construção da cúpula da catedral de Santa Maria del Fiore. Era um arquiteto, engenheiro, construtor e cientista, sendo que, para a construção dessa cúpula, suas inovações transcenderam por todas essas quatro disciplinas, transformando-a em um triunfo arquitetônico (KIERAN; TIMBERLAKE, 2004).

Este envolvimento dos arquitetos no ambiente da construção propriamente dita perdurou por séculos. A partir do Renascimento, no entanto, o arquiteto passa a ser visto como uma profissão de superior do ponto de vista intelectual, distanciando-se do desenvolvimento da obra (KOLAREVIC, 2003). Assim, inicia-se um processo de especialização dessas profissões e disciplinas, que trouxe também a desconexão entre diferentes atuações. O papel do *master builder* com o tempo se contraiu e se dividiu, de tal forma que nenhum arquiteto na atualidade se vê como tal. A maior parte da produção arquitetônica contemporânea exclui os arquitetos da participação dos mecanismos e métodos do fazer, transformando-os assim em meros estilistas, cujo universo se restringe à estética apenas (KIERAN; TIMBERLAKE, 2004).

Uma das conseqüências da dissociação deste profissional da prática construtiva é a necessidade de se introduzir numerosos desenhos – plantas, cortes, elevações e perspectivas – de modo a realizar a comunicação entre arquitetura e construção (KOLAREVIC, 2003). Anteriormente, esses eram desnecessários e muitas vezes inexistentes, tendo em vista que o local de atuação do *master builder* era no canteiro de obras.

Assim, tradicionalmente, essa representação dos projetos de edificações passou a ser dominada por desenhos bidimensionais, que transmitem a intenção do projeto. Sua execução, até poucos anos atrás, era manual. A integração de computadores aos processos de projeto ocorre apenas a partir do ano de 1982 (ONUR; NOUBAN, 2019). E é somente na década de 1990, no entanto, que a migração do desenho executado em papel, ou seja, da prancheta para o ambiente digital, no desenvolvimento de projetos de edificações, tornou-se uma realidade (OXMANN, 2006), o que traz grandes facilidades ao cotidiano do profissional da arquitetura.

As tecnologias que possibilitam o desenho assistido por computador (CAD) são a primeira forma de projeto digital. Consistem em uma estrutura que se desenvolve de forma sucessiva em relação a desenhos realizados em pranchetas e resultam em um processo de projeto tradicional, equivalente ao processo de projeto em papel (OXMANN, 2006). Nesse sentido, o desenho digital resultante do processo em CAD possui apenas significado geométrico no ambiente computacional, ainda que possa ser compreendido pelos projetistas e demais agentes do setor da construção civil (GIACAGLIA, 2005).

Essa compreensão, entretanto, pode ser questionada. O desenho assistido por computador pode ter facilitado e agilizado, e, de certa maneira, até resolvido, a execução da atividade que passou a ser compreendida como uma das funções principais do arquiteto, ou seja, a geração de desenhos. Contudo, a própria necessidade de elaborar desenhos, em sua essência, traz um problema muito mais profundo. Isso porque uma outra consequência da demasiada especialização profissional e dissolução do *master builder* é a quebra na comunicação e na conexão, antigamente existente, entre os diferentes agentes que atuam no campo da construção civil.

Como Kieran e Timberlake refletem: “pergunte a um arquiteto ou engenheiro se eles já tiveram alguma vez uma conversa sobre as coisas, as substâncias, dos nossos prédios com um cientista de materiais. A resposta certamente será não” (KIERAN; TIMBERLAKE, 2004, p. 33, tradução própria). [*ask architects and engineers if they have ever had a conversation about the stuff, the substance, of our buildings with a materials scientist. The answer will almost certainly be no*]

Essa quebra na comunicação que se originou há séculos, como será observado mais adiante, permanece ainda inalterada. Ou ainda, talvez tenha apenas se fortalecido com o passar das décadas. Da mesma forma, em relação a processos também não se vivenciou praticamente nenhuma mudança drástica até recentemente. Como visto, a própria adoção do desenho assistido por computador pouco alterou a maneira como os desenhos arquitetônicos eram

elaborados. A forma de representação ainda era a mesma, sendo que apenas saiu da prancheta física e foi transferida para a prancheta digital.

No entanto, nos últimos anos, ou seja, entre final do século XX e as primeiras décadas do século XXI, observa-se uma explosão exponencial na criação de novos materiais, diferente de qualquer outra ao longo da história (KIERAN; TIMBERLAKE, 2004). Esse é o caso da utilização dos concretos de alto desempenho que permitiram a construção de componentes estruturais mais delgados e resistentes, além de proporcionarem maior durabilidade. Além disso, observa-se frequentemente a criação de novos materiais compósitos, que consistem na combinação de dois materiais distintos e com propriedades diferentes, resultando em novos materiais com desempenho superior aos dos originais (KOLAREVIC, 2003). Até mesmo os painéis de MLCC, um dos principais objetos desta pesquisa, nascem nesse contexto, durante a década de 1990, trazendo consigo grande inovação também no processo de construção das edificações.

A FABRICAÇÃO DIGITAL

Pode-se dizer que simultaneamente aos novos materiais vieram também novos processos, além de novas formas de pensar a realidade atual da construção civil e novas possibilidades para sua evolução, tendo em vista a implementação de conceitos emergentes e revolucionários para o setor. Dentre essas inovações conceituais, encontra-se a introdução de tecnologias com CNC (Comando Numérico Computadorizado), que permitem a conversão de projetos e modelos tridimensionais, concebidos e desenvolvidos digitalmente, em objetos reais. Este novo marco na história é, inclusive, denominado por Kolarevic (2003) como a Revolução Digital.

A adoção de equipamentos com CNC para a manufatura de determinado objeto cotidiano ou elemento construtivo é o que define o conceito de fabricação digital. Seja qual for o equipamento empregado, o processo ocorre sempre da mesma maneira, iniciando com a elaboração de um modelo virtual em um computador (CAD – *Computer-Aided Design*, ou desenho assistido pelo computador) no qual são introduzidos os parâmetros para sua fabricação (CAM – *Computer-Aided Manufacturing*, ou manufatura assistida pelo computador). O programa gera então instruções numéricas, denominadas por *G-Code*, para que a máquina controlada pelo computador (CNC) execute os comandos necessários para a fabricação do objeto (FONSECA DE CAMPOS; LOPES, 2017).

As tecnologias de fabricação com CNC, conforme define Kolarevic (2003), podem ser de quatro tipos: fabricação bidimensional, fabricação subtrativa, fabricação aditiva e fabricação formativa. A primeira delas consiste na técnica de fabricação mais comum e pode ser exemplificada por cortadores a laser, a plasma ou mesmo corte com jato de água. Nesse processo, a cabeça do equipamento de corte ou a mesa de apoio do objeto se movimentam nos eixos X e Y, possibilitando a fabricação de elementos bidimensionais. Já a última delas, a fabricação formativa, consiste em processos nos quais o material base é deformado ou reconfigurado de modo a configurar o objeto desejado (KOLAREVIC, 2003).

A fabricação subtrativa, por sua vez, apresenta maior relevância para o setor da construção civil. Essa envolve a remoção de materiais sólidos com o auxílio de processos mecânicos, elétricos ou químicos, por meio de uma fresadora axial, superficial ou volumétrica. Na primeira delas, que pode ser exemplificada por um torno, a cabeça de corte do equipamento possui dois eixos de translação enquanto o material a ser fresado é fixado em um eixo de rotação. As fresadoras superficiais se assemelham conceitualmente aos processos de fabricação bidimensional, tendo em vista que nessa técnica a cabeça de corte se movimenta apenas nos eixos X e Y (Figura 6). Já as fresadoras volumétricas consistem em uma extensão das superficiais. Nesse último processo, além dos eixos X e Y, a fresa movimenta-se também no eixo Z, possibilitando a remoção volumétrica de material (KOLAREVIC, 2003).

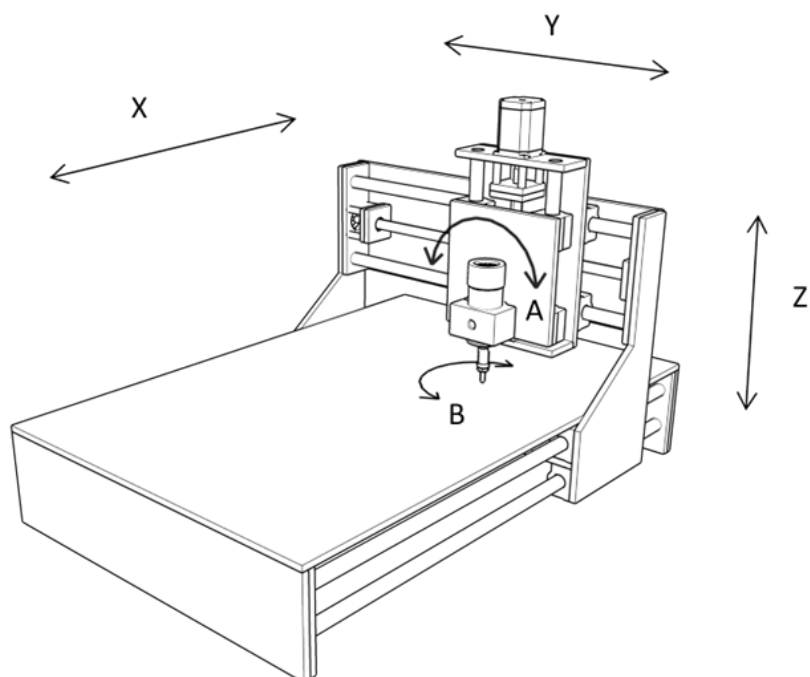


Figura 6: Esquema de funcionamento de um equipamento de usinagem com cinco eixos.

Fonte: adaptado de Kolarevic (2003).

Para a elaboração de formas mais complexas, é possível, ainda, utilizar fresadoras com quatro ou cinco eixos. Nas fresadoras com quatro eixos, é adicionado um eixo de rotação (A) na cabeça de corte ou na mesa de corte. Nas fresadoras de cinco eixos acrescenta-se, além do eixo A, o eixo de rotação B, que consiste na rotação em torno do eixo Z. Para os três tipos de fresadoras descritos anteriormente, é possível utilizar no equipamento ferramentas com tamanhos distintos, como por exemplo, fresas de diferentes diâmetros (KOLAREVIC, 2003).

Nas fresadoras com comando numérico computadorizado (CNC), ou fresadoras CNC, um sistema computacional atua no controle dos movimentos do equipamento. Para isso, a geometria da peça a ser fresada é exportada para um *software* de pós-processamento, o qual irá gerar as instruções que serão transmitidas à fresadora, de modo a controlar seus movimentos, sua velocidade, as ferramentas utilizadas, dentre outros parâmetros. Nesse processo, a definição da sequência ideal de movimentos do equipamento, executada frequentemente por operadores qualificados, é uma etapa de fundamental importância (KOLAREVIC, 2003).

A fabricação aditiva, em oposição à subtrativa, refere-se às técnicas de manufatura que constroem objetos tridimensionais por meio da adição de materiais na forma de camadas subsequentes. Esta forma de fabricação também ganhou maior reconhecimento no setor da construção civil nos últimos anos com o surgimento de uma nova técnica, denominada *contour crafting*, baseada na deposição de concreto ainda não endurecido em camadas sucessivas (KOLAREVIC, 2003).

Atualmente, no entanto, observa-se ainda mais uma forma de fabricação digital que abrange técnicas diversas, além das já mencionadas. Esta consiste no emprego de braços robóticos, os quais podem realizar atividades como manipulação e movimentação de materiais e objetos, montagens, remoção de material (fabricação subtrativa), dentre outras inúmeras possibilidades (QI *et al*, 2021).

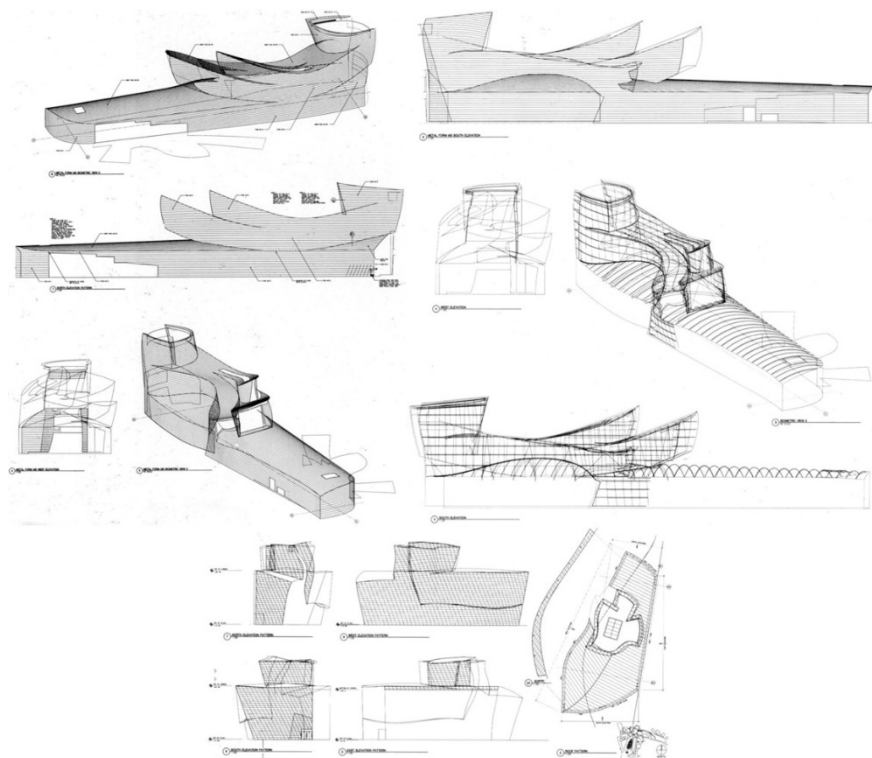
Todos esses equipamentos controlados digitalmente podem fabricar componentes únicos, de maneiras variadas e com custos acessíveis. Consequentemente, a variabilidade passa a não mais comprometer a economia e otimização da produção. Esta habilidade de produzir um único componente diferenciado com a mesma facilidade que componentes padronizados, introduz no campo da construção industrializada a noção de customização em massa (KOLAREVIC; DUARTE, 2019), definida como a produção em escala de produtos e serviços personalizados (PINE, 1993, apud KOLAREVIC; DUARTE, 2019).

Um dos primeiros arquitetos a incorporar o uso de tecnologias digitais de fabricação em suas obras é Frank Gehry, que assina, dentre muitos outros, o projeto do Museu Guggenheim. Da mesma maneira que a Torre Eiffel e o Palácio de Cristal, ambos construídos na segunda metade do século XIX, representam o marco inicial da Era Industrial, pode-se afirmar que o Museu de Guggenheim (1997), em Bilbao, da autoria de Frank Gehry (Figura 7), é o melhor exemplo de arquitetura que captura a essência da atual Revolução Digital (KOLAREVIC, 2003).

As primeiras experiências do arquiteto no ramo da fabricação digital ocorreram nas décadas de 1980 e 1990, quando ainda existiam diversas barreiras para a transposição dos modelos digitais ao canteiro de obras (FONSECA DE CAMPOS; LOPES, 2017). O recurso encontrado pelo escritório de arquitetura para viabilizar os conceitos arquitetônicos de Gehry consistiu na adoção do *software* CATIA, o qual permitia, entre outras funcionalidades, a planificação precisa de superfícies curvas (EASTMAN *et al*, 2014).

Entende-se, assim, que a implementação das tecnologias de fabricação digital pressupõe também a adoção de novas ferramentas de projeto, que permitam a modelagem tridimensional do edifício, de onde serão facilmente retiradas as informações para sua fabricação.

Figura 7: Desenho gerado do modelo desenvolvido para o projeto do Museu Guggenheim de Bilbao, de Frank Gehry.



Fonte:
<https://www.archdaily.com.br/786175/classicos-da-arquitetura-museu-guggenheim-de-bilbao-gehry-partners>

Consequentemente, conforme aponta Kolarevic (2003), por meio das tecnologias digitais e dos *softwares* de modelagem tridimensional, altera-se a maneira como o edifício é projetado. A maneira de projetar e construir também sofre grandes alterações, tendo em vista que as informações utilizadas na construção devem ser retiradas do modelo tridimensional do edifício, que converge sua representação e seu processo de produção.

Essa conexão direta entre projeto e construção/produção foi definida por Kolarevic (2003), no início dos anos 2000, como *digital continuum*. Na sua visão, há duas décadas atrás, o autor mencionava que, no futuro, atuar como um arquiteto seria equivalente a atuar como um construtor, não literalmente, mas por meio da habilidade de gerar informações construtivas diretamente do modelo tridimensional do projeto, o que potencialmente poderia levar à reaproximação entre arquitetura e construção. Nesse contexto, a produção maciça de desenhos bidimensionais tenderia a declinar com a introdução dos modelos gerados digitalmente, redefinindo a relação entre concepção e produção e propiciando um *continuum* entre projeto e construção. Neste cenário, o modelo digital passaria a se tornar a única fonte de informação, tanto para o projeto quanto para a construção (KOLAREVIC, 2003).

A MODELAGEM DIGITAL

De fato, o advento da Modelagem da Informação da Construção (*Building Information Modeling* – BIM) vem, nos últimos anos, alterando o tradicional processo de desenvolvimento e representação dos projetos de edificações. Isso pois demanda uma mudança na maneira de pensar do projetista, ao substituir os desenhos por uma nova forma de representação baseada em modelos digitais 3D compostos por informação da construção.

A primeira aparição do termo BIM, conforme constataram Gaspar e Ruschel, data de 1992, em artigo publicado por Nederveen e Tolman (1992). Esse, no entanto, ganha força a partir de 2004 e se consolida nos anos de 2008 e 2009. Em 2008, é, inclusive, publicada a primeira edição do livro Manual BIM, que, organizado pelo autor Chuck Eastman, tornou-se referência para o tema desde então (GASPAR; RUSCHEL, 2017).

No Brasil, o amadurecimento do conceito BIM pode ser verificado pelo trabalho constante de normatização e padronização dos dados produzidos e compartilhados nesse processo projetual, que originou a norma nacional relativa à classificação da informação da construção com foco em BIM. Seu objetivo é o de estabelecer a estrutura de classificação e terminologia a ser adotada

nacionalmente para a modelagem de informação da construção e seu desenvolvimento inicia-se no começo dos anos 2010, com base na publicação ABNT NBR ISO 12006-6:2010 – Construção de Edificação – Organização de informação da construção (GIOZET OLIVEIRA, 2020). A norma final, ABNT NBR 15965 – Sistema de Classificação da Informação da Construção, divide-se em 7 partes e sua primeira publicação data do ano de 2011, quando é publicada a Parte 1. Na sequência, são publicadas a Parte 2 (2012), Parte 3 (2014), Parte 7 (2015) e a Parte 4 (2021), sendo que as Partes 5 e 6 são publicadas apenas no ano de 2022 (ABNT NBR 15965, 2022).

Segundo Eastman *et al* (2014), o termo BIM pode ser definido “como uma tecnologia de modelagem e um conjunto associado de processos para produzir, comunicar e analisar modelos de construção” (EASTMAN *et al*, 2014, p. 13). Para os autores, os modelos de construção, por sua vez, são caracterizados por:

- (i) Componentes de construção que são representados com representações digitais inteligentes (objetos) que “sabem” o que eles são, e que podem ser associados com atributos (gráficos e de dados) computáveis e regras paramétricas;
- (ii) Componentes que incluem dados que descrevem como eles se comportam, conforme são necessários para análises e processos de trabalho, por exemplo, quantificação, especificação e análise energética;
- (iii) Dados consistentes e não redundantes de forma que as modificações nos dados dos componentes sejam representadas em todas as visualizações dos componentes;
- (iv) Dados coordenados de forma que todas as visualizações de um modelo sejam representadas de maneira coordenada. (EASTMAN *et al*, 2014, p. 13)

Assim, uma das bases para a compreensão do BIM é o conceito de objetos paramétricos, ou seja, objetos inteligentes que compreendem o que são e como se comportam. A grande distinção do processo BIM de outras formas de projeto é a semântica inerente ao modelo. Na essência, o *Building Information Model* é um modelo orientado a objetos. Dentre as características dos objetos paramétricos, Eastman *et al* (2014) mencionam a integração de dados e regras a eles associados, as quais modificam automaticamente suas geometrias quando inseridas em um modelo de construção ou quando são feitas modificações no objeto em si. Essas regras podem também identificar se determinada alteração praticada pelo usuário irá violar a viabilidade do objeto quanto ao seu tamanho ou construtibilidade, por exemplo (EASTMAN, 2014).

A adoção da modelagem BIM permite, em muitos aspectos, viabilizar as tecnologias de fabricação digital apresentadas anteriormente, por possibilitar a transmissão das informações digitais e tridimensionais do projeto para a máquina. No entanto, passadas duas décadas das previsões de Kolarevic (2003) referentes à transformação do papel do arquiteto e da reaproximação entre arquitetura e construção, é possível mencionar que este fluxo de transmissão das informações

do projeto para a fabricação ainda pode demandar bastante tempo e exigir um trabalho intenso. Por esse motivo o maior objetivo das pesquisas recentes acerca da temática da fabricação digital, conforme levantado pela revisão bibliográfica conduzida por Qi *et al* (2021) é realizar a transmissão automática das informações de projeto para os equipamentos de fabricação. Entende-se, portanto, que ferramentas de projeto tridimensional associadas a formas de fabricação digital criam condições favoráveis para este retorno do *master builder* e consequente integração das disciplinas por meio de ambientes digitais. Estas, contudo, não pressupõem a resolução dos problemas de comunicação entre os agentes da construção.

A COMUNICAÇÃO NA ERA DIGITAL

Mesmo com todas as tecnologias emergentes no setor da construção industrializada verifica-se de forma recorrente relatos recentes que retratam falhas na troca de informações entre os fabricantes e os responsáveis pela concepção dos projetos. 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, como mencionam Gbadamosi *et al* (2020), os fornecedores, usualmente, contribuem muito pouco nos estágios preliminares de projeto.

Com as tecnologias digitais de fabricação, essa falha na comunicação e troca de informação entre as partes resulta em maiores custos de implementação dos sistemas, recorrentes alterações de projeto em etapas avançadas de seu desenvolvimento, além de requerer maior esforço e tempo por parte de produtores. Identifica-se também uma relação de sobreposição entre *designers* e fabricantes, marcada pela dependência bidirecional de informação entre eles (EASTMAN, *et al*, 2014). Nesse sentido, Hamid *et al* (2018) apontam que o desenvolvimento de objetos BIM pode atuar como suporte ao fluxo de trabalho entre fabricantes e profissionais responsáveis pela concepção de projetos.

Como já mencionado, as tecnologias digitais de projeto podem ser sim uma forma de solucionar a problemática da comunicação no setor da construção civil. Contudo, entende-se que a ferramenta de projeto por si só, mesmo que inserida em um processo BIM, não irá solucionar todos os problemas e, de forma quase mágica, resgatar a conexão entre o arquiteto e a construção.

Tecnologias de fabricação digital demandam mudanças na mentalidade ou, ao menos, um olhar para as diferentes mentalidades presentes em outros setores da sociedade, a exemplo das indústrias automotiva ou aeronáutica. Conforme aponta Kieran e Timberlake (2004) e como serão apresentados nos próximos capítulos, essas indústrias já desenvolveram e estabeleceram métodos e processos que integram *design* e produção por meio de ferramentas interativas, que atualmente não são mais físicas, e sim virtuais, de informação e comunicação. Processos de manufatura digital exigem a integração daquele que concebe com aquele (ou aquilo) que executa. Os pressupostos de fabricação devem estar presentes no projeto para permitir sua execução. Não é possível elaborar um projeto sem o entendimento do que a máquina consegue fabricar, do que é passível de execução.

No campo da construção civil, a adoção de métodos convencionais permite, com maior facilidade, que se estabeleça a desconexão entre as partes, pois a maioria das inconsistências de projeto pode ser solucionada no canteiro de obras. Além disso, não se observa mais a busca pela economia nos gastos de energia ou de recursos. Afinal, como consequência dessa desconexão, aquele que concebe não tem conhecimento da forma como será executado e dos esforços necessários para tal.

Com tecnologias digitais de fabricação e construção, por outro lado, o mesmo não acontece. Ou a máquina consegue executar o que está projetado ou aquilo que foi concebido não é passível de fabricação. Pensando em um processo ideal de fabricação, lógico e direto, não devem existir etapas intermediárias de correção do projeto para possibilitar sua execução. Assim, para garantir sua devida implementação, apreende-se ser imprescindível retomar o conceito do *master builder*, não no sentido original de sua atuação demasiadamente ampla. Hoje, a realidade em que se vive é outra. A forma de produção arquitetônica é, e deve ser, outra. Naturalmente, a atual especialização das disciplinas é fundamental para se atingir a excelência exigida pelas demandas contemporâneas da sociedade. O *master builder* medieval e renascentista, que atuava do conceito à conclusão da construção, não se aplica mais à realidade presente, que pressupõe níveis extremamente profundos de conhecimento em cada área. A interdisciplinaridade é imperativa e, nesse sentido, a sociedade já possui inovações tecnológicas que prometem auxiliar o arquiteto a compreender as problemáticas, as necessidades e as restrições de cada atividade inerente ao processo de construção digital da edificação, de modo a estabelecer a reconexão indispensável entre concepção e execução.

2.2. PANORAMA DAS PESQUISAS PRECEDENTES

As tecnologias digitais mencionadas até o momento, como visto, nascem em um contexto temporal datado da virada do século XX para o século XXI. A Revolução Digital cunhada por Kolarevic em 2003, insere-se assim em um momento histórico que também é conhecido como a Terceira Revolução Industrial, conforme aponta Oliveira (2020). Esta foi marcada pela evolução da computação, com grande avanço da eletrônica, nanotecnologia, informática e robótica (OLIVEIRA, 2020). Passadas duas décadas, contudo, pode-se afirmar que a humanidade se encontra em uma era ainda posterior. A revolução da computação já está, de certa maneira, consolidada e passa a ser contada como parte da história da humanidade.

Embora nem todos tenham percebido, estamos em plena quarta revolução industrial. A indústria tem se apropriado do arsenal disponível e do Estado da Arte em termos de inovação e da tecnologia (...). Compõem este arsenal tecnológico a Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem, automação, robótica, big data, captura e troca de dados, drones, inteligência artificial, *machine learning*, realidade virtual e aumentada, manufatura aditiva, conceitos de sistemas ciber-físicos, dentre outras tantas tecnologias e inovações que estão gerando máquinas, robôs e equipamentos cada vez mais inteligentes. (OLIVEIRA, 2020, p. 5)

A Quarta Revolução Industrial, que também pode ser conhecida por Indústria 4.0, é marcada pela inteligência, atingindo níveis complexos de automação e Inteligência Artificial (IA). Estes desenvolvimentos recentes na indústria da manufatura giram em torno do conceito de sistemas que integram o digital ao físico, assim como da tendência pela digitalização e automatização do ambiente de fabricação, culminando em uma maior disseminação de fábricas inteligentes (OLIVEIRA, 2020; Qi *et al*, 2021).

Essas profundas mudanças tecnológicas vivenciadas atualmente possuem aplicações práticas no cotidiano do ser humano. Muitos dos aplicativos empregados nos aparelhos celulares, sites e ferramentas de mídias utilizados pela sociedade contemporânea são alimentados pela tecnologia da inteligência artificial (LEE, 2019). Inclusive, nos últimos meses que antecederam a conclusão da presente pesquisa (primeiro semestre de 2023), verificou-se um avanço rápido e intenso de evolução e disseminação dos aplicativos de inteligência artificial. Devido, justamente, ao desenvolvimento extremamente acelerado dessas tecnologias, dentre as quais o aplicativo mais conhecido até o momento é o ChatGPT, o presente trabalho não pretende adentrar no cenário atual de evolução em que a sociedade se encontra neste quesito específico.

Vale, no entanto, compreender os conceitos que embasam tais evoluções tecnológicas. Conforme apresenta Lee (2019), as tecnologias de inteligência artificial começam a ser estudadas e desenvolvidas na década de 1950, com o objetivo de recriar a inteligência humana em uma máquina. Posteriormente, dividem-se em duas vertentes: a abordagem baseada em regras e a abordagem baseada em redes neurais. A primeira fundamenta-se na ideia de fornecer ao computador determinadas regras a serem seguidas para balizar sua tomada de decisão, ou seja, eles são ensinados a pensar por meio da codificação de uma série de regras lógicas. Essa abordagem, no entanto, restringe-se a situações mais simples, como jogos bem definidos, e não é tão funcional em cenários com um universo amplo de escolhas.

Por outro lado, a segunda vertente, embasada no conceito de aprendizado profundo, parte do pressuposto que quanto menor interferência humana, melhor. Desse modo, ao invés de ensinar regras ao computador, busca-se uma equiparação ao próprio cérebro humano, para que a máquina, quando munida de uma quantidade significativa de exemplos de um mesmo fenômeno, possa determinar sozinha os padrões dentro dos dados.

O aprendizado profundo, considerado como uma “abordagem inovadora para a inteligência artificial que turbinou a capacidade cognitiva das máquinas” (LEE, 2019, p. 17), torna-se o responsável pelo renascimento da IA como é difundida atualmente. Este conceito, contudo, só se tornou possível no início dos anos 2000, algumas décadas após as primeiras pesquisas em IA, com a evolução de dois itens imprescindíveis para sua viabilidade: poder de computação e dados. Enquanto os dados – ou os exemplos de um mesmo fenômeno – são compreendidos como formas de treinar a máquina para o reconhecimento de padrões, o poder computacional permite a análise desses exemplos em alta velocidade (LEE, 2019).

Então, como o aprendizado profundo faz isso? Fundamentalmente, esses algoritmos usam grandes quantidades de dados de um domínio específico para tomar uma decisão que otimiza um resultado desejado. (...) Isso exige quantidades massivas de dados relevantes, um algoritmo forte, um domínio restrito e uma meta concreta. Se não houver algum destes, as coisas desmoronam. Poucos dados? O algoritmo não tem exemplos suficientes para descobrir correlações significativas. Um objeto muito amplo? O algoritmo não tem referências claras para conseguir uma otimização. O aprendizado profundo é o que se conhece como “IA estreita” – inteligência que coleta dados de um domínio específico e o aplica à otimização de um resultado específico. (LEE, 2019, p. 23)

No campo da arquitetura e construção, Blanco *et al* (2018) identificam, como alguns dos possíveis exemplos de sua aplicação no setor, a otimização de cronogramas e do planejamento da

construção ou mesmo o desenvolvimento de sistemas que interajam com engenheiros e arquitetos para a recomendação de determinadas soluções estruturais ou arquitetônicas.

Nessa última linha de aplicação, observa-se exemplos reais de associação de ferramentas digitais, como projeto paramétrico e simulações numéricas computacionais, também 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 um grande número de variantes de projeto baseadas em regras e parâmetros pré-determinados, possibilitando a avaliação do desempenho de seu projeto em diferentes aspectos, como emprego de material ou consumo energético. A otimização pode ser adotada para resolver um objetivo único ou múltiplos objetivos. Nesse segundo caso, nem sempre é possível alcançar um resultado bem definido, mas sim um conjunto de soluções, também conhecido como do tipo Pareto. Uma abordagem alternativa para situações como esta é adotar pesos para os objetivos, definindo maior ou menor importância para cada um deles, de modo a tornar a solução final mais definida, dispensando a dependência de uma mente humana para escolher uma dentre as soluções possíveis (WORTMANN; NANNICINI, 2017). No entanto, ressalta-se que a análise humana, até o momento, nunca deve ser dispensada em qualquer resultado computacional.

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).

Wortmann e Nannicini (2017) apontam que a existência de problemas complexos no campo da engenharia e arquitetura, no entanto, tem acarretado maior interesse nos métodos de otimização baseados em modelos globais. Os algoritmos baseados em modelos globais utilizam técnicas de *machine learning* e refinam o modelo a partir de informações obtidas com a

realização de simulações. Os autores reconhecem apenas três ferramentas de projeto disponíveis publicamente, as quais integram simulações de desempenho e otimização que dispensem habilidades de programação. São eles Grasshopper, Dynamo Studios e Design Builder. Enquanto Grasshopper é uma ferramenta de modelagem paramétrica que possui uma comunidade ativa e significativa de usuários, Dynamo Studio é uma ferramenta semelhante, mas com uma comunidade menor de usuários. Já o Design Builder oferece a criação de geometria, simulação e otimização, para consumo energético, iluminação natural, emissão de carbono e conforto térmico (WORTMANN; NANNICINI, 2017).

Qi *et al* (2021), que realizam uma revisão bibliográfica com o objetivo de apresentar o cenário atual de pesquisa para a aplicação de tecnologias emergentes na construção industrializada, verificam que a prática do *Design Optimization* é frequentemente adotada nos estágios iniciais do desenvolvimento de projeto, visando melhorar a adequação deste às técnicas de pré-fabricação. Utiliza-se para isso processos BIM, tendo em vista que a parametrização a eles inerente permite extrair informações da construção e utilizá-las para aplicações de otimização de projeto, como checagem automática de regras e validação da exequibilidade dos componentes. Os autores apontam que muitos algoritmos de simulação e otimização também têm sido extensamente aplicados em diferentes aspectos da construção industrializada, sendo que aqueles comumente adotados incluem a otimização com base em restrições, programação linear e algoritmos genéticos (Qi *et al*, 2021).

PRECEDENTES NA ACADEMIA

A associação de processos algorítmicos para o desenvolvimento de projetos arquitetônicos em ambiente BIM, segundo Souza *et al* (2019) tem sido denominada pelo termo A-BIM. Como exemplo da aplicação do conceito, pode ser relatado um exercício desenvolvido em uma disciplina de projeto da Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, o qual é descrito e analisado por Souza *et al* (2019).

Os autores relatam que, nesta disciplina, os estudantes têm como objetivo conceber um abrigo a ser construído com a tecnologia *Wood Frame*. O projeto deve iniciar com a descrição dos perfis de madeira empregados na produção dos painéis de *Wood Frame*, os quais são parametrizados com dimensões reguladas pelos padrões de fabricação, inerentes à tecnologia construtiva determinada, utilizando-se para isso o *software* Grasshopper. Assim, desde o início do projeto, o conceito de espaço e volume do abrigo respeitou a modulação estabelecida pelo sistema

construtivo. Posteriormente, o esqueleto estrutural do abrigo, gerado no Grasshopper com o auxílio de algoritmos que regulam a geometria dos perfis de madeira, é transferido para um ambiente BIM, representado na disciplina em questão pelo *software* Archicad.

Ao final, algumas das dificuldades verificadas pelos autores consistiram na falta de intuitividade apresentada pela interface do Grasshopper, o qual emprega uma abordagem muito distinta dos *softwares* comumente utilizados pelos estudantes de arquitetura. Dentre eles, Souza *et al* (2019) mencionam o SketchUp, o AutoCAD, o Archicad e o Revit. Além disso, outra dificuldade encontrada foi na transmissão dos dados do Grasshopper para o Archicad. Como conclusão, pôde-se verificar que a integração de uma plataforma BIM e um *software* paramétrico, baseado em processos algorítmicos, constitui em um ambiente favorável para desenvolvimento da criatividade, assim como facilita a representação gráfica de formas complexas concebidas no ambiente digital paramétrico (SOUZA *et al*, 2019).

A associação de algoritmos no processo de concepção do projeto arquitetônico é observada em um número relevante de pesquisas, como verificado pela revisão bibliográfica apresentada por Qi *et al* (2021), além dos demais trabalhos que são aqui mencionados e relatados. No que diz respeito aos estudos que abordam especificamente tecnologias de madeira engenheirada, observa-se que um objetivo comum entre os pesquisadores é solucionar uma problemática relevante no setor da construção industrializada, identificada anteriormente. Trata-se da falha de comunicação existente entre projeto e construção, ou fabricação. Assim, verifica-se 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.

Bianconi *et al* (2019) partem desse pressuposto ao entenderem 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. Ou seja, trata, a motivação da pesquisa, da mesma problemática mencionada previamente. Assim, usualmente, o processo de otimização se inicia apenas após a concepção do projeto, quando as principais características do edifício já estão definidas.

Dessa forma, desenvolvem uma pesquisa que aprofunda a possibilidade de usar modelos generativos, princípios evolucionários e inteligência artificial para auxiliar projetistas a lidarem com projetos cada vez mais complexos e tomar decisões conscientes em etapas ainda iniciais de concepção arquitetônica, o que pode resultar em economias consideráveis. Vale explicar que, no

contexto de *design* computacional, um sistema generativo é um grupo de regras geométricas que permite transformar um conjunto de parâmetros em uma geometria (BIANCONI *et al*, 2019).

O trabalho é desenvolvido com programação visual por meio do *plugin* Grasshopper, dentro do *software* Rhinoceros. Utiliza como tecnologia construtiva painéis de MLCC e vigas de MLC, os quais são dimensionados tendo como base o processo de fabricação, transporte e montagem, visando minimizar desperdícios e otimizar o processo construtivo. Para isso, os autores definem uma série de regras e parâmetros, com o auxílio de empresa fabricante, para a apropriação dos princípios de fabricação e montagem, de modo que o modelo generativo possa criar o envelope e sistema estrutural da edificação, a partir de uma forma básica estabelecida. Ao final, é gerada uma lista de modelos disponíveis em uma página virtual, ou seja, um catálogo virtual, que pode ser ordenado com base em diferentes critérios, a exemplo de custo da construção, consumo de energia, iluminação, dentre outros. O usuário pode então escolher a opção desejada de volumetria. Ressalta-se que o custo da estrutura também é tido como parte do processo de otimização e é inserido na interface do usuário como um dos principais critérios de performance da solução arquitetônica (BIANCONI *et al*, 2019).

Almejando um objetivo semelhante no sentido da otimização, Stroble (2016) identifica que a maioria das edificações construídas com madeira apresentam grande redundância estrutural e entende que, com o crescimento da adoção desta tecnologia construtiva em escala global, mostra-se fundamental que ela se torne mais otimizada para reduzir custos e competir, de maneira mais 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). Para isso, desenvolve um algoritmo paramétrico, utilizando, também, como ferramenta o Grasshopper dentro do *software* Rhinoceros, empregado neste trabalho como ambiente de visualização e conferência gráfica do algoritmo. Este último, por sua vez, pretende gerar geometrias construtivas com base nos parâmetros de projeto e dimensões dos elementos estruturais, os quais, em sua pesquisa, consistem em lajes de MLCC, vigas e pilares de MLC. As geometrias geradas são então avaliadas, de modo a compreender as implicações das decisões de projeto no emprego de material de cada solução estrutural resultante, tendo em vista que a quantidade de material necessária impacta diretamente nos custos e na eficiência ambiental de cada opção. Vale apontar que o autor menciona ter enfrentado dificuldades ao utilizar as funcionalidades pré-existentes do Grasshopper, por necessitar de maior complexidade nos processos implementados por ele. Para superá-las, ele escreveu um código em linguagem C customizado de modo a simplificar os procedimentos padrões (STROBEL, 2016).

Com base nessas mesmas ferramentas (Rhinceros e Grasshopeper), Pini e Souza (2020) desenvolvem um *plugin* a elas conectado que permite a realização de análises estruturais para elementos de MLC (vigas e pilares), segundo o Eurocode 5, o qual consistia na referência normativa para cálculo estrutural de madeira lamelada colada até o momento do desenvolvimento da pesquisa em questão. O resultado da pesquisa, que iniciou como trabalho final de graduação, permitiu, inclusive, aplicação para situações reais de dimensionamento estrutural de elementos de MLC.

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 MLCC, atuando como vedação estrutural. Os autores partem do pressuposto desse ser um sistema construtivo eficiente, apesar do alto custo de material e, portanto, facilitar o processo de fabricação e montagem é um fator essencial na justificativa de seu emprego. A estrutura, na condição de um item que contribui significativamente para o custo global, torna-se um fator relevante para concentrar os esforços de projeto.

A pesquisa parte de duas problemáticas já conhecidas para a otimização da tecnologia em questão, que são o planejamento do corte dos painéis e a logística de transporte. 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. O algoritmo não trata de uma plataforma de modelagem, mas pode ser integrado a ferramentas de projeto pré-existentes (YAZDI *et al*, 2021).

É interessante mencionar que, conforme apontado pelos autores, esta otimização almejada baseia-se no conceito de DFMA (*Design for Manufacture and Assembly*), ao seguir as seguintes diretrizes relacionadas aos elementos construtivos: standardização dos elementos, minimização do número de peças, redução no desperdício de material e redução nas tipologias de materiais (YAZDI *et al*, 2021).

Este conceito é também empregado por Yuan *et al* (2017), que procuram estabelecer métodos e etapas para desenvolver um processo de modelagem da informação da construção (BIM) que garanta a boa manufatura e montagem da edificação, de modo a evitar problemas futuros nessas etapas específicas e garantir o sucesso do projeto. Assim, propõe-se introduzir um processo de projeto paramétrico orientado a DFMA (YUAN *et al*, 2017).

PRECEDENTES NA INDÚSTRIA

A sigla DFMA se refere ao termo *Design for Manufacture and Assembly*, em inglês, que pode ser traduzido como projeto para fabricação e montagem. DFM, ou *Design for Manufacture* (projeto para fabricação) é uma disciplina na qual os produtos são concebidos para serem produzidos da maneira mais fácil e com menor custo possível. Já DFA remete a *Design for Assembly*, ou seja, um projeto voltado para a montagem eficiente das partes individuais de modo a configurar o produto final. A habilidade em fabricar as partes individuais (DFM) é tão relevante quanto a capacidade de agrupá-las de forma eficiente (DFA). Por esse motivo, as duas disciplinas são frequentemente tratadas em conjunto (DFMA) (BOGUE, 2012).

Conforme discorre Bogue (2012), as primeiras abordagens formais aos termos DFM e DFA originam no final da década de 1960 e início de 1970, na indústria manufatureira. No caso específico de DFA, é interessante apontar que já os primeiros estudos sobre o tema basearam-se no conceito de que o fator mais importante para se reduzir os custos de montagem era minimizar o número de peças de um produto. O autor, apesar de analisar especificamente o conceito de DFMA no contexto da indústria manufatureira de bens duráveis, como automóveis ou eletroeletrônicos, apresenta algumas reflexões sobre o tema que podem ser extrapoladas também para as tecnologias de construção industrializada, que se baseiam na mesma ideia de manufatura e montagem de peças. Aponta, por exemplo, que poucos engenheiros de projeto possuem conhecimentos detalhados de todas as diferentes formas de manufatura e montagem de tecnologias e materiais, sendo que tendem a desenvolver projetos baseados naqueles que possuem maior familiaridade. Consequentemente, os projetos são raramente otimizados e frequentemente aparecem problemas por alterações neles realizadas, para torná-los mais adequados aos processos fabris. As ferramentas e os princípios de DFMA possibilitam, assim, uma abordagem para alcançar projetos mais simplificados para produtos que possam efetivamente ser produzidos. O principal resultado da adoção dessas tecnologias está na redução significativa de custos.

Há três maneiras de aplicar o conceito de DFMA. A primeira, utilizada originalmente, é criar um conjunto de regras ou diretrizes gerais para serem seguidas durante o desenvolvimento dos projetos. No entanto, isso exige um ser humano para interpretá-las e aplicá-las corretamente para cada caso individual. O segundo método, inventado por Boothroyd e Dewhurst, emprega uma avaliação quantitativa do projeto. Com isso, cada parte do projeto é avaliada com uma nota, dependendo da sua facilidade de montagem. As notas são então somadas para o projeto como um todo e o valor resultante é utilizado como guia para a qualidade integral do projeto. O produto

é, assim, revisado com base nesses valores, de modo a focar nas áreas com maior impacto para maximizar o processo de revisão de projeto. O terceiro método, e o mais utilizado atualmente, é a automatização do processo completo, ao empregar um *software* que pode analisar o projeto quantitativamente. O próprio sistema computadorizado, ao empregar as regras e diretrizes estabelecidas previamente, pode analisar e otimizar o projeto repetidamente, avaliando automaticamente a qualidade do resultado após cada revisão (BOGUE, 2012).

Essa última abordagem é empregada por Yuan *et al* (2017) para desenvolver o processo de projeto paramétrico orientado a DFMA, conforme mencionado anteriormente. Apesar deste trabalho ter como enfoque elementos de concreto pré-moldado, o resultado encontrado pelos autores pode ser extrapolado também para tecnologias construtivas de madeira, foco da presente pesquisa. O processo de otimização proposto parte de duas etapas (Figura 8). A primeira estabelece uma biblioteca padrão de elementos pré-fabricados por meio de uma família na ferramenta BIM, que considera os requisitos das etapas de fabricação e montagem. A segunda envolve simulações de fabricação, transporte e montagem, por meio do desenvolvimento de um *plugin*, o qual, no caso específico da pesquisa em questão, é pensado para o *software* Revit. O modelo BIM passa, assim, por um processo de otimização global, conforme ilustrado pelo esquema a seguir (YUAN *et al*, 2017).

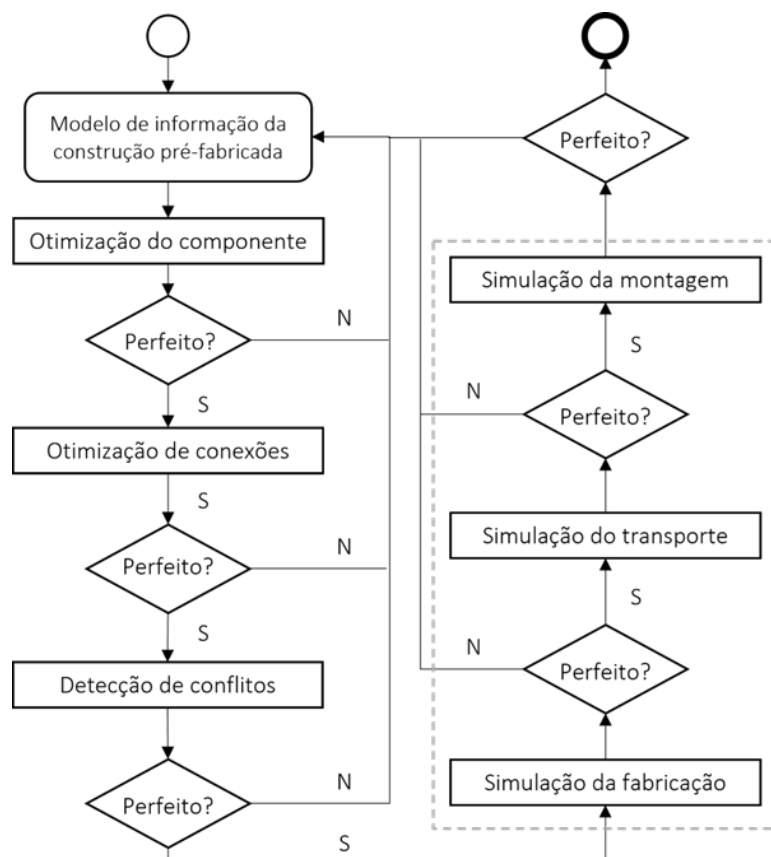


Figura 8:
Fluxograma
apresentado por
Yuan *et al* (2017)
para exemplificar o
plugin concebido.

Fonte: adaptado de
Yuan *et al* (2017).
Tradução da autora.

Seja a estrutura formada por peças de concreto pré-moldado ou de madeira engenheirada, elementos construtivos industrializados pressupõem um alto grau de complexidade das atividades em todos os diferentes estágios do processo construtivo. Conseqüentemente, a aplicação de abordagens convencionais de projeto para edificações industrializadas pode levar a desafios não usuais, como o fato de que o projeto de componentes industrializados deve considerar não apenas a arquitetura e desempenho da edificação, mas também as exigências das etapas de fabricação, transporte e montagem. Nesse sentido, a integração dos conceitos de DFMA no processo de projeto de uma construção industrializada pode auxiliar a mitigar alguns desses desafios (Qi *et al* 2021), ao possibilitar o desenvolvimento de projetos adequados para o método construtivo escolhido, de modo a garantir o emprego otimizado de recursos. Os objetivos possíveis para a otimização de DFMA que podem ser considerados durante o projeto são inúmeros, sendo que os principais incluem custos, cronograma e qualidade da construção em geral (GBADAMOSI, 2020).

A questão específica dos custos é apontada por grande parte das pesquisas estudadas como objetivo primário da otimização dos projetos ou implementação dos conceitos de DFMA, sendo mencionados os benefícios que essa abordagem pode proporcionar aos custos da edificação. Alguns estudos apontam, inclusive, que 80% dos custos da construção e operação dos edifícios são alocados com base nas decisões tomadas ainda nas etapas iniciais de projeto (YAZDI *et al*, 2021; YUAN *et al*, 2017). Esta mesma relação é apontada também no setor industrial, para a manufatura de produtos, no qual cerca de 70 a 80% do custo total do produto é definido nas etapas iniciais do desenvolvimento de projeto (BOGUE, 2012; CHIU, OKUDAN, 2010, apud RETOLAZA *et al*, 2021).

No setor manufatureiro, a abordagem do projeto voltada aos custos do produto é bastante recorrente, de tal forma que um dos campos com número significativo de pesquisas na área é o *Design to Cost* (DtC), que pode ser traduzido por Projeto para o Custo, conforme apresentam Retolaza *et al* (2021). Este consiste em um processo baseado na estimativa de custos para a tomada de decisão, o qual ganhou bastante popularidade no setor devido à importância dada aos custos de produção, tratando-se de produtos industrializados (RETOLAZA *et al*, 2021).

No caso da construção civil, partindo do mesmo pressuposto, é lógico constatar que projetos adequados permitem, portanto, redução também nos custos para construção da edificação. No entanto, é de conhecimento geral que, tradicionalmente, o setor é marcado pelo emprego de tecnologias não industrializadas, sistemas e métodos construtivos ainda tradicionais, apresentando uma produtividade significativamente inferior em relação ao setor manufatureiro.

Além disso, como observado no capítulo anterior, a desconexão existente entre aqueles que concebem os projetos com quem, ou com o que, executa, ou fabrica, a edificação é um dos maiores problemas enfrentados pelo setor, não só atualmente, mas já há alguns séculos. Como consequência direta desse cenário, o *designer* está, frequentemente, desalinhado às leis da economia, não só de tempo, mas também de recursos.

Uma das maneiras de se resgatar essa conexão entre as partes, retomar a figura do *master builder*, e possibilitar maior otimização aos processos e maiores economias ao produto, ou seja, à edificação, é o emprego dos conceitos de DFMA, por meio de tecnologias digitais ou mesmo algoritmos com inteligência artificial, também no setor da construção. Assim dizendo, a adoção do DFMA possibilita trazer ao conceito do projeto as necessidades, restrições e características da execução do produto, permitindo àquele que concebe adquirir os conhecimentos antes possíveis apenas ao *master builder*, que de fato permeava por todas as etapas.

Contudo, ao analisar este cenário de forma abrangente, deduz-se ser impossível realizar a associação dos conceitos de otimização de projeto (DFMA ou DtC), inerentes à manufatura de produtos, a técnicas de construir ainda artesanais. Ainda assim, é importante destacar que painéis de MLCC e elementos de MLC, a tecnologia construtiva objeto da presente pesquisa, resultam de processos intrinsecamente industriais, baseados na adoção de técnicas de fabricação digital. Dessa forma, entende-se que a maneira mais correta de abordar suas etapas de projeto e construção – sendo que o termo construção aqui deve ser substituído pela díade “fabricação e montagem” – na busca pela otimização de todo seu processo construtivo é, de fato, realizando uma analogia ao setor manufatureiro. Ou seja, ao empregar a madeira engenheirada como técnica construtiva, deve-se compreender que não se trata mais da construção de uma edificação, mas sim da fabricação e montagem de um produto.

2.3. PANORAMA DA PRECIFICAÇÃO DA ARQUITETURA

A problemática que envolve os custos do projeto é, frequentemente, enfrentada pelos projetistas como uma questão que deva ser abordada *a posteriori*. De fato, o custo global para construção de determinado empreendimento passa a ser discutido de maneira mais intensa quando finalizadas as etapas de projeto e iniciado o processo de orçamentação, que, conforme definição apresentada por Ambroewicz (2015), consiste no custo total de um empreendimento calculado previamente à sua execução.

Existem, contudo, diferentes tipos de orçamentos, a depender das informações disponíveis e da confiabilidade esperada. Os três principais níveis, conforme apresenta Mattos (2006), são a estimativa de custos, o orçamento preliminar e o orçamento detalhado ou analítico. O primeiro deles pode ser elaborado ainda em etapas iniciais de projeto e baseia-se em dados paramétricos como a área construída da edificação e o CUB (Custo Unitário Básico da Construção).

O cálculo do Custo Unitário Básico (CUB) da construção é estabelecido pela NBR 12721:2006 – Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edifícios – Procedimento. Tal métrica consiste no “custo por metro quadrado de construção do projeto-padrão considerado, calculado de acordo com a metodologia estabelecida no item 8.3 [desta norma], pelos Sindicatos da Indústria da Construção Civil (...)” (ABNT NBR 12721, 2006, p. 5). O CUB/m² não representa, no entanto, o custo global da obra, apenas o parcial, sendo que desconsidera, por exemplo, fundações, elevadores, projetos arquitetônicos, estrutural e demais, dentre outros itens que são mencionados no item 8.3.5 da norma em questão (AMBROEWICZ, 2015).

A métrica de precificação por área construída de edificação, por certo, é a mais empregada para determinação de parâmetros relacionados a custos, sendo adotada para balizar eventuais oscilações no setor da construção civil ao longo dos anos. Este é, inclusive, o objetivo básico do CUB/m², que, ao ser atualizado e divulgado mensalmente pelos sindicatos da indústria da construção civil, visa “disciplinar o mercado de incorporação imobiliária, servindo como parâmetro na determinação dos custos dos imóveis” (AMBROEWICZ, 2015, p. 50).

Além disso, a estimativa de custos com base em dados paramétricos apresenta grande importância na construção civil, possibilitando a compreensão da viabilidade econômica da obra,

sendo, normalmente, solicitada por proprietários em momentos preliminares de projeto para embasar decisões sobre a continuidade ou não do empreendimento (MAUÉS et al, 2022).

Sabe-se, no entanto, que a premissa de cálculo preliminar do custo da construção por metro quadrado construído possui baixa confiabilidade, em especial ao se tratar de projetos arquitetônicos que se diferenciam daqueles estabelecidos como padrão. Ao se considerar arquiteturas únicas, concebidas para contextos e usuários singulares, pode-se afirmar que este pensamento simplificado para orçamentação inicial se distancia muito da realidade, pois, como aponta Mascaró (2006), a cada traço elaborado com o intuito de representar uma decisão arquitetônica, é determinada uma variável do custo da edificação.

Parece uma constatação lógica, inclusive, que o custo de construção aumente de forma diretamente proporcional à maior complexidade do projeto arquitetônico. Mascaró, que busca analisar os aspectos econômicos das decisões arquitetônicas e sua influência no custo final do edifício, inicia seu estudo afirmando que “embora geralmente se conheça muito pouco a respeito das relações entre as decisões de projeto e o custo total do edifício, elas existem e são muito claras” (MASCARÓ, 2006, p. 9).

O autor menciona também que, por não se conhecer a fundo essas relações diretas entre custo e conceito arquitetônico, muitas vezes, buscando uma redução do valor da obra, opta-se pela diminuição da qualidade construtiva, por meio da escolha de materiais mais simples ou ajustando a maneira de execução do prédio, sem que se altere a forma ou dimensão dos ambientes. Nessa linha, frequentemente, são aplicados conceitos equivocados, como, por exemplo, a ideia de que ao diminuir o tamanho de uma habitação, seu custo sofrerá redução proporcional. Por exemplo, é muito comum pensar que uma redução de 10 % de superfície construída representa redução equivalente no custo total da construção. Isso não é verdade, já que as instalações praticamente não sofrem modificações nem tampouco as divisórias, as quais não diminuem seu custo proporcionalmente à redução da superfície (MASCARÓ, 2006).

Para essa relação entre área construída e custo da obra, o autor define a Lei do Tamanho, a qual consiste em uma das três leis apresentadas pelo autor em seu estudo e estabelece que “o aumento (ou redução) nas áreas construídas em X % levarão a aumentos (ou redução) de X/2 % nos custos (ou ainda menos)” (MASCARÓ, 2006, p. 45).

A segunda lei apontada pelo autor é a Lei da Forma. Esta, por sua vez, está intrinsecamente associada ao “que se conhece como ‘índice de compacidade’, que é definido como a relação

percentual que existe entre o perímetro de um círculo de igual área do projeto e o perímetro das paredes do projeto” (MASCARÓ, 2006, p. 51). O autor apresenta, inclusive, uma expressão matemática adotada para calcular e analisar o referido índice, o qual é inversamente proporcional aos custos de edificações com perímetros originados por linhas retas. Porém, este é diretamente proporcional aos custos de edificações que possuem linhas curvas em seu perímetro. Isso ocorre pela maior dificuldade de execução de formas curvas na construção civil, considerando os materiais e tecnologias disponíveis até o momento. Assim, “o custo diminui à medida que o índice de compacidade aumenta, chegando ao mínimo custo quando o índice atinge o valor de 88,6, que corresponde a um quadrado [...]” (MASCARÓ, 2006, p. 51). A partir da forma quadrada, conforme o perímetro se reduz e começa a adquirir formato mais curvo, a relação se inverte, pois quanto maior o índice de compacidade, maior também será o custo da edificação.

Essa relação direta do perímetro da edificação com seu custo se dá pelo fato de que os planos verticais, ou seja, paredes, localizados na envoltória do edifício normalmente são mais caros que os equivalentes internos. Além de demandarem maior valor para sua execução, os planos exteriores estão sujeitos às ações das intempéries, da agressividade do clima e do meio ambiente, e, por esse motivo, devem manter e conservar, ao longo do tempo, as qualidades que garantem a segurança e a habitabilidade do edifício.

Com o entendimento desse conceito, torna-se clara a importância do perímetro do projeto nos custos de seus planos verticais externos. Nesse sentido, todos os recortes que acarretam aumento de perímetro, ocasionam também acréscimo nos custos da edificação. Com isso, define-se a Lei da Forma, a qual estabelece que: “na medida em que as formas perdem a compacidade, seja porque se alongam ou porque se quebram com múltiplas arestas seus custos aumentarão, seguindo uma curva que se inicia suavemente, mas que cresce cada vez com mais intensidade” (MASCARÓ, 2006, p. 68).

Nessa mesma linha de pesquisa, Moraes *et al* (2016) desenvolvem um estudo bibliográfico que busca identificar na literatura quais são os indicadores de projetos arquitetônicos – definidos como variáveis e índices geométricos – que possuem relação com os custos dos empreendimentos. Os autores também realizam a classificação dos indicadores encontrados em três categorias: índices de plano horizontal, índices de plano vertical e índices de qualidade da solução adotada. Nesta última, estão agrupados aqueles índices relacionados à qualidade e que possuem relação indireta com o custo de construção do projeto. Já os índices de plano vertical associam-se aos elementos de fachadas, vedações e configurações de paredes. Dentre estes, aquele destacado pelos autores como o mais representativo é o Índice de Compacidade, descrito anteriormente.

Além deste, outro índice classificado na categoria de plano vertical levantado pelos autores é o índice de densidade de paredes, que consiste na variável definida como a divisão da área de projeção das paredes apoiadas sobre uma laje-tipo pela área desta laje, e é apresentada originalmente por Brandão (2006) e Oliveira (1995) (MORAES *et al*, 2016).

Brandão (2006), apresenta ainda outra maneira de calcular o índice de densidade de paredes, segundo método estabelecido pelo Manual de Projetos da Construtora Encol², o qual adota a área de superfície de paredes ao invés da área de projeção dessas. Nesse caso, a área de paredes considera o comprimento total de linhas de paredes multiplicado pelo pé-direito, sendo o resultado dessa equação dividido pela área de lajes apoiadas nessas paredes para se obter a densidade de paredes. O referido manual traz ainda o valor limite de 2,50 m² de parede por unidade de área construída como um parâmetro de qualidade para projetos de apartamentos em torno de 90,00 m² (BRANDÃO, 2006).

Esta segunda forma de cálculo do índice de densidade de paredes é considerada por Brandão (2006) como mais coerente do que o primeiro. O autor utiliza este atributo para analisar as plantas de 83 apartamentos com área em torno de 90,00 m², na busca pelo desenvolvimento de um método para avaliar a racionalização de arranjos espaciais de unidades habitacionais frente à otimização construtiva da solução arquitetônica. Além do índice em questão, outros dois índices são empregados neste estudo: o número de segmentos de paredes e número de junções duplas entre segmentos (BRANDÃO, 2006). O primeiro consiste no número de segmentos de paredes entre junções subsequentes. O segundo, por sua vez, é definido pelo encontro entre duas paredes perpendiculares (ou angulares, com angulação diferente de 180°), formando uma quina que possa representar maior dificuldade construtiva de acabamento.

A escolha dessas três variáveis relacionadas aos planos verticais da construção, para desenvolvimento deste estudo em questão, é justificada pelo autor pela sua maior participação no custo total do edifício, representando cerca de 45 % deste total (MASCARÓ, 1998, *apud* BRANDÃO, 2006). Os planos horizontais, por sua vez, são responsáveis por cerca de 25 % deste valor. Além disso, considera-se que existem poucas alternativas para otimização dos custos da edificação a partir do plano horizontal. Já o plano vertical permite maior possibilidade de otimização tendo em vista as inúmeras alternativas de composição do arranjo físico das plantas arquitetônicas (BRANDÃO, 2006).

² A construtora mencionada atualmente não possui mais atuação no mercado.

O CUSTO DA MADEIRA ENGENHEIRADA

Além do fator projeto propriamente dito, entende-se, também, que os custos de uma edificação, seja ela construída de alvenaria, *steel frame*, concreto aparente ou qualquer outro sistema construtivo, é composto por outras variáveis, as quais nem sempre resultam do desenho do edifício. A localização e acesso à obra, por exemplo, são fatores não relacionados diretamente ao projeto, mas que podem gerar relativa influência nos custos finais. Dessa forma, diante das inúmeras variáveis passíveis de interferência nos custos de uma construção, reitera-se aqui a inadequação verificada na lógica usual que considera a área construída da edificação como métrica padrão para o cálculo de estimativas dos custos de construção da edificação.

Tratando-se especificamente da construção de estruturas de madeira engenheirada, essa lógica irá se distanciar de maneira ainda mais significativa da realidade. Especificamente para tal tipologia construtiva, a relação entre projeto e custo torna-se bastante evidente para os profissionais que atuam diretamente com a tecnologia. Ainda assim, esses mesmos profissionais, em especial aqueles em contato direto com os clientes finais, deparam-se recorrentemente com a indagação: “qual o custo por metro quadrado”?

Uma das principais características dessas estruturas é sua fabricação integralmente industrializada, incluindo tecnologias CNC para corte e usinagem dos painéis, vigas ou pilares. Consequentemente, na condição de tecnologias pré-fabricadas, o emprego de elementos de MLCC ou MLC, pode proporcionar ganhos significativos no processo global de construção da edificação, a exemplo da grande precisão das peças e do rápido tempo de montagem. Porém, como qualquer sistema construtivo industrializado, para se usufruir da totalidade das suas características positivas é essencial que desde a concepção do projeto sejam consideradas as particularidades inerentes ao processo construtivo deste tipo de estrutura. Isto porque as decisões de projeto influenciam diretamente no processo de fabricação (incluindo perdas de material proveniente do corte e usinagem dos painéis), transporte das peças, leiaute do canteiro, montagem e, principalmente, no desempenho da edificação finalizada, afetando diretamente os custos e satisfação dos usuários. Dessa forma, torna-se claro também que uma das consequências mais perceptíveis de um projeto desalinhado a premissas básicas da tecnologia construtiva empregada é o aumento no custo final da estrutura.

No entanto, as informações acerca do custo de edificações de madeira engenheirada ainda são muito restritas, assim como a divulgação de pesquisas que relacionam os fatores de influência na

composição final dessa precificação, justificando, portanto, o questionamento recorrente quanto ao seu custo balizado por uma métrica usual de mercado, ou seja, por área edificada.

A existência de poucos estudos que discorrem sobre as implicações no custo de construção e fatores de viabilidade financeira para edificações com mais de 6 pavimentos construídas com tecnologias de madeira engenheirada foi, inclusive, a motivação para Sorathiya (2019) desenvolver uma revisão bibliográfica sobre este assunto. No estudo, desenvolvido no ano de 2019, são identificadas 12 pesquisas consideradas relevantes para este tema. Porém, dentre elas, aponta-se que apenas cinco apresentam informações quantitativas sobre os custos de edificações de madeira engenheirada. Estes trabalhos estudados, como menciona o autor, não revelam nenhum aumento ou redução significativa nos custos da construção com madeira engenheirada para edifícios de média altura em relação ao emprego do concreto. Na média, os custos variam entre mais ou menos 6 %, seja de economia ou acréscimo, na comparação do uso da madeira com o concreto. No entanto, esta análise é limitada tendo em vista que os trabalhos analisados consideram edificações hipotéticas e não projetos construídos. Além disso, tendo em vista que cada estudo utilizou diferentes componentes construtivos para sua análise, desde LVL até MLCC ou MLC, empregados de maneira distinta, não é possível realizar comparações entre eles (SORATHIYA, 2019).

Dentre as poucas pesquisas recentes disponíveis sobre o desempenho econômico de edifícios de madeira, a maioria deles revela que construções de MLCC são relativamente mais caras quando comparadas a construções executadas em concreto ou aço (AHMED; AROCHO, 2020). Ao discorrer sobre este tema específico, Cover (2020) menciona que estimar custos em sistemas construtivos baseados na madeira engenheirada requer uma abordagem holística, que busque comparar economias e rendimentos. Essa abordagem deve considerar os potenciais financeiros de uma construção com cronograma reduzido e equipes de montagem compostas por um menor número de profissionais, representando também um menor risco associado a acidentes de trabalho. Consequentemente, uma comparação direta entre o preço de uma estrutura construída em aço ou concreto com aquele de estrutura de madeira engenheirada não irá fornecer resultados precisos.

A pré-fabricação, associada às tecnologias de montagem e conexão dos elementos estruturais, permite um cronograma significativamente mais enxuto, possibilitando o retorno do investimento em um prazo mais curto, o que pode representar 25 % de economia em relação a edificações de aço ou concreto, no que diz respeito ao cronograma. Além disso, a madeira como matéria-prima, por apresentar menor peso específico, pode auxiliar também a reduzir

diretamente os gastos com execução das fundações, apresentando-se igualmente como uma possibilidade mais viável para expansões verticais em edificações existentes (COVER, 2020).

O reduzido peso das estruturas e a necessidade de poucos profissionais para sua montagem são benefícios igualmente apontados por Kremer e Ritchie (2018), que realizam uma análise comparativa entre os custos de uma estrutura de MLCC e uma estrutura de concreto armado para um edifício residencial de médio porte. Os autores consideram que as construções de madeira engenheirada apresentam um custo de material mais elevado. Porém, como todo novo desenvolvimento tecnológico, este custo elevado pode ser atribuído ao volume limitado de fornecimento, marcado por uma capacidade produtiva ainda limitada, em um contexto de crescente demanda global pela tecnologia (KREMER; RITCHIE, 2018). Todavia, como resultado da expansão em andamento da capacidade produtiva mundial, além da standardização e comoditização do produto, é esperado que se reduza os custos para seu fornecimento ao longo do tempo. Outra possibilidade identificada por Sorathiya (2019) para um custo mais elevado das tecnologias de madeira engenheirada é a falta de conhecimento e entendimento dessas edificações por parte dos profissionais e demais agentes do setor da construção civil. Logo, aumenta-se o grau de ineficiência no desenvolvimento dos projetos da edificação e no processo de construção. Consequentemente, esse contexto resulta em aumento no tempo e nos custos de implementação dos projetos.

Contudo, assim como Cover (2020), Kremer e Ritchie (2018) também mencionam que uma análise que meramente explore os custos de materiais do projeto, como por exemplo esta comparação entre MLCC e concreto armado, é equivocada, tendo em vista os distintos benefícios proporcionados pela madeira em termos de material e metodologia (KREMER; RITCHIE, 2018). Ainda assim, é válido compreender quais foram os resultados encontrados por aquelas pesquisas recentes que buscaram realizar esta análise comparativa entre a madeira industrializada e tecnologias tradicionais de construção.

A comparação entre construções em madeira e concreto é realizada por Ahmed e Arocho (2020), que utilizaram como estudo de caso um edifício residencial localizado no Canadá, construído em 2017. Os custos reais do edifício foram calculados simultaneamente à elaboração de um modelo de custo da mesma edificação projetada em concreto. Neste edifício, o pavimento térreo, as lajes do segundo pavimento e a caixa de circulação vertical (escada e elevador) foram construídas em concreto. Já a superestrutura do edifício era composta por painéis pré-fabricados de MLCC como piso, suportada por pilares de MLC. Para a opção em madeira, o custo real da construção resultou em 1,4 % superior ao limite de orçamento. O custo final real da construção em madeira foi 6,43 %

superior à opção modelada em concreto, sendo que a maior participação nesse custo foi da aquisição dos elementos estruturais de madeira e do processo de instalação das peças.

Os autores identificaram, por meio da análise bibliográfica de estudos anteriores, que a construção com madeira engenheirada é entre 2 % e 6 % mais cara do que construções tradicionais. Em seu próprio estudo, a diferença encontrada foi de 6,43 %, o que corrobora com os valores encontrados por outras pesquisas (AHMED; AROCHO, 2020).

Resultados semelhantes são encontrados também por Cazemier (2017), que realiza a análise comparativa entre os custos de duas edificações na Austrália, sendo uma edificada com concreto e aço e outra com estrutura modelada teoricamente com painéis MLCC, empregando o mesmo desenho estrutural. De acordo com seu estudo, os custos de construção de um modelo teórico estruturado com painéis de MLCC resultaram 2,64 % mais elevados do que o edifício real desenvolvido em concreto e aço. Contudo, em relação ao cronograma final da construção, observa-se também um tempo significativamente inferior de obra de 6 meses no total. Esse tempo foi calculado em 15 meses, para a construção com painéis de MLCC, e em 21 meses para a construção convencional em concreto. Conseqüentemente, isso resulta na possibilidade de iniciar as vendas dos apartamentos em um momento anterior, com um retorno mais rápido do investimento.

Em relação ao custo para fornecimento e montagem da estrutura de MLCC, este é calculado pelo autor por meio do volume total de painéis de MLCC necessários para a edificação, definido a partir do levantamento das lajes de piso e paredes estruturais empregadas no projeto. O volume total identificado foi então multiplicado por uma taxa para fornecimento e instalação dos painéis equivalente a US\$1.600,00 por m³ de MLCC, sendo o resultado dessa conta o custo da estrutura de MLCC instalada (CAZEMIER, 2017). Deve-se advertir que este, assim como demais valores reais aqui mencionados, são específicos à localização geográfica de cada pesquisa, disponibilidade de material, demanda de mercado e situação econômica.

Todos os trabalhos que almejam estudos sobre os custos de produtos de madeira engenheirada citados até então foram desenvolvidos nas regiões da América do Norte, Europa ou Oceania. Encontrou-se apenas um estudo nacional, desenvolvido na região sul do país, que visa compreender, em termos quantitativos, a viabilidade econômica de painéis de MLCC, além de determinar a rigidez do painel produzido durante a pesquisa. Para isso, os pesquisadores confeccionaram três painéis de pequenas dimensões em escala artesanal e estimaram os custos para sua produção no que diz respeito a material e mão de obra. Ao final, compararam os valores

obtidos aos custos pré-estipulados da construção com alvenaria, encontrando valores significativamente inferiores para os painéis de MLCC e concluindo possuir esse último grande viabilidade econômica na região do estudo (AMARAL *et al*, 2017).

Deve-se, contudo, realizar aqui uma ressalva, pois entende-se que esta comparação de custos com base em uma produção artesanal de painéis de pequeno porte, sem envolver etapas de usinagem em equipamentos com CNC, como ocorre na produção industrial, não espelha de fato a realidade da tecnologia construtiva. Como visto nas demais pesquisas analisadas, o custo do material em si é, na maior parte dos casos, superior quando da comparação entre madeira engenheirada e sistemas construtivos tradicionais. Porém, em uma análise mais abrangente, tem-se que os demais benefícios proporcionados pelo processo construtivo industrializado são os motivos que permitem, de maneira geral, equalizar ou aproximar os valores finais.

A RAZÃO DO CUSTO DA MADEIRA ENGENHEIRADA

Ainda que em muitos casos a opção pelo emprego de elementos estruturais de madeira engenheirada como principal tecnologia construtiva apresente custo superior em relação a opções tradicionais, ressalta-se que há ainda espaço para otimizar significativamente os custos de construção com elementos de madeira em questão. Isso pode ocorrer não apenas com a ampliação dos conhecimentos sobre a tecnologia, tendo em vista que o desconhecimento é apontado por Sorathiya (2019) como um fator relevante para o encarecimento, mas também em termos de como empregar os produtos em si, ou seja, quais são as situações em que se pode obter maior proveito e custo-benefício com a utilização da madeira engenheirada. Este é justamente o objetivo principal do documento publicado pela instituição Woodworks, voltado para arquitetos, engenheiros, *designers* ou outros profissionais envolvidos na criação projetual. O trabalho foi desenvolvido com o intuito de auxiliar o processo de desenvolvimento arquitetônico e otimização de custos de projetos que empreguem elementos de madeira engenheirada e consiste em uma listagem de itens a serem considerados pelos profissionais mencionados por etapa de projeto (WOODWORKS, 2022).

Dentre os pontos identificados no documento, vale assinalar aqueles a serem considerados previamente ao início do projeto arquitetônico, como a forma de contratação da obra. Neste quesito, não se considera adequado o formato tradicional de construção, no qual inicialmente se desenvolve o projeto e apenas após sua conclusão é elaborada a licitação para, somente então,

se escolher o responsável pela construção. No caso de edificações de madeira engenheirada, a participação da equipe de obra desde o início é muito importante para auxiliar o desenvolvimento do projeto e para o melhor planejamento do processo como um todo. A coordenação entre todas as equipes de projeto (desde arquitetura até instalações), logística, planejamento e cronograma são fundamentais para maior otimização de custos de edificações de madeira engenheirada. Orienta-se, ainda, que todas essas etapas devem ser desenvolvidas por meio da modelagem tridimensional, para que se possa extrair, ao máximo, os benefícios da pré-fabricação intrínseca às tecnologias de madeira engenheirada (WOODWORKS, 2022).

No que diz respeito ao projeto em si, muitos dos itens mencionados relacionam-se à otimização do material em termos dimensionais, tanto em relação à maximização das dimensões dos painéis visando minimizar a execução de cortes e as perdas de material, além de viabilizar a logística de transporte, quanto à redução da espessura dos painéis empregados como lajes de piso. A minimização dessas espessuras auxilia no controle dos custos, tendo em vista que são essas as áreas que usualmente possuem maior influência econômica (WOODWORKS, 2022). Além disso, como observado pelo método empregado por Cazemier (2017) para levantamento dos custos de uma estrutura de MLCC, o valor de fornecimento das peças estruturais é calculado diretamente pelo volume de material empregado, justificando a necessidade de adoção de menores espessuras para se alcançar maior economia na construção.

O documento aponta, por fim, que todos os edifícios de madeira engenheirada tendem a ser competitivos em termos financeiros. No entanto, alguns projetos podem se beneficiar de sistemas híbridos. Dentre as opções de associação dos elementos de madeira a demais tecnologias construtivas são citados: painéis de MLCC apoiados em vigas metálicas, lajes de concreto em vigas de MLC, painéis de MLCC e vigas de MLC suportadas por pilares de concreto pré-moldado e lajes mistas de MLCC com capa de concreto colaborante, para atingir grandes vãos e reduzir a vibração da estrutura (WOODWORKS, 2022).

Como observado, as variáveis que podem interferir no custo de uma edificação construída com madeira engenheirada são inúmeras e se distinguem bastante daquelas consideradas no orçamento de uma construção convencional, baseada no uso do concreto. Muitas decorrências do emprego de elementos pré-fabricados, como a redução no cronograma ou nas equipes de montagem, não são, inclusive, mensuráveis nessa comparação direta entre os custos unitários das duas tecnologias.

Por esse motivo, ainda que alguns estudos tenham desenvolvido análises dessa natureza, não é possível afirmar que os resultados encontrados espelhem integralmente a realidade, onde essa percepção de valor deve ser encarada de uma maneira mais holística. Conseqüentemente, as constatações de que as edificações de madeira engenheirada atingem valores superiores do que edificações construídas em concreto podem ser verídicas para uma comparação simples dos custos unitários envolvidos, mas certamente não serão válidas ao considerarem o retorno dos investimentos na equação, ou mesmo a redução nos riscos envolvidos na construção, os quais são, ainda, de mensuração mais complexa. Levando-se em conta também os demais benefícios alcançados em uma edificação de madeira, como o reflexo positivo na percepção sensorial do usuário em um ambiente que possibilita a biofilia e a adoção de um material natural e renovável, com baixa pegada de carbono, o resultado da comparação entre tecnologias poderia, inclusive, se reverter.

Por fim, no que diz respeito ao custo unitário para fornecimento e montagem das estruturas de madeira engenheirada, reitera-se aqui a conjectura de que a métrica usual para levantamentos dos custos de edificações que empreguem tecnologias convencionais, como concreto ou alvenaria, baseada em valores padronizados por área de construção, é inteiramente equivocada quando se trata de elementos estruturais de madeira. Mesmo para edificações convencionais, como apontado pela literatura estudada, as variáveis identificadas no projeto arquitetônico resultam em impactos significativos no custo final de construção.

Para as edificações de madeira engenheirada, que abarcam especificidades próprias, ainda que não tenham sido analisadas por essa perspectiva, é possível assegurar que a interferência do projeto arquitetônico na otimização da estrutura e, conseqüentemente, nos custos da edificação, atinge proporções mais expressivas. Assim, a mensuração dos seus custos pelo simples levantamento da sua área construída, torna-se impossibilitada.

Esta hipótese aqui levantada, será, contudo, melhor explanada e demonstrada ao longo do desenvolvimento da presente pesquisa.

2.4. PANORAMA DA MADEIRA ENGENHEIRADA

A maioria das publicações, sejam elas acadêmicas ou com intuítos comerciais, relacionadas ao emprego de estruturas de madeira engenheirada na construção civil, inicia-se com a apresentação dos benefícios destas tecnologias, muitos dos quais estão mencionados no final do capítulo anterior. Dentre eles, o principal, ou ao menos aquele citado de forma mais recorrente, é a associação dessas estruturas aos conceitos de sustentabilidade, tema frequentemente abordado pelos empreendimentos contemporâneos.

Isso porque, de maneira geral, os impactos do setor da construção civil no meio ambiente são largamente conhecidos. Agopyan e John (2014) apontam inclusive que “é quase um senso comum que a construção em geral, e o uso dos edifícios em particular, tem grande contribuição para as mudanças climáticas” (AGOPYAN; JOHN, 2014, p. 42). Nessa linha, entende-se também que os edifícios são a alternativa mais barata e efetiva para a redução das emissões de CO₂, sendo, dessa forma, uma prioridade para a mitigação da crise ambiental.

Assim, como menciona Salvadori (2021), a posição dominante do aço e do concreto como principais materiais de construção é desafiada pela crescente consciência das mudanças climáticas e pela conseqüente busca por descarbonização em todos os aspectos da sociedade. A contribuição destes materiais nas emissões globais de carbono já não é mais contestada. Dessa forma, desde o final do século XX, a necessidade de se encontrar materiais renováveis, no setor da construção civil, tem sido uma questão central. Nesse contexto, quando proveniente de florestas plantadas, a madeira pode ser considerada como o único material de construção de fato renovável. Os benefícios de seu emprego como matéria-prima para o meio ambiente são, inclusive, o ponto de partida dos artigos de Kuzmanovska *et al* (2018), Cover (2020) e Cazemier (2017), da dissertação de Strobel (2016) e da tese de Salvadori (2021), por exemplo.

Este benefício decorre principalmente do sequestro de carbono, pois durante o crescimento, as árvores absorvem e fixam o gás carbônico por meio da fotossíntese, e o CO₂ absorvido será lançado novamente à atmosfera apenas ao final do ciclo de vida dessas árvores, seja por meio da decomposição ou da combustão da madeira. Logo, a utilização da madeira na construção civil, evitando sua decomposição, impede a liberação do CO₂ (GAUZIN-MÜLLER, 2011).

Fora da academia, esta característica da madeira e, especificamente, dos sistemas construtivos industrializados de madeira, é também amplamente conhecida. Para muitos profissionais, a

madeira pode ser considerada como o material do século XXI. Pela vivência profissional da autora neste ramo específico do mercado da construção civil nacional, verifica-se também que, frequentemente, a sustentabilidade é o motivo apontado como primário para a escolha do emprego de painéis de MLCC, por parte de arquitetos, incorporadores ou proprietários, em muitas das edificações desenvolvidas no Brasil.

Da mesma forma, o emprego da madeira por ser uma escolha mais sustentável é o primeiro ponto alegado pelo vice-diretor de uma construtora finlandesa para justificar seu uso em uma escola, ainda em construção, com painéis de MLCC na cidade de Helsinkí. Esta se encaixa em um plano nacional para o setor da construção civil finlandesa, país este que pretende atingir neutralidade nas emissões de carbono até 2035. Ademais, o profissional em questão menciona o apreço dos usuários com relação às estruturas de madeira (SAVAGE, 2022).

Este apreço, ou a sensação agradável proporcionada pelas estruturas de madeira, tanto em termos estéticos quanto emocionais, também conhecida pelo termo biofilia, é outro benefício das estruturas de madeira engenheirada mencionado com muita frequência pelas publicações acadêmicas e para fins de mercado, para justificar e incentivar o emprego destas tecnologias construtivas (PERKINS + WILL, 2022; WOODWORKS, 2022). Sobre esta questão específica, conforme menciona Salvadori (2021), a capacidade da madeira, quando exposta, em aumentar o bem-estar dos usuários que permanecem nos edifícios é um tema já comprovado por meio de estudos experimentais. As causas que levam a esse conforto, e consequentemente atuam na melhoria da saúde dos usuários, devem-se ao fato de que a exposição a superfícies de madeira aparente está diretamente relacionada à redução do cortisol, que consiste em um hormônio associado ao estresse. Assim, a estrutura de madeira aparente, por si só, pode atuar na redução do nível de estresse dos usuários a ela expostos.

Outro benefício bastante mencionado associado às estruturas de madeira aqui estudadas é a sua forma de produção industrializada, a qual foi bastante frisada no capítulo anterior por contribuir também para a redução dos custos globais das construções. A industrialização apresenta, igualmente, diversos benefícios para o meio ambiente, tendo em vista que proporciona uma construção limpa, com produção mínima de resíduos em obra, além de tratar-se de uma montagem seca, sem necessidade de uso de água no canteiro, e de possibilitar melhores condições de trabalho para os profissionais envolvidos neste processo construtivo, sem margem para a informalidade.

Este último ponto levantado, a respeito das condições de trabalho, pode não aparentar, em uma análise superficial, uma questão relacionada à sustentabilidade. Entretanto, deve-se ressaltar que o conceito de sustentabilidade, aqui, é compreendido com base na definição de Agopyan e John (2014), ou seja, no seu sentido mais amplo, que abrange aspectos ambientais, econômicos e sociais. Como mencionam os autores:

O tripé ambiente-economia-sociedade deve ser considerado de uma maneira integrada, pois, do contrário, não teremos um desenvolvimento sustentável: o desafio é fazer a economia evoluir, atendendo às expectativas da sociedade e mantendo o ambiente sadio para esta e para as futuras gerações. (AGOPYAN; JOHN, 2014, p. 13)

Neste contexto, Agopyan e John (2014) consideram que o setor da construção civil brasileiro, quando comparado a outras indústrias nacionais, possui ainda muita margem para evolução, em especial no que diz respeito à sustentabilidade social. A informalidade é uma realidade corriqueira no cotidiano da construção convencional, sendo este o setor que apresenta a menor porcentagem de trabalhadores formalmente assalariados no país. Esta situação, que não se restringe a obras de pequeno porte, mas abrange igualmente grandes construtoras por meio da terceirização dos serviços, proporciona condições desiguais de competição entre as empresas e contribui para o agravamento das desigualdades sociais. Além da formalização do setor, outro desafio social por ele enfrentado é a baixa remuneração dos seus trabalhadores, tendo em vista que a média salarial da construção civil é inferior à média nacional. Conseqüentemente, o baixo nível salarial tende a dificultar a atração ou mesmo retenção de profissionais qualificados e habilitados, resultando na presença significativa de operários com baixa qualificação, que são atraídos para atuar na construção civil. Este cenário também afeta diretamente a produtividade e o desempenho do setor (AGOPYAN; JOHN, 2014).

Em contrapartida, tratando-se de sistemas construtivos industrializados, parte-se do pressuposto que a força de trabalho é integralmente registrada, excluindo, ou ao menos reduzindo, possibilidades de informalidade neste nicho específico de mercado. Logo, entende-se também que a média salarial dos trabalhadores, na condição de formalizados, tende a ser superior do que em relação ao restante do setor da construção civil. Assim, teoricamente, presume-se que há uma maior atração de operários de maior qualificação e profissionais talentosos para atuação na construção industrializada.

Nesta lógica, os sistemas construtivos industrializados de madeira podem ser considerados sustentáveis em seu conceito mais amplo, desde a questão da própria matéria-prima em si – a madeira – até sua forma de produção *off-site*, que, além de proporcionar menor impacto ao meio

ambiente, atua também na sustentabilidade social. Contudo, deve-se aqui ressaltar que inexistem tecnologia construtiva que não apresente qualquer impacto, seja ambiental ou social. Como mencionam Agopyan e John:

Não existem materiais que não tenham qualquer impacto ambiental. A magnitude do impacto de cada material depende muito de condições locais como: detalhes do processo produtivo, natureza do combustível utilizado, distâncias e modalidades de transporte, detalhes do projeto, condições de exposição durante o uso, manutenção e práticas a serem adotadas após a vida útil dos materiais. (AGOPYAN; JOHN, 2014, p. 61)

Com base, ainda, nas relações verificadas, no capítulo anterior, entre desenho da edificação e seus custos de execução, ressalta-se que, como consequência natural, a própria concepção do projeto arquitetônico em si pode acarretar maior ou menor impacto ambiental e mesmo social. Como mencionam também Agopyan e John (2014), todas as decisões de projeto, desde a própria localização da obra, incluindo a definição do conceito da edificação a ser construída, até a especificação de materiais e elementos construtivos, afetam diretamente o consumo de energia (aqui pode-se ampliar para todas as formas de energia, incluindo tempo e energia humana), os recursos naturais e a racionalização ou não da execução da obra.

AS SINGULARIDADES DA TECNOLOGIA

Sabe-se que não há tecnologia construtiva perfeita, isenta de pontos de atenção, de características próprias que exijam diferentes abordagens projetuais ou, como muitos podem considerar, até mesmo desvantagens. Assim, apesar de todos os benefícios mencionados, a disseminação das tecnologias industrializadas de madeira, na sua condição de inovadoras e tendo em vista o emprego da matéria-prima madeira, enfrenta atualmente alguns desafios.

Um dos pontos muito questionados por aqueles que buscam projetar ou pelos usuários que pretendem construir uma edificação de madeira é a questão da biodeterioração, que consiste na degradação da madeira ocasionada por organismos vivos. Tais organismos, os quais reconhecem os polímeros da parede celular da madeira como fonte de alimento, são denominados como xilófagos, ou seja, aqueles que se alimentam da madeira.

O termo biodeterioração, conforme definido pela norma ABNT NBR 16143:2013 – Preservação de madeiras – Sistema de categorias de uso, consiste nas alterações indesejáveis produzidas pela ação direta ou indireta de seres vivos, em materiais usados pelo homem (ABNT NBR 16143, 2013).

Esse processo, segundo Lelis *et al* (2001), leva à decomposição do substrato, tornando-o prejudicial e indesejável ao ser humano. Os três principais agentes por ele responsáveis consistem nos microrganismos, nos insetos e nos perfuradores marinhos. Estes últimos são moluscos e crustáceos que atacam a madeira no ambiente marinho ou de água salobra, como píer e contêntores (LELIS, 2001). Por esse motivo, não se apresentam como um risco real para qualquer edificação fora desse bioma.

Já no grupo dos microrganismos encontram-se os fungos. Dentre os fatores ambientais que condicionam a deterioração biológica por eles ocasionada estão a temperatura, umidade e a disponibilidade de oxigênio, como aqueles mais relevantes. Praticamente todos os organismos bióticos necessitam de oxigênio para sua sobrevivência e se desenvolvem em uma faixa de temperatura entre 5 °C e 65 °C, ainda que a temperatura ideal para sua subsistência varie em torno de 20 °C e 35 °C. Enquanto as baixas temperaturas desaceleram os processos de deterioração, altas temperaturas podem ser letais a esses organismos, visto que poucos deles crescem acima de 35 °C ou 40 °C (LEPAGE *et al*, 1986; LELIS *et al*, 2001; MORREL, 2006). A umidade é outro fator determinante à sua sobrevivência, dado que a decomposição não ocorre se o teor de umidade da madeira estiver abaixo do ponto de saturação das fibras, que “corresponde a um teor de umidade no qual as paredes celulares se encontram completamente saturadas” (LEPAGE *et al*, 1986, p. 188), em torno de 25 %. Para a decomposição ocorrer, os constituintes da madeira devem ser quebrados em moléculas menores, solúveis em água, para que sirvam de fonte de energia para um microrganismo. Assim, a água livre na madeira, dentre outras atribuições, também irá atuar como solvente, possibilitando o transporte das moléculas decompostas do substrato até o microrganismo. Por esse motivo, a maioria dos organismos não provoca danos em peças com umidade abaixo do ponto de saturação das fibras.

Esses mesmos fatores ambientais também possibilitam a criação de condições favoráveis para o desenvolvimento dos agentes deterioradores pertencentes ao grupo dos insetos, os quais se desenvolvem, predominantemente, em climas tropicais, ou seja, quentes e úmidos. Os principais representantes deste grupo consistem nos cupins e nas brocas de madeira (LEPAGE *et al*, 1986).

Percebe-se que, quando do emprego de elementos construtivos de madeira, a principal causa das degradações relaciona-se ao contato com a umidade. Em situações abaixo do ponto de saturação das fibras, torna-se impossível o desenvolvimento de microrganismos, como fungos. Consequentemente, durante o detalhamento do projeto arquitetônico, no que diz respeito às ligações estruturais entre componentes e sistemas, há que se respeitar as diferentes naturezas dos materiais envolvidos e a sua durabilidade. Deve-se atentar, por exemplo, à conexão dos

elementos de madeira com fundações de concreto ou vedações em alvenaria, tendo em vista a suscetibilidade da madeira à umidade. A criação de barreiras de proteção dos elementos de madeira contra possíveis fontes de umidades, mostra-se, assim, fundamental para que se possa evitar a deterioração precoce destes.

Além disso, outras formas de preservação das estruturas, que envolvem a adoção de produtos preservativos, são recomendadas e até imprescindíveis a depender das condições de exposição das estruturas. A adoção, no contexto brasileiro, destas medidas em estruturas de madeira em geral, ou em painéis de MLCC especificamente, são discutidas com maiores detalhes por Lotufo Oliveira *et al* (2020) e Lotufo Oliveira e Oliveira (2021), respectivamente.

Além das deteriorações ocasionadas por seres vivos, a madeira pode ser também degradada pelos agentes físicos e químicos. Nessa categoria, enquadram-se as deteriorações ocasionadas pela umidade em si, que atua na variação dimensional da madeira, além de proporcionar condições adequadas para o desenvolvimento dos organismos vivos já mencionados. Isso ocorre por ser a madeira um material higroscópico, ou seja, que troca umidade com o ar a que está exposto, em função da umidade relativa e da temperatura do ar. Uma peça de madeira submetida a um ambiente com temperatura e umidade relativa constantes, atinge, após certo período, situação de estabilidade, alcançando sua umidade de equilíbrio. Quando uma peça é utilizada com umidade acima do seu ponto de equilíbrio, essa perderá água para o meio externo, sendo que a perda de água abaixo do ponto de saturação das fibras é acompanhada pela contração volumétrica da peça (LEPAGE *et al*, 1986).

Ainda nesta categoria é possível mencionar o fenômeno do intemperismo, que consiste na degradação da madeira quando exposta à atmosfera, ocasionada pela ação conjunta de fatores como luz, umidade, temperatura, oxigênio, poluição atmosférica e abrasão. A consequência mais perceptível desse fenômeno é a alteração na cor, decorrência da fotodegradação ocasionada pela radiação ultravioleta. A mudança de cor da madeira, que assume aparência levemente acinzentada, relaciona-se à decomposição da lignina. Os produtos resultantes dessa decomposição são lixiviáveis, permanecendo, na superfície da madeira, fibras com alto teor de celulose e com coloração variando de branco ao cinzento, as quais são resistentes à degradação por ultravioleta. Este fenômeno, no entanto, é estritamente superficial, atingindo profundidade entre 0,05 e 2,50 mm (LEPAGE *et al*, 1986).

Além desses fatores, possivelmente uma das degradações que mais causa receio, nos usuários e projetistas, quanto à adoção de estruturas de madeira, é a questão do fogo, a qual também se

enquadra, segundo Lepage *et al* (1986) como um agente físico que promove a degradação da madeira na condição de um material combustível. Apesar disso, a inflamabilidade e a resistência ao fogo não são determinadas pela composição química dos elementos, mas pelas suas proporções e espessuras. A elevação da temperatura não diminui a resistência da madeira, podendo, inclusive, elevá-la, dado que o calor tira a sua umidade levando a uma contração das peças (LEPAGE *et al*, 1986).

Em situações de incêndio, a madeira maciça carboniza superficialmente, criando uma camada de carvão em sua superfície, que protege o núcleo da peça, o qual mantém sua resistência original. Essa carbonização, intrínseca à madeira maciça e que pode ser extrapolada para as tecnologias industrializadas de madeira, ocorre em uma taxa previsível. Conseqüentemente, os elementos estruturais de madeira engenheirada podem ser mantidos expostos e ainda assim atingir o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) exigido pelas legislações locais. Para isso, a estrutura deve ser dimensionada de forma que seu núcleo, remanescente após um eventual incêndio, possa resistir às cargas previstas para a edificação pelo tempo definido para a exposição ao fogo (BRENEMAN *et al*, 2022; ICC 2021; WOODWORKS, THINK WOOD, 2021).

Assim como a questão da biodeterioração, passível de solução por meio de detalhes construtivos adequados à tecnologia, a proteção de estruturas de madeira em situações de incêndio é, igualmente, um ponto que pode ser solucionado por meio do próprio projeto estrutural. Este dimensionamento deve ser realizado de modo a se adequar às legislações locais, que regulam os critérios a serem atendidos pelos projetos estruturais, com base nas necessidades de segurança contra incêndio pré-estabelecidas para aquela região.

Os limites para as construções de madeira são, dessa forma, estabelecidos por legislações locais e esbarram, principalmente, em questões relacionadas à proteção ao fogo. Conseqüentemente, conforme aponta Cover (2020), enquanto edificações executadas com MLCC e MLC entre 9 e 24 pavimentos já são mais usuais no continente Europeu, a disseminação desta tecnologia construtiva nos Estados Unidos, em contrapartida, até o ano de 2020, limitava-se a edificações com gabarito máximo de 6 pavimentos, seguindo as restrições estabelecidas pelo *International Building Code* (IBC) de 2018. Ainda assim, é possível encontrar alguns exemplares de edifícios construídos até esta data com gabarito superior, os quais utilizaram-se de estratégias alternativas para possibilitar sua aprovação, como é o caso do edifício Carbon12, localizado em Portland (COVER, 2020).

No entanto, de acordo com Cover (2020) e Breneman *et al* (2022), o crescente interesse global em edificações mais altas executadas em *mass timber* levou à criação de um comitê no ano de 2015, para estudar e explorar cientificamente possíveis alterações no código de obras a ser aprovado em 2021, de modo a possibilitar esta nova tipologia construtiva. Vale ressaltar que todas as disposições propostas para o novo código foram validadas por meio de testes laboratoriais de incêndio, que incluíram ensaios conduzidos em escala real, para simular as novas tipologias construtivas em estudo (ICC, 2021). Assim, em janeiro de 2019 foi aprovado um conjunto de propostas que possibilitam a construção de edifícios de madeira em altura como parte do IBC de 2021. Com base nessas propostas, o IBC 2021 passou a incluir três novas tipologias construtivas fundamentadas no uso de *mass timber* e denominadas como tipo IV-A, IV-B e IV-C, permitindo edificações de até 18 pavimentos do tipo IV-A (estruturas de madeira não exposta) para usos residenciais e corporativos (Figura 9). No caso de estruturas de madeira parcialmente expostas, conforme limitações estabelecidas para a tipologia IV-B, permite-se que se atinja gabarito de até 12 pavimentos, para uso residencial ou corporativo. Já estruturas de maneira integralmente expostas, enquadradas no tipo IV-C, podem ser construídas com gabarito máximo de 8 pavimentos, no caso de uso residencial, ou 9 pavimentos, quando possuírem uso corporativo (COVER, 2020; BRENEMAN *et al*, 2022; IBC, 2021).

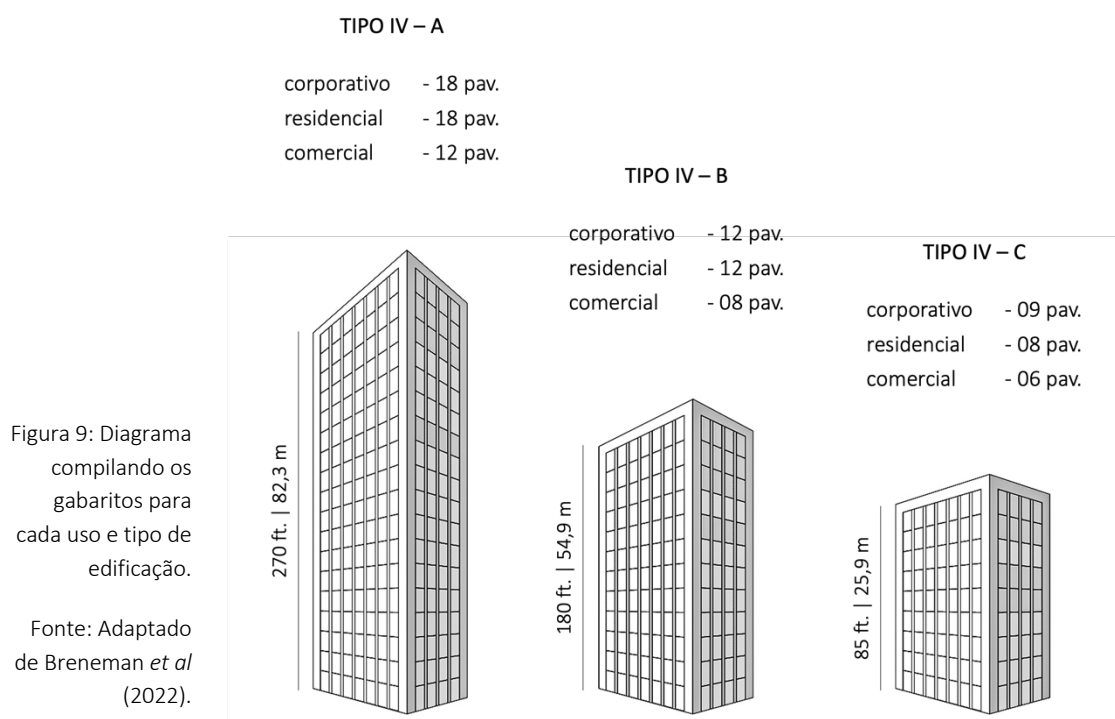


Figura 9: Diagrama compilando os gabaritos para cada uso e tipo de edificação.

Fonte: Adaptado de Breneman *et al* (2022).

AS COMPOSIÇÕES DAS ESTRUTURAS

O crescente interesse global em estruturas de madeira engenheirada pode ser comprovado não apenas por mudanças legais significativas que ampliam as possibilidades para sua disseminação, como é o caso da aprovação das novas tipologias de madeira no IBC de 2021, mas também por estudos recentes que buscam levantar a evolução dessas edificações ao longo das últimas décadas, e mais especificamente, dos últimos anos.

Este é o caso do estudo divulgado em 2022 pelo CTBUH (*Council on Tall Building and Urban Habitat*), que identifica 84 edifícios estruturados com madeira engenheirada com oito ou mais pavimentos, já finalizados ou em construção ao redor do mundo, os quais são analisados por região, uso e tipologia estrutural. No que diz respeito ao uso, observa-se uma predominância do uso residencial, que representa 65 % do total. Quando à localização, dentre os exemplares levantados, a grande maioria se localiza no continente Europeu (71 %), enquanto os demais dividem-se pela América do Norte (18 %) e Austrália (10 %). Não há edificações que se adequam a este pré-requisito de gabarito na América do Sul ou África (SAFARIK *et al*, 2022).

Em relação às configurações estruturais verificadas, o estudo divide as edificações por material, resultando em quatro configurações: integralmente de madeira, estruturas híbridas de madeira e concreto, estruturas híbridas de madeira e aço, e estruturas híbridas de madeira, concreto e aço. Algo interessante de se apontar é que dentre essas 4 categorias, aquela que apresenta um maior número de exemplares é a primeira, ou seja, estruturas integralmente de madeira. Cada uma dessas macro categorias pode, por sua vez, subdividir-se com base na combinação estrutural dos elementos, que ocorre de três formas: estrutura panelizada (composta por paredes autoportantes), estrutura composta por pilar e viga e sistemas modulares. A primeira, dentre essas 3 formas de composição da estrutura, é a mais comum, com utilização de vedações formadas por painéis de MLCC, apresentando um total de 26 exemplares, ou seja, 30,9 % do total (SAFARIK *et al*, 2022).

Essa mesma divisão com base na combinação estrutural é empregada também por Salvadori (2021). Em sua tese, o autor analisa 197 estudos de caso coletados em escala global, executados entre 2004 e 2019, com 5 ou mais pavimentos e cujo principal sistema estrutural baseia-se no emprego de estruturas de madeira engenheirada. Desses, como verificado na pesquisa anterior, a grande maioria se localiza na Europa, que concentra um total de 161 edificações. A América do Norte, por sua vez, possui 24 edificações construídas, sendo que as 12 restantes estão localizadas em países dispersos por outras regiões do mundo. Confirma-se também pela pesquisa, uma

constatação apontada anteriormente, de que as estruturas de madeira engenheirada são um fenômeno recente, tendo em vista que 117 dos casos contemplados pelo estudo foram edificadas a partir de 2016.

Como mencionado, o autor baseia-se nas três formas de composição estrutural adotadas por Safarik *et al* (2022) para o desenvolvimento de seu estudo. No entanto, de modo a se aprofundar na análise, estas são subdivididas de acordo com o material empregado, resultando em 32 categorias para classificação dos 197 exemplares encontrados.

A primeira composição possível aos dois estudos são os sistemas estruturais panelizados, ou seja, formados por painéis com função estrutural, autoportantes, que podem atuar como vedações ou lajes de piso ou cobertura. Segundo Salvadori (2021), a estrutura, como um todo, forma uma configuração de colmeia, de forma que a rigidez global da edificação é atingida por meio dessa composição de paredes que suportam tanto as cargas verticais quanto as laterais (vento ou eventos sísmicos). Conseqüentemente, observa-se maior limitação no *layout* interno dos pavimentos, tendo em vista a impossibilidade de remoção das vedações. Nessa categoria, é possível encontrar exemplares que combinam elementos estruturais de concreto – localizados em geral no núcleo de circulação vertical ou na base da edificação – com vedações estruturais de madeira, as quais são majoritariamente de MLCC. Todavia, também se verificam muitos exemplos compostos integralmente por vedações estruturais de MLCC, incluindo o núcleo de circulação vertical, assim como edificações nas quais as vedações externas são compostas por painéis de MLCC estruturais atuando em conjunto com uma configuração interna composta por pilares e vigas (de MLC ou metálicos), de modo a tornar a planta mais flexível. As lajes, para todos os casos, configuram-se principalmente por painéis de MLCC (SALVADORI, 2021).

Um exemplar de grande importância dessa categoria é o edifício Stadhaus, também conhecido como Murray Grove (Figuras 10 e 11). Localizado em Londres, Inglaterra, e concluído em 2008, possui nove pavimentos e cerca de 30,00 m de altura. Com uso residencial, foi o primeiro edifício construído inteiramente em MLCC, incluindo as caixas de escada e elevador. A única exceção consiste na fundação, realizada em concreto (GREEN, 2017).

A segunda composição estrutural adotada por ambos os estudos são as estruturas formadas por pilares e vigas, também conhecida como *timber frame*. Esse *frame* de madeira pode ser ancorado em um núcleo rígido, o qual, por sua vez, pode ser construído de concreto ou mesmo com painéis de MLCC. As lajes, como na categoria anterior, configuram-se principalmente por painéis de MLCC, mas também podem ser compostas por outros produtos de madeira engenheirada.



Figura 10: Edifício Stadthaus durante a montagem da estrutura.

Fonte: <https://www.archdaily.mx/mx/02-22097/stadthaus-24-murray-grove-waugh-thistleton-architects>



Figura 11: Edifício Stadthaus finalizado.

Fonte: <https://www.archdaily.mx/mx/02-22097/stadthaus-24-murray-grove-waugh-thistleton-architects>

Uma questão importante para se considerar nessas tipologias estruturais é o travamento lateral da edificação. Enquanto no sistema estrutural panelizado, este travamento é realizado pelas próprias vedações autoportantes, nesta composição formada por pilares e vigas, quando o núcleo rígido por si só não suporta todas as cargas laterais, devem ser concebidos travamentos adicionais, ou seja, contraventamentos, executados, majoritariamente, na forma de diagonais de madeira ou aço (SALVADORI, 2021).

Como exemplo desta configuração estrutural, pode-se mencionar o edifício Mjøstårnet, localizado em Brumunddal, na Noruega (Figuras 12 e 13). Sua construção, formada por pilares e vigas de MLC, núcleo de circulação vertical composto por painéis de MLCC e lajes de LVL e concreto pré-moldado, foi finalizada em 2019, tornando-se, naquele momento e pelos três anos consecutivos à sua entrega, a estrutura de madeira mais alta do mundo.³ Possui 18 pavimentos e altura de 85,40 m, que abrigam apartamentos residenciais, escritórios, hotel e restaurantes (GREEN; TAGGART, 2020).

Outro exemplar singular dessa categoria é a estrutura formada apenas por pilares e lajes, onde estas últimas atuam também como vigas. Para este caso, no entanto, até o momento Salvadori (2021) encontrou apenas um exemplar com mais de 5 pavimentos, que consiste no edifício Brock Commons (Figuras 14 e 15). Localizado em Vancouver, Canadá, e finalizado em 2017, esta estrutura possui 18 pavimentos, sendo o primeiro construído em concreto armado e os 17 restantes constituídos por pilares de MLC e lajes de MLCC. Apresenta dois núcleos de circulação vertical construídos também em concreto. Seu uso consiste em habitações estudantis para cerca de 400 alunos da University of British Columbia (UBC) (GREEN; TAGGART, 2020).

A terceira composição estrutural adotada pelos estudos é aquela formada por módulos tridimensionais, os quais são fabricados *off-site*, configurando ambientes completos, com esquadrias, portas, instalações prediais, acabamentos, etc. Estes, posteriormente, são apenas posicionados e conectados entre si em obra. Assim como as anteriores, esta categoria também pode ser integralmente de madeira ou apresentar núcleos de circulação vertical construídos em concreto.

Um exemplo de edificação que emprega módulos tridimensionais em sua composição estrutural, apesar de ainda não constar no levantamento de Salvadori (2021), é o Sara Kulturhus, finalizado

³ Essa marca foi, no entanto, superada em 2022, com a conclusão do edifício Ascent, localizado em Milwaukee (EUA), que possui 25 pavimentos e 86,6 m de altura.



Figura 12: Edifício Mjøstårnet durante a montagem da estrutura.

Fonte: <https://www.archdaily.com/934374/mjostarnet-the-tower-of-lake-mjosa-voll-arkitekter>



Figura 13: Edifício Mjøstårnet finalizado.

Fonte: <https://www.archdaily.com/934374/mjostarnet-the-tower-of-lake-mjosa-voll-arkitekter>

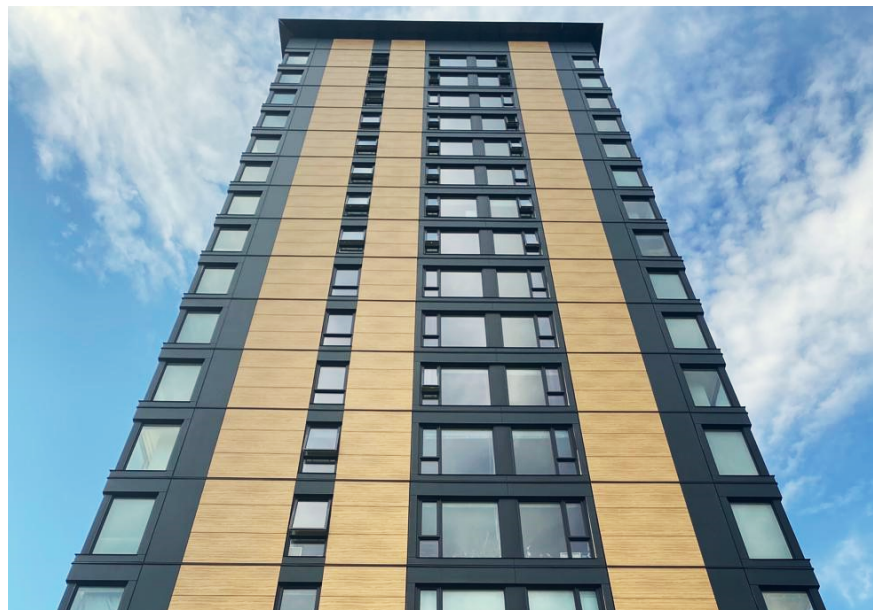
Figura 14: Edifício Brock Commons durante a montagem da estrutura.

Fonte: <https://www.archdaily.com.br/br/879671/maior-arranha-ceu-de-madeira-do-mundo-e-concluido-em-vancouver>



Figura 15: Edifício Brock Commons finalizado.

Fonte: da autora (2022).



em 2021 em Skellefteå, na Suécia (Figuras 16 e 17). Este edifício possui 72,80 m de altura e 19 pavimentos, abrigando teatros, biblioteca, galerias de arte, centro de conferência, restaurantes, spa e um hotel, na torre de maior altura. Esta última foi construída com módulos pré-fabricados de MLCC, posicionados entre dois núcleos de circulação vertical, estruturados também em MLCC. Já os edifícios menores deste complexo são compostos por pilares e vigas de MLC, núcleos de circulação vertical e vedações de MLCC.

De maneira semelhante aos estudos anteriores, Kuzmanovska *et al* (2018) também levantam as estruturas de madeira engenheirada construídas entre 2009 e 2020 com altura superior a 25,00 m (cerca de 8 pavimentos), buscando compreender as tendências na construção contemporânea com estas estruturas de madeira, direcionando maior ênfase às soluções arquitetônicas e tipologias estruturais empregadas. Ao todo, os autores encontraram 46 edificações, localizadas na Europa, Canadá, Estados Unidos e Austrália, que se enquadram nos critérios pré-estabelecidos. Os exemplares são distribuídos em quatro gerações, de acordo com o período de construção. A última geração inclui aquelas edificações ainda em construção, com entrega prevista para o ano de 2020.

Um dos resultados mais relevantes e, de certa maneira, esperado, desta pesquisa diz respeito à altura das edificações, a qual aumenta significativamente através das gerações. Verificou-se ainda uma ampliação no uso dos edifícios para além do residencial apenas, com uma tendência observada para usos mistos. Outra questão importante é a constatação de uma migração da estratégia estrutural dominante nas edificações altas de madeira. Enquanto na primeira geração os sistemas estruturais compostos por vedações autoportantes, tipicamente de MLCC, eram os mais comuns, representando 75 % do total dos edifícios deste período, a última geração é marcada pelo emprego dominante de estruturas do tipo pilar e viga combinados com lajes de MLCC. Solução, esta, que corresponde a 67 % do total dos exemplares mais recentes (KUZMANOVSKA *et al*, 2018).

Além disso, o uso do núcleo rígido de concreto também é verificado com mais frequência nos últimos anos, passando a existir em 57 % das edificações da última geração. Na primeira geração, essa estrutura estava presente em apenas 38 % dos exemplares. Contrariamente, o emprego dos núcleos de circulação vertical em MLCC tornou-se menos comum com o passar dos anos. Ainda sobre este ponto, a partir da terceira geração de edifícios, observou-se também o surgimento de núcleos rígidos construídos com estruturas metálicas, sugerindo uma propensão para soluções estruturais híbridas (KUZMANOVSKA *et al*, 2018).

Figura 16: Edifício Sara Kulturhus durante a montagem da estrutura.

Fonte:
<https://www.archdaily.com/967019/sara-kulturhus-center-white-arkitekter>



Figura 17: Edifício Sara Kulturhus finalizado.

Fonte:
<https://www.archdaily.com/967019/sara-kulturhus-center-white-arkitekter>



Como tendências futuras, os autores apontam para uma possível redução do emprego de vedações estruturais, como paredes de MLCC, nas fachadas das edificações, tendo em vista que esta solução, adotada em 75 % das edificações mais antigas, foi constatada em apenas 35 % dos exemplares mais recentes. Além disso, outra direção observada é o maior uso de fachadas envidraçadas, as quais não foram observadas na primeira geração, mas passaram a compor 30 % das edificações da última geração. Ademais, verificou-se uma presença marcante de acabamentos de madeira e inclusão de vegetação nas edificações mais recentes, o que pode ser um indicador do desejo de associar tais edifícios à sustentabilidade (KUZMANOVSKA *et al*, 2018).

AS ESTRUTURAS HÍBRIDAS

A redução do emprego de um único elemento estrutural, como é o caso do edifício Stadthaus, apresentado anteriormente, e, em contrapartida, a maior adoção de sistemas estruturais híbridos, demonstra, de fato, uma tendência, como observado também em outras referências. Conforme aponta Woodworks (2022), muitas vezes essas soluções híbridas apresentam também benefícios econômicos para a construção da edificação.

É natural, e até óbvio, supor que o uso de materiais e elementos estruturais, quando empregados de forma a se obter o melhor desempenho, acarretará um resultado positivo na relação custo-benefício da estrutura. Nessa lógica, a associação de diferentes materiais mostra-se vantajosa não apenas para configurar a estrutura como um todo, associando elementos de concreto a elementos de madeira, por exemplo, mas também para compor elementos estruturais isolados compostos por materiais de diferentes origens.

Essa configuração estrutural híbrida, com associação de diferentes materiais, é empregada, por exemplo, na estrutura do edifício HoHo Wien, finalizado em 2019 em Viena, Áustria (Figuras 18 e 19). Esta edificação possui 84,00 m de altura e 24 pavimentos e abriga apartamentos residenciais, um hotel, escritórios e restaurantes. Sua composição estrutural enquadra-se na categoria pilar e viga, conforme classificação de Salvadori (2021). Quanto aos materiais, adota-se solução composta por núcleo de circulação vertical de concreto, pilares de MLC, vigas de transição em concreto pré-moldado, paredes de MLCC e lajes híbridas de MLCC com concreto colaborante (GREEN; TAGGART, 2020).

Figura 18: Interior do Edifício Hoho Wien.

Obs.: é possível visualizar a associação da viga de concreto à laje de madeira.

Fonte: <https://www.archdaily.com/catalog/us/products/29352/the-potential-of-prefabrication-hoho-vienna-hasslacher-group>



Figura 19: Edifício Hoho Wien finalizado.

Fonte: <https://www.archdaily.com/catalog/us/products/29352/the-potential-of-prefabrication-hoho-vienna-hasslacher-group>



Para as lajes híbridas de madeira com concreto é possível utilizar tanto elementos de MLC como de MLCC. No caso das primeiras, observa-se, frequentemente, um número grande de vigas de madeira, posicionadas lado a lado, suportando uma laje relativamente fina de concreto. Já no segundo caso, os elementos de laje podem ser fabricados como um conjunto, sendo o concreto depositado na laje de MLCC ainda em fábrica, como também *in loco*, quando o pavimento é montado com lajes de MLCC e, posteriormente, é depositado o concreto criando um plano único.

Ambas as combinações, no entanto, exigem cuidado especial na conexão entre os diferentes materiais, de modo que concreto e madeira possam trabalhar como um conjunto único (Figura 20). Conseqüentemente, verifica-se a aplicação dos materiais de forma a atingir seu melhor desempenho, empregando peças de madeira nas regiões tracionadas das lajes e capas de concreto nas regiões comprimidas. Assim, a atuação conjunta dos dois permite um emprego mais coerente e otimizado de material, ou seja, menos material para vencer vãos maiores.

A busca por soluções estruturais mais coerentes, inteligentes e econômicas, associando para isso diferentes materiais que juntos possam proporcionar os melhores desempenhos construtivos, está integralmente alinhada à tendência mundial por soluções sustentáveis, que possibilitem o menor impacto ambiental possível. Hoje, é fato que a geração atual de jovens arquitetos e engenheiros está vivendo um momento marcado por uma série de mudanças climáticas, além das mudanças tecnológicas que se tornaram onipresentes em nossos cotidianos nos últimos anos, mencionadas e relatadas anteriormente.

- 1 – conector madeira – concreto
- 2 – capa de concreto
- 3 – laje de madeira
- 4 – viga de MLC

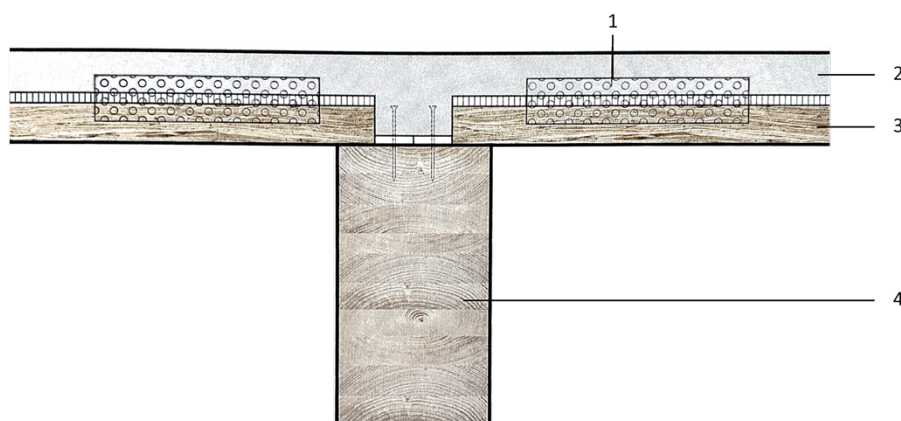


Figura 20: Exemplo esquemático de conexão colaborante entre estruturas de madeira e capa de concreto.

Fonte: adaptado de Green e Taggart (2020).

Neste contexto, o papel destes profissionais na mitigação dos impactos da construção civil no meio ambiente é central. Das mãos do arquiteto inicia toda a concepção do projeto, que pode acarretar, a depender do primeiro traço, maior ou menor impacto em todos esses itens citados. Não é apenas uma questão de especificação de materiais verdes. Esses, por si só, não garantem uma construção coerente e sustentável da forma mais ampla como pode ser compreendido esse conceito. Nesse sentido, empregar um único material apenas pelo fato dele possuir uma matéria-prima mais sustentável pode, inclusive, não ser a opção mais coerente para determinadas situações. Dessa maneira, mostra-se fundamental para aqueles que concebem as estruturas e edificações compreender qual a solução mais adequada para cada contexto.

Como visto, a matéria-prima madeira, na sua essência, possui também limitações e características próprias que exigem um detalhamento adequado, de modo a garantir sua durabilidade ao longo da vida útil da edificação. Dessa forma, o próprio emprego adequado do elemento estrutural de madeira, proporcionando as proteções devidas contra a umidade, é uma forma de garantir um uso sustentável do material. Isso porque a durabilidade está diretamente relacionada à sustentabilidade, tendo em vista que a substituição constante dos elementos construtivos gera uma produção desnecessária de resíduos e desperdício dos recursos da natureza.

Assim, entende-se que a madeira, por si só, é sim uma matéria-prima que traz muitos benefícios e está integralmente alinhada aos conceitos de sustentabilidade almejados pela sociedade nas últimas décadas. Inclusive, verifica-se que as tecnologias industrializadas de madeira vêm emergindo nos últimos anos e ganhando espaço no mercado, muitas vezes em decorrência de sua associação a conceitos de sustentabilidade pelo uso, dentre outros motivos, de uma matéria-prima renovável. Seu emprego, contudo, deve ser consciente e inteligente, associando-se a outros materiais quando essa for a solução que proporcione maior custo-benefício e prevendo uma utilização adequada às suas características próprias como matéria-prima.

Por fim, ao incluir ainda o próprio processo construtivo das estruturas de madeira engenheirada nessa análise, em vista da adoção de técnicas de fabricação digital, entende-se que o nascimento dessas estruturas ocorre de forma conexa ao momento de evolução, ou talvez, revolução, tecnológica e digital no qual se encontra a humanidade. Portanto, ainda que pareçam, para muitos, como uma novidade ou cenário distante, ou até mesmo uma tendência passageira que em breve irá desaparecer, não é mais possível afirmar que se constituem como uma mera alternativa para construções do futuro. São, na verdade, uma realidade das edificações do presente, reflexo do percurso que estamos trilhando como sociedade em constante ascensão.

2.5. CONSIDERAÇÕES PARCIAIS DA CONTEXTUALIZAÇÃO

Como visto anteriormente, nos últimos anos constatou-se uma disseminação relativamente intensa das estruturas de madeira engenheirada. Isso ocorreu de forma global, atingindo praticamente todos os continentes, mas ainda não uniforme, tendo em vista as maiores concentrações dessas tipologias estruturais inicialmente na Europa, com implementação relativamente recente também na América do Norte e Austrália. A adoção dessas estruturas, ano a ano, vem quebrando paradigmas da construção civil tradicional e atingindo patamares até então inimagináveis para esta matéria-prima. Edificações com mais de dez pavimentos já não causam mais estranheza para aqueles que atuam neste nicho específico do setor, sendo que os desafios mais recentes consistem em ultrapassar a marca dos 25 pavimentos atingida no ano de 2022.

No Brasil, por outro lado, o cenário é bastante distinto. Por mais que estruturas de MLC sejam produzidas no país já há algumas décadas, ao menos desde a década de 1960, sua disseminação em território nacional não é tão abrangente quanto em relação ao contexto global, sendo que na década de 2010 a produção nacional representava cerca de 1% da produção norte-americana (GAUZIN-MÜLLER, 2011). No entanto, nos últimos anos observou-se a construção de algumas estruturas notórias nacionais. Este, por exemplo, é o caso da estrutura construída em 2017 para abrigar uma moradia estudantil da Fundação Bradesco (Figuras 21 e 22), localizada no interior do estado de Tocantins. Com área construída superior a 20.000,00 m², sua estrutura é composta por pilares e vigas de MLC, que sustentam a cobertura da moradia. Os elementos estruturais de madeira foram fornecidos e montados pela empresa Ita Construtora, que atua neste nicho das estruturas de madeira há cerca de 4 décadas, e, especificamente, com a produção de MLC há mais de 15 anos (VEJA, 2018).

No que diz respeito aos painéis de MLCC, estes são ainda mais recentes no país, como é de se esperar, considerando a própria história da tecnologia em termos mundiais. O primeiro fabricante de MLCC do Brasil, a empresa Crosslam, já atuando na fabricação de vigas de MLC desde 2008, iniciou a produção de painéis de MLCC no ano de 2012 na cidade de Suzano (SP), como mencionado anteriormente. Por muitos anos, este se manteve como o único produtor nacional da tecnologia. Atualmente, sabe-se, contudo, da existência de ao menos dois outros fabricantes no país.

Figura 21: Moradias estudantis da Fundação Bradesco, construídas com pilares e vigas de MLC.

Fonte:
<https://www.archdaily.com.br/br/879961/moradias-infantis-rosenbaum-r-plus-aleph-zero>



Figura 22: Moradias estudantis da Fundação Bradesco, construídas com pilares e vigas de MLC.

Fonte:
<https://www.archdaily.com.br/br/879961/moradias-infantis-rosenbaum-r-plus-aleph-zero>



Segundo levantamento realizado por Lotufo Oliveira (2018), até novembro de 2018 foram construídas 31 edificações com painéis de MLCC no país oriundos da fabricação nacional, sendo que pouco mais da metade consiste em residências unifamiliares (58%), que se localizam, majoritariamente, no estado de São Paulo (84%). Entretanto, no ano de 2023, passados quatro anos do levantamento mencionado, verifica-se que há uma quantidade muito maior de edificações que empreguem painéis de MLCC construídas, tanto em território nacional, quanto em outros países da América do Sul. O uso dessas estruturas também se diversificou bastante, incluindo edificações educacionais, de lazer ou galpões industriais.

Como exemplo destes usos diversificados, é possível mencionar a estrutura construída pela empresa Crosslam para abrigar um clube localizado na cidade de Itupeva (SP), com área de aproximadamente 3.600,00 m² (Figura 23). A cobertura desta edificação, finalizada no ano de 2021, é estruturada em vigas de MLC e vigas metálicas, apoiadas em pilares metálicos, e que recebem, pontualmente, lajes de MLCC. Além deste primeiro, outro exemplar de edificação não residencial, executada pela empresa em questão, consiste na cobertura de uma escola municipal, localizada na cidade de São Caetano (SP) e finalizada no ano de 2020 (Figura 24). Esta cobertura, configurada por vigas de MLC apoiados em pilares de concreto, apresenta formato circular, com diâmetro de 40,00 m e área de superfície de 1.250,00 m².

Há, também, algumas empresas que atuam na importação de painéis produzidos no exterior. Considerando estas construções com painéis importados⁴, no que diz respeito a seu gabarito, aquela identificada com maior altura consiste em uma loja conceito de uma fábrica de chocolate com aproximadamente 1.500,00 m² e quatro pavimentos (Figuras 25 e 26), localizada na cidade de São Paulo e concluída em 2020. A estrutura é composta integralmente por elementos de madeira, sendo configurada por lajes de MLCC, produzidas pelo fornecedor austríaco KLH Massivholz GmbH e importadas pela empresa Urbem, além de pilares e vigas de MLC, confeccionados pela empresa nacional Rewood, há qual atua na produção de elementos de MLC desde 2011. Esta última também forneceu os painéis de *Wood Frame*, que compõem as vedações da edificação.

Este cenário nacional de adoção das estruturas de madeira engenheirada, empregando especificamente painéis de MLCC, pode parecer ainda tímido quando comparado aos grandes

⁴ Nesta categoria foram identificadas, nas páginas virtuais (acesso em setembro de 2022) das empresas que trabalham com esta tecnologia mais três edificações.

Figura 23:
Edificação para
clube construída
com vigas de MLC,
lajes de MLCC,
pilares e vigas
metálicos.

Fonte:
<https://www.archdaily.com.br/br/979201/prai-da-grama-arquitetura-gui-mattos>



Figura 24: Cobertura
de escola municipal
construída com
estrutura de MLC.

Fonte:
https://www.archdaily.com.br/br/977957/escola-parque-nil-emei-cleide-rosa-auricchio-carolina-penna-arquitetura-e-urbanismo?ad_medium=office_landing&ad_name=article





Figura 25: Loja conceito de fábrica de chocolates construída com painéis de MLCC e estrutura de MLC.

Fonte:
<https://www.archdaily.com.br/br/960042/loja-conceito-da-dengo-chocolates-matheus-farah-plus-manoel-maia-arquitetura>



Figura 26: Loja conceito de fábrica de chocolates construída com painéis de MLCC e estrutura de MLC.

Fonte:
<https://www.archdaily.com.br/br/960042/loja-conceito-da-dengo-chocolates-matheus-farah-plus-manoel-maia-arquitetura>

avanços observados na Europa ou América do Norte, por exemplo. Ainda assim, espera-se, para um futuro bastante próximo, evoluções consideráveis nesta realidade.

dos primeiros motivos para esta alegação é a publicação da revisão da norma NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira (2022), ocorrida no segundo semestre de 2022. Este documento trata da norma que regula as estruturas de madeira no Brasil, o qual se encontrava em processo de revisão desde o ano de 2002 (CALIL JÚNIOR; CALIL NETO, 2023). Dentre as alterações mais significativas dessa recente publicação em relação à versão anterior, datada de 1997, tem-se a introdução dos painéis de MLCC, os quais até então não eram normatizados em território nacional. Isso ocorre com a introdução de 5 métodos de ensaio que orientam a classificação e caracterização tanto dos painéis de MLCC produzidos nacionalmente quanto de elementos de MLC (ABNT NBR 7190, 2022).

O segundo motivo para se esperar movimentações neste setor em um futuro breve é a inauguração das novas indústrias em território nacional, como mencionado anteriormente. Dentre os fabricantes mais recentes, aquele de maior porte, a empresa Urbem, inicia sua produção em outubro de 2022, com as primeiras edificações sendo montadas no início de 2023.

Além dessas razões apontadas, atualmente, encontra-se em construção na cidade de Suzano o edifício Aurora (Figuras 27 e 28), produzido e incorporado pela empresa Crosslam e cujo projeto arquitetônico é assinado pela presente autora. Esta edificação possuirá 6 pavimentos no total (térreo livre e cinco pavimentos de apartamentos) e será o primeiro edifício residencial construído com MLCC no país, além de também receber a marca de maior edificação em madeira no Brasil quando da sua conclusão. Sua estrutura será composta por painéis de MLCC, atuando como lajes de piso e cobertura, além de paredes externas autoportantes, pilares e vigas de MLC, pilares e vigas metálicos e elementos pré-moldados de concreto formando tanto a caixa de circulação vertical quanto o pavimento térreo.

No que diz respeito à configuração estrutural, a estrutura é panelizada, ainda que o MLCC seja empregado apenas no perímetro da edificação, de modo que os vãos internos são vencidos com vigas a fim de manter uma planta livre no interior, permitindo ao usuário a criação de um *layout* flexível que pode comportar até dois dormitórios e dois banheiros. Em termos de evolução construtiva, até o momento de conclusão da presente pesquisa (julho de 2023) a estrutura já se encontra com sua fundação e caixa de escada e elevador concluídas, e processo de montagem das peças de MLCC. A entrega dos apartamentos está prevista para o final do ano de 2023.



Figura 27: Imagem de divulgação da fachada frontal do Edifício Aurora.

Fonte: Crosslam e da autora (2023).



Figura 28: Imagem de divulgação do interior do apartamento do Edifício Aurora.

Fonte: Crosslam e Tropicália Arquitetura (2023).

A PROBLEMÁTICA DO MERCADO

Como visto, as expectativas para a maior disseminação das estruturas de madeira engenheirada no Brasil, em um futuro próximo, estão relativamente altas. Contudo, entende-se que todas essas movimentações de mercado e indústria, por si só, não pressupõem a real consolidação das tecnologias construtivas em questão. Conforme apresentado nos capítulos anteriores, estas tecnologias constituem-se como altamente revolucionárias na construção civil. Envolvem uma matéria-prima que, apesar de não ser nada nova, possui suas características próprias, distinguindo-se significativamente dos materiais convencionais empregados amplamente na construção. Além do mais, envolvem processos de fabricação e montagem, etapas estas que englobam tecnologias de ponta, capazes de proporcionar precisões bastante altas e cronogramas muito acelerados, não usuais para este setor específico. Conseqüentemente, não se trata simplesmente de substituir a parede de alvenaria ou o pilar de concreto por uma parede de MLCC e um pilar de MLC.

Em um primeiro momento, este pensamento superficial, de uma mera substituição, pode até funcionar. Certamente, quando dimensionada corretamente, a estrutura não irá colapsar. Pode sim, ao longo do tempo, apresentar deteriorações conseqüentes da não adoção de detalhes construtivos apropriados, não atingindo a vida útil esperada para uma edificação. Mas, além do desempenho e durabilidade em si, que, de forma alguma, devem ser menosprezados, a manutenção de uma mentalidade convencional, ao se trabalhar com as estruturas de madeira engenheirada, afeta diretamente sua viabilidade econômica e, conseqüentemente, a disseminação nacional a médio prazo. Após um curto período de emprego inadequado da tecnologia, é possível que muitos passem a considerá-la como inviável financeiramente, suscetível a muitas manutenções, extremamente complexa de se fabricar e montar, ou mesmo concluir que essas edificações de madeira exigem projetos demasiadamente detalhados e possuem muitas restrições, atrapalhando assim o processo criativo de toda a equipe de projetos e mesmo o andamento das obras.

Assim, entende-se que a difusão e consolidação das estruturas de madeira engenheirada no mercado exigem uma mudança de mentalidade do projeto, incluindo desde o projeto arquitetônico, até projetos estruturais, de instalações e todos os demais necessários para a edificação. Exigem, em outras palavras, um pensamento disruptivo por parte daqueles que concebem. Disruptivo não no sentido formal, que busca trazer ao projeto formas arrojadas, até orgânicas talvez, diferentes de tudo aquilo que já foi visto no mundo da arquitetura.

Não. Não se trata da forma em si. Trata-se da mentalidade, do processo, da associação coerente e inteligente de ideias. Ideias estas adequadas à inovação tecnológica com a qual se está trabalhando.

A necessidade de consciência dos projetistas e, especificamente, dos arquitetos, responsáveis pela criação das edificações de madeira engenheirada, para concepção de um projeto adequado à tecnologia industrializada pode, inclusive, ser um gargalo maior do que o contexto, ainda restrito no território nacional, em termos de mercado e indústria. Isso vale tanto para aqueles que estão iniciando sua atuação profissional, quanto para os profissionais mais experientes.

Essa mudança de mentalidade, no entanto, não se concretizará apenas com o conhecimento do produto, ou seja, com o entendimento superficial do que são as tecnologias do MLCC e MLC, quais são seus benefícios, como funcionam seus processos de fabricação e montagem, dentre outras informações já bastante divulgadas por muitas empresas e agentes atuantes neste nicho específico do setor da construção. Estes conhecimentos são muito importantes, naturalmente. No entanto, o pensamento disruptivo aqui mencionado compreende questões que vão muito além.

Nessa lógica, um dos pontos de partida, como discorrido em capítulos anteriores, é a compreensão de que estruturas de madeira engenheiradas consistem em tecnologias intrinsecamente industriais. A forma de enxergar os projetos e todo o processo construtivo das edificações de MLCC e MLC deve migrar de uma mentalidade condicionada à construção tradicional para a percepção de que aquilo que está sendo construído, ou melhor, desenvolvido, é, na verdade, um produto. Dessa forma, inclusive o termo construção é aqui substituído pela díade fabricação e montagem.

Partindo desse pressuposto, a própria concepção dos projetos em si deve levar em consideração essas etapas posteriores, que de fato concretizarão a estrutura, ou seja, projetar para fabricar e montar. Em outras palavras, trata-se justamente da aplicação do conceito de DFMA – *Design For Manufacture and Assembly*.

A adoção do DFMA possibilita trazer ao projeto as necessidades, restrições e características da execução do produto, permitindo àquele que concebe conectar-se com aquilo que é produzido, reduzindo a distância identificada atualmente entre essas duas frentes de atuação, problemática anteriormente exposta em maiores detalhes nos capítulos anteriores. Como já mencionado também, entende-se que, no setor da construção civil, a adoção de métodos convencionais tradicionalmente permite, com maior facilidade, que se estabeleça a desconexão entre as partes, pois a maioria das inconsistências de projeto pode ser solucionada no canteiro de obras. Isto não

ocorre para as estruturas industrializadas de maneira geral, as quais proporcionam processos em que imperam detalhamentos minuciosos prévios e consequentes precisões milimétricas.

Esta reaproximação entre conceito e execução, necessária para o setor manufatureiro e, igualmente, para sistemas construtivos industrializados, pressupõe a retomada da figura do *master builder*, apresentado por Kieran e Timberlake (2004) e Kolarevic (2003). No entanto, não é mais factível, para o mundo contemporâneo no qual se vive, conceber a existência desse papel no sentido original de sua atuação, a qual permeava por todas as atividades necessárias para a execução de uma edificação. Essa atuação demasiadamente ampla é oposta à realidade vivenciada pelo ser humano atualmente, tendo em vista o alto grau de especialização exigido pelo mercado e pelas demandas contemporâneas da sociedade. O *master builder* renascentista, dessa maneira, não se aplica mais à realidade presente e nem é esperado que isso aconteça.

Da mesma forma, não se espera que os profissionais de arquitetura detenham todo o conhecimento ou compreendam todas as premissas necessárias para o correto desenvolvimento de projetos arquitetônicos de edificações estruturadas com tecnologias de madeira engenheirada, aplicando o conceito de DFMA necessário para que se alcance máxima adequação da concepção à execução. Sabe-se que, para adquirir esse *know-how*, necessita-se de alguns anos de contato direto com a tecnologia, não apenas em projeto, mas em todo o entorno desse processo (fábrica, montagem, conclusão da obra etc.). Também é pouco provável que um profissional que nunca tenha projetado edificações com estrutura de madeira engenheirada consiga, em um primeiro momento, se adequar a todas as peculiaridades que envolvem essa tecnologia. Além disso, é de se esperar que esta seja uma tecnologia nova e diferente para a grande maioria dos agentes atuantes em todas as frentes da construção civil, desde a arquitetura, passando pelos demais projetistas, até as equipes de acabamentos que concluem a edificação. É fato que as tecnologias aqui estudadas são revolucionárias e disruptivas tanto globalmente como, e ainda mais, em território nacional. O próprio contato dos profissionais de arquitetura com estruturas industrializadas não é uma prática usual na construção nacional, de modo que, tradicionalmente, estes agentes estão habituados às técnicas convencionais que, até certo ponto, abrem margens para a referida desconexão do desenho ao canteiro.

Contudo, sabe-se também que existe uma relação direta entre o primeiro traço desenhado pelo arquiteto (ou por aquele que concebe a edificação) e os custos de construção, como discorrido intensamente por Mascaró (2006). Isso ocorre para qualquer sistema construtivo. Todavia, tratando-se das estruturas de madeira engenheirada, essa relação direta entre conceito arquitetônico e custo torna-se ainda mais evidente, como será demonstrado ao longo do

desenvolvimento desta pesquisa. Consequentemente, como observado pela presente autora em sua vivência diária na atuação profissional, quando não há aplicação adequada das particularidades envolvendo as tecnologias de MLCC e MLC ainda na concepção do projeto arquitetônico, dificilmente será possível atingir a máxima otimização da forma estrutural a ser projetada, fabricada e montada para a edificação em questão.

O termo “otimizar”, conforme definição do dicionário Houaiss, remete a “tirar o melhor rendimento de (algo), criando as condições mais favoráveis possíveis” (HOUAISS, 2010, p. 566). Assim, por forma estrutural otimizada, entende-se uma estrutura que permite o desenvolvimento do processo construtivo da tecnologia empregada para sua concretização de maneira mais favorável, conveniente ou mesmo ideal. Ou seja, possibilita maior racionalização deste processo, considerando, além das macro etapas de fabricação e montagem, também o próprio desempenho estrutural em si. Em outras palavras, é aquela estrutura condizente às suas próprias características, que emprega de forma mais inteligente e eficaz os recursos, sejam eles naturais, como a matéria-prima, ou industriais, a exemplo do maquinário, e até mesmo humanos, incluindo o próprio tempo dos profissionais envolvidos para sua consolidação.

Em resumo, a forma estrutural otimizada resulta de um projeto concebido com aplicação do conceito de DFMA desde o primeiro traço. Em contrapartida, quando isso não ocorre, uma das consequências mais perceptíveis do projeto desalinhado às premissas básicas da tecnologia construtiva empregada é o aumento no custo final da estrutura. Assim, a otimização da forma estrutural aqui será compreendida como um conceito intrinsecamente relacionado à viabilidade econômica. Além disso, entende-se que a racionalização do processo construtivo também está totalmente atrelada aos conceitos de sustentabilidade.

A DEFINIÇÃO DA PESQUISA

Tendo em vista o exposto, o presente trabalho pretende, justamente, contribuir para a resolução desta problemática, propiciando aos profissionais da construção a oportunidade de conceber estruturas de madeira engenheirada orientadas ao DFMA, visando a racionalização do processo construtivo e embasando as decisões arquitetônicas e projetuais em premissas reais, que possam servir de auxílio para os traçados iniciais do projeto. Assim, busca-se identificar e organizar, de forma clara e acessível a todos, essas premissas que permitirão àqueles que não detém longas experiências de trabalho com a tecnologia, a aplicação do DFMA desde os primeiros traços do

projeto arquitetônico. Estas informações, servirão, assim, como balizadores a arquitetos, engenheiros e *designers* na etapa de concepção da edificação.

Por isso, nos próximos capítulos, será aprofundado esse processo construtivo, de modo a identificar os fatores de relação entre sua racionalização e o projeto arquitetônico, além das implicações desta maior ou menor adequação de um ao outro na precificação da estrutura.

Contudo, sabe-se que a absorção de todas essas particularidades e variáveis inerentes à tecnologia construtiva em estudo, como mencionado, exige algum tempo, às vezes até anos, de contato intenso com todo esse contexto. Naturalmente, é um processo complexo para a mente humana realizar de forma rápida. Pode-se traçar a mesma analogia ao *master builder* renascentista, que necessita de um longo período atuando como aprendiz para só então, tornar-se a figura que permeia por todas as frentes de atuação.

Em contrapartida, atualmente, vive-se em uma sociedade cercada por tecnologias digitais, incluindo aquelas com inteligência artificial, inclusive. Nesse cenário, é possível, assim, a criação do *master builder* digital, que utilizará destas ferramentas para reter e aplicar conhecimentos de outras áreas de atuação que não a sua especialidade principal. Dessa forma, entende-se aqui que a maneira mais adequada para disponibilizar os resultados a serem alcançados, ou seja, as premissas para concepção do projeto arquitetônico de uma estrutura de madeira engenheirada orientado à racionalização do processo construtivo, seria por meio de uma ferramenta de modelagem digital que pudesse assessorar e auxiliar a criação de modelos conceituais das edificações em questão.

Reitera-se, contudo, que este estudo não adentrará em especificidades que competem a outras áreas profissionais. Sendo assim, não faz parte do escopo desta pesquisa desenvolver códigos em linguagem de programação para viabilizar de maneira prática esse cenário proposto. Por esse motivo, foram traçadas diretrizes que orientam o planejamento de um *plugin*, que será apresentado na forma de um fluxograma, de modo a permitir sua futura tradução por um profissional especializado.

Para viabilizar a concepção deste cenário ideal para desenvolvimento dos conceitos iniciais do projeto no período desta tese de doutorado, fez-se necessário realizar um recorte temático das tipologias de edificações a serem consideradas. Assim, quanto ao uso, tendo em vista o contexto brasileiro no qual predominam edificações de uso residencial, optou-se por restringir o recorte a edificações de uso residencial, de modo a tornar este trabalho de fato aplicável no cenário estritamente atual, sem divagar sobre tipologias de estruturas que ainda não são usuais no país.

O objetivo é, assim, auxiliar a concepção das edificações que estão sendo concebidas e executadas no momento presente. Seguindo a mesma lógica, no que diz respeito ao gabarito da estrutura, o recorte realizado contemplará aquelas com até dois pavimentos, compostas por térreo e pavimento superior.

Por fim, levando em consideração as diversas opções de configuração estrutural possíveis para as tecnologias do MLCC e MLC, deve-se também, pensar em um recorte temático para essas variações. O sistema estrutural a ser adotado para o desenvolvimento do trabalho será o panelizado, segundo definição apresentada por Salvadori (2021). Ou seja, consistem naquelas estruturas formadas por painéis de MLCC com função estrutural, que podem atuar como vedações autoportantes, lajes de piso ou cobertura. Nessa categoria, é possível encontrar exemplares compostos integralmente por vedações estruturais de MLCC, assim como edificação nas quais as vedações externas são compostas por painéis de MLCC estruturais, atuando em conjunto com uma configuração interna composta por pilares e vigas, de modo a garantir maior flexibilidade à disposição interna dos ambientes. As lajes, para todos os casos, configuram-se por painéis de MLCC. Os elementos lineares, por sua vez, poderiam ser tanto de madeira, ou seja, MLC, quanto metálicos. Para o desenvolvimento do produto específico proposto nesta pesquisa, estes serão, contudo, considerados apenas como vigas ou pilares de MLC.

A justificativa para essa escolha não se origina da solução estrutural em si, pois a associação de elementos metálicos às estruturas de madeira pode trazer diversos benefícios em diferentes contextos, sendo esta uma das tendências para as estruturas híbridas como observado no capítulo anterior. Porém, os elementos construtivos metálicos, usualmente, são produzidos a partir de perfis disponíveis no mercado e que possuem dimensões e pesos padronizados. Por esse motivo, possuem uma lógica de fabricação específica e características próprias no que diz respeito à sua matéria-prima e a seu desempenho, que os diferenciam bastante das estruturas de madeira engenheirada objeto deste estudo. Desse modo, a inclusão de elementos metálicos como possível solução estrutural para o recorte temático estabelecido, tornaria este trabalho extremamente complexo e inviável de execução no tempo pré-determinado. Isso não minimiza, no entanto, a importância destes elementos, os quais devem ser considerados como opções viáveis para atuar como vigas ou pilares.

Assim, em resumo, os resultados a serem alcançados neste trabalho enquadram-se para edificações residenciais com até dois pavimentos com configuração estrutural panelizada, composta por painéis de MLCC atuando como vedações autoportantes, lajes de piso ou lajes de cobertura, associadas, eventualmente, a vigas e pilares, que podem ser tanto de MLC quanto

metálicos. Para essas tipologias construtivas intenciona-se que seja alcançada máxima racionalização em seus projetos arquitetônicos, de modo a empregar os elementos estruturais da forma mais apropriada e alinhada ao seu processo construtivo, aplicando a lógica do projeto para fabricar e montar (DFMA) e, conseqüentemente, resultando em uma edificação com maior viabilidade econômica potencial.

Em um contexto nacional marcado pela busca por consolidação e disseminação das estruturas de maneira engenheirada, pressupõe-se que atingir viabilidade financeira potencial deve ser um dos principais objetivos deste nicho de mercado. Depreende-se, que, sem a comprovação de que estas soluções estruturais, além de todos os seus benefícios ambientais e sociais já mencionados no capítulo anterior, são de fato viáveis economicamente, sua disseminação será mais lenta e árdua. Portanto, não é factível esperar que apenas a implementação de novas indústrias irá revolucionar o mercado. Enquanto não houver a mudança de mentalidade daqueles que compram, concebem, e constroem essas edificações, passando a compreender as necessidades e as razões para se buscar a otimização das estruturas, não haverá revolução. Assim, entende-se que o presente trabalho poderá atuar no início dessa transformação, ou seja, dessa mudança de mentalidade exigida para a real consolidação das tecnologias estudadas, a qual passa, necessariamente pela concepção do projeto arquitetônico orientada à racionalização do processo construtivo. Em outras palavras, orientada ao DFMA.

03

DESENVOLVIMENTO

A terceira parte da tese, baseada no método de estudos de caso, inicia-se com o estudo do processo construtivo das estruturas de madeira engenheirada, inicialmente de forma mais ampla e, em seguida, aprofundando-se em etapas específicas de maior interesse para o trabalho. Na sequência, são realizados estudos de orçamentos e de dois casos de estruturas construídas. As discussões, reflexões e conclusões apresentadas nos próximos capítulos serão a base para a fundamentação teórica do *plugin* planejado como produto final da pesquisa, cuja proposição exige conhecimentos profundos acerca da tecnologia em questão, os quais serão justamente abordados a seguir.

3.1. ESTUDO DO PROCESSO CONSTRUTIVO

Como mencionado anteriormente, a estrutura otimizada é aqui compreendida como “a estrutura que possibilita a maior racionalização do processo construtivo da tecnologia empregada para sua concretização”. Resulta do conceito arquitetônico que emprega os elementos estruturais da forma mais apropriada possível, aplicando a lógica do projeto para fabricar e montar (DFMA).

Alguns autores consideram que o processo construtivo de uma estrutura industrializada 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).

Lotufo Oliveira (2018), em sua dissertação de Mestrado, abordou particularmente o processo construtivo de edificações de MLCC no Brasil, pontuando que este pode ser dividido em três macro etapas: matéria-prima, fabricação dos painéis e montagem da edificação. Cada uma possui suas próprias etapas internas. A matéria-prima diz respeito, principalmente, aos tratamentos preservativos que podem ser impregnados nas lamelas de madeira, em um momento anterior à sua aquisição pelo fabricante. A fabricação, por sua vez, engloba todas as etapas que ocorrem dentro da fábrica, visando a transformação dessas lamelas brutas, sejam elas tratadas ou não, em painéis acabados. A montagem do edifício inclui a logística, ou seja, o transporte dos elementos construtivos até o local da obra, assim como a movimentação e conexão das peças, a execução das instalações hidráulicas e elétricas e a instalação dos acabamentos finais.

Na presente pesquisa, este processo construtivo foi adequado, de modo a se acomodar ao recorte temático estabelecido pelo trabalho. Assim, deverá incluir tanto painéis de MLCC quanto vigas e pilares de MLC. Da mesma maneira, englobará apenas as etapas necessárias para a conclusão da estrutura de madeira engenheirada panelizada, sem discorrer sobre as etapas posteriores, necessárias para a conclusão da edificação. Ou seja, o resultado do processo construtivo apresentado a seguir será o esqueleto estrutural da edificação, também denominado aqui apenas por estrutura de madeira engenheirada (Figura 29). Esta será composta majoritariamente por elementos construtivos de MLCC, atuando como vedações estruturais externas, lajes de piso ou cobertura e eventuais vedações estruturais internas, além de elementos de MLC empregados como pilares ou vigas.

Figura 29: Residência localizada na cidade de Valinhos (SP) após a montagem do esqueleto estrutural.

Fonte: da autora (2018).



Figura 30: Residência localizada na cidade de Valinhos (SP) praticamente finalizada.

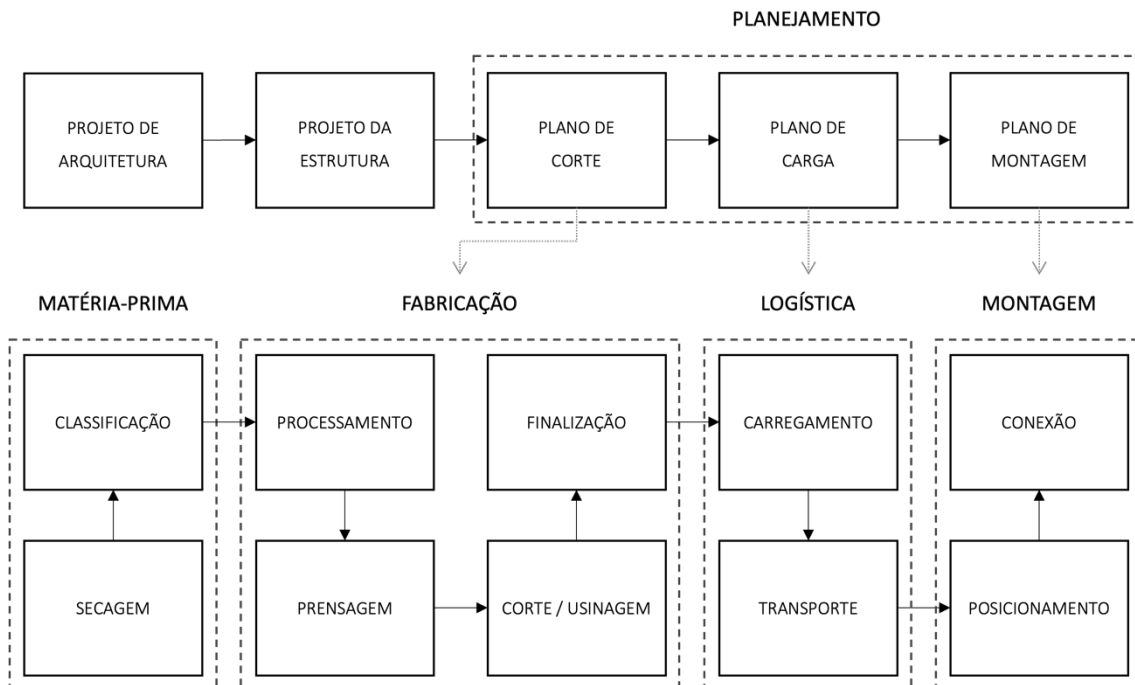
Fonte: da autora (2018).



Ao final deste processo, para que de fato seja concluída a edificação, serão necessárias outras fases construtivas, como: execução de revestimentos ou acabamentos externos e internos; instalações prediais (elétricas, hidráulicas, dentre outras); instalação de esquadrias e de portas internas; impermeabilização; arremates e demais itens especificados no projeto da edificação. Dessa forma, a edificação é aqui compreendida como o resultado da associação de todos os elementos e componentes construtivos que a compõe, incluindo a estrutura de madeira engenheirada e demais itens mencionados (Figura 30).

O processo construtivo desta estrutura de madeira também evoluiu em relação àquele proposto por Lotufo Oliveira (2018). Aqui, sua estruturação será dividida em cinco macro etapas, de forma semelhante às referências bibliográficas mencionadas. São elas: (i) planejamento; (ii) matéria-prima; (iii) fabricação; (iv) logística e (v) montagem. Cada uma destas macro etapas, por sua vez, divide-se em demais etapas, conforme apresentado no esquema a seguir (Figura 31).

Figura 31: Diagrama ilustrando o desenrolar do processo construtivo das estruturas de madeira engenheirada conforme proposto pela presente pesquisa.



Fonte: da autora (2023).

De maneira geral, as quatro últimas macro etapas deste processo construtivo podem ser resumidas em dez etapas contemplando atividades práticas, as quais tem como ponto de partida a macro etapa inicial de planejamento, que apresenta três atividades necessárias para o desenrolar das demais e baseia-se no projeto de arquitetura. Esta, contudo, é uma visão bastante generalizada e resumida de toda a cadeia que envolve as estruturas de madeira engenheirada. No entanto, faz-se necessária essa compreensão global do processo de modo a apreender as minúcias de determinadas etapas que possuem relações diretas com o projeto arquitetônico e, naturalmente, com a otimização da estrutura. Assim, estas cinco macro etapas serão apresentadas a seguir de forma sucinta, visando contextualizar a formação da estrutura panelizada. No capítulo seguinte, algumas destas serão apresentadas e discutidas em maiores detalhes, com enfoque nas suas relações com o projeto arquitetônico.

A SÍNTESE DO PROCESSO

A macro etapa matéria-prima, apesar de não ser incluída no processo construtivo de outros sistemas estruturais industrializados, deve ser considerada como de fundamental importância em se tratando de estruturas de madeira engenheirada. Isso porque a própria escolha da espécie a ser empregada na produção é algo que pode gerar impactos no processo construtivo como um todo.

Atualmente, no Brasil, é possível a produção de painéis de MLCC e elementos de MLC utilizando-se tanto o pinus quanto o eucalipto. O uso do eucalipto, ainda que já fosse uma prática usual na produção de MLC, passou a ser uma opção viável para a fabricação de painéis de MLCC apenas a partir de 2021. Em relação ao emprego do pinus, esta opção permite a aquisição de lamelas previamente impregnadas com tratamento preservativo, visando prevenir o ataque de organismos deterioradores, como fungos ou insetos.

A primeira etapa relacionada à matéria-prima consiste na secagem das lamelas brutas de madeira, adquiridas com dimensões determinadas pelos fornecedores da matéria-prima. Esta secagem se dá em estufa e almeja atingir umidade da madeira de $(12 \pm 2) \%$, a qual se faz necessária para a colagem apropriada das lamelas de madeira entre si e posterior desempenho adequado do elemento construtivo ao longo de sua vida útil na edificação. Em seguida, para qualquer uma das duas espécies, após atingirem a umidade adequada, as lamelas brutas passam por uma etapa de classificação. Esta inclui triagem visual e classificação mecânica da matéria-

prima, e visa categorizá-la nas classes de resistência da madeira, pré-determinadas por normatizações nacionais e internacionais.

A macro etapa da fabricação, tanto para painéis de MLCC quanto elementos de MLC, inicia-se com o processamento das lamelas brutas, as quais são emendadas com ligações do tipo *finger joints* (Figura 32). As lamelas emendadas, após atingirem o comprimento necessário para o elemento de MLC ou uso em camadas transversais ou longitudinais do MLCC, são, na sequência, aplainadas de modo a garantir a planicidade da superfície e uniformidade dimensional. Essas lamelas apresentam espessuras variando de 19 a 40 mm, conforme definido no Projeto da Estrutura. O comprimento pode chegar a 30,00 m para MLC; 14,50 m para camadas longitudinais de MLCC ou 3,00 m se utilizadas em camadas transversais de painéis de MLCC.

Para a prensagem do MLCC, as lamelas aplainadas são dispostas na prensa lado a lado e orientadas em uma mesma direção, até se obter o comprimento ou a largura desejada. Vale acrescentar que o painel formado por camadas externas paralelas ao comprimento da prensa é denominado por longitudinal. Já para aquele que resulta de camadas externas alinhadas à largura da prensa dá-se o nome de transversal. Aplica-se então, de forma automatizada, o adesivo estrutural sobre a superfície da primeira camada de lamelas (Figura 33), posicionando-se em seguida uma nova camada acima e com orientação perpendicular à camada subjacente. Na produção do fabricante estudado são utilizadas duas prensas a vácuo. A primeira possui dimensão total de 3,00 m de largura por 12,00 m e a segunda apresenta mesma largura com 14,50 m de comprimento. Consequentemente, os painéis confeccionados podem atingir dimensões brutas de, no máximo, 12,00 m x 3,00 m ou 14,50 m x 3,00 m. No entanto, a dimensão útil desse painel, após a etapa de corte e usinagem passará a ser 11,95 m x 2,95 m ou 14,40 m x 2,95 m. A espessura dos painéis varia de acordo com a configuração de camadas e espessura das lamelas utilizadas.

Para a confecção de elementos de MLC, as lamelas emendadas e aplainadas são posicionadas umas sobre as outras, com suas fibras dispostas de forma paralela entre si e coladas por meio do adesivo estrutural. Na sequência, as peças são prensadas, sendo que usualmente são utilizadas braçadeiras ou pistões hidráulicos.

Em seguida, passa-se para o corte e a usinagem dos elementos estruturais. Nesta etapa, executa-se tanto o corte dos elementos brutos para confecção das peças em suas dimensões finais, quanto usinagens para instalações prediais. Consequentemente, neste momento, são realizadas também as aberturas de portas e janelas, canaletas de passagem de eletrodutos e outras furações ou rasgos necessários para demais instalações.

Figura 32: Lamelas de madeira após execução do corte para as emendas dentadas.

Fonte: Crosslam (2021).



Figura 33: Etapa de prensagem dos painéis de MLCC, durante aplicação automática do adesivo estrutural acima de camada de lamelas dispostas na longitudinal.

Fonte: da autora (2017).



Tais operações são realizadas em uma fresadora de cinco eixos (Figura 34) ou em um braço robótico de sete eixos, ambos com CNC, por meio de fabricação subtrativa. Para isso, o modelo tridimensional da peça a ser cortada e usinada é exportado para um *software* de pós-processamento. Este irá traduzir sua geometria para um código computacional que descreve as instruções transmitidas à fresadora ou ao braço robótico, de modo a controlar seus movimentos, sua velocidade, as ferramentas utilizadas, dentre outros parâmetros. Por fim, a macro etapa de fabricação é concluída com a finalização das peças estruturais devidamente cortadas e usinadas. Neste momento, aplicam-se determinados produtos de acabamento na superfície dos elementos construtivos para sua proteção durante o período da montagem.

A macro etapa de logística inicia-se com as peças finalizadas e engloba o carregamento e transporte dos elementos construtivos até o local da obra. Esta etapa possui grande influência em todas as etapas seguintes, tendo em vista que pressupõe planejar a quantidade de cargas, organizar o cronograma para o número total de viagens necessárias, além de prever a disposição das peças nos veículos de transporte tanto durante o carregamento em fábrica quanto no posterior descarregamento no canteiro, a partir das condições e estratégias de montagem analisadas previamente. O transporte entre fábrica e canteiro pode ocorrer de diversas formas, de acordo com a quantidade e tamanho das peças que serão enviadas e levando-se em consideração o acesso ao canteiro de obras. Isso ocorre, pois, veículos de grandes dimensões, muitas vezes, apresentam maior dificuldade de locomoção em vias não pavimentadas, muito íngremes ou mesmo com curvas sinuosas.

Na macro etapa de montagem são utilizados equipamentos com sistema hidráulico ou mecânico, a exemplo de guias, guindastes ou guindautos para a movimentação e posicionamento das peças no local de montagem (Figura 35). Essa prática se deve às grandes dimensões e ao elevado peso dos elementos construtivos. Porém, em situações nas quais não é possível o acesso de equipamentos de grande porte, pode-se adotar equipamentos menores, como empilhadeiras ou mesmo realizar a movimentação das peças apenas com operários. Por fim, após o posicionamento dos elementos construtivos nos locais corretos, estes são fixados entre si, ou nos demais sistemas do edifício, como lajes de concreto, vigas metálicas, dentre outros, por meio de parafusos autoperfurantes ou conectores metálicos.

Na macro etapa de planejamento realizam-se o Plano de Corte, que define a execução dos cortes e usinagens dos painéis de MLCC ou elementos de MLC, o Plano de Carga, que orienta o carregamento e transporte das peças e o Plano de Montagem, que direciona a movimentação e posicionamento destas para configurar a estrutura.

Figura 34:
Usinagem de um
painel de MLCC por
meio da fresadora
CNC com 5 eixos.

Fonte: da autora
(2021).



Figura 35:
Posicionamento de
um painel de MLCC
com o auxílio de um
caminhão *munck*.

Fonte: da autora
(2017).



O ponto de partida da macro etapa de planejamento consiste no Projeto da Estrutura. Esse, por sua vez, é elaborado com base no Projeto de Arquitetura, fornecido logo no início pelo arquiteto, engenheiro, *designer* ou projetista responsável pela concepção da edificação. A princípio, o Projeto de Arquitetura pode ser entregue de diversas maneiras, que vão desde desenhos bidimensionais não editáveis até modelos tridimensionais com grande quantidade de informações e altamente complexos. Já o Projeto da Estrutura é desenvolvido em um *software* de modelagem tridimensional, por meio da equipe de projetos do fabricante ou escritórios de projeto especializados em estruturas de madeira engenheirada.

Quando realizado pela equipe de projetos do próprio fabricante, o Projeto da Estrutura desenvolve-se em três fases. Inicialmente, na primeira fase, após análise do Projeto de Arquitetura, é proposta uma solução estrutural que atenda às demandas do conceito arquitetônico e alcance maior eficácia possível para a estrutura, por meio de um modelo tridimensional conceitual. Assim, avalia-se a viabilidade de adoção de painéis de MLCC para vedações com ou sem função estrutural, lajes de piso ou cobertura, assim como de pilares ou vigas de MLC. Neste momento, verifica-se, inclusive, a necessidade de se adotar outros tipos de estruturas, como estrutura metálica auxiliar ou elementos de concreto, que podem ter atuação secundária ou principal.

Nesse modelo estrutural conceitual são realizados, também, determinados ajustes e adaptações no Projeto de Arquitetura, de modo a atender às características da matéria-prima, aos padrões de fabricação, premissas de logística e montagem e características próprias da edificação. Assim, para peças estruturais de MLCC com tamanhos que ultrapassam as dimensões máximas úteis de fabricação, como lajes com mais de 3,00 m de largura, por exemplo, são modeladas peças distintas que serão conectadas durante a montagem da estrutura, para configurar a laje de maior dimensão. O mesmo ocorre com elementos de MLC.

Aprovado o modelo conceitual, realiza-se, em seguida, uma análise estrutural minuciosa, para que os elementos sejam dimensionados corretamente, com base em diretrizes normativas, na localização da obra e no uso da edificação. Posteriormente, a última fase do Projeto da Estrutura ocorre após conclusão de todos os projetos executivos da edificação, incluindo o Arquitetônico, de fundação, elétrico, hidráulico, ar-condicionado, luminotécnico, dentre outros que se fizerem necessários. Assim, o modelo estrutural final, após análise de todos os demais projetos desenvolvidos para a edificação, irá contemplar as usinagens, rasgos, rebaixos e furações por eles solicitados. Este modelo também englobará conectores, parafusos e outros itens necessários para a montagem dos elementos e para sua estabilidade estrutural.

Para melhor compreensão e clareza das fases seguintes ao Projeto da Estrutura, vale aqui distinguir os termos “painel de MLCC” e “elemento construtivo de MLCC” ou “peça estrutural”. O primeiro será utilizado para os painéis de grandes dimensões resultado da prensagem das lamelas de madeira. Desses painéis, são cortados os elementos construtivos ou peças de MLCC de menores dimensões, que irão compor a edificação, ou seja, as vedações, as lajes, os pilares, dentre outros.

Assim, no modelo estrutural final, todos os elementos construtivos de MLCC ou MLC a serem utilizados na edificação são nomeados e identificados. Em seguida, após conclusão e validação da fase de projeto, para iniciar de fato a macro etapa de fabricação, inicia-se a etapa aqui denominada como Planejamento, a qual inclui os planos de corte, transporte e montagem, mencionados anteriormente.

Para isso, tratando-se de pilares ou vigas de MLC, após sua identificação no modelo estrutural final, esses são inicialmente distribuídos em elementos maiores para confecção (Figura 36). Duas vigas com mesmas larguras e alturas, mas comprimentos de 6,00 m e 3,00 m, por exemplo, podem, assim, ser retiradas de um mesmo elemento a ser fabricado com dimensão total de 9,00 m.

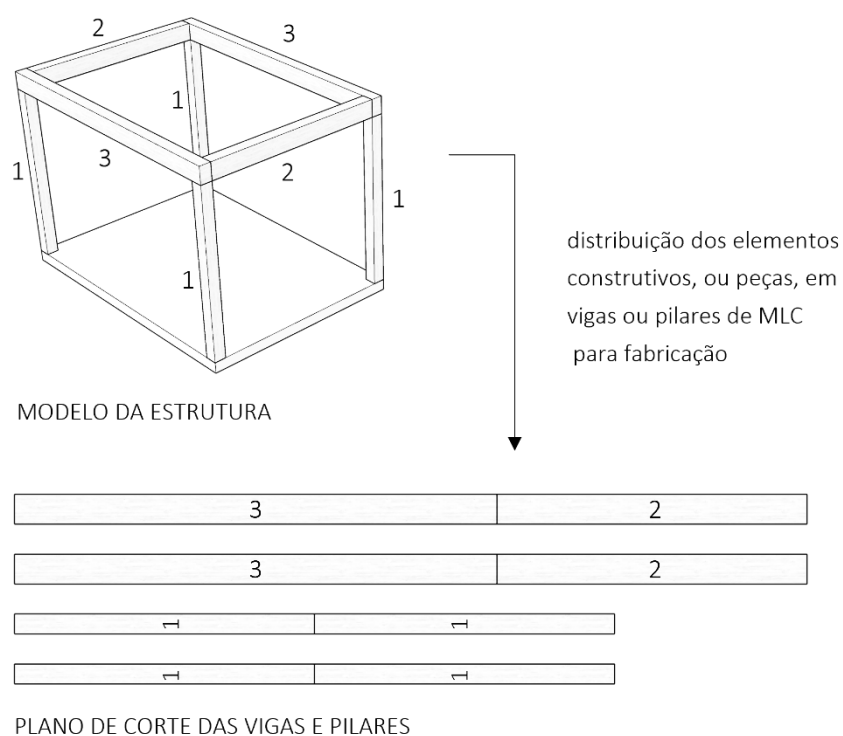


Figura 36: Esquema ilustrando o planejamento do corte de pilares e vigas de MLC.

Fonte: da autora (2023).

Já no caso das peças de MLCC, essas igualmente devem ser distribuídas em painéis de grandes dimensões a serem fabricados, buscando-se maior economia e menor desperdício de material (Figura 37). Dessa forma, como mencionado, de um único painel, é possível obter diversos elementos menores que irão configurar o edifício.

Esse processo, em ambos os casos, é denominado de Plano de Corte e será utilizado posteriormente na execução dos cortes e usinagens do painel ou dos elementos de MLC. Para isso, o modelo tridimensional é utilizado de maneira direta, tendo em vista que o modelo individual de cada peça estrutural, já com as usinagens, rasgos ou furos modelados, é exportado para o *software* de pós processamento do equipamento de corte e usinagem com CNC, o qual irá identificar a geometria do elemento virtual e programar os movimentos necessários para transformá-lo em uma peça real.

Na sequência, essas mesmas peças retiradas do modelo estrutural final também serão utilizadas para elaboração do Plano de Carga e Plano de Montagem, os quais estão diretamente relacionados.

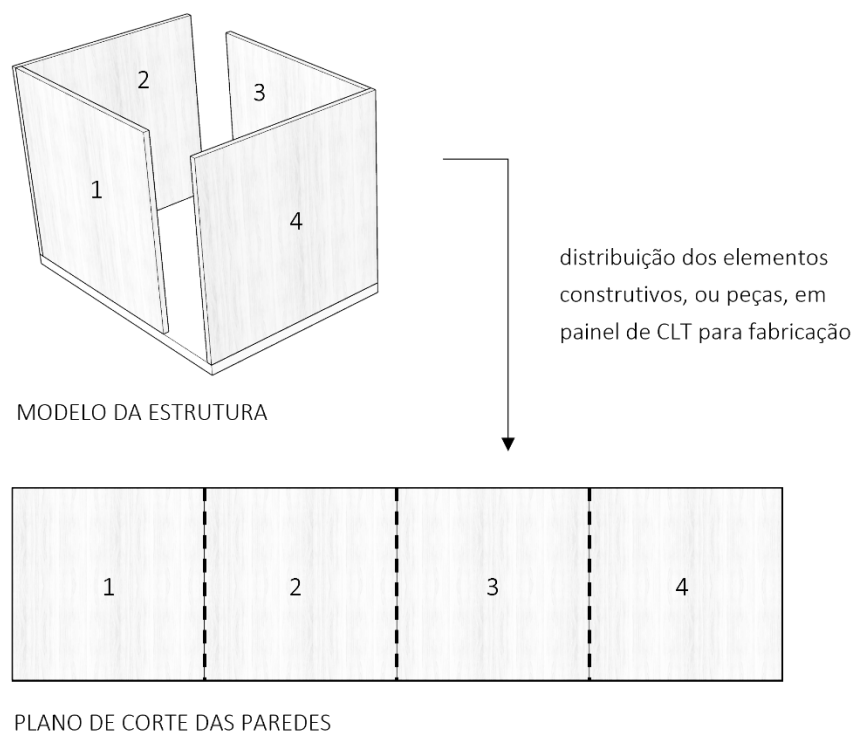


Figura 37: Esquema ilustrando o planejamento do corte de paredes de MLCC.

Fonte: da autora (2023).

Ambos devem ser definidos buscando racionalizar a logística e as atividades dos funcionários durante a montagem. Devem, além disso, transmitir as definições e os planejamentos aos funcionários responsáveis pela execução das atividades de carregamento em fábrica e posicionamento das peças no canteiro.

Para isso, define-se inicialmente a própria sequência de montagem, tendo em vista a facilidade de acesso, a quantidade e tamanho das peças que compõem a edificação, a possibilidade de armazenamento dessas no canteiro de obras e os equipamentos que serão utilizados na montagem. Vale, aqui, apontar que este armazenamento é realizado posicionando-se as peças umas sobre as outras, de modo a criar pilhas de MLCC ou MLC.

Levando-se em consideração esses mesmos fatores, posteriormente, é decidida a disposição das peças estruturais no veículo de transporte, a qual estará também associada à sequência de montagem, além de outros aspectos igualmente importantes, a exemplo das próprias dimensões dos elementos construtivos. Assim, idealmente, a posição destes no veículo de transporte é exatamente a mesma da sequência de montagem. Ou seja, a primeira peça a ser montada será a primeira a ser posicionada na obra, localizando-se abaixo de todas as outras no frete. Por outro lado, a última peça a ser movimentada na obra será a última a ser colocada no frete, localizando-se no topo da pilha. Contudo, como mencionado, o encadeamento da montagem, por si só, não é o único fator determinante para a definição da sequência de carregamento. É necessário também, verificar as melhores disposições das peças no frete, de modo a otimizar o transporte e garantir a estabilidade da pilha de elementos transportados.

Percebe-se, portanto, a relação direta entre todas as etapas desse processo, em especial naquelas que envolvem o planejamento das atividades. Estas últimas, por sua vez, claramente, não podem ser definidas de forma isolada, tendo em vista as implicações das decisões tomadas em determinado momento nas etapas seguintes ou subsequentes. Dado, ainda, que todo esse processo nasce do Projeto de Arquitetura constata-se que, sua racionalização, dessa forma, é consequência direta do desenho arquitetônico. Daí a necessidade real do arquiteto projetista ter conhecimento de todo o processo para a concepção do projeto.

Algumas etapas específicas, contudo, são afetadas de maneira mais intensa pelas escolhas projetuais. Por esse motivo, no capítulo a seguir, serão aprofundadas e detalhadas essas relações que ocorrem em momentos mais pontuais do processo construtivo geral.

3.2. ESTUDO DA RACIONALIZAÇÃO DO PROCESSO

A concepção de uma edificação, ou seja, de uma forma arquitetônica, está intrinsicamente relacionada com a concepção de sua estrutura. Como apresenta Yopanan Rebello, a forma e a estrutura são itens que nascem juntos, um como consequência direta do outro.

Conceber uma estrutura é ter consciência da possibilidade da sua existência; é perceber a sua relação com o espaço gerado; é perceber o sistema ou sistemas capazes de transmitir as cargas ao solo da forma mais natural; é identificar os materiais que de maneira mais adequada se adaptam a esses sistemas. (...) Na verdade, a concepção de uma forma implica na concepção de uma estrutura e, em consequência, dos materiais e processos para materializá-la. (REBELLO, 2007, p. 26)

Logo, o autor parte do pressuposto de que quem cria a forma, cria também a estrutura. Assim, imaginar que a estrutura deve ser concebida pelo profissional engenheiro pode ser um grande engano. Enquanto a concepção estrutural nasce naturalmente do projeto arquitetônico, o dimensionamento estrutural deve existir como forma de comprovar e corrigir o que se intuiu inicialmente. Nesse sentido, quando aquele que concebe a forma inicial – isto é, o arquiteto – não se preocupa com sua estabilidade estrutural, delegando tal função a outro profissional, é possível que ocorra a desconfiguração do conceito arquitetônico, para torná-lo estruturalmente exequível.

Inclusive, entende-se que a forma pode ser considerada mais importante do que a própria resistência do material que irá configurá-la, de modo que haverá um maior proveito do material quando sua forma for projetada de maneira apropriada ao vão e ao carregamento a que estiver submetida. Consequentemente, como também aponta Yopanan Rebello, “se a concepção da estrutura parte do tipo de material disponível no local, o sistema estrutural a ser adotado deverá desenvolver esforços que sejam compatíveis com ele” (REBELLO, 2007, p. 210).

Partindo da ideia apresentada pelo autor, pressupõe-se que, ao se conceber uma edificação a ser construída com painéis de MLCC e elementos de MLC, deve-se projetar a forma e o conceito estrutural – entendendo este como consequência direta da primeira – de maneira compatível ao material escolhido (MLCC e MLC).

Tendo em vista o acima exposto, deduz-se que a concepção arquitetônica deste tipo de edificação em questão deve pressupor, como ponto de partida, a compreensão do comportamento

estrutural dos elementos construtivos. Sendo assim, cabe aqui uma breve explanação dos elementos de MLCC e MLC sob a óptica da engenharia estrutural.

Ressalta-se, contudo, que não se pretende apresentar conceitos aprofundados de dimensionamento nem detalhar pormenores do cálculo estrutural de uma estrutura de madeira engenheirada. A intenção é, tão somente, transmitir ao profissional arquiteto uma visão geral de como estas estruturas se comportam e funcionam, pois, sem tal compreensão, a racionalização almejada torna-se prejudicada. Como mencionado, a concepção estrutural, que surge a partir da idealização da forma, não deve ser delegada a profissionais terceiros, e sim nascer da arquitetura.

Inicialmente, deve-se compreender os elementos individualmente, ou seja, como eles funcionam e se comportam de maneira isolada. Para isso, primeiramente, vale mencionar que a madeira é um material anisotrópico, isto é, que apresenta propriedades bastante diferentes entre suas direções. Sua formação se dá por meio de fibras que se desenvolvem ao longo de uma direção predominante (Figura 38). Assim, esforços de tração e de compressão são bem absorvidos quando atuam na direção paralela a essas fibras. O mesmo, contudo, não ocorre quando a aplicação dos esforços é na direção normal às fibras. No caso da tração especificamente, a

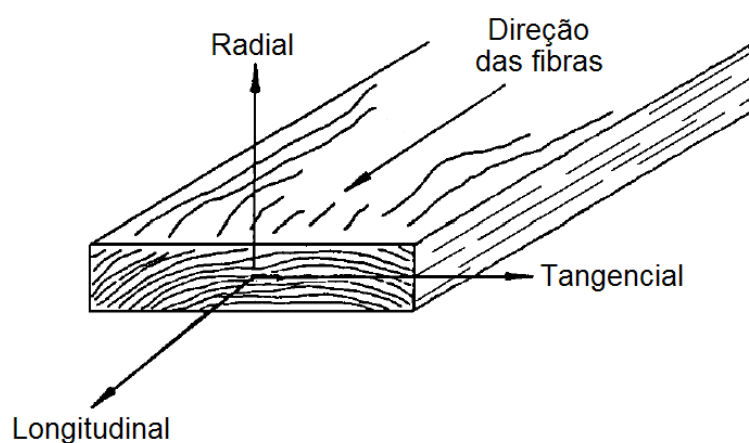


Figura 38:
Representação da
direção das fibras
da madeira.

Fonte: adaptado de
Green *et al* (1999).

resistência da matéria-prima a este esforço quando aplicado na direção contrária a suas fibras pode ser, inclusive, considerada desprezível (REBELLO, 2007).

Como mencionado anteriormente, elementos de MLC decorrem da colagem de lamelas em uma única direção, com o posicionamento de suas fibras de forma paralela entre si, configurando elementos lineares. Assim, estes consistem em barras, as quais, conforme define Rebello (2007), possuem uma de suas dimensões (comprimento) predominante em relação às outras duas (largura e altura). Portanto, podem atuar como pilares, quando a transmissão da carga ocorre na vertical, ou como vigas, quando trabalham vencendo um vão, de modo que a transmissão das cargas se dá no sentido horizontal (Figura 39).

Os painéis de MLCC, por sua vez, configuram-se pela colagem de lamelas em ambas as direções. Formam-se, então, elementos que transmitem cargas de forma bidimensional. Dessa maneira, painéis de MLCC podem ser classificados como placas, segundo definição mencionada por Rebello (2007), já que duas de suas dimensões (largura e comprimento) prevalecem em relação à terceira (espessura), além de apresentarem maior rigidez e conseqüente capacidade de vencer vãos,

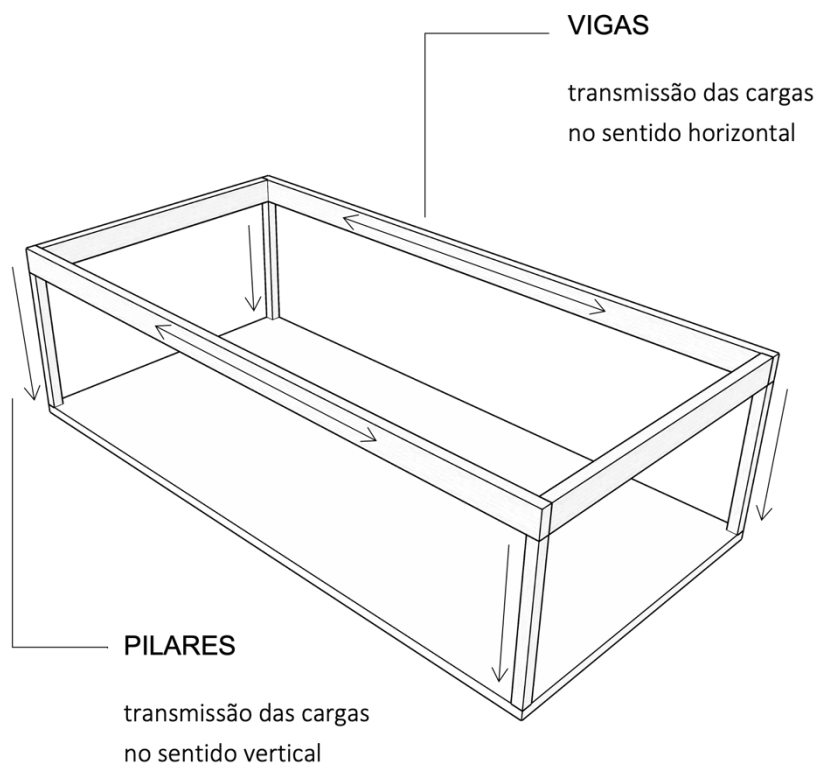


Figura 39: Esquema de configuração estrutural fictícia representando o comportamento estrutural de elementos de MLC.

Fonte: da autora (2023).

ao suportarem cargas transversais aplicadas em seu plano. Consequentemente, podem atuar como lajes, de piso ou de cobertura, ou como vedações estruturais, internas ou externas.

Apesar do cruzamento das camadas para configurar o MLCC permitir a transmissão das cargas em ambas as direções, isto é, tanto na largura quanto no comprimento dos painéis, essa configuração cruzada acarreta a predominância de uma das direções. Dessa forma, a direção principal para a transmissão dos esforços de flexão é aquela paralela à camada externa, isto é, aos veios da madeira. Também existe uma direção secundária para a transmissão dos esforços, que será perpendicular à primeira (Figura 40). Consequentemente, nas camadas aonde o veio da madeira é perpendicular aos esforços de flexão, pode ser utilizada matéria-prima com propriedades inferiores (WOODARD; JONES, 2020). Este tema será melhor detalhado mais à frente.

Portanto, no caso de lajes, considera-se o sentido longitudinal como o principal e o transversal como o secundário. Consequentemente, por trabalharem na longitudinal, as lajes devem possuir seus apoios posicionados de forma transversal ao sentido das lamelas, sendo que podem vencer um vão simples ou vãos contínuos (WOODARD; JONES, 2020). Vale ressaltar, contudo, que peças vencendo vãos contínuos tendem a ser mais eficientes, resultando em espessuras menores.

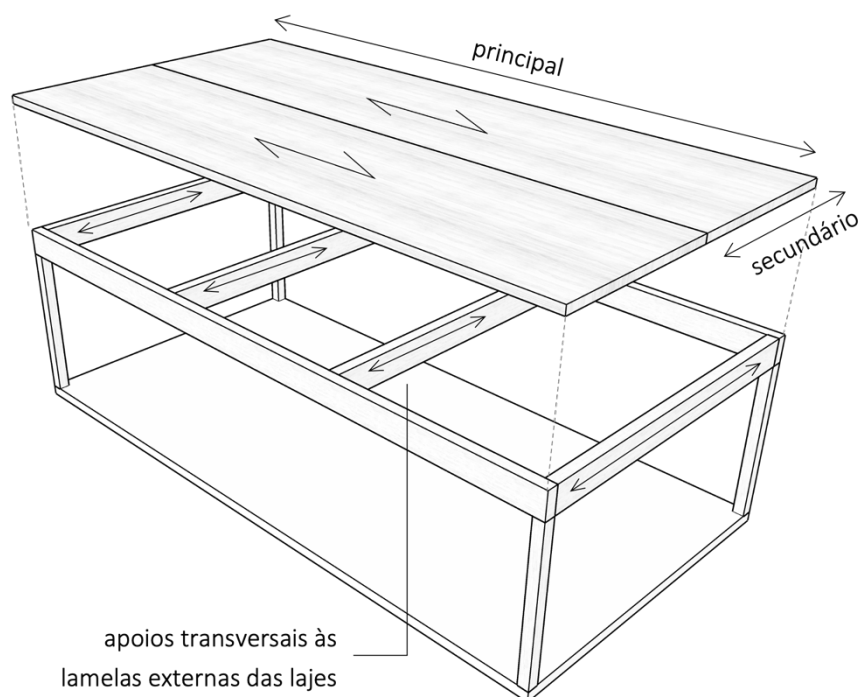


Figura 40: Esquema de configuração estrutural fictícia representando o comportamento estrutural de lajes de MLCC.

Fonte: da autora (2023).

apoios transversais às lamelas externas das lajes

Essa espessura total do painel e composição das camadas que o configuram⁵, no caso do emprego como lajes, está condicionada às distâncias entre os apoios, à forma de atuação do elemento estrutural, seja como piso ou cobertura e, naturalmente, às cargas que o painel está sujeito. Assim, quanto maior a distância entre os apoios, maior será a espessura da laje. Ao mesmo tempo, a adição de apoios intermediários resulta na redução da espessura do painel. Esses apoios, quando se trata de uma edificação integralmente de madeira engenheirada, podem consistir tanto em vigas de MLC quanto em paredes de MLCC com função estrutural. Já em edificações híbridas, podem se tratar de vigas metálicas ou mesmo elementos estruturais de concreto ou alvenaria.

Como exemplo para o emprego de lajes de MLCC, é possível mencionar uma edificação concluída em 2019 na cidade de São Paulo, que consistiu em uma cobertura para uma quadra inserida no interior de uma escola (Figura 41). Sua estrutura era composta por pilares, vigas e contraventamentos de MLC e lajes de cobertura de MLCC. Os painéis de lajes apresentam lamelas no sentido longitudinal e se apoiam em vigas secundárias de MLC. Essas últimas, por sua vez, atuam na redução da distância entre os apoios para a laje de MLCC, resultando em um menor vão para este painel, e apoiam-se em vigas principais, as quais apresentam maiores dimensões e vencem o vão principal da edificação.

Ainda nesse projeto, é interessante apontar também para a existência de uma passarela em formato orgânico, a qual conecta a cobertura da quadra em questão a outros espaços de lazer da escola. Para isso, as lajes de MLCC que configuram essa passarela foram usinadas em trechos de pequenas dimensões com formatos curvos (Figura 42).

É importante mencionar, contudo, que o vão vencido pela laje de MLCC não é o único fator a ser considerado para seu dimensionamento e definição da composição de suas camadas. Outro item de fundamental importância é justamente o carregamento a que a laje está submetida, que é dividido em cargas permanentes (ocorrem ao longo de toda a vida útil da edificação, como peso próprio da estrutura e peso dos revestimentos) e nas cargas acidentais (ocorrem eventualmente, no peso de pessoas, mobiliários, veículos ou força do vento) (Rebello, 2007). Assim, lajes de piso, sujeitas a cargas elevadas de uso, incluindo usuários, mobiliários e revestimento, consequentemente,

⁵ A composição de camadas é denominada, internacionalmente, pelo termo em inglês “layup”. Refere-se à quantidade de camadas que compõe o painel de MLCC, assim como a espessura e classe de resistência de cada camada.

Figura 41:
Cobertura
executada com lajes
de MLCC apoiadas
em pilares e vigas
de MLC, para área
esportiva escolar.

Fonte:
<https://www.archdaily.com.br/918035/escola-concept-triptyque-architecture>



Figura 42:
Cobertura de
marquise executada
com lajes de MLCC
com formato curvo
e orgânico para
área esportiva
escolar.

Fonte:
<https://www.archdaily.com.br/918035/escola-concept-triptyque-architecture>



terão espessuras mais elevadas do que lajes de cobertura não transitáveis e sem telhado verde, que recebem apenas o carregamento da impermeabilização e chuva, caso ambas se encontrem nas mesmas condições dentro da edificação, vencendo os mesmos vãos.

Além das cargas, outros fatores mencionados em Woodworks e Thinkwood (2021) para a determinação das espessuras de lajes por meio do dimensionamento estrutural são a vibração e a resistência ao fogo. Conforme aponta o documento, no caso de lajes de piso, a vibração, frequentemente, possui maior influência na espessura dos painéis do que o carregamento propriamente dito. A questão do incêndio, igualmente, pode ter uma influência bastante significativa no caso de estruturas expostas e mais altas, tendo em vista que uma maior altura da edificação irá acarretar um maior tempo requerido de resistência ao fogo. No caso de estruturas expostas, esse tempo de resistência ao fogo poderá acarretar maior espessura das camadas externas dos painéis, de modo que após a sua queima e carbonização, a espessura remanescente dos elementos estruturais mantenha resistência mínima durante o tempo exigido pela legislação local (WOODWORKS, THINKWOOD, 2021).

Esses três fatores (carregamentos, vibração e resistência ao fogo) podem ser amenizados com a adoção de uma laje híbrida de MLCC com concreto, atuando como piso. A capa de concreto, ao trabalhar em conjunto com o painel de MLCC proporciona maior resistência aos carregamentos, possibilitando que o elemento estrutural híbrido vença maiores vãos com uma menor espessura de madeira. Ademais, a associação de dois materiais distintos acarreta menores vibrações no elemento construtivo final, além de aumentar sua resistência ao fogo pela adoção do concreto, que irá proteger a camada superior da laje, de tal forma que apenas a face inferior do painel passa a permanecer exposta a um eventual incêndio.

Por fim, um último ponto a ser mencionado em relação aos painéis de MLCC atuando como lajes de piso ou cobertura diz respeito aos balanços que estes elementos conseguem vencer. A dimensão exata, naturalmente, deverá ser verificada para cada situação e projeto específico. No entanto, é possível adiantar que, para uma mesma laje, o balanço a ser vencido no sentido principal de sua transmissão de cargas será sempre superior àquele perpendicular às camadas externas. Isso porque o sentido perpendicular às camadas externas é secundário para a transmissão de cargas no elemento estrutural.

Já no caso de vedações estruturais de MLCC, que trabalham na vertical, transmitindo esforços de cima para baixo, estes serão mais eficientes quando suas lamelas externas estão posicionadas na vertical, que frequentemente corresponde à largura dos painéis (WOODARD; JONES, 2020)

(Figura 43). Contudo, é possível também observar paredes com lamelas externas horizontais (alinhadas ao comprimento do painel), em situações nas quais essas se comportam de maneira semelhante a vigas, ao vencerem vãos e transmitirem esforços horizontais para os elementos em sua lateral.

Ainda em relação às paredes, é importante ressaltar que vedações estruturais de MLCC se constituem como elementos bastante esbeltos. Assim, para sua sustentação pode-se realizar uma analogia ao exemplo utilizado por Rebello (2007) para ilustrar elementos desse tipo, que são as folhas de papel. Estas não possuem capacidade de suportar a si mesmas sem que seja realizada uma curvatura ou dobra em suas superfícies, de modo que apenas dobradas ou curvadas passarão a ter uma rigidez maior e a serem capazes de suportar forças perpendiculares a seus planos. Esta lógica da criação de dobras para aumentar a rigidez das seções dos elementos estruturais é apresentada pelo autor em diversos momentos ao longo de seu livro. Parte-se do conceito de que quanto maior a quantidade de material localizado longe do centro de gravidade da seção do elemento estrutural, mais rígida será ela e, conseqüentemente, mais difícil será de flambar, isto é, de ocorrer o deslocamento lateral da peça por consequência da sua perda de estabilidade antes que se atinja a ruptura.

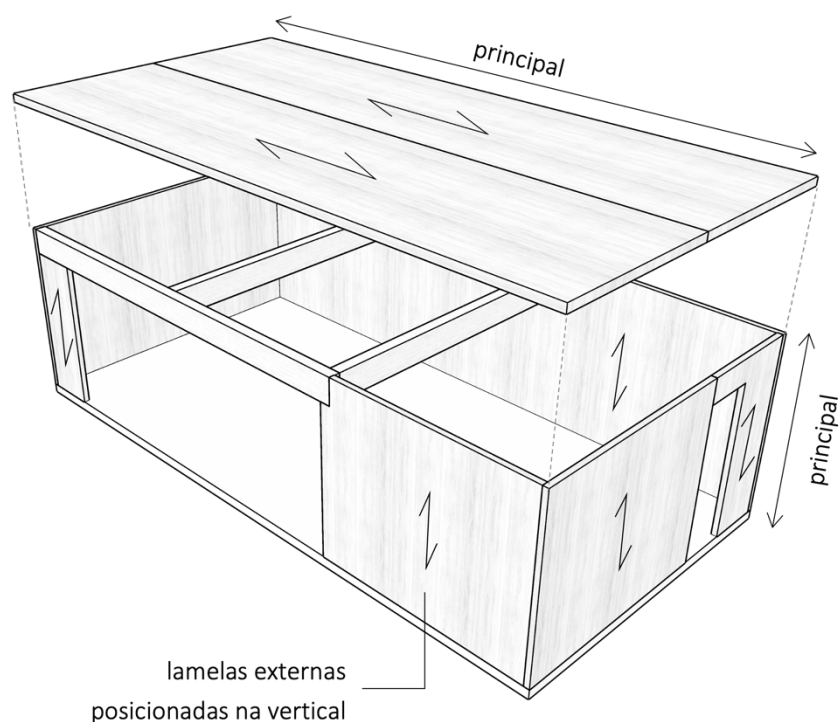


Figura 43: Esquema de configuração estrutural fictícia representando o comportamento estrutural de lajes e paredes de MLCC.

Fonte: da autora (2023).

Nessa lógica, a distribuição de vedações estruturais de MLCC resultará em maior estabilidade global da edificação quando do posicionamento das peças umas perpendiculares em relação às outras, atuando no travamento lateral dos elementos construtivos e compensando a sua esbeltez.

No que diz respeito a essa composição da estrutura em uma visão mais global, considerando a associação dos elementos entre si e não mais seu comportamento de forma isolada, Salvadori (2021) menciona que as estruturas de madeira engenheirada diferenciam-se significativamente das estruturas de concreto, nas quais, após concretagem *in loco*, é observada a consolidação de todos os elementos estruturais, por meio de nós rígidos, engastados, que formam uma unidade sólida. As estruturas de madeira, de maneira diversa, atuam de forma mais similar às estruturas de aço, ou seja, configuram-se por elementos estruturais distintos e isolados, que são conectados entre si por uma ligação frequentemente articulada.

Esta comparação é bastante válida ao se imaginar elementos em aço pré-fabricados que serão parafusados entre si durante a montagem da estrutura, formando nós articulados, ou rotulados. No entanto, as conexões entre elementos de aço podem também ser rígidas, quando se executa a solda entre duas vigas, por exemplo. As estruturas de madeira, em contrapartida, apesar de também se configurarem por elementos individuais, pressupõe uma dificuldade muito maior para colar duas peças entre si, pelo menos com as tecnologias disponíveis até o momento no mercado. Assim, as conexões entre dois elementos estruturais de madeira, na grande maioria dos casos, são articuladas. Outra diferença entre as estruturas de aço e as de madeira é o fato de as primeiras serem compostas basicamente por elementos lineares (pilares e vigas), enquanto as últimas apresentam produtos tanto lineares quanto na forma de painéis (painéis de MLCC).

A relação entre forma e estrutura, e a conseqüente necessidade de se conhecer o funcionamento dos elementos construtivos previamente à concepção arquitetônica, pode ser extrapolada para qualquer sistema construtivo, composto por diferentes materiais, não se restringindo apenas às estruturas de madeira engenheirada. Para estas últimas, no entanto, apenas a compreensão de seu comportamento não é suficiente para a concepção adequada da arquitetura. Como visto anteriormente, o processo construtivo de estruturas panelizadas de madeira engenheirada é bastante complexo e apresenta um número significativo de particularidades. Por esse motivo, além das questões estruturais apresentadas, mostra-se fundamental, aqui, o aprofundamento de alguns dos principais pontos identificados em cada macro etapa do processo construtivo apresentado anteriormente, como mais relevantes para o desenvolvimento do presente trabalho.

MATÉRIA-PRIMA

Inicialmente, na macro etapa da Matéria-prima, sabe-se que os painéis de MLCC e elementos de MLC podem ser fabricados, no Brasil, tanto com madeira de pinus, quanto de eucalipto.

O pinus é um tipo de madeira que pertence ao grupo das Gimnospermas, conhecidas também como coníferas ou *softwood*. Já o eucalipto pertence ao grupo das Angiospermas, denominadas também por folhosas ou *hardwood* (LELIS *et al*, 2001; LEPAGE *et al*, 1986).

Considerando as particularidades de cada um desses grupos vegetais, estas são matérias-primas que apresentam suas características e valores de referência próprios. As propriedades da matéria-prima, além dos fatores carregamento, vão, vibração e resistência ao fogo, mencionados previamente, também 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, podem ser especificadas lamelas com diferentes propriedades para camadas distintas dos elementos de MLC ou painéis de MLCC. Nas camadas longitudinais de lajes MLCC, por exemplo, pode ser empregada madeira com módulo de elasticidade mais elevado, tendo em vista a atuação principal dessas camadas na transmissão das cargas atuantes na estrutura. Nas camadas transversais, por serem estas secundárias na transmissão das cargas dos painéis, é possível a adoção de matéria-prima com módulos de elasticidade inferiores.

Sabe-se, contudo, que a madeira é um material natural e que durante sua formação foi exposta a diferentes condições climáticas, direção e intensidade de vento, exposição à água, dentre outros fatores que podem variar significativamente ao longo da vida útil da árvore. Dessa forma, além de consistir em um material anisotrópico, é também pouco homogêneo (REBELLO, 2007).

Assim, cada lamela de madeira que é adquirida para a produção de elementos estruturais pode apresentar características e propriedades bastante distintas. Para isso, mostrou-se necessário enquadrá-las individualmente em determinadas categorias, criando, de certa forma, uma padronização dessa matéria-prima. Estabeleceu-se, dessa forma, o que se denomina por classes de resistência, para classificar as lamelas a serem utilizadas nas diferentes camadas dos elementos de madeira engenheirada. Os valores de referência (faixa dos módulos de elasticidades da matéria-prima) para essas classes de resistência são encontrados, em território nacional, na norma NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira (2022) (ABNT NBR 7190, 2022).

A especificação da classe de resistência de cada camada dos elementos construtivos deve ser realizada no projeto de dimensionamento estrutural. Assim, a definição da matéria-prima é fundamental neste momento, pois resulta em dimensões diferentes para os elementos construtivos, em termos de espessura, número e composição de camadas.

Por esse motivo, a etapa de classificação da matéria-prima, que envolve a classificação mecânica e visual das lamelas, além de remoção de defeitos, mostra-se também de grande importância para possibilitar a fabricação dos elementos estruturais conforme especificações e definições estabelecidas pelo dimensionamento da estrutura.

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, o que igualmente deve ser levado em consideração no desenvolvimento do cálculo estrutural. A largura das lamelas utilizadas na fabricação, após etapa de aplainamento, pode variar, assim, entre 140 mm ou 160 mm para ambas as espécies. Já suas espessuras finais podem ser de 20 mm, 30 mm ou 40 mm no caso do emprego de pinus, e 22 mm, 35 mm ou 42 mm no caso do uso de eucalipto. Estas dimensões, contudo, estão sujeitas a variações constantes, a depender da disponibilidade de fornecimento das empresas que atuam no beneficiamento da madeira bruta. Recomenda-se, dessa maneira, a confirmação das possibilidades de bitolas e seções estruturais antes do início de um novo projeto arquitetônico.

Outro ponto relevante a ser considerado na escolha da matéria-prima diz respeito à resistência natural às intempéries apresentada por cada espécie. O pinus, na condição de conífera, apresenta baixa resistência natural aos agentes deterioradores, enquanto o eucalipto, por ser uma folhosa, apresenta maior resistência natural. Em contrapartida, a primeira permite a impregnação na totalidade de sua seção transversal de produtos preservativos de modo a aumentar essa resistência, o que não ocorre no caso do uso do eucalipto.

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 (Figura 44), o eucalipto, por sua vez, apresenta um tom avermelhado, que pode alternar entre um rosa claro e uma matiz mais bordô (Figura 45).

Figura 44: Painel de MLCC de pinus.

Fonte: da autora (2016).



Figura 45: Painel de MLCC de eucalipto.

Fonte: da autora (2022).



FABRICAÇÃO

Na macro etapa da fabricação dos elementos estruturais, considera-se aqui importante abordar duas etapas específicas, são elas: a prensagem e o corte e a usinagem dos painéis de MLCC, ambas orientadas pelo Plano de Corte. Será dado mais enfoque à produção dos painéis de MLCC, 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 este trabalho dispõe de duas prensas a vácuo com dimensões de 3,00 m x 12,00 m e 3,00 x 14,50. Estes, contudo, são os tamanhos brutos para confecção dos painéis, sendo que, após o esquadreamento destes, os painéis finais apresentarão dimensão máxima líquida de 2,95 m x 11,95 m e 2,95 m x 14,40 m. Portanto estas últimas são as dimensões que devem ser consideradas para a concepção dos elementos construtivos a serem empregados no projeto de arquitetura. Porém, cada fábrica possui dimensões máximas líquidas proporcionais aos seus equipamentos específicos.

Outro aspecto a ser considerado durante a prensagem dos painéis é a direção das lamelas. Sabe-se que 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 prensagem de um único painel contínuo, mostra-se impossível posicionar peças consecutivas com direcionamento oposto de fibras. Em outras palavras, o painel a ser prensado será sempre ou longitudinal ou transversal, sendo impraticável atender simultaneamente às duas direções. Nesta mesma lógica, o painel irá possuir também uma única composição de camadas (*layup*) e, conseqüentemente, espessura.

Por esse motivo, para a etapa de prensagem, as peças serão divididas em painéis de mesma matéria-prima, espessura, composição de camadas e direção. Assim, no caso de estruturas panelizadas que possuem elementos de MLCC 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 não transitáveis, 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 racionalizada será a etapa de prensagem de sua estrutura. Este raciocínio é apontado também em 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. O documento acrescenta, ainda, que geometrias únicas e uma grande quantidade de variações tipológicas dos elementos construtivos tendem a acarretar o aumento dos custos da estrutura.

Partindo deste princípio, é uma prática corriqueira que elementos de laje sejam confeccionados em painéis únicos, maiores, que podem apresentar dimensões máximas de 2,95 m de largura por 14,40 m de comprimento. Já peças de parede possuirão tamanhos máximos de 2,95 m de altura (largura) por 14,40 m de comprimento, sendo que peças menores são agrupadas em painéis maiores para sua fabricação. Especificamente para as vedações, contudo, é possível adotar uma segunda estratégia durante a prensagem, associada à disposição das paredes de forma longitudinal no Plano de Corte, que permite a confecção de peças com altura superior ao limite máximo mencionado.

Para isso, mostra-se necessário, previamente, discorrer de forma mais aprofundada acerca da etapa do Plano de Corte, o qual foi apresentado sucintamente no capítulo anterior. Como mencionado, esta etapa consiste no planejamento do corte das peças de MLCC, as quais são distribuídas nos painéis a serem prensados.⁶ O esquema a seguir ilustra, como exemplo, este processo para uma estrutura fictícia (Figura 46).

Para que este planejamento ocorra da forma mais racionalizada possível, devem ser consideradas todas as premissas estruturais, de logística e montagem da edificação, além das restrições de fabricação, como dimensão máxima de prensagem. A título de exemplo, pode-se citar uma vedação com dimensões de 2,70 m de altura e 18,00 m de comprimento. Uma das opções possíveis para sua montagem seria fabricar um elemento de 6,00 m e outro de 12,00 m de comprimento para se conectar as duas peças no local de montagem.

⁶ Conforme apresentado no capítulo anterior, a mesma lógica de distribuição e agrupamento de peças menores em elementos maiores para a prensagem ocorre tanto para a fabricação de MLCC quanto de MLC. No entanto, neste momento, optou-se por discorrer de forma mais profunda sobre a fabricação das peças de MLCC especificamente.

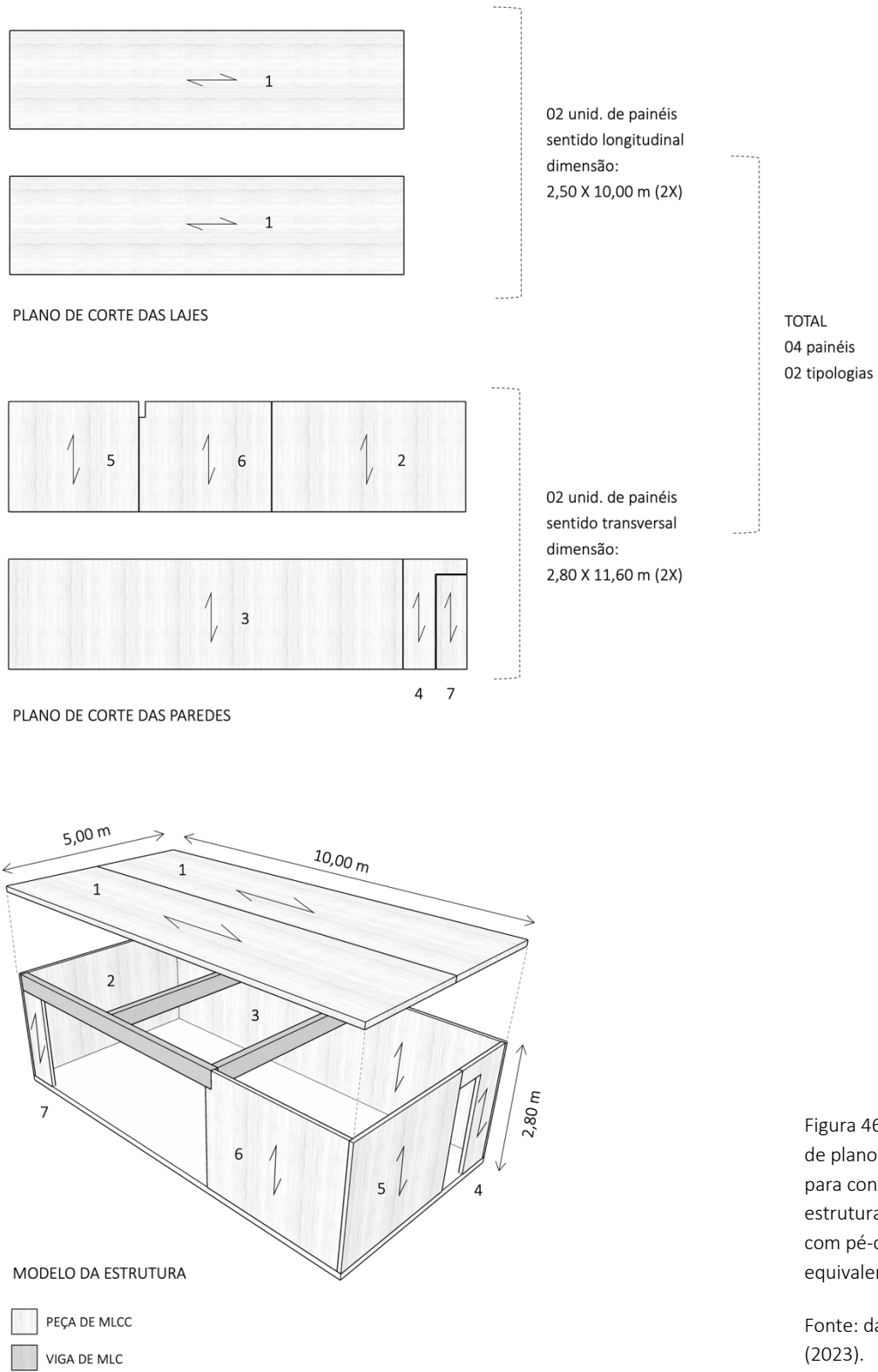


Figura 46: Esquema de plano de corte para configuração estrutural fictícia com pé-direito equivalente a 2,80 m.

Fonte: da autora (2023).

Considerando as etapas de fabricação, essa escolha, contudo, pode não ser a mais adequada, por exigir o ajuste da prensa e do equipamento de usinagem para dois tamanhos distintos. Uma opção mais vantajosa, tendo em vista apenas o quesito fabricação em mente, seria a confecção de dois painéis com 9,00 m de comprimento por 2,70 m de largura, pois, assim, tanto a configuração da prensa quanto a do equipamento de usinagem seria realizada uma única vez para as duas peças.

Em contrapartida, é possível que esta última opção não seja adequada para a macro etapa de logística, supondo que o acesso ao local de montagem permita apenas a entrada de veículos com comprimento máximo de 8,00 m. Se este for o caso, o caminho mais adequado para a divisão do elemento poderia ser o de produzir três peças com 6,00 m de comprimento, ao invés de duas com 9,00 m. Essa alternativa, porém, acarreta uma peça a mais a ser posicionada, o que, a depender do número de peças existentes no projeto, poderia ocasionar aumento significativo no tempo total de montagem da estrutura de madeira. Assim, se fosse possível ao projeto de arquitetura, conceber o comprimento total dessa laje com 16,00 m, possibilitando a manufatura de duas peças com 8,00 m de comprimento, poderia ser a melhor escolha para esta situação hipotética específica.

Como visto neste conjunto de suposições relatado acima, não existe uma única solução certa para o Plano de Corte, que possa ser aplicada de forma indiscriminada. Para diferentes contextos, é possível que seja necessário seguir por este ou por aquele caminho. Exatamente por isso, a etapa de planejamento do corte deve levar em consideração todas as etapas precedentes e posteriores, de modo a se atingir a melhor solução para cada projeto específico.

Outra questão interessante de ser considerada no planejamento do corte é justamente a direção dos painéis. Como mencionado, para a fabricação de lajes, usualmente, são produzidos painéis longitudinais, enquanto para vedações são confeccionados 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 citados, sendo que esta dimensão tornar-se-á o comprimento da parede.

Esta situação é ilustrada no esquema a seguir, o qual representa a mesma edificação apresentada na imagem anterior, 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 (Figura 47), além do número total de peças necessárias para a montagem da estrutura.

Tendo em vista o exposto, compreende-se que, quando se busca máxima racionalização do processo construtivo como um todo, torna-se interessante conceber a edificação considerando o planejamento dos cortes dos painéis. Isso não pressupõe restringir o projeto a dimensões modulares ou padronizadas, dado que o emprego do equipamento de usinagem com CNC permite alto grau de personalização, sem que se perca com isso a maximização da produção. Além disso, considerando a possibilidade de conexão das peças em obra, é possível a execução de elementos em MLCC em qualquer dimensão e formato.

Contudo, 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. Para evitar perdas dessa natureza é possível, por exemplo, considerar todos os painéis com uma das dimensões sempre igual, como vedações com a mesma altura de 2,70 m, ainda que possuam larguras diferentes. Nessa lógica, para edificações com formatos retangulares ou quadrados, sem coberturas inclinadas, atingir maior racionalização do Plano de Corte das vedações é, de certa maneira, mais tangível. Partindo do pressuposto que todas as paredes possuem a mesma altura, a maior otimização relaciona-se apenas a uma questão de disposição das peças em painéis iguais para fabricação.

No entanto, para aqueles profissionais que desejem ir além e pensar em edificações com lajes curvas, alturas ou inclinações diferentes, ainda assim é possível que o conceito arquitetônico esteja associado a essa busca por maior racionalização da etapa de corte e usinagem. Não é factível presumir que em uma estrutura com formato diferente do quadrado ou retângulo, haverá necessariamente maior desperdício de material para sua produção. Ao contrário, é possível sim atingir, simultaneamente, uma geometria diferenciada para a edificação e garantir um bom racionalização desta etapa, de modo que a forma seja planejada com o intuito de aproveitar os cortes dos painéis. Isso pode ocorrer, por exemplo, com a adoção de elementos com uma das arestas inclinadas, mas que possuam o mesmo ângulo de inclinação de outros elementos da edificação (Figura 48).

Vale ressaltar que este é apenas um exemplo bastante simplificado de como é possível garantir maior otimização do corte dos painéis, sendo que o máximo aproveitamento também pode ser alcançado em muitas outras ocasiões.

Especificamente em relação às usinagens, que são executadas nesta mesma etapa, para criar rebaixos, rasgos e furos que permitam a passagem das instalações prediais, ou mesmo aberturas para portas e janelas, é importante, antes de discorrer sobre este tema, resgatar algumas das premissas estruturais dos elementos construtivos aqui estudados.

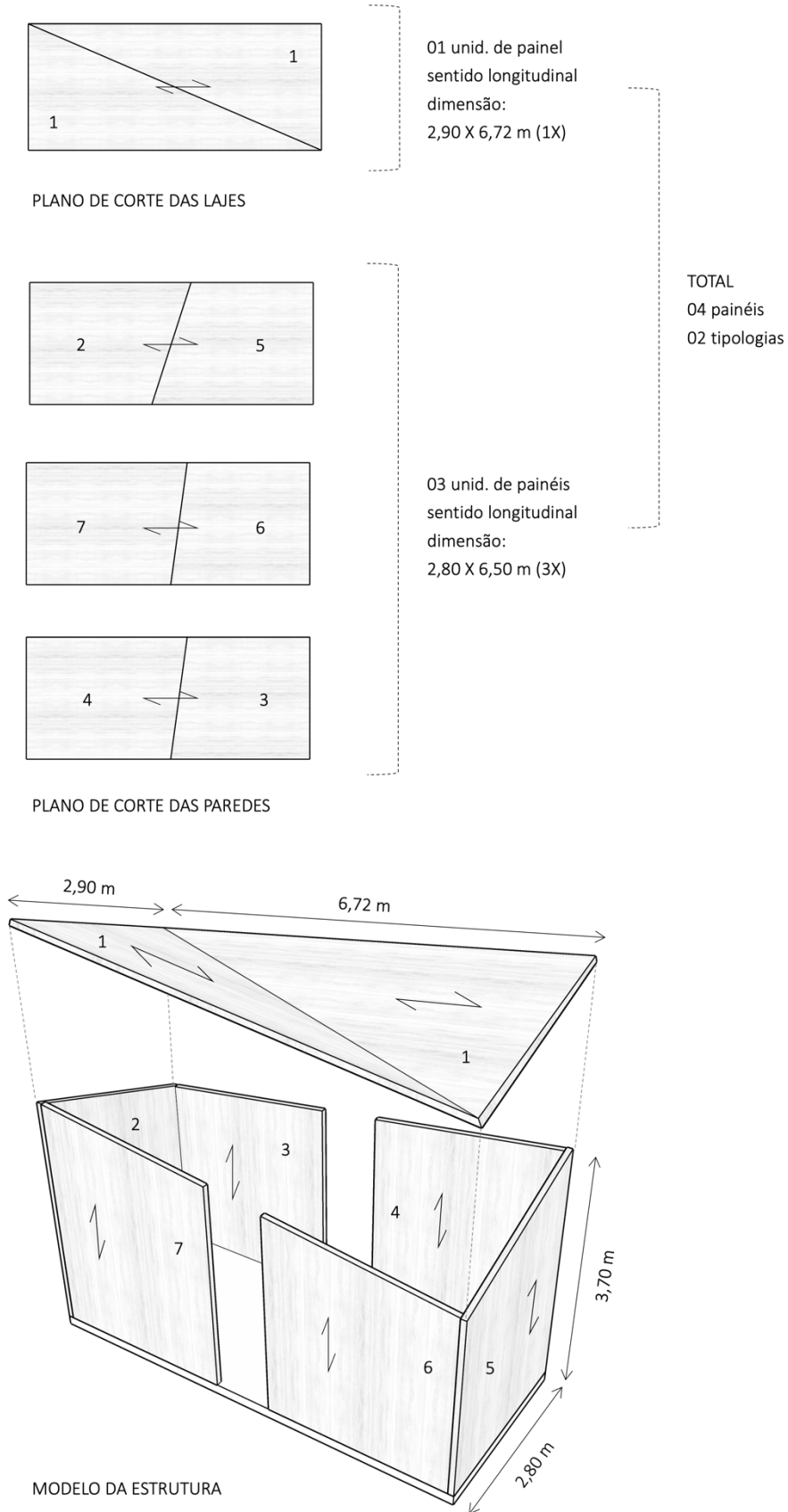


Figura 48: Esquema de plano de corte para configuração estrutural fictícia com alturas variadas no pé-direito.

Fonte: da autora (2023).

Isso porque, qualquer tipo de interferência a ser realizada nos painéis deve estar alinhada ao funcionamento da estrutura. Ou seja, deve acompanhar a direção principal de atuação da peça, posicionando-se paralela às lamelas externas, as quais são, majoritariamente, longitudinais para lajes e transversais para paredes. Assim, garante-se que a transmissão dos esforços, que é predominante na direção mencionada, não seja interrompida. Como exemplo, pode-se mencionar um *shaft* ou abertura zenital a ser realizada em uma laje. Para isso, idealmente, caso não se intencione criar apoios adicionais ou reforçar a estrutura de alguma outra maneira, as aberturas devem ser concebidas com formato retangular, alongado, com o lado de maior dimensão posicionado na direção longitudinal da laje.

Em geral, tais interferências são resolvidas apenas ao final do desenvolvimento do projeto de arquitetura. Ainda assim, tendo em vista sua relação direta na conformação e até no dimensionamento da estrutura, considera-se importante que este seja um tema a ser tratado também na concepção do projeto, ao menos de forma esquemática. É possível considerar reforços adicionais para apoiar os rasgos de grandes dimensões ou transversais à estrutura, caso estes mostrem-se necessários somente em um momento avançado do desenvolvimento do projeto. Contudo, tratando-se de um projeto alinhado às premissas da tecnologia, tem-se, por óbvio, maior racionalização do processo construtivo como um todo, quando da menor necessidade de reforços secundários a serem fabricados e montados.

Esta mesma lógica pode ser extrapolada também para instalações elétricas. No caso de qualquer tipo de instalação seca, a exemplo de eletrodutos elétricos, é possível prever o embutimento destes nas peças de madeira. Para isso, as canaletas para passagem dos eletrodutos são usinadas nos painéis por meio do equipamento de usinagem, juntamente com as aberturas para caixas de tomadas e interruptores. Estes rasgos para eletrodutos devem seguir as mesmas premissas apontadas anteriormente, ou seja, serem posicionados sempre na direção dos veios das faces externas das peças de MLCC. No caso de paredes, rasgos para eletrodutos serão verticais, sendo que a conexão horizontal entre caixas elétricas pode comprometer o desempenho estrutural do elemento construtivo (Figura 49).

Instalações molhadas, por sua vez, não podem ser embutidas no interior dos painéis de madeira, tendo em vista a maior suscetibilidade da matéria-prima quando do contato com a umidade. Isto inclui tubulações hidráulicas, drenos para ar-condicionado, descidas pluviais e qualquer outra instalação de mesma natureza. Usualmente, essas tubulações são locadas na edificação em vedações leves autoportantes, do tipo *drywall* ou *wood frame*, ou mesmo em paredes hidráulicas faceadas à estrutura de madeira. Assim, é interessante pensar nessas paredes hidráulicas em

posições onde não apresentem função estrutural, possibilitando a execução de apenas uma vedação leve. Com isso, dispensa-se o emprego de um elemento estrutural, como uma parede de MLCC ou viga de MLC.

No caso da mera travessia de uma tubulação molhada por um elemento de MLCC, como uma descida pluvial que cruza uma laje de cobertura, naturalmente estas são passíveis de execução, mediante o devido detalhamento que assegure a durabilidade da estrutura de madeira. Em relação a qualquer furo desse tipo, ou mesmo para as usinagens das caixinhas elétricas mencionadas anteriormente (Figura 50), sua execução segue a lógica do equipamento de usinagem empregado para tal. Assim, estas usinagens apresentarão sempre cantos arredondados, tendo em vista o formato da ferramenta que executa os movimentos de fresa.

Este tipo de limitação aparenta ser contrário à afirmação de que equipamentos de manufatura digital permitem a execução de praticamente qualquer idealização da mente humana. De fato, essa frase pode ser considerada como verdade, caso a ideia concebida esteja dentro das possibilidades e limitações de funcionamento da tecnologia. Toda tecnologia possui sua própria forma de operação e para empregá-la, deve-se, antes da concepção da ideia, compreender o comportamento da máquina, incluindo quais são as ferramentas por ela empregadas e os movimentos passíveis de realização. A aplicação da tecnologia de uma forma não raciocinada acarretará uma demanda não otimizada dos processos.

Neste sentido, outra questão a ser compreendida quanto ao funcionamento de uma fresadora CNC diz respeito à disposição dos painéis na mesa de usinagem. Estes são posicionados de forma deitada, de modo que apenas uma de suas faces será acessível à ferramenta. Consequentemente, as usinagens são realizadas em uma face de cada vez. Assim, idealmente, estas devem ser posicionadas apenas em um dos lados dos elementos construtivos, pois a operação necessária para virar os painéis brutos durante a usinagem, visando usiná-lo dos dois lados, é um processo bastante árduo e que demanda um tempo muito maior para esta etapa da fabricação, devido às suas grandes dimensões e peso. Por este motivo, durante o desenvolvimento do projeto de arquitetura e da estrutura, são escolhidas as faces para execução das usinagens.

Observa-se, portanto, a necessidade de se conceber, não apenas a forma da edificação e, consequentemente, sua estrutura, mas também todos os seus detalhes e compatibilização entre disciplinas, com base nas premissas da tecnologia construtiva. Dessa forma, não só o profissional responsável pelo projeto de arquitetura, mas também todos aqueles envolvidos no desenvolvimento de projetos de instalações prediais e na execução, planejamento e

Figura 49: Rasgos para eletrodutos e demais instalações, posicionados de forma alinhada à lamela externa dos painéis de MLCC (parede e laje).

Fonte: Crosslam (2021).



Figura 50: Usinagem para caixinha elétrica com cantos arredondados.

Fonte: da autora (2017).



gerenciamento da obra, devem conhecer as minúcias da tecnologia para que se atinja maior racionalização de seu processo construtivo, culminando em uma estrutura mais otimizada.

Muitas vezes, é possível que a estrutura em si seja concebida de forma otimizada, garantindo a prensagem de poucas tipologias de painéis, com maior eficiência dessa etapa. Porém, se o mesmo não ocorrer com as interferências ocasionadas pelas instalações prediais, acarretando usinagens únicas para cada elemento construtivo, esta eficácia obtida na prensagem será perdida ao longo do processo construtivo. Isso porque cada elemento diferente a ser usinado exige uma programação distinta dos movimentos a serem executados pela fresadora, além do detalhamento diferenciado das peças no projeto da estrutura. Invariavelmente, então, será despendido maior tempo e energia (tanto do maquinário quanto humana) para execução do corte e usinagem das peças.

Confirma-se, com isso, a necessidade de se adotar a ideia do projeto para fabricar e montar (DFMA), da concepção global da estrutura ao furo para passagem de tubulações. Isto é, da forma macro - conceito - ao mínimo detalhe - minúcia.

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 este carregamento ou com qualquer mobilização logística, a primeira questão que deve ser verificada é a possibilidade de acesso do frete ao canteiro de obras. O acesso pode restringir os modelos ou tamanhos dos veículos que poderão ser utilizados nesse processo, de modo que veículos menores são capazes de transportar peças com dimensões reduzidas e em menor quantidade, sendo a recíproca também válida.

Nessa lógica, a verificação das vias de acesso para o local de montagem é um ponto a ser conduzido, inclusive, antes do início do projeto de arquitetura. No caso de ser confirmar a necessidade de uso de peças com limites dimensionais reduzidos, tendo em vista a impossibilidade de se transportar grandes elementos construtivos, então, esta premissa deve constar já no conceito da forma para originar uma estrutura condizente com o contexto no qual está inserida. Isso porque a adequação posterior da estrutura pode ser muito mais complexa ou até inviável, supondo que esta informação seja confirmada apenas em um momento tardio do desenvolvimento do projeto.

Os limites regulamentados para veículos de carga 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. O peso para esses veículos é determinado em detalhes pela legislação em questão e varia de acordo com a tipologia, quantidade de eixos, dentre outras características.


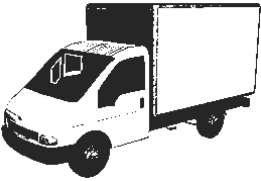




Os veículos com dimensões excedentes a essas mencionadas ou que transportem cargas indivisíveis com dimensões acima dos limites regulamentados somente poderão circular se munidos de Autorização Especial de Trânsito (AET). A emissão dessa autorização deverá ser realizada previamente à data do transporte e exigirá o pagamento de determinada taxa. Caso esses possuam largura superior a 3,20 m, comprimento superior a 30,00 m ou altura superior a 5,00 m, deverão circular acompanhados por escolta credenciada ou com a Polícia Federal, a depender da categoria em que se enquadram, conforme estabelece o Anexo II da Resolução nº 1, de 2016, do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (DNIT, 2016).

Dentre as opções de veículos disponíveis para utilização no mercado, aqueles modelos mais frequentemente utilizados pelo fabricante estudado constam na Tabela 1 apresentada a seguir, a qual também relaciona as dimensões e capacidade de carga próprias de cada veículo.

Desses, os mais usuais são a carreta convencional e o caminhão *truck*. O primeiro possui dimensões maiores e, conseqüentemente, uma maior capacidade de carga. Como visto, permite 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. Assim, não é uma possibilidade de escolha no caso de edificações mais afastadas dos centros urbanos, tal como aquelas localizadas em regiões montanhosas ou de mata fechada. Da mesma forma, para obras situadas nos centros das cidades, especialmente aquelas em ruas locais e estreitas, também deve ser descartado seu uso.

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. Assim,

Tabela 1: Modelos de veículos usualmente utilizados para transporte das peças estruturais.

Imagem ilustrativa	Modelo de veículo	Comprimento (m)	Largura (m)
	Strada	1,90	1,20
	HR	3,00	1,80
	Toco	6,00	2,20
	Truck	8,00	2,50
	Carreta simples	12,00 ⁷	2,50
	Carreta extensiva	25,00	2,50

Fonte: adaptado de Lotufo Oliveira (2018).

⁷ Eventualmente, é possível também encontrar para locação carretas simples com comprimento de até 15,00 m. Porém, essas não são tão usuais.

tratando-se da mesma quantidade de peças de tamanhos idênticos, o transporte dessas até o canteiro exigirá um número maior de viagens caso se opte pelo uso do caminhão *truck* em relação a uma carreta, a qual executará este deslocamento em número inferior de viagens.

Para cargas com dimensões superiores a 12,00 m recomenda-se o uso de uma carreta extensiva, a qual possui um sistema telescópico, permitindo o alongamento de seu assoalho para transporte de cargas com comprimento entre 13,00 m e 25,00 m, com regulagens intermediárias entre estas medidas. Vale, todavia, ressaltar a dificuldade por parte desse tipo de veículo para executar manobras, realização de curvas fechadas e passagem em ruas estreitas, além da necessidade de planejamento da carga com relativa antecedência, a fim de possibilitar a emissão de documentações e licenças especiais de tráfego.

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. 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 sequência 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.

Nessa lógica, a disposição das peças no veículo de transporte, para a etapa de carregamento, considera, principalmente, a sequência de montagem dos elementos estruturais. Assim, frequentemente, a posição dos elementos no frete será exatamente a mesma da sequência de montagem. Ou seja, a primeira peça a ser montada será a primeira a ser posicionada, localizando-se abaixo de todas as outras no veículo. Por outro lado, a última peça a ser movimentada também será a última a ser colocada no frete, localizando-se no topo da pilha. Desse modo, após a transferência das peças para a pilha de estocagem no canteiro de obras (Figura 51), o elemento que se localiza abaixo de todos os outros na pilha do veículo de transporte passa, inversamente, a ser o primeiro. Igualmente, o elemento no topo da pilha do frete, será o último elemento da pilha da montagem (Figura 52). Portanto, a formação da pilha de peças no veículo guarda uma ordem inversa com a pilha na obra.



Figura 51:
Transferência da
carga para o
caminhão *munck*
para montagem da
edificação.

Fonte: da autora
(2017).



Figura 52: Içamento
de painéis de MLCC
localizados em uma
pilha de estocagem
em obra.

Fonte: da autora
(2016).

Em outras palavras, para exemplificar o processo descrito acima, pode-se imaginar que no caso de uma estrutura corriqueira, composta por paredes e lajes de MLCC, não é lógico enviar um frete inicial com todas as lajes que compõem a estrutura. Tendo em vista que elas se apoiam nas paredes de MLCC, são estas últimas que devem ser montadas a princípio. A primeira carga deveria prever o envio das vedações e, na sequência, planeja-se uma carga para transportar as lajes, de modo a chegarem na obra após ou durante a finalização da instalação das primeiras.

Não obstante, o encadeamento da montagem, por si só, não é determinante na definição da sequência de carga. É necessário também, verificar as melhores disposições das peças no veículo, de modo a otimizar o transporte e garantir a estabilidade da pilha de elementos transportados. Alguns ajustes logísticos devem ser realizados nesse sentido.

Percebe-se que o Plano de Carga visa melhorar e agilizar a etapa de montagem da edificação. Ou seja, são duas macro etapas intrinsecamente atreladas, de modo que Plano de Carga e Plano de Montagem devem ser pensados em conjunto. Quando a logística é organizada sem que se leve em conta a sequência de montagem, possivelmente, será preciso movimentar os elementos construtivos mais vezes do que, de fato, seria necessário. Isso porque as primeiras peças a serem movimentadas, dificilmente, estarão acima de todas as outras. O processo de busca dos elementos construtivos no canteiro de obras, ou a movimentação das peças que se encontram acima daquelas que devem ser posicionadas inicialmente, pode levar muito tempo, acarretando atrasos na montagem em horas ou dias. Esse tempo é extremamente valioso, especialmente quando se trata de uma estrutura que, usualmente, demanda alguns dias para sua montagem, como será apresentado na sequência.

Da mesma maneira, a logística, como um todo, associa-se fortemente também ao projeto, tanto de arquitetura como de estrutura. Isso porque as restrições de acesso podem inviabilizar ou limitar algumas escolhas projetuais, tais como grandes vãos que demandam peças com dimensões que ultrapassem as capacidades dos meios de transporte. Consequentemente, aquilo que poderia ser considerado, posteriormente, como uma dificuldade de acesso, ou de logística, para implementação do processo construtivo, deixa de ser um obstáculo, quando é compreendido, na verdade, desde o início, como uma característica do contexto no qual a edificação se insere. Depreende-se, então, que a logística deve, necessariamente, compor o conjunto de premissas preliminares de projeto, em se tratando da busca por maior racionalização do processo construtivo da estrutura.

MONTAGEM

Como visto, os elementos construtivos de MLCC 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 gruas, guindastes ou guindautos.

Dentre estes, o equipamento utilizado com maior frequência nas edificações brasileiras é o caminhão *munck*, 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, ou remoção de equipamentos e máquinas, podendo, também, atuar no transporte dos materiais de construção. Os guindastes, por sua vez, são veículos especiais de maior porte, projetados para elevar, movimentar e baixar materiais de elevado peso e dimensão, podendo ser autopropelidos ou montados sobre caminhão (DNTI, 2016).

A diferença entre ambos está na capacidade de carga e raio de atuação que cada um pode atingir. Uma estrutura com peças menores, de menor peso, e que exige maior mobilidade do equipamento, pode ser montada por um guindauto. Já para uma estrutura composta por peças maiores, com pesos elevados, e mais distante do local onde o equipamento deverá estar posicionado, ou seja, necessitando um maior raio de alcance do braço hidráulico, pode ser empregado um guindaste durante a montagem. Contudo, essa escolha deve levar em consideração todas as demais condições do canteiro de obras, além das características da estrutura e viabilidade de acesso do equipamento, como mencionado.

Assim, da mesma forma como ocorre na macro etapa de logística, um dos primeiros pontos a ser verificado antes de se iniciar o projeto de arquitetura de uma estrutura de madeira engenheirada 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, ressalvados o trabalho infantil e feminino. Dessa forma, para esses casos, os elementos construtivos devem ser dimensionados de modo a possuir peso compatível àquele definido na legislação brasileira.

Verificadas as possibilidades de acesso e permanência dos equipamentos, a macro etapa da montagem desenvolve-se inicialmente com a etapa de posicionamento, 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 etapa 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 (Figura 53) ou conectores metálicos.

Para as conexões dos elementos de madeira com outros materiais construtivos, ressalta-se, novamente, a necessidade de prever detalhes adequados, que proporcionem a criação de barreiras de proteção da peça estrutural contra a umidade. No caso específico da conexão entre painéis de MLCC e fundações em concreto, esta barreira pode ser realizada, por exemplo, por meio de um perfil metálico quadrado que realize a conexão entre ambos (Figura 54). Em situações em que a laje de concreto não está muito bem nivelada, a utilização desta peça é muito recomendada, auxiliando no nivelamento do piso.

Ainda neste tema, vale apontar também que, como visto na macro etapa de fabricação, as peças de MLCC ou MLC são cortadas e usinadas com precisão milimétrica. Assim, muitas vezes, a conexão entre os elementos de madeira e outras estruturas convencionais, em concreto moldado *in loco* ou alvenaria, torna-se bastante trabalhosa, tendo em vista que estas últimas, usualmente, são executadas com precisões muito menores, consideradas em centímetros. Estas ligações não são, contudo, inviáveis, mas apenas demandam um planejamento prévio de conectores que garantam as folgas necessárias para a devida interface entre dois elementos que apresentam precisão dimensional bastante distinta. Por outro lado, quando se trata da ligação entre elementos de MLC ou MLCC e estruturas metálicas, o processo se torna mais favorável, por serem ambas tecnologias industrializadas em sua essência, que permitem grande precisão de fabricação e montagem.



Figura 53: Conexão entre uma viga de MLC e uma parede de MLCC por meio de parafusos autoperfurantes.

Fonte: da autora (2022).



Figura 54: Conexão de um painel de MLCC na fundação de concreto por meio de um perfil metálico.

Fonte: da autora (2022).

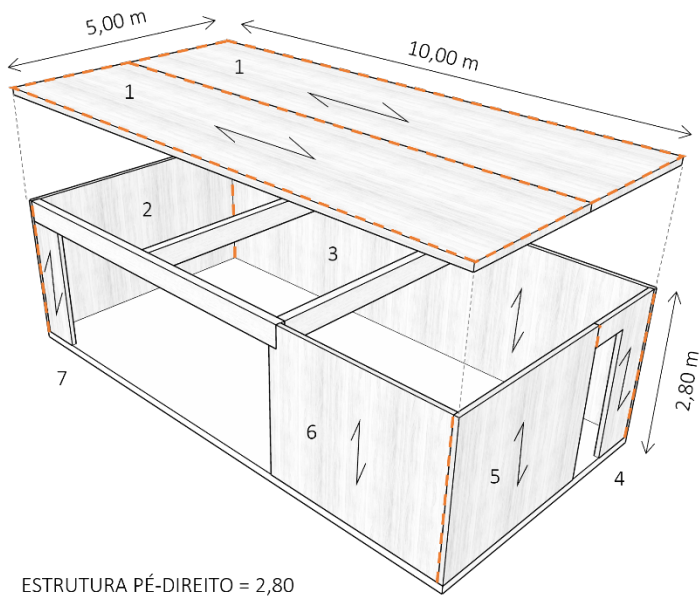
Como citado, tanto a etapa de posicionamento quanto a de conexão são orientadas pelo Plano de Montagem, o qual tem como objetivo primário definir a sequência de montagem dos elementos estruturais, possibilitando mais eficiência e rapidez no desenrolar desse processo. Para definir esta sequência, é necessário, inicialmente, planejar os acessos e definir o local onde o caminhão será estacionado para executar o posicionamento das peças, verificando o raio de alcance do braço hidráulico do equipamento. Importante ressaltar que quanto maior a distância a ser atingida pelo braço hidráulico, menor será o peso máximo do elemento que será içado.

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 MLCC, 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.

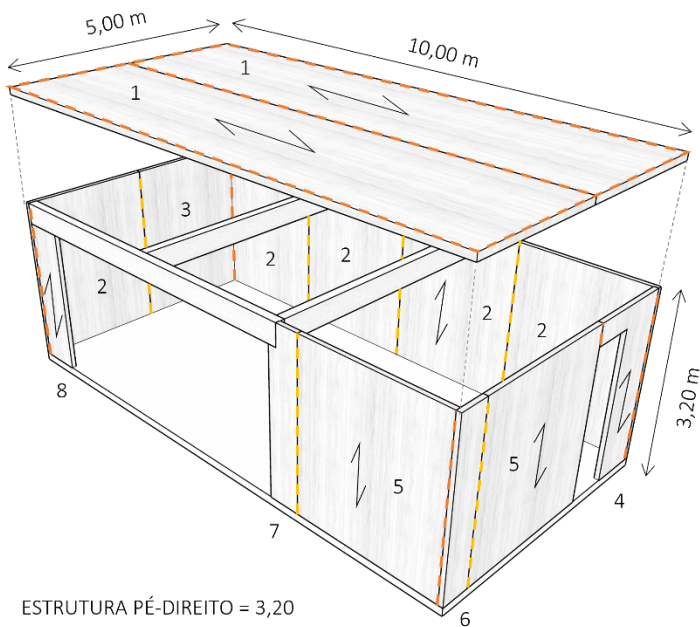
A título de exemplo, é apresentado a seguir o mesmo esquema de edificação fictícia utilizado anteriormente, com 10,00 m de comprimento por 5,00 m de largura e pé-direito de 2,80 m. Neste caso seriam necessários 8 elementos de MLCC para executar essa montagem, resultando em um total de 10 linhas de conexão. No entanto, caso essa mesma edificação tivesse um pé direito de 3,20 m, o cenário seria um pouco diferente e deveria seguir o plano de corte apresentado na Figura 47 (página 128). Consequentemente, o pé-direito 40 cm maior, resultaria em 14 elementos de MLCC e 16 linhas de conexão, como é apresentado no esquema a seguir (Figura 55).

Tratando-se da mesma quantidade de funcionários na implantação da edificação, o tempo de conexão entre dois elementos adjacentes e o de içamento de cada peça seria o mesmo nos dois casos. Dessa maneira, o tempo total de montagem da segunda aumentaria em comparação ao da primeira, chegando a quase dobrar de uma para a outra. Assim, pode-se verificar que existe uma relação direta entre a quantidade de elementos e o tempo de montagem de uma estrutura.



ESTRUTURA PÉ-DIREITO = 2,80

QUANTIDADE DE PAINÉIS = 8 UNID.
 QUANTIDADE DE CONEXÕES = 10 LINHAS
 (EQUIVALENTE A 51,60 m LINEARES)



ESTRUTURA PÉ-DIREITO = 3,20

QUANTIDADE DE PAINÉIS = 14 UNID.
 QUANTIDADE DE CONEXÕES = 16 LINHAS
 (EQUIVALENTE A 72,40 m LINEARES)

- - - LINHA DE CONEXÃO ENTRE PEÇAS DE CLT
- - - LINHA DE CONEXÃO ADICIONAL

Figura 55: Esquema comparativo entre as duas configurações estruturais fictícias das Figuras 46 e 47 quanto à montagem da estrutura.

Fonte: da autora (2023).

Além deste fator, as condições de içamento podem alterar muito o tempo total. Em situações, por exemplo, em que há uma quantidade significativa de vegetação na frente da obra, a operação de içamento e posicionamento dos elementos construtivos é dificultada, retardando o processo. Logo, a própria disposição da edificação no terreno, determinada, muitas vezes, nas etapas iniciais do projeto de arquitetura, é um fator que pode interferir na macro etapa de montagem da estrutura, reduzindo a racionalização deste processo de uma maneira geral.

Observa-se, portanto, a intrínseca relação existente entre o projeto arquitetônico e a maior otimização da montagem da estrutura, em especial 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 locação 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.

Resgata-se, portanto, a ideia de que, ao se buscar a máxima racionalização do processo construtivo da tecnologia, é fundamental considerar as premissas de montagem desde o desenvolvimento do traço inicial do projeto de arquitetura. Ou seja, ao se considerar essas premissas, aplica-se o conceito do *Design For Manufacture and Assembly* (DFMA).

Em se tratando de estruturas de madeira engenheirada, observa-se ainda 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. Dessa forma, deve-se acrescentar à sigla DFMA, conforme apresentado pela literatura estudada, a etapa intermediária entre fabricação (M refere-se a *manufacture*) e montagem (A refere-se a *assembly*), que se trata da logística.

Isto posto, conclui-se que a máxima racionalização do processo construtivo, resultando em uma estrutura mais otimizada, será alcançado quando o traço inicial do projeto for orientado à facilidade em se estruturar, fabricar, transportar e montar a arquitetura a ser concretizada, de forma a se criar um processo fluido e concatenado.

3.3. ESTUDO DA PRECIFICAÇÃO DA ESTRUTURA

Nos capítulos anteriores, compreendeu-se a relação direta entre o projeto arquitetônico e a racionalização do processo construtivo de uma estrutura de madeira engenheirada. Pressupõe-se, assim, que o projeto de arquitetura, por ocasionar maior ou menor racionalização deste processo, acarreta possíveis interferências na fase da construção, o que certamente afetará os custos finais da estrutura em questão.

Questiona-se, contudo, qual de fato seria este impacto e se sua magnitude poderia, realmente, demonstrar a ineficiência da valoração da construção pela área da edificação. Isso porque, partindo do pressuposto que o projeto de arquitetura possui relevância suficiente para ocasionar variações de custo de grande amplitude, a área da edificação, por si só, não é parâmetro suficiente para se conduzir a precificação de sua estrutura.

De modo a comprovar tais hipóteses e sanar os questionamentos aqui levantados, foram analisados dados provenientes de 18 orçamentos, os quais foram elaborados entre o segundo semestre de 2020 e o primeiro semestre de 2021. Os projetos orçados consistiam em sua totalidade em estruturas de edificações residenciais, conforme o recorte temático estabelecido nesta pesquisa, de modo a possibilitar uma comparação padronizada das informações de acordo com a tipologia construtiva. Desse total, 14 se localizavam no estado de São Paulo, duas em Minas Gerais e duas na região Sul do país. As edificações possuem porte bastante diversificado variando de 70,00 m² a 1.085,00 m².

Para cada orçamento, os dados coletados foram os seguintes:

- I. área da estrutura orçada (m²);
- II. distância entre o local de montagem e a fábrica (km);
- III. volume de madeira a ser fabricado para a composição da estrutura, incluindo painéis de MLCC e elementos de MLC (m³);
- IV. quantidade de elementos construtivo de MLCC e MLC a serem utilizados na montagem da estrutura;
- V. custo total da estrutura (R\$)

- VI. percentual dos principais itens que compõe esse valor total, os quais dividem-se em fornecimento de peças de madeira, serviços de montagem das peças de madeira, deslocamento da equipe de montagem e fornecimento de peças metálicas, para configurar estrutura auxiliar.

Ressalta-se que o procedimento de orçamentação, em geral, considera ainda outras variáveis de caráter comercial, a exemplo da visibilidade potencial a ser proporcionada pela obra. Essas, contudo, não foram fornecidas ou incluídas no presente estudo de modo a possibilitar a real comparação entre os dados.

Além disso, vale mencionar que 12 dos orçamentos analisados empregavam ainda estrutura metálica auxiliar, complementando a estrutura de madeira. Essa peça metálica constitui-se, na realidade, como uma estratégia estrutural auxiliar empregada para aquelas estruturas nas quais se identifica a possibilidade de maior custo-benefício quando da associação a elementos construtivos que não de madeira.

Sabe-se, contudo, que a adoção de estruturas metálicas é contraditória ao objeto definido pela presente pesquisa que se restringe a estruturas panelizadas compostas integralmente por elementos estruturais de madeira. Contudo, caso este recorte fosse realizado também para a análise dos orçamentos, seria necessário conduzir este estudo com número muito restrito de amostras. A escolha por investigar também orçamentos de caráter híbrido se justifica, dessa maneira, pela necessidade de ampliar a amostragem em questão, a qual já se mostra reduzida, mesmo com a ampliação do objeto de pesquisa para este item específico da presente tese.

É importante destacar também que, especificamente em relação ao custo, os dados a serem aqui apresentados não correspondem aos originais, em respeito ao sigilo empresarial. Os números fornecidos foram igualmente divididos por um fator que se denominou "X". O fator X corresponde a 0,01 % do custo final real da estrutura de menor valor dentre as 18 analisadas. Por esse motivo, foi atribuído ao orçamento de menor valor o preço final fictício equivalente a 10.000,00 unidades monetárias e para o orçamento de maior valor o preço final fictício equivalente a 169.897,22 unidades monetárias, o que corresponde a 16,9897 vezes o custo do primeiro, de menor valor. Tal conversão, no entanto, não acarretou perda de informação ou prejuízo ao estudo, tendo em vista que a pesquisa buscou apenas avaliar as relações existentes entre os itens que compõem o orçamento e desses com o projeto da estrutura.

A partir do recebimento das informações, separou-se os itens que compõem os custos totais da estrutura em duas principais macro categorias: material e montagem. Na primeira encontram-se

os percentuais para fornecimento das peças de madeira, incluindo painéis de MLCC e elementos de MLC, e para fornecimento das peças metálicas, que incluem vigas e pilares metálicos. Já a segunda, engloba os serviços necessários para montagem da estrutura de madeira – o qual inclui tanto as diárias dos montadores quanto a locação de equipamentos – e o deslocamento da equipe.⁸

Na sequência, após tratamento e organização das informações coletadas, que podem ser observados na Tabela 2, a análise dos resultados ocorreu em duas etapas. Inicialmente, foram realizadas análises comparativas entre os dados para compreender suas relações. Posteriormente, prosseguiu-se com a análise qualitativa de três projetos específicos, dentre os 18 orçamentos recebidos, os quais foram considerados aqueles que mais se diferenciaram durante o desenvolvimento do presente estudo.

Para isso, foram disponibilizados os modelos tridimensionais da estrutura, realizados pela equipe de projetos da empresa para possibilitar o levantamento dos dados necessários para compor o orçamento. A análise dos modelos tridimensionais teve como objetivo compreender a origem de determinadas conclusões preliminares levantadas a partir da análise quantitativa dos dados.

É importante observar que este estudo não pretende realizar uma análise estatística, a qual se mostra impossibilitada pelo tamanho da amostragem disponível. Trata-se, na realidade, de uma análise preliminar, ainda inédita no país, que busca incitar discussões e quebrar conceitos pré-estabelecidos acerca do tema “custos” envolvendo a tecnologia da madeira engenheirada.

ANÁLISE DOS DADOS

Os dados coletados, após tratamento, foram compilados na Tabela 2. Antes de se iniciar a análise dos dados, é importante realizar algumas explicações a respeito das informações recebidas.

⁸ Vale aqui explicar que os profissionais que atuam na montagem das estruturas são provenientes da cidade onde se localiza a fábrica, justificando assim a existência deste último item. Até o momento de conclusão da coleta de dados não existiam equipes locais para atuação em montagens localizadas em outras regiões do país que não a região Sudeste.

Tabela 2: Dados coletados para os orçamentos 1 a 18.

Nº	Área (m ²)	Distância (km)	Volume (m ³)	Peças (un.)	Custo Total (unidade monetária)	Material		Montagem	
						Madeira	Metálica	Serviços	Deslocamento
1	560,0	150	58,6	155	63.786,76	49,8%	38,7%	10,8%	0,6%
2	181,8	750	35,8	67	26.625,70	73,0%	13,2%	10,4%	3,4%
3	411,0	200	60,2	215	42.815,46	82,8%	0,0%	16,4%	0,8%
4	1134,3	130	151,2	209	109.869,17	75,4%	13,3%	10,7%	0,7%
5	70,0	130	15,8	33	10.000,00	87,0%	0,0%	11,5%	1,5%
6	485,6	180	82,5	154	56.789,59	80,0%	5,2%	14,2%	0,6%
7	350,0	200	55,6	124	41.951,28	82,2%	4,0%	13,2%	0,6%
8	530,4	130	89,7	209	59.146,65	83,7%	0,0%	15,8%	0,5%
9	956,4	840	114,2	81	106.917,30	58,9%	32,1%	8,1%	0,9%
10	792,0	900	133,7	270	92.966,86	81,2%	1,6%	14,9%	2,3%
11	350,7	60	61,8	50	37.586,00	88,5%	0,0%	11,0%	0,5%
12	335,8	60	68,3	96	46.237,05	79,5%	8,0%	12,2%	0,3%
13	1085,4	180	236,5	124	169.897,22	76,8%	19,9%	3,2%	0,1%
14	484,7	60	98,4	181	63.209,95	87,3%	0,0%	12,4%	0,3%
15	492,0	60	65,8	149	58.749,50	61,5%	23,9%	14,3%	0,3%
16	199,5	550	47,9	157	31.664,99	81,9%	0,0%	15,3%	2,8%
17	1025,7	180	182,0	474	129.798,03	77,0%	10,4%	12,2%	0,4%
18	341,1	400	32,2	31	36.860,91	58,9%	29,1%	10,4%	1,5%

Fonte: Dados fornecidos pela empresa Crosslam e trabalhados pela autora (2023).

Obs.: Reforça-se que os valores não correspondem aos originais em respeito ao sigilo empresarial.

O item “Madeira” é valorado de acordo com o volume da estrutura, sendo que para isso não se considera apenas o volume líquido de material empregado no conjunto de elementos construtivos de madeira engenheirada, mas também as perdas de matéria-prima resultantes do processo de corte e usinagem das peças.

Partindo-se, então, das informações apresentadas na Tabela 2, iniciou-se a análise dos dados pela macro categoria de “Material”.

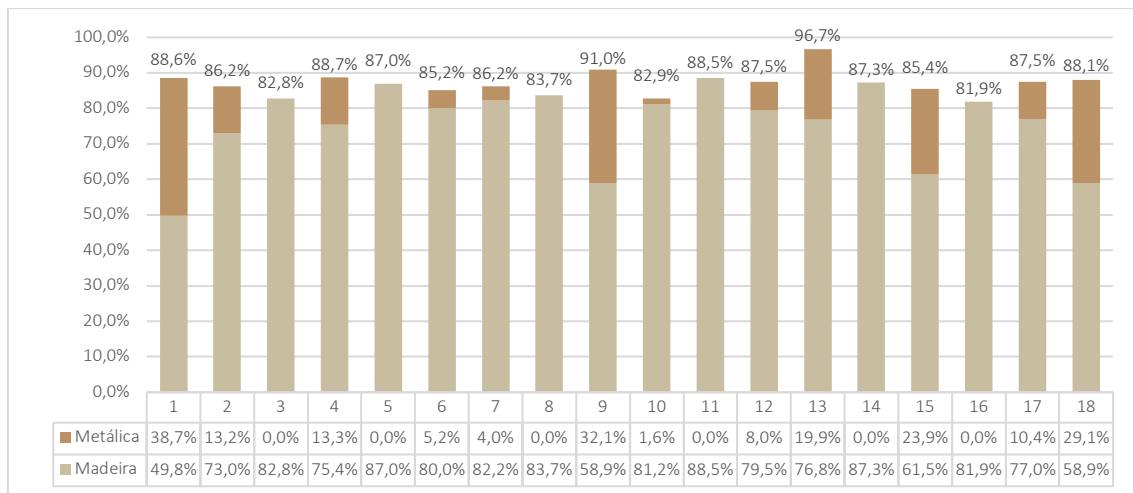
O Gráfico 1 mostra, por orçamento, o percentual individual da participação de cada um dos subitens agrupados nessa categoria (fornecimento de peças de madeira e de peças metálicas). Também é indicada no mesmo gráfico a porcentagem total de participação da categoria “Material” no custo total da estrutura.

Observando-se o Gráfico 1, depreende-se que os materiais empregados têm uma participação na composição final dos custos da estrutura bastante significativa. Em média, a participação desta categoria no custo global orçado oscila em torno de 87 %. Certamente, o item “Madeira” destaca-se pela maior porcentagem de participação na categoria Material, representando uma média de 75,9 %. Já o grupo “Metálica” representa, em média, 11,1 % do valor final orçado. Nota-se, ainda, que naqueles projetos onde o uso da estrutura metálica é bastante expressivo, percebe-se uma redução na participação percentual dos elementos de madeira engenheirada. Ou seja, no valor total, o emprego de elementos construtivos metálicos compensa o emprego dos elementos construtivos de madeira. Isso pode ser observado nos orçamentos 1, 9, 13, 15 e 18, onde o grupo “Metálica” tem percentual de participação próxima ou superior a 20 %.

Verifica-se que a única obra cujo percentual de participação da categoria de “Material” ultrapassa 90 %, atingindo 96,7 %, consiste no orçamento 13. Este orçamento é o que mais se distancia da média no que diz respeito ao consumo de materiais, com afastamento de quase 10 pontos percentuais. Tal discrepância é oriunda da própria forma da edificação, a qual apresenta linhas arredondadas e acarreta maior desperdício de material durante o corte dos painéis. Este estudo, contudo, relacionando a forma do projeto às porcentagens identificadas em seu orçamento, será realizado em maior profundidade quando da análise dos modelos tridimensionais.

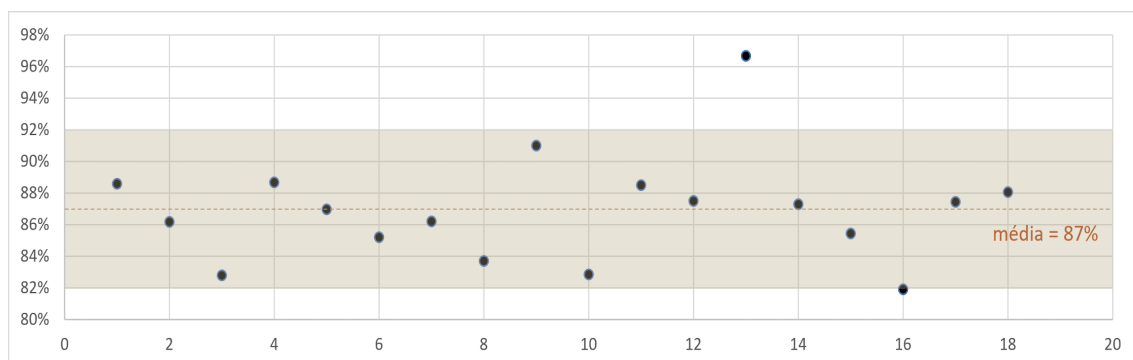
Em relação a esse ponto, o Gráfico 2 mostra a distribuição da porcentagem de participação obtida para a categoria “Material”. Dos 18 orçamentos analisados, percebe-se que praticamente todos apresentam representatividade desta categoria entre 82 % e 92 %, variando até 5 pontos percentuais da média encontrada, com exceção do já mencionado orçamento de número 13.

Gráfico 1: Percentual dos itens que compõe a categoria material no custo total da estrutura de madeira engenheirada.



Fonte: da autora (2023).

Gráfico 2: Distribuição da porcentagem encontrada para a categoria “Material” dos 18 orçamentos analisados. Obs.: Aqueles localizados na faixa laranja apresentam variação de até mais ou menos 5 pontos percentuais.



Fonte: da autora (2023).

A segunda categoria analisada consiste na “Montagem”, que agrupa os subitens “Serviços” de montagem e “Deslocamento” da equipe. A participação individual de cada subitem e a porcentagem total de participação desta categoria no custo total da estrutura é mostrada no Gráfico 3.

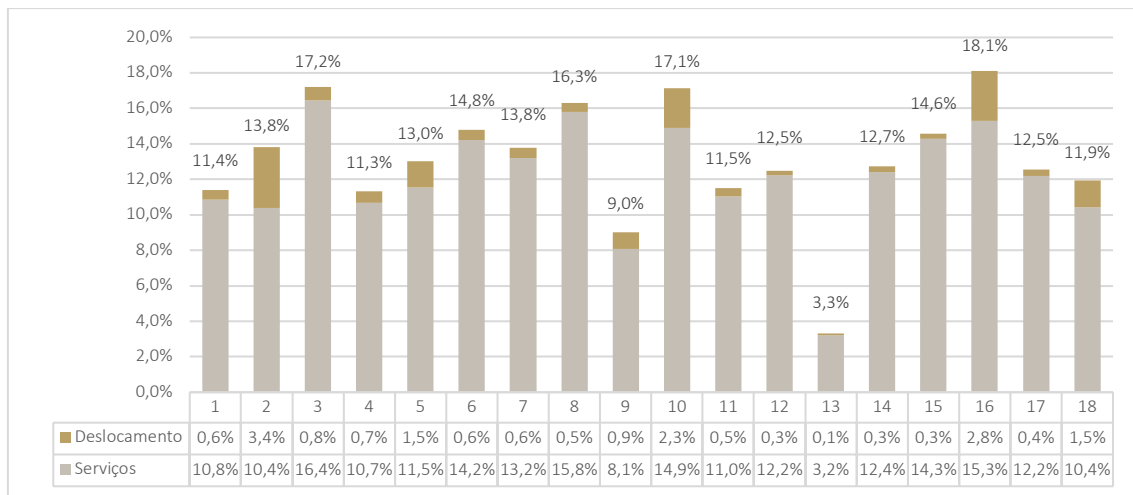
A representatividade total da categoria “Montagem” consiste em média de 13 % do valor total da estrutura. Naturalmente, de forma contrária ao ocorrido na categoria anterior, destaca-se aqui o orçamento 13, cuja participação percentual na montagem é significativamente inferior em relação aos demais.

Depreende-se, ainda, que nessa categoria, a maior participação em relação a porcentagem global concentra-se no subitem “Serviços”. Ou seja, os serviços de mão de obra e locação de equipamentos durante a montagem das estruturas representam, em média, 12,1 % do valor total orçado. Já o subitem “Deslocamento” representa em média 1,0 % do total. Ressalta-se que este não inclui o valor do frete dos elementos estruturais, o qual é custeado, posteriormente, pelo próprio adquirente da estrutura, quando da entrega dos materiais.

O valor estabelecido para o deslocamento baseia-se na distância entre a fábrica, situada na cidade de Suzano (SP), e o local de montagem da estrutura, a qual pode ser verificada na Tabela 2 na coluna denominada “Distância”. Assim, buscou-se realizar uma análise comparativa entre o subitem “Deslocamento” e a informação “Distância”, de modo a constatar a relação existente entre ambos. No Gráfico 4 é possível observar que na maioria dos orçamentos analisados, a participação do valor para deslocamento no custo total é diretamente proporcional à distância da fábrica à obra.

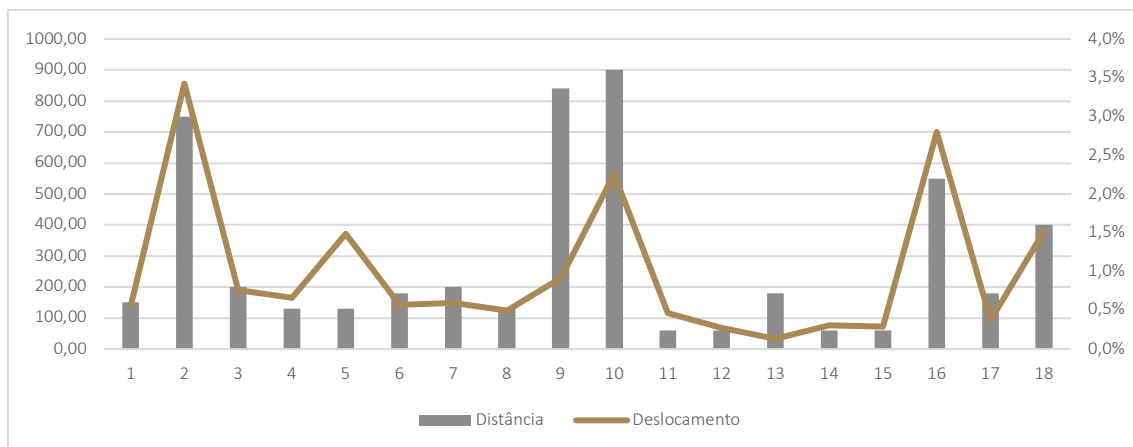
No entanto, nesse ponto observa-se grande diferença entre os orçamentos 9 e 10, os quais localizam-se distantes em 840 km e 900 km da fábrica, respectivamente. Ainda que ambos se encontrem igualmente afastados do fornecedor do material, a influência do item “Deslocamento” mostra-se superior para o orçamento 10, representando 2,3 % do valor total da estrutura. O mesmo item, no orçamento 9, equivale a 0,9 % do custo global. Aprofundando-se na análise das demais características destes dois orçamentos, de modo a compreender a origem desta diferença, observa-se que as duas residências possuem área construída quase que semelhante, de 956,40 m² para o orçamento 9 e 792,00 m² para o 10. Além disso, o volume de madeira empregado também se assemelha nos dois casos, correspondendo a 114,20 m³ e 133,70 m³, respectivamente. Entende-se, portanto, não serem estes os fatores de interferência para a discrepância apontada.

Gráfico 3: Percentual dos itens que compõem a categoria mão de obra no custo total da estrutura de madeira engenheirada.



Fonte: da autora (2023).

Gráfico 4: Relação entre distância da obra e porcentagem do valor de deslocamento em relação ao custo total da estrutura de madeira engenheirada.



Fonte: da autora (2023).

Em contrapartida, no subitem “Serviços”, percebe-se uma diferença significativa entre os dois orçamentos, sendo essa participação equivalente a 8,1 % para o de número 9 e 14,9 % para o de número 10. Da mesma maneira, a informação relativa à quantidade de peças também se mostra bastante discrepante, sendo a primeira estrutura composta por 81 peças e a segunda por 270.

A relação entre quantidade de peças versus tempo de montagem para uma estrutura de madeira engenheirada de fato já é apontada no capítulo anterior. Para comprovar, portanto, esta constatação, buscou-se realizar uma análise comparativa entre as informações levantadas para cada orçamento. Dessa maneira, de modo a possibilitar uma análise mais efetiva entre os 18 orçamentos e com base nas informações apresentadas na Tabela 2, foram calculados dois índices, os quais relacionam (iii) volume de madeira a ser fabricado para a composição da estrutura, incluindo painéis de MLCC e elementos de MLC (m^3), e (iv) quantidade de peças de madeira a ser utilizada na estrutura, à (i) área da estrutura orçada (m^2). Os resultados podem ser verificados na Tabela 3.

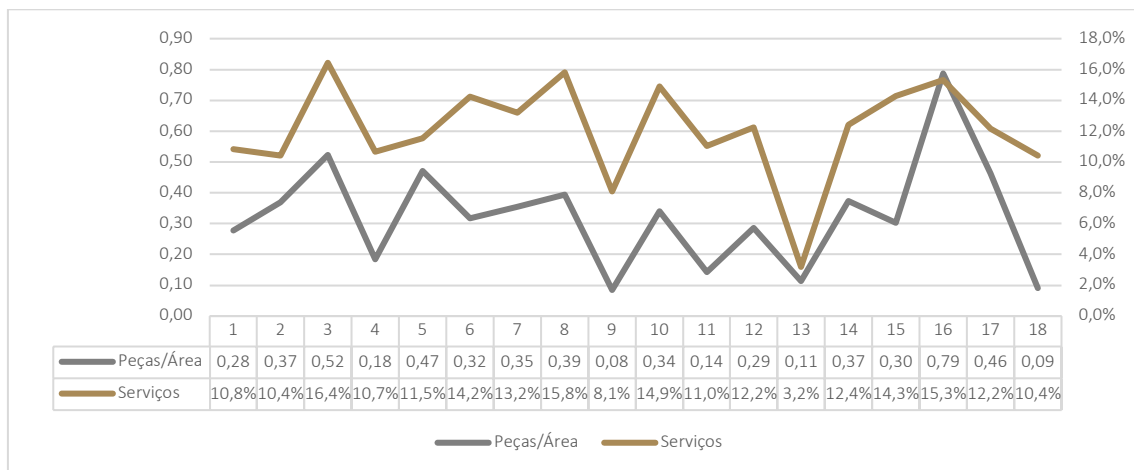
A partir do cálculo dos dois índices propostos, é possível relacioná-los também aos subitens analisados. Nesse sentido, o Gráfico 5 demonstra a sobreposição das curvas formadas pelo percentual do subitem “Serviços”, dentro da categoria “Montagem”, com a relação Peças/Área, estabelecida anteriormente.

Observa-se no Gráfico 5 grande semelhança entre as duas curvas traçadas. Desta forma, confirma-se a premissa já apontada de que quanto maior o número de peças estruturais empregadas, maior será o tempo de montagem da estrutura e, conseqüentemente, maior a influência do custo de montagem no orçamento global.

Assim, compreende-se que a diferença entre os orçamentos 9 e 10, apontados no Gráfico 4, originou-se, de fato, da quantidade de peças empregadas nas estruturas.

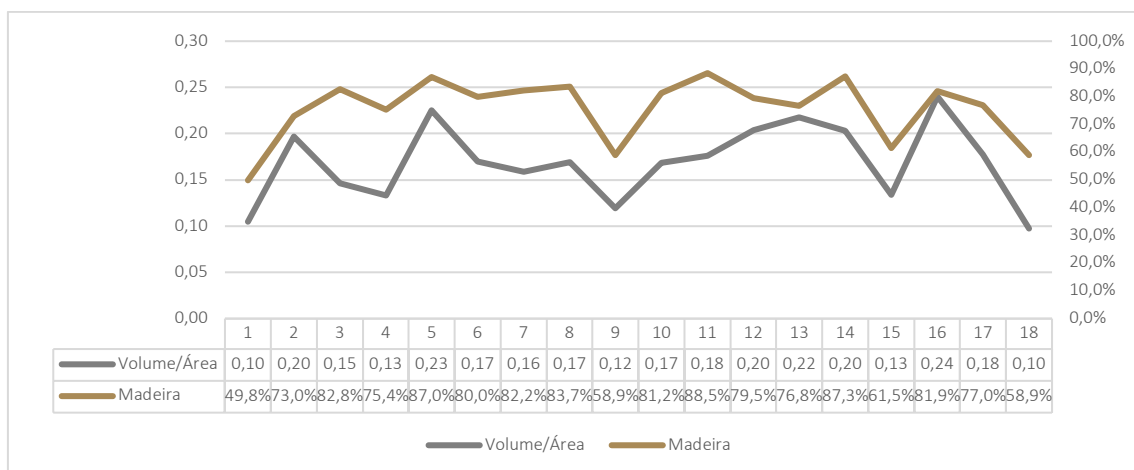
Nessa mesma lógica, o Gráfico 6 apresenta a sobreposição entre o subitem “Madeira”, dentro da categoria “Material”, com o índice Volume/Área. De forma análoga ao gráfico anterior, fica evidente a proporcionalidade existente entre as duas curvas encontradas, confirmando a relação direta entre o volume de madeira que deve ser fabricado para compor a estrutura e a influência do item “Madeira” na composição final dos custos desta.

Gráfico 5: Relação entre o índice de quantidade de peças utilizada por m² construído da edificação com a porcentagem do subitem de serviços no custo total da estrutura de madeira engenheirada.



Fonte: da autora (2023).

Gráfico 6: Relação entre o índice de volume de material utilizado por m² construído da edificação com a porcentagem do subitem de madeira no custo total da estrutura de madeira engenheirada.



Fonte: da autora (2023).

Tabela 3: Índices calculados para os orçamentos 1 a 18.

Nº	Área (m ²)	Volume (m ³)	Peças (un.)	Volume/Área (m ³ /m ²)	Peças/Área (un./m ²)
1	560,0	58,6	155	0,10	0,28
2	181,8	35,8	67	0,20	0,37
3	411,0	60,2	215	0,15	0,52
4	1134,3	151,2	209	0,13	0,18
5	70,0	15,8	33	0,23	0,47
6	485,6	82,5	154	0,17	0,32
7	350,0	55,6	124	0,16	0,35
8	530,4	89,7	209	0,17	0,39
9	956,4	114,2	81	0,12	0,08
10	792,0	133,7	270	0,17	0,34
11	350,7	61,8	50	0,18	0,14
12	335,8	68,3	96	0,20	0,29
13	1085,4	236,5	124	0,22	0,11
14	484,7	98,4	181	0,20	0,37
15	492,0	65,8	149	0,13	0,30
16	199,5	47,9	157	0,24	0,79
17	1025,7	182,0	474	0,18	0,46
18	341,1	33,2	31	0,10	0,09

Fonte: da autora (2023).

ANÁLISE DE PROJETOS ESPECÍFICOS

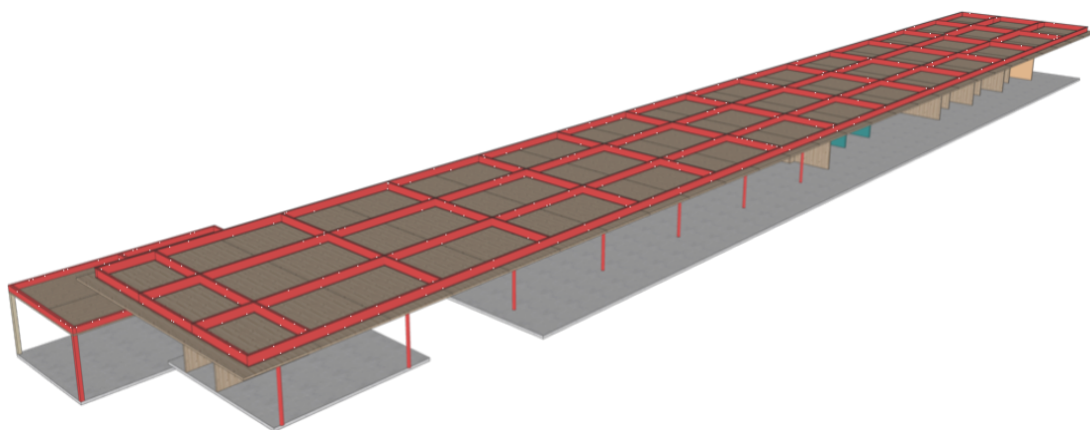
De modo a complementar as observações realizadas com base nos dados apresentados, analisou-se também os modelos tridimensionais dos orçamentos 9, 10 e 13, por serem essas as estruturas que mais se diferenciaram durante o presente estudo.

O orçamento 9 (Figura 56) trata de uma edificação térrea, composta por paredes de MLCC, pilares metálicos, lajes de MLCC na cobertura e estrutura auxiliar formada por vigas metálicas invertidas que sustentam as lajes da cobertura.

É uma estrutura relativamente simples e aberta, ou seja, apresenta poucos elementos de MLCC como paredes e espaços bastante amplos. A maior parte do perímetro da edificação será fechada por esquadrias, sendo que praticamente inexistem paredes de MLCC atuando como vedação externa com função estrutural. A madeira é empregada majoritariamente nas lajes de cobertura. Consequentemente, pelo número reduzido de paredes estruturais, ou mesmo vigas de MLC, torna-se necessário empregar vigas metálicas invertidas na cobertura (representadas na imagem acima em vermelho), para sustentação das lajes de MLCC, as quais permanecerão aparentes em sua face inferior, adquirindo, assim, função estética (forro interno) e estrutural.

Os elementos metálicos nesse orçamento, conforme já apresentado no Gráfico 1, correspondem a 32,1 % do custo total, enquanto os elementos de madeira equivalem a 58,9 % do valor global da estrutura. Juntos, esses elementos representam 91 % do valor total, ficando um pouco acima da média para essa categoria, que é de 87 %.

Figura 56: Perspectiva retirada do modelo tridimensional confeccionado durante a elaboração do orçamento 9.



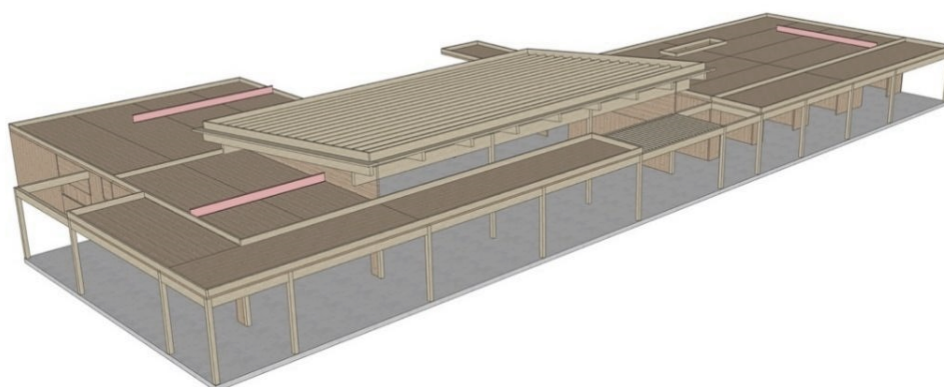
A análise deste modelo se justifica, também, pela quantidade de peças de madeira empregada na estrutura, a qual é baixa quando comparada aos demais orçamentos. Isso ocorre pois o MLCC está presente majoritariamente nas lajes de cobertura, as quais possuem grandes dimensões e nenhuma perda de material resultante da etapa de corte e usinagem dos painéis. A confecção das paredes dessa residência também acarretará pouca ou nenhuma perda, tendo em vista a adoção de um pé direito homogêneo e inferior a 2,90 m.

O orçamento 10 (Figura 57), assim como o 9, também representa uma edificação térrea, estruturada por paredes de MLCC internas e externas com função estrutural, pilares de MLC, lajes de MLCC na cobertura, vigas de MLC configurando um pergolado na cobertura central e três vigas metálicas invertidas posicionadas acima das lajes de MLCC para reforço estrutural.

Esta estrutura possui uma quantidade significativamente maior de paredes de MLCC quando comparada à anterior, bem como adoção de esquadrias de menor dimensão. Por esse motivo, tendo em vista que as lajes de MLCC se apoiam majoritariamente nas paredes estruturais, observa-se apenas três vigas metálicas atuando como estrutura auxiliar na cobertura (identificadas na imagem em rosa).

Dessa forma, o material madeira representa neste orçamento 81,2 % do custo total, enquanto a estrutura metálica corresponde a apenas 1,6 % do valor global. Juntos, esses elementos estruturais equivalem a 82,9 % do total, percentual este que se encontra abaixo da média de 87 % obtida a partir da somatória dos itens madeira e metálica.

Figura 57: Perspectiva retirada do modelo tridimensional confeccionado durante a elaboração do orçamento 10.

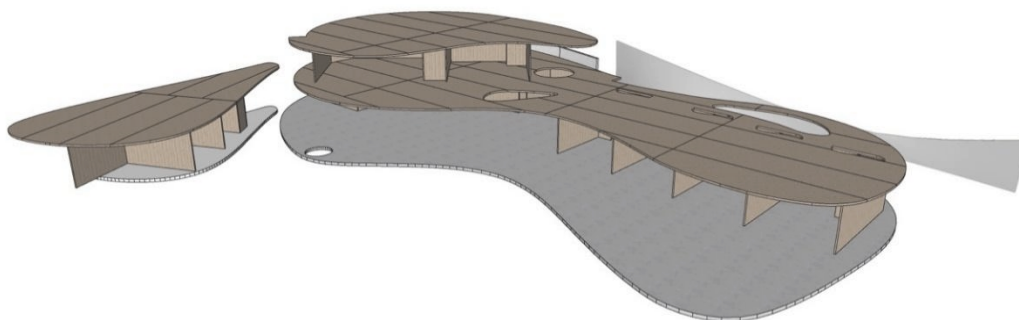


Isso se deve também à maior influência do item montagem verificada neste orçamento, tendo em vista a elevada quantidade de peças empregadas na edificação, como é apresentado pelo Gráfico 5. Conforme já mencionado, nessa estrutura são utilizados 270 elementos estruturais de madeira, os quais podem ser identificados no modelo tridimensional e se localizam especialmente no pergolado da cobertura central, estruturada com vigas de MLC.

Estudou-se, ainda, o modelo tridimensional elaborado durante o desenvolvimento do orçamento 13 (Figura 58). Esta estrutura diferencia-se bastante das anteriores, primeiramente, por possuir um segundo pavimento e, principalmente, por apresentar formas curvas em suas coberturas, as quais são formadas por lajes de MLCC. Essas lajes, por sua vez, apoiam-se em paredes estruturais de MLCC, que configuram tanto as paredes internas como externas da edificação. Esta estrutura também emprega vigas metálicas, embora os elementos metálicos não estejam representados no modelo tridimensional analisado.

Ainda assim, esses últimos representam 19,9 % do valor total da estrutura, enquanto os elementos estruturais de madeira correspondem a 76,8 % do custo global. A soma de ambas as participações equivale a 96,7 %, sendo este o maior valor encontrado para a categoria considerando todos os orçamentos estudados. Essa porcentagem elevada da categoria “Material” no custo total da estrutura é justificada com a análise do modelo tridimensional. O volume elevado de madeira considerado neste orçamento, totalizando 236,45 m³, não corresponde unicamente ao volume de material de fato empregado na estrutura, mas também à grande perda de matéria-prima decorrente do corte dos painéis para configuração das formas curvas.

Figura 58: Perspectiva retirada do modelo tridimensional confeccionado durante a elaboração do orçamento 13.



A execução de cortes curvos, como estes propostos no orçamento em questão, é inteiramente viável e, inclusive, já foi executada anteriormente, como é o caso da passarela com formato orgânico que integra o projeto de uso educacional, apresentado no capítulo anterior (Figura 42). No entanto, o processo de usinagem necessário para se atingir este objetivo naturalmente acarreta perdas de material, quando não há uma associação direta entre o projeto arquitetônico e o processo construtivo da tecnologia. Tais perdas, contudo, podem ser evitadas quando a elaboração do projeto considera a lógica inerente ao processo de fabricação.

ANÁLISE CONJUNTA DOS ORÇAMENTOS

Pela observação rápida da Tabela 2, nota-se que o orçamento 5, de menor valor, também representa aquele de menor área construída, com 70 m². Já o orçamento 13, de maior valor, é aquele que possui a maior área construída, com 1.085 m². Esse apontamento pode levar a uma primeira conclusão evidente e superficial de que a área da estrutura está diretamente relacionada ao custo final e que este poderia ser então facilmente determinado apenas por um valor padrão para cada metro quadrado construído. Por óbvio, existe uma relação entre área construída e custo. No entanto, como comprovado por Mascaró (2006), esta não é linearmente proporcional. Tratando-se ainda de estruturas de madeira engenheirada, outras peculiaridades do projeto tornam-se fatores determinantes para a composição orçamentária final, como pôde ser observado nas análises realizadas anteriormente.

Especificamente por meio da análise dos três projetos específicos selecionados foi possível constatar que sua dissonância em relação aos demais orçamentos resultou de questões oriundas da concepção dos projetos das edificações, as quais são resumidas a seguir:

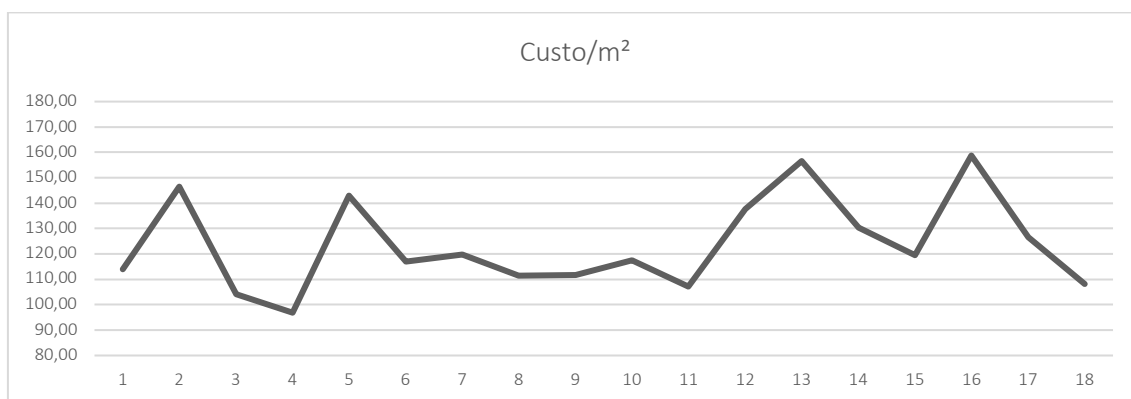
- Adoção de muitas esquadrias, poucas paredes estruturais de MLCC e cobertura composta por lajes de MLCC, resultando em:
 - baixo índice de quantidade de peças;
 - menor custo de montagem e deslocamento;
 - utilização de uma quantidade expressiva de vigas metálicas como estrutura auxiliar.
- Emprego de pergolado de MLC e muitas paredes estruturais de MLCC, resultando em:
 - alto índice de quantidade de peças;
 - maior custo de montagem e deslocamento.

- Formas curvas nas lajes de cobertura, resultando em:
 - muitas perdas no processo de corte e usinagem dos painéis;
 - elevado volume de madeira.

Todas essas decisões, naturalmente, assim como muitas outras escolhas realizadas durante a concepção do projeto arquitetônico da edificação, acarretam aumento ou redução dos custos da estrutura, como também demonstrou Mascaró (2006). Por esse motivo, especialmente no que diz respeito a estruturas de madeira engenheirada, não é possível afirmar que o custo está diretamente relacionado à área construída da edificação. No caso do presente estudo, como pode ser observado no Gráfico 6, esse valor apresenta grande variação de um orçamento para o outro, atingindo diferença de até 60% entre o menor e o maior índice encontrado.

Tal apuração, no entanto, já é verificada pela primeira lei definida por Mascaró (2006), a Lei do Tamanho. Todavia, vale ressaltar que o autor em questão analisa os custos globais da edificação finalizada, enquanto esta pesquisa pretende compreender os custos apenas da estrutura de madeira engenheirada, conforme conceito definido no início deste trabalho. Assim, para compor o custo global da edificação, o valor unitário aqui analisado para a estrutura deverá ser, posteriormente, acrescido ao custo dos demais componentes construtivos da edificação, a exemplo de revestimentos, acabamentos internos ou externos, instalações prediais, dentre outros mencionados anteriormente.

Gráfico 7: Custo do m² encontrado para os orçamentos analisados. Obs.: os valores apresentados não correspondem ao custo real da estrutura, conforme explicado no início deste estudo, tendo em vista que o objetivo é realizar uma análise comparativa entre os orçamentos, preservando o sigilo dos dados.



Fonte: da autora (2023).

Considerando o tamanho reduzido da amostragem analisada, ainda assim, verifica-se que todas as variações constatadas na análise dos números – a exemplo do Gráfico 2 – puderam, posteriormente, ser justificadas e compreendidas pelo estudo dos modelos tridimensionais.

Constatou-se, inclusive, que até o item deslocamento, resultante da localização da edificação, o qual inicialmente foi considerado como um dos fatores não relacionados diretamente ao projeto, mas que possuem relativa influência nos custos finais, sofre também alterações em função das decisões arquitetônicas. É interessante notar que esse item possui representatividade bastante baixa na composição total dos custos, atingindo, na situação mais desfavorável, pouco mais de 3 % do valor total da estrutura. Assim, entende-se que a localização da obra por si só, e o fato desta estar afastada do centro produtor da tecnologia, não inviabiliza a disseminação das construções em madeira engenheirada pelo país. Contudo, para que se comprove de fato essa conclusão, seria necessária ainda uma análise conjunta do custo do frete da estrutura, o qual neste estudo não foi considerado.

Comprovou-se também que, como levantado no capítulo anterior, o aproveitamento dos cortes dos painéis, ou seja, dos materiais empregados na estrutura, é uma prática que deve partir do próprio conceito arquitetônico e é consequência do conhecimento, por parte dos arquitetos e demais projetistas, das particularidades do processo construtivo da tecnologia adotada. Quando isso não ocorre, observam-se discrepâncias nos custos de construção, como pôde ser constatado no orçamento 13, o que pode inviabilizar sua execução. No entanto, como já mencionado, perdas desse tipo e os consequentes acréscimos nos custos de construção podem ser evitados quando o projeto arquitetônico é concebido de modo a respeitar as características da tecnologia construtiva, atingindo-se, assim, resultados arquitetônicos cada vez mais distintos.

Por fim, no que diz respeito ao custo unitário para fornecimento e montagem das estruturas de madeira engenheirada, comprova-se aqui a conjectura de que a métrica usual para levantamentos dos custos de edificações que empreguem tecnologias convencionais, como concreto ou alvenaria, baseada em valores padronizados por área de construção, é inteiramente inadequada quando se trata de elementos estruturais de madeira. Reitera-se, assim, que as variáveis identificadas no projeto arquitetônico resultam em impactos significativos no custo final de construção, sendo essa relação projeto-custo ainda mais evidente no caso do emprego de painéis de MLCC.

3.4. ESTUDO DE CASOS CONSTRUÍDOS

Como pôde ser observado, o fator de maior influência nos custos de uma estrutura de madeira engenheirada panelizada é o material em si. Este, por sua vez, é calculado com base na métrica do volume de madeira necessário para se confeccionar todos os elementos construtivos que compõem a estrutura e corresponde a cerca de 85 % do seu valor total. Verificou-se também que, na etapa de planejamento de corte, o aproveitamento dos painéis é de extrema importância. Desse modo, estruturas que acarretam muita perda de material terão acréscimo nos custos individuais deste item específico e, conseqüentemente, influenciarão de forma significativa também o montante final a ser despendido para sua execução.

O segundo fator de maior importância diz respeito ao tempo de montagem das estruturas, mensurado a partir da quantidade de peças nelas empregadas. Este, por sua vez, pode resultar tanto da própria configuração do projeto arquitetônico em si, como também de fatores externos, a exemplo de condições de acesso e possibilidade de permanência de equipamentos de grande porte no canteiro de obras.

Contudo, até o momento, estes fatores de influência foram abordados de maneira hipotética nos capítulos em que se discorreu sobre o processo construtivo em geral, ou mesmo de maneira sintetizada, quando da análise da composição dos custos. Importante observar que as estruturas analisadas previamente não se tratavam de edificações concluídas, mas sim de projetos em fase de orçamentação. Desse modo, visando ilustrar, com maior profundidade, sobretudo estes dois fatores mais relevantes aqui levantados e para além da mera suposição, isto é, para situações reais que de fato aconteceram, serão analisados a seguir dois casos de estruturas panelizadas.

Vale ressaltar que, neste momento, não se pretende analisar nenhum aspecto relacionado ao custo dos estudos de caso selecionados. As análises pretendem, em contrapartida, focar na etapa de planejamento de corte dos painéis de MLCC confeccionados como também na lógica de montagem adotada para cada situação. Será, ainda, avaliado o aproveitamento atingido para cada um desses itens e as razões que orientaram as principais decisões tomadas no desenvolvimento dos respectivos projetos.

ANÁLISE DO CASO 01

O primeiro projeto a ser aqui estudado em maiores detalhes consiste em uma edificação provisória construída em abril e desmontada em agosto do ano de 2018. Localizou-se no interior de uma exposição de arquitetura e *design* de interiores de renome, a qual neste ano em questão foi organizada no Jockey Clube da cidade de São Paulo. A concretização desta estrutura viabilizou-se por meio de um concurso promovido pela própria feira para a construção da Casa Sustentável na mostra. Assim, pode-se dizer que a maior premissa desse projeto consistiu na máxima busca pela sustentabilidade, desde aspectos projetuais, de uso do ambiente, até nos materiais empregados e nas possibilidades de desmontagem do ambiente após conclusão do evento.

O projeto deste espaço foi desenvolvido pela própria autora do presente trabalho, em conjunto com a arquiteta Larissa Oliveira. Dessa forma, foi possível uma coleta de dados bastante extensa. Além disso, essa edificação mostra-se também como uma boa forma de exemplificar limitações extremas de acesso e montagem de uma estrutura, assim como as estratégias adotadas para sanar tais dificuldades. Por esses motivos, justifica-se sua escolha como um dos estudos de caso a ser analisado nesta pesquisa.

Em relação ao contexto no qual a estrutura se inseriu, o maior esforço para acesso e montagem se apresentou desde o início do desenvolvimento do projeto, tendo em vista que o ambiente da Casa Sustentável deveria ser montado – e também desmontado – dentro de uma residência pré-existente e com suas vedações externas tombadas. Assim, em seu interior, esta casa, praticamente, não possuía nenhuma divisória. Estas ocorriam apenas nos espaços do banheiro e área de serviço. Nesse cenário, eventuais vedações a serem instaladas não poderiam ocasionar qualquer dano ao piso interno original da edificação. No exterior, da mesma forma, não era possível realizar nenhuma alteração na configuração de suas portas ou janelas, considerando a condição de tombamento mencionada. Tendo em vista o exposto, 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, distribuídos em uma área de 55,00 m² e dispostos de forma destacada da estrutura existente. Para isso, deveriam ser autoportantes, exigindo assim um material estrutural que os configurasse. Ademais, o bloco idealizado para os dormitórios (Figura 59), localizado aos fundos da casa, possuía uma cobertura transitável, ao aproveitar o pé-direito mais elevado na linha central da edificação.

Figura 59: Vista do interior da Casa Sustentável, do bloco dos dormitórios.

Foto: Rafael Luvizetto



Figura 60: Vista do interior da Casa Sustentável, do bloco da cozinha.

Foto: Rafael Luvizetto

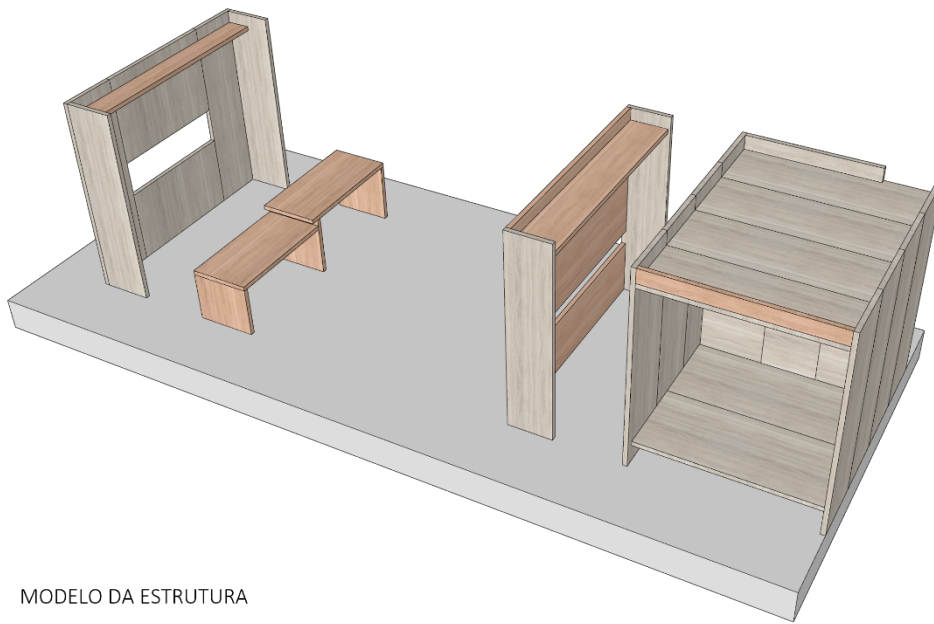


Além deste, o espaço se configurava ainda por um bloco para armários que separava a região privada do ambiente social, formado pela sala de estar e jantar. Por fim, na entrada, o terceiro bloco separava a cozinha e o ambiente social, do acesso principal da residência, composto por um *hall* de entrada (Figura 60).

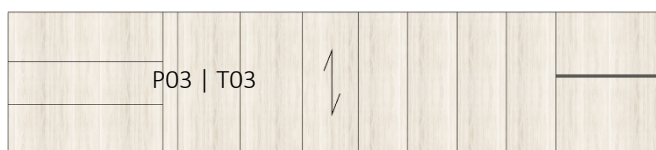
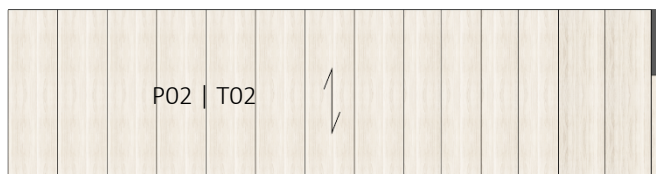
Tendo em vista as características estruturais necessárias para o material que configuraria este espaço, além da premissa de escolha de materiais com características sustentáveis, especificou-se, ainda durante a etapa de criação do projeto de arquitetura, o emprego de painéis de MLCC para todas as vedações que configuraram os módulos, bem como a laje acima dos dormitórios. Para a conformação da estrutura não se mostrou necessário o uso de peças metálicas auxiliares, como pilares ou vigas, ou mesmo elementos lineares de MLC. Dessa forma, a totalidade da estrutura se configurou por peças de MLCC, confeccionadas com pinus como matéria-prima. A estrutura era de pequeno porte, sendo que o volume dos elementos de MLCC utilizados correspondeu a 4,09 m³, distribuídos em 39 peças e em uma área de 55,00 m².

Contudo, para o emprego dos elementos de MLCC, uma das limitações de montagem, verificada desde o início do desenvolvimento do projeto, foi justamente o acesso para o interior desta edificação tombada, o qual se dava por meio de uma porta com dimensões limitadas e que não poderia ser demolida ou aberta. Para viabilizar toda essa montagem, os painéis, que possuíam altura de 2,75 m, foram divididos em larguras pré-determinadas, de até 80 cm, que possibilitassem peso máximo de 80 kg e permitissem, assim, que duas pessoas pudessem realizar o transporte e montagem 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 MLCC, nomeados P01, P02 e P03. Cada um consistia em uma tipologia única, respectivamente T01, T02 e T03 (Figura 61). 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 4. O volume total de painéis produzidos foi de 4,18 m³, enquanto o volume individual de todas as peças de MLCC somadas foi de 4,09 m³, como mencionado. Dois deles possuíam direção transversal e o terceiro, de menor dimensão, era longitudinal. Calculando-se a relação entre o volume montado e volume fabricado é possível constatar um bom aproveitamento quanto ao planejamento de corte, com racionalização equivalente a 97,85 % dos painéis fabricados. No entanto, não se pode dizer o mesmo para o número de tipologias confeccionadas, tendo em vista que cada painel produzido possuía dimensões únicas, impossibilitando a racionalização da etapa de prensagem.



MODELO DA ESTRUTURA



01 unid. de painel
sentido longitudinal
dimensão:
2,60 X 6,20 m (1X)

02 unid. de painéis
sentido transversal
dimensão:
2,75 X 10,60 m (1X)
2,30 x 10,60 m (1X)

PLANO DE CORTE

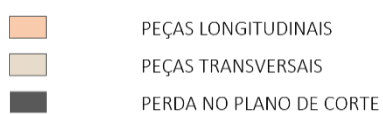


Figura 61: Esquema do plano de corte para o Caso 01. Fonte: da autora (2023).

Tabela 4: Características dos painéis fabricados para o Estudo de Caso 01.

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
TOTAL						4,09	4,18

Fonte: da autora (2023).

ANÁLISE DO CASO 02

A segunda estrutura aqui analisada consiste em uma residência térrea montada no mês de novembro de 2022.⁹ Localizada no município de Bertioga (SP), possui área de aproximadamente 280,00 m² e é composta por dois blocos. O bloco dos fundos comporta os ambientes sociais e de serviços e é configurado por paredes de MLCC, pilares de MLC, vigas e terças de MLC. Essas últimas exercem a função de apoio para a telha metálica termoacústica de cobertura. O bloco da frente, onde se localizam três dormitórios, estrutura-se com paredes e lajes de MLCC e vigas de MLC.

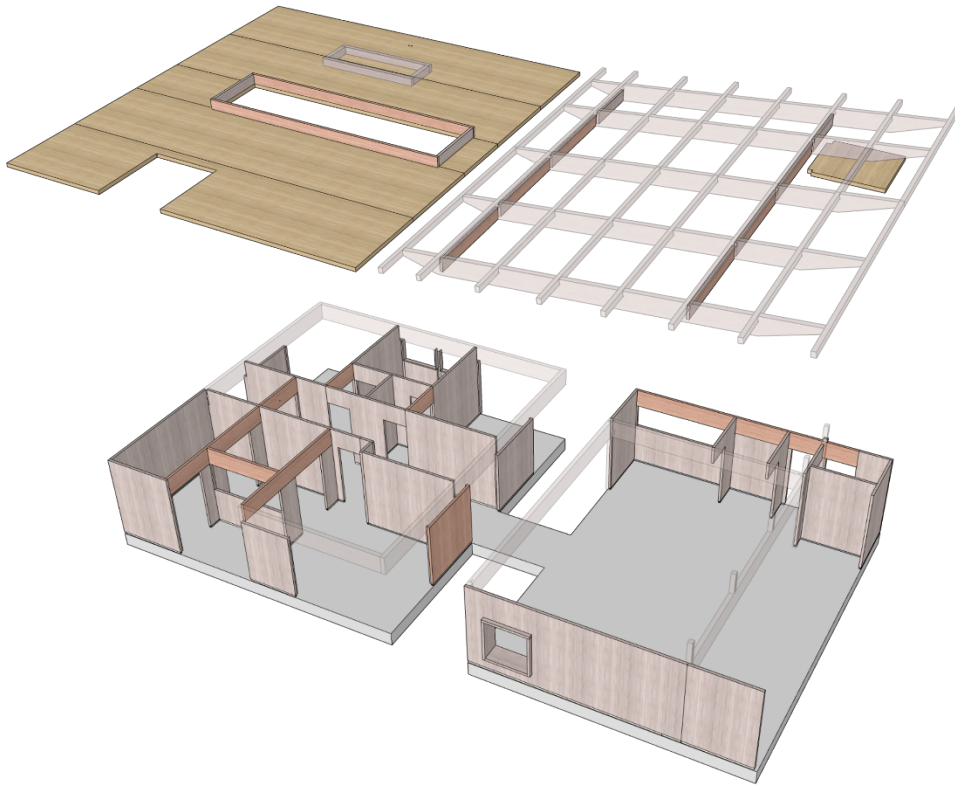
A escolha pelo uso do MLCC e MLC nesta edificação se deu, principalmente, pela velocidade de montagem e conclusão de obra proporcionada pelas tecnologias em questão, tendo em vista que os proprietários deveriam se mudar para a residência finalizada em um prazo bastante curto.

Em termos estruturais, não se observa o uso de peças metálicas auxiliares, como pilares ou vigas metálicos. Assim, foram empregadas apenas peças de madeira, confeccionadas com eucalipto como matéria-prima. Dessas, o volume dos elementos de MLCC utilizados corresponde a 33,65 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.

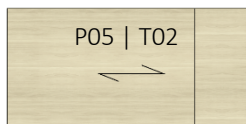
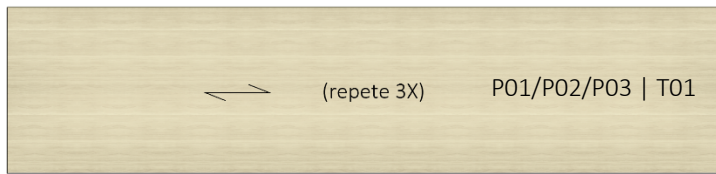
Antes de se iniciar, contudo, o projeto executivo da estrutura dessa residência, verificou-se a possibilidade de acesso com veículos ou equipamentos de grande porte. Isso porque o conjunto da estrutura continha algumas peças de grandes dimensões, como lajes com comprimento de 11,60 m por 2,70 m de largura e vigas com 10,70 m de comprimento. Considerando os tamanhos das peças, o veículo de transporte deveria ser, necessariamente, uma carreta.

Para a fabricação desta estrutura foram confeccionados 13 painéis de MLCC, divididos em 5 tipologias (Figuras 62 e 63). Essas tipologias se mostraram necessárias, inicialmente pela diferença de espessura entre as peças empregadas como lajes de cobertura e aquelas empregadas como paredes. 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.

⁹ O nome original do projeto não será mencionado de modo a preservar a privacidade dos proprietários.



MODELO DA ESTRUTURA



05 unid. de painel
sentido longitudinal
dimensão:
2,70 X 11,60 m (4X)
1,92 x 3,95 m (1X)

PLANO DE CORTE LAJES

- LAJES LONGITUDINAIS
- PAREDES LONGITUDINAIS
- PAREDES TRANSVERSAIS
- PERDA NO PLANO DE CORTE

Figura 62: Esquema do plano de corte para o Caso 02 (continua na próxima página). Fonte: da autora (2023).



PLANO DE CORTE PAREDES

Figura 63: Esquema do plano de corte para o Caso 02 (continuação). Fonte: da autora (2023).

Tabela 5: Características dos painéis fabricados para o Estudo de Caso 02.

Painel	Dimensão (m)	Tipologia	Uso	Direção	Nº peças	Volume peças (m ³)	Volume painel (m ³)
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
TOTAL						33,64	34,41

Fonte: da autora (2023).

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. Essas configuravam-se como apoios para as vigas de MLC ou bandeiras de MLCC com direção longitudinal e por esse motivo possuíam altura de 2,20 m. Entretanto para as bandeiras de MLCC mencionadas, foi necessário ainda a confecção de uma terceira tipologia, uma unidade, 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.

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 5. 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 MLCC somadas foi de 33,64 m³. Isto é, a porcentagem de racionalização dos painéis confeccionados em relação ao material utilizado para a montagem foi de 97,76 %.

Nesse item, conforme verificado na Figura 63, vale apontar que aberturas de portas e janelas foram realizadas como recortes nos próprios painéis. Essa prática, muitas vezes, ocasiona maiores perdas de material tendo em vista que, usualmente, o trecho retirado do painel para formar a abertura é descartado. No entanto, no caso desta estrutura em questão, por conta da disposição das peças nos painéis fabricados, resultante do plano de corte, mesmo essas eventuais perdas foram aproveitadas para confecção de peças de menores dimensões. Compreende-se assim a alta porcentagem de racionalização de corte verificada para este projeto.

No que diz respeito à etapa de logística, a totalidade das peças foi dividida em três cargas de transporte até o local de instalação. A primeira delas, que chegou na obra logo no primeiro dia de montagem, levou os perfis metálicos para conexão entre a laje de fundação e as paredes de MLCC, além de parafusos, barras, chapas e demais itens necessários para a execução dos trabalhos. Tendo em vista a menor quantidade de material e dimensão reduzida das peças, o transporte ocorreu em um veículo de menor porte.

A segunda carga (Figura 64) comportava todas as peças de madeira do bloco dos fundos, o qual, naturalmente, foi o primeiro a ser montado por uma questão de disposição no terreno. Esta carga foi enviada dois dias úteis após a chegada da primeira, tempo necessário para a instalação dos

perfis metálicos do bloco dos fundos. Como mencionado, devido às grandes dimensões das vigas que seriam instaladas, o veículo utilizado para este transporte consistiu em uma carreta. A terceira e última carga, que também exigiu o uso de uma carreta, transportou todas as peças do bloco da frente. Seu envio ocorreu com um espaçamento de quatro dias úteis em relação ao envio da segunda, de modo a possibilitar tanto a montagem de todas as peças do fundo quanto a instalação dos perfis metálicos da frente previamente à sua chegada. Para todas essas cargas, o carregamento em fábrica sempre ocorreu um dia antes de sua entrega na obra.

Em relação à montagem em si, esta se deu com o auxílio de um guindauto, do tipo caminhão *munck*. Para o armazenamento, verificou-se também a impossibilidade de se estocar uma grande quantidade de peças em obra, excluindo-se as vigas que, pelo seu formato linear, puderam ser posicionadas na lateral da edificação durante o período de montagem. Dessa forma, quanto à sequência de posicionamento das peças, procedeu-se com a instalação de todas as paredes diretamente da carreta, com exceção de uma única que, pelo seu maior porte, foi posicionada abaixo de toda a carga para melhor disposição e estabilidade das demais peças durante o transporte. Ou seja, na primeira carga, o caminhão *munck*, posicionado entre a carreta e o bloco dos fundos, realizava o içamento das peças direto da carreta, posicionando-as imediatamente no local correto, indicado pelo plano de montagem. As vigas de MLC, por sua vez, foram dispostas no frete agrupadas, ou seja, criando-se pacotes de peças que pudessem ser içados e retirados da carga com maior facilidade (Figura 65). Assim, primeiramente, foram descarregadas sendo, posteriormente, posicionadas com o auxílio do caminhão *munck* no local correto.

No mesmo dia da chegada desta segunda carga foram instaladas todas as peças de maior porte e peso, incluindo paredes de MLCC, 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.

Para o bloco da frente, a lógica de montagem se repetiu. Ou seja, as peças de MLCC e MLC foram içadas diretamente da carreta para o local de instalação. Para isso, a sequência no frete foi a mesma da sequência de montagem. Assim, as paredes de MLCC localizavam-se na parte superior da pilha, acima das vigas de MLC, as quais, por sua vez, estavam posicionadas acima das lajes.

Figura 64: Veículo de transporte com segunda carga, incluindo painéis de MLCC e vigas de MLC.

Fonte: da autora (2022).



Figura 65: Içamento de pacote com vigas de MLC para transporte e montagem.

Fonte: da autora (2022).



ANÁLISE CONJUNTA DOS CASOS

Como é bastante comum para estruturas de madeira em geral, o fator primordial para justificar o emprego do MLCC como material estrutural que permitisse a concretização do espaço conforme a concepção arquitetônica no primeiro exemplo aqui estudado consistiu na sua associação aos conceitos de sustentabilidade. Além disso, tanto para este primeiro quanto para o segundo estudo de caso, a escolha pelo uso da estrutura de madeira engenheirada deu-se ainda pelos benefícios proporcionados por uma montagem simples e rápida da estrutura.

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 MLCC não foram descartadas. Foram, na realidade, devolvidas e, na fábrica, receberam novo uso.

No entanto, também por questões de montagem questiona-se no primeiro estudo de caso se a escolha do MLCC foi de fato a mais interessante, tendo em vista as dificuldades verificadas nessa etapa, 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 MLCC, 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.

Ainda assim, talvez o uso do MLCC em si não tenha sido o mais apropriado para emprego de forma integral no projeto. Seu uso justifica-se no bloco dos dormitórios, o qual apresenta a laje transitável, legitimando a escolha por uma tecnologia com função estrutural. Contudo, para os demais blocos da frente, os quais apresentavam função apenas de divisórias, possivelmente a execução de elementos mais leves, como marcenarias, poderia ter, igualmente, atendido às necessidades impostas pelo projeto e pela obra. Isso porque ao se recortar de forma demasiada as peças para permitir seu posicionamento, 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 nos capítulos anteriores, relaciona-se diretamente ao tempo de montagem, ao se considerar a presença constante de um guindauto ou equipamento similar.

Além disso, a própria presença ou não deste equipamento também é um fator de interferência. 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. Já 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, torna o processo muito menos produtivo, pois a complexidade e o esforço demandado àqueles que estão atuando diretamente no serviço, acarretam a queda de rendimento individual, influenciando no resultado final.

É interessante destacar um último ponto ainda na etapa de montagem. Em nenhum dos dois casos estudados foi verificada a necessidade de caçamba nas obras. Confirma-se, de fato, que a produção de resíduo durante a montagem é praticamente nula. A logística se mostra também bastante eficiente, tendo em vista que, no segundo caso estudado, para a conclusão de uma estrutura de uma residência com aproximadamente 280,00 m² foram necessárias apenas 3 viagens entre fábrica e obra.

Em síntese, observa-se que as soluções empregadas em cada estrutura resultam de uma associação entre o projeto arquitetônico e o contexto no qual a edificação se insere. Este contexto aqui pode ser compreendido de forma ampla, incluindo tanto as características físicas do entorno imediato, como os acessos a serem verificados por todo o trajeto entre fábrica e obra, e contemplando ainda premissas próprias da edificação que são incorporadas ao conceito arquitetônico.

3.5. CONSIDERAÇÕES PARCIAIS DO DESENVOLVIMENTO

Diante do exposto nos capítulos anteriores infere-se que como cada contexto exige soluções projetuais singulares, específicas para as premissas que o envolvem, não há o que se falar em uma única resposta tida como correta, ou mesmo que se sobrepõe a todas as demais. Esta ideia é transmitida por Rebello (2007), o qual menciona que para uma mesma situação é possível existir um grande número de soluções, sendo que cada uma atenderá melhor a determinados quesitos.

No que diz respeito à concepção estrutural, o conceito “do melhor” é relativo, pois pode pressupor aquela estrutura mais fácil de se executar, a mais barata ou mesmo a mais agradável esteticamente. A melhor solução pode ser entendida como aquela que consegue resolver da maneira mais adequada possível os requisitos hierarquicamente impostos. Isto porque, muitas vezes, a beleza pode ser mais relevante para determinado contexto, mas possuir pouca importância em outro, que exige maior viabilidade financeira por exemplo. Assim, é função de quem concebe a estrutura compreender qual o grau de relevância de cada variável, requisito e restrição pré-determinadas para o projeto da edificação e possibilitar que estes sejam atendidos da forma mais eficiente e harmonizada possível. Nessa lógica, a pior solução para a estrutura certamente será aquela que apresenta um maior descompasso entre estes requisitos e as aspirações do projeto de arquitetura (REBELLO, 2007).

Conforme exemplificado pelos dois estudos de caso analisados anteriormente, as principais variáveis impostas pelos usuários e exigência do contexto foram: (i) a sustentabilidade e montagem com menor impacto, para o primeiro; e (ii) rapidez na montagem para o segundo. Esses quesitos se estabelecem no topo da ordem de preferência em relação aos demais, e foram, assim, considerados como ponto de partida para a escolha e desenvolvimento do conceito estrutural.

Tratando-se especificamente das estruturas de madeira engenheirada, além de premissas usuais consideradas em projeto, como localização, desejos do usuário, restrições urbanísticas, dentre outras, existem determinadas restrições adicionais que devem ser igualmente atendidas para que se possa alcançar essa solução mais próxima da ideal. Estas se relacionam à sua conformação estrutural e também às suas etapas de fabricação, logística e montagem, como visto nos capítulos anteriores. Contudo, quando são inseridas no conjunto de premissas do projeto, passam não mais a atuarem como restrições, mas sim como características próprias da tecnologia construtiva

empregada. O conhecimento prévio dessas características e sua incorporação ao conceito do projeto são, assim, fundamentais para a maior proximidade do resultado final ao que se compreende como a solução mais próxima da ideal.

Esse desenvolvimento apropriado do projeto em vista das premissas inerentes à tecnologia construtiva industrializada pode ser definido pelo termo DFMA, o qual é empregado, com grande frequência, pelo setor manufatureiro, como mencionado anteriormente nesta pesquisa. Tal conceito é, porém, comumente utilizado também pelo setor das estruturas de madeira engenheirada, para descrever o ganho de eficiência nos processos de fabricação e montagem, possibilitados pelas decisões adequadas de projeto.

Neste contexto específico da madeira engenheirada, como descrevem Woodard e Jones (2020), o termo DFM (projeto para fabricar) se refere à etapa de fabricação digital dos elementos de madeira, por meio do equipamento CNC, de modo a tornar esse processo o mais simples possível, sem preocupação com a maneira como os elementos estruturais poderão ser instalados. Isto é, deve-se considerar as limitações da ferramenta de corte, como dimensão e formato, de modo a conceber usinagens e furações passíveis de execução. A este item, entende-se aqui que deva ser acrescentado ainda o próprio planejamento do corte, bastante detalhado anteriormente. Intenciona-se, com isso, possibilitar máximo aproveitamento e menor desperdício possível de matéria-prima. Além disso, outra meta a ser mencionada é a busca pela maior repetição possível no número de tipologias de painéis a serem prensados, permitindo maior racionalização também desta etapa específica.

O DFA (projeto para montar), por outro lado, tem como foco o processo de montagem da construção, sem a preocupação prévia com o tempo necessário para a manufatura dos elementos construtivos. Assim, um primeiro item que deve ser considerado diz respeito à quantidade de peças para montagem, tendo em vista que quanto menor a quantidade de elementos construtivos, menor será o tempo despendido nessa etapa. Ademais, a questão das conexões neste ponto também se mostra bastante importante. Naturalmente, uma maior quantidade de linhas de conexão resulta em maior tempo da equipe em obra e número mais elevado de parafusos utilizados. Conexões mais simples, que permitem um encaixe rápido das peças entre si, também acarretarão maior agilidade nesta etapa do processo construtivo.

Na associação dos dois conceitos, o DFMA deve considerar tanto manufatura quanto montagem, de modo que garanta, quando propriamente executado, que o processo como um todo ocorra da maneira mais eficiente possível. Um detalhe que requer maquinários complexos para sua

execução pode, em contrapartida, possibilitar uma instalação extremamente simples e rápida. Da mesma forma, o oposto também é válido.

Para ilustrar situações divergentes como essa, o esquema a seguir, adaptado de Woodard e Jones (2020), apresenta a mesma parede, com mesmas dimensões e aberturas, mas que poderia ser concebida em projeto de duas maneiras diferentes (Figura 66). A primeira delas pressupõe o recorte e remoção das janelas diretamente do painel. Com isso, a montagem na obra seria bastante eficiente, pois necessitaria apenas de um movimento do equipamento para posicioná-la e demandaria linhas de conexão somente com as paredes adjacentes na extremidade. No entanto, é possível que uma peça dessa dimensão não possa ser transportada pelo veículo do frete, caso o local de montagem apresente alguma dificuldade de acesso. Além disso, a remoção das aberturas dos painéis resulta em uma produção maior de resíduos.

Assim, para a mesma parede é possível também executá-la com peças menores que envolvem as aberturas de janelas. Essa segunda opção pode gerar mínima ou até produção nula de resíduos, pois depende unicamente do encaixe das peças no plano de corte. Permite ainda um transporte com qualquer tipo de veículo, desde aqueles de menor aos de maior porte, podendo assim ser transportada até para locais de difícil acesso. Contudo, passa a exigir um tempo muito maior de montagem, pois ao invés de apenas uma peça, ter-se-iam 9 elementos construtivos a serem instalados com uma quantidade bastante superior de linhas de conexão e de parafusos, além daquelas já mencionadas para a primeira opção de desenho.

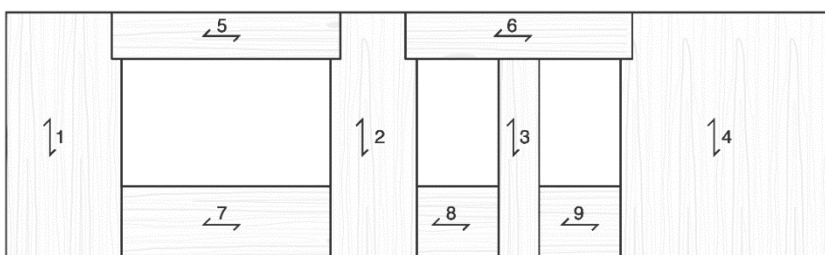
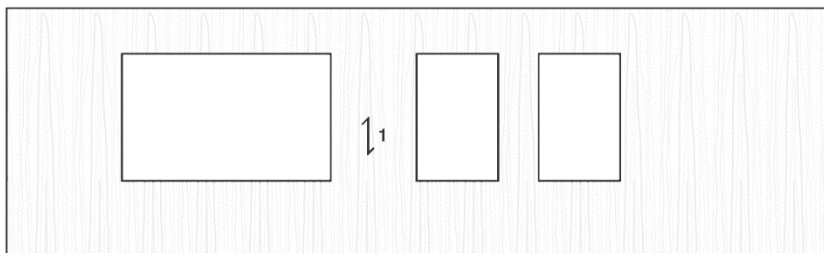


Figura 66: Esquema ilustrando duas possibilidades para fabricação de uma parede de MLCC.

Fonte: WOODARD; JONES (2020).

Retomando-se aos estudos de caso analisados previamente, pode-se mencionar que o primeiro exemplo de manufatura dessa parede seria mais apropriado ao segundo caso, ou seja, a residência de aproximadamente 280,00 m². Isso porque nesta obra específica era possível o acesso por uma carreta e a montagem em si deveria ser extremamente rápida, conforme solicitado pelos clientes. Já para o primeiro estudo de caso, em contrapartida, apenas a segunda possibilidade de produção da vedação seria plausível, tendo em vista que a montagem de uma peça com grandes dimensões não era viável naquele contexto específico de montagem. Além disso, a necessidade de se empregar materiais sustentáveis leva ao entendimento de que seria almejada a menor produção possível de resíduos, descartando assim a primeira opção de fabricação que acarreta o desperdício de material pela remoção das aberturas.

Com isso, fica claro que não há regras para a concepção e desenvolvimento de projetos de estruturas de madeira engenheirada. Não há uma única solução correta. Da mesma forma, não é factível desenvolver um passo a passo único para todos os projetos, para todos os casos. Projetos individuais apresentarão premissas diferentes e apenas com sua compreensão é possível que se atinja a solução mais próxima da ideal.

Verifica-se também que o conceito do DFMA abrange a totalidade do processo construtivo da estrutura. Deve ser considerado desde a concepção inicial da edificação, do projeto de arquitetura, de modo a incorporar as macro premissas do comportamento estrutural, além da fabricação, logística e montagem dos elementos construtivos. Da mesma forma, não adianta atingir máxima racionalização no traço inicial da arquitetura, originando, a título de exemplo, uma única tipologia de prensagem para uma edificação inteira, caso a compreensão do DFMA não seja levada adiante, ao detalhe do projeto. Para este mesmo exemplo, com uma única tipologia repetida centenas de vezes, quando da elaboração do projeto de instalações prediais, a ausência de DFMA pode acarretar usinagens únicas, sem nenhum tipo de padronização, ou posicionadas contrárias ao que se permite estruturalmente.

Tem-se, portanto, a necessidade de se considerar o conceito do DFMA desde a concepção inicial ao mínimo detalhe da edificação. Pressupõe-se, com isso, o comprometimento de todos os profissionais envolvidos no desenvolvimento da etapa projetual, do gerenciamento e da construção, desde arquitetos a projetistas de instalações elétricas e hidráulicas, passando pelas gerenciadoras e construtoras, para que se alcance o melhor resultado possível no todo do processo construtivo. A interdisciplinaridade é imprescindível para o sucesso de uma edificação executada com estrutura de madeira engenheirada.

Naturalmente, essa prática de envolver todos os agentes desde o início deveria ser comum para qualquer projeto, construído com as mais diversas tecnologias construtivas. No entanto, quando se trata de estruturas de madeira engenheirada, essa demanda por interdisciplinaridade é ainda mais latente. Isso porque todas essas decisões de projeto e obra impactam diretamente no processo construtivo e levam à maior ou menor racionalização desse processo.

No caso das estruturas aqui em estudo, comprovou-se que esse racionalização possui impacto direto nos seus custos de forma bastante significativa. Enquanto na construção convencional a métrica de estimativa orçamentária comum – ainda que possa ser bastante questionável – é pela área construída, para a estrutura de madeira engenheirada, essa lógica, definitivamente, não pode ser extrapolada. Como visto nos orçamentos analisados em capítulos anteriores, a variação de preço por metro quadrado de edificação foi na ordem de 60 %. Ou seja, para uma mesma área edificada o custo por metro quadrado da estrutura pode variar em aproximadamente 60 %, sendo que esta variação resultou da maior ou menor adequação da estrutura ao processo construtivo da tecnologia. Estruturas mais adequadas são significativamente mais econômicas do que aquelas que acarretam menor racionalização do processo, seja na fabricação, na logística ou na montagem.

Por esse motivo, reitera-se aqui a importância pela busca da forma estrutural otimizada, isto é, aquela que possibilita maior racionalização do processo construtivo da tecnologia desde os momentos iniciais de concepção arquitetônica. O posterior impacto dessa prática no custo para fornecimento e instalação da estrutura certamente será direto e bastante relevante. Desse modo, um projeto que consiga originar uma estrutura coerente em termos funcionais e que possa ser desenvolvida de maneira fluida e eficiente durante todas as etapas de processo construtivo, consequentemente alcança maior viabilidade financeira potencial para a concretização da edificação como um todo. Em contrapartida, um projeto concebido em estrutura de madeira engenheirada, que não insira o processo construtivo da tecnologia como uma premissa para sua concepção inicial, tende a apresentar custos mais elevados, seja pelas perdas de material acarretadas ou pela menor eficiência no uso dos maquinários e emprego de mão de obra.

Sabe-se que o custo é fator preponderante para a grande maioria dos usuários na escolha da tecnologia construtiva que irá compor sua edificação. Assim, os benefícios por ela apresentados podem se contrapor ante a sua inviabilidade financeira, possibilitando a refuta desta escolha pelo cliente.

Ademais, tendo em vista que, especificamente no caso das tecnologias aqui em estudo, o fator custo relaciona-se, também, diretamente com o fator racionalização do processo construtivo, é factível afirmar que aquelas formas estruturais mais viáveis economicamente são também aquelas que empregam de forma mais consciente e coerente os recursos necessários para a sua conformação. Esses recursos, por sua vez, podem ser materiais – indicados pelo volume necessário de madeira – ou em relação ao aproveitamento do tempo de uso dos equipamentos, sejam eles em fábrica, durante a montagem das estruturas ou o tempo despendido pela mão de obra que atua em todo o processo construtivo. O emprego consciente e coerente dos recursos materiais e do tempo é um dos aspectos almejados pelo conceito de sustentabilidade. Consequentemente, em outras palavras, pode-se afirmar que a estrutura mais otimizada é também a estrutura mais sustentável.

Nessa lógica, entende-se que a busca pela otimização da forma estrutural, ou seja, pela racionalização de todas as etapas de seu processo construtivo não é apenas uma questão de custo. Não se trata da busca por uma estrutura mais viável economicamente. Trata-se sim, acima de tudo, de um emprego consciente e coerente dos recursos naturais, de energia elétrica, de combustível e de energia humana. Em outras palavras, é também a busca por uma estrutura mais sustentável.

Há que se ponderar, ainda, que o quesito sustentabilidade é um dos fatores mais mencionados atualmente para justificar o emprego das estruturas de madeira. A escolha por essas estruturas, aplicando-as de forma não otimizada, isto é, não adequada a seu processo construtivo, e com conseqüente desperdício de matéria-prima e energia na sua execução, estaria na contramão desse princípio.

Desse modo, deduz-se que a busca por uma estrutura sustentável deve se pautar na maximização da racionalização de seu processo construtivo. Esse objetivo, por sua vez, pode ser alcançado pela incorporação do conceito de DFMA, desde as etapas iniciais de concepção arquitetônica e passando por todas as etapas posteriores de desenvolvimento do projeto da edificação e planejamento de construção.

Portanto, aponta-se que a integração, de maneira interdisciplinar, de todos os agentes envolvidos nessas etapas, de projeto, planejamento e execução da obra, é imperativa. A interdisciplinaridade mostra-se fundamental e imprescindível para que se atinja máxima racionalização no desenvolvimento do processo construtivo como um todo, resultando em uma edificação de fato alinhado aos conceitos de sustentabilidade.

04

PRODUTO

Com base nos estudos realizados anteriormente, a quarta parte da tese pretende consolidar os propósitos da pesquisa, por meio de uma proposta organizacional de um *plugin* que possa auxiliar a concepção de um projeto arquitetônico orientado à racionalização do processo construtivo da tecnologia em questão, de modo a garantir maior adequação a esse processo, menor desperdício de recursos e, conseqüentemente, maior viabilidade potencial da estrutura. Serão apresentadas premissas, índices e parâmetros considerados no planejamento do *plugin* em si, o qual, por sua vez, é representado na forma de um fluxograma que organiza suas etapas de funcionamento.

4.1. DEFINIÇÃO DO PRODUTO

Quando do desenvolvimento do conceito arquitetônico, a aplicação das particularidades e características das estruturas de madeira engenheirada não é tão simples quanto aparenta, conforme apresentado no decorrer do trabalho. Isso se deve à quantidade significativa de variáveis consideradas, envolvendo tanto questões estruturais, quanto de fabricação, logística e montagem. A decisão tomada em qualquer uma dessas etapas influencia direta e completamente a anterior ou subsequente. Ainda, para que se possa atingir maior racionalização do processo construtivo como um todo, garantindo o desenvolvimento de um projeto orientado ao conceito de DFMA, exige-se considerável experiência prática do profissional projetista. Como exemplo, tem-se o planejamento do corte dos painéis de MLCC, que deve buscar, simultaneamente, a menor perda possível de material aliada ao menor número possível de tipologias a serem prensadas.

Sabe-se que, para adquirir esse *know-how*, necessita-se profundo contato direto com a tecnologia, não apenas em projeto, mas em todo o entorno desse processo (fábrica, logística, montagem, conclusão da obra, etc.). Este conhecimento global do processo construtivo, desde o desenho até a conclusão do edifício, já foi um dia, há muitos séculos, cabível ao ser humano, quando da existência da figura do *master builder* renascentista, conforme discorrido no início desta tese.

Contudo, com o passar do tempo, a constante dissolução dessa pessoa que combinava os papéis de arquiteto, engenheiro, construtor e cientista, e conseqüente especialização das profissões e disciplinas, acarreta a progressiva desconexão entre diferentes atuações. No campo da construção civil essa desconexão ocorre principalmente entre aqueles que concebem os projetos e aquele, ou aquilo, que executa, ou fabrica, a edificação, sendo este um dos maiores problemas enfrentados pelo setor, não só atualmente, mas, como visto, há algum tempo.

Essa problemática é, inclusive, apontada por diversas pesquisas, muitas das quais foram mencionadas anteriormente. Tratando-se, especialmente, da construção industrializada, observa-se, por exemplo, que poucos profissionais de projeto possuem domínio das capacidades de manufatura e montagem de tecnologias e materiais, sendo que passam a superestimar, ou subestimar as possibilidades construtivas. Conseqüentemente, os projetos são raramente otimizados e frequentemente aparecem obstáculos ocasionados por alterações neles realizadas, para torná-los mais adequados aos processos fabris.

Dessa forma, a resolução da referida problemática é verificada como um objetivo comum de tais pesquisas, por meio da criação de fórmulas, 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.

A própria introdução das técnicas de fabricação digital é mencionada como uma das possibilidades de reaproximação entre projeto e execução, ao pressupor a transmissão direta das informações construtivas do modelo tridimensional da edificação aos equipamentos de fabricação. Pressupõe-se, para isso, a inserção de ferramentas de modelagem da informação da construção, que permitam a ocorrência deste *continuum* digital, no processo de desenvolvimento dos projetos das edificações.

Contudo, como mencionado, no caso das estruturas de madeira engenheirada, diante da quantidade de variáveis inerentes a seu processo construtivo, entende-se que as ferramentas de projeto e os equipamentos de fabricação, por si só, não possibilitarão a resolução dos problemas de comunicação entre arquiteto e construção.

Isso porque a adoção adequada dessas tecnologias construtivas demanda também mudanças na mentalidade daquele que projeta, para que este passe a compreender o conjunto completo da edificação como um produto. Processos de manufatura digital exigem a integração daquele que concebe com aquilo que executa. As premissas do processo construtivo industrializado devem estar presentes no projeto para permitir sua execução, pressupondo o entendimento do que a máquina consegue fabricar, do que o veículo consegue transportar e do que o equipamento consegue montar.

Destaca-se, porém, que não se espera que os profissionais de arquitetura detenham todo esse conhecimento profundo, este *know-how*, adquirido ao longo de uma intensa experiência de atuação neste nicho específico de mercado. Mesmo o *master builder* renascentista, em sua concepção original, necessitava de um período prolongado, atuando como aprendiz, para só então tornar-se a figura que permeava por todas as frentes de trabalho.

Entende-se, também, que o papel do arquiteto, atualmente, não se restringe à especialização excessiva em uma única técnica de construção, pois ele deve conhecer os demais sistemas necessários para a conclusão da edificação, além de questões que envolvem sua funcionalidade e seu desempenho, seja este térmico, lumínico, acústico, dentre outros.

Não obstante, é importante que, dada a oportunidade, todos tenham condições de projetar adequadamente estruturas de madeira engenheirada, embasando as decisões projetuais em

premissas reais, ou seja, em parâmetros que possam servir de auxílio para a concepção do projeto. Além disso, considera-se essencial, para a maior disseminação das estruturas estudadas, que este conceito arquitetônico possa também garantir, conscientemente, maior viabilidade potencial para o processo construtivo como um todo, acarretando diretamente em ganhos financeiros para o empreendimento bem como ganhos ao meio ambiente.

Para possibilitar este cenário, grande parte das pesquisas mencionadas propõe a associação de tecnologias digitais, por meio de abordagens que incluem, por exemplo, modelos generativos, princípios evolucionários e inteligência artificial, para auxiliar projetistas a tomar decisões conscientes em etapas ainda iniciais de concepção arquitetônica. Busca-se, com isso, sanar a capacidade humana de absorver e aplicar conhecimentos – naturalmente restrita quando comparada à atual aptidão das máquinas na resolução de problemas complexos –, acelerando assim o tempo necessário para formação da figura do *master builder*, capaz de permear por todas as etapas construtivas e estabelecer a conexão necessária do que se concebe ao que se executa, de forma alinhada às leis da economia de recursos, sejam eles naturais ou energéticos.

Além disso, emprega-se, com frequência, o conceito de DFMA às tecnologias de construção industrializadas, o qual é também bastante reforçado ao longo deste trabalho. Para sua implementação, o método mais utilizado consiste no emprego de *softwares* com o intuito de analisar o projeto quantitativamente. Assim, o próprio sistema computadorizado, ao empregar as regras e diretrizes estabelecidas previamente, pode analisar e otimizar o projeto repetidamente, avaliando automaticamente a qualidade do resultado após cada revisão.

Esta abordagem é utilizada, por exemplo, na pesquisa de Yuan *et al* (2017), que desenvolvem um processo de projeto paramétrico orientado a DFMA para estruturas de concreto pré-moldado, conforme apresentado no capítulo 2.2. Vale resgatar que o processo de otimização proposto pelos autores parte de duas etapas. A primeira estabelece uma biblioteca padrão de elementos pré-fabricados por meio de uma família desenvolvida no *software* Revit, que considera os requisitos das etapas de fabricação e montagem. A segunda envolve simulações de fabricação, transporte e montagem, por meio do desenvolvimento de um *plugin*.

De forma semelhante a esta pesquisa citada, como produto final do presente trabalho, planejou-se um *plugin* que poderia ser associado a uma ferramenta de modelagem tridimensional pré-existente e amplamente utilizada pelos profissionais da arquitetura, visando auxiliar na concepção de projetos arquitetônicos de edificações que empregam estruturas de madeira engenheirada. Ressalta-se que as diretrizes estabelecidas para funcionamento deste *plugin* consideram sua atuação exclusiva na orientação da criação inicial arquitetônica, ou seja, na

concepção do Projeto de Arquitetura, de modo a possibilitar que cada traçado arquitetônico a ser idealizado guarde coerência e adequação ao processo construtivo da tecnologia que será especificada para a estruturação da edificação.

Além disso, vale acrescentar que o planejamento do *plugin* considera o recorte tipológico estabelecido para o desenvolvimento desta pesquisa. Isto é, aplica-se às estruturas de madeira engenheirada enquadradas na categoria da configuração estrutural panelizada (composta por painéis de MLCC atuando como vedações e lajes, associados a elementos lineares auxiliares, como pilares ou vigas de MLC). Restringe-se também às edificações de uso residencial unifamiliar com gabarito máximo de dois pavimentos.

Entende-se, ainda, que essa concepção arquitetônica deva ser realizada, desde seu início, em um ambiente de modelagem tridimensional, sendo este um pressuposto para viabilizar a implementação do *continuum* digital no processo construtivo da tecnologia em questão. Além disso, tratando-se de estruturas de madeira engenheirada, verificou-se que até sua precificação se dá pelo volume de material empregado. Assim, caso em uma edificação seja adotado pé-direito de 2,50 m ou de 3,50 m, tal decisão ocasionará uma diferença significativa em todos os aspectos do sistema construtivo da estrutura, como analisado anteriormente. Daí a importância de uma ferramenta digital que possibilite projetar a volumetria das formas.

Além disso, o *plugin* planejado deverá, ainda, realizar a checagem do modelo tridimensional da estrutura, de modo a constatar maior ou menor racionalização do processo construtivo. Para isso, deverá ser analítico, ou seja, ele funcionará através da análise do modelo elaborado pelo usuário. Durante este processo, o *plugin* irá levantar dados específicos do modelo e calcular determinados índices, a fim de medir de forma concreta essa racionalização do processo construtivo e consequente otimização da estrutura. A análise destes dados ocorrerá de forma semelhante à metodologia utilizada para o estudo dos orçamentos e dos casos construídos, ambos discorridos em capítulos anteriores.

O levantamento de dados, no entanto, poderá ocorrer apenas com a correta modelagem da estrutura, empregando objetos com as mesmas características – os mesmos parâmetros – e regras de modelagem iguais. Assim, tendo em vista que todos os modelos partem do mesmo ponto e se baseiam nas mesmas premissas, será possível efetuar a correta comparação entre dados levantados.

Assim, a implantação do *plugin* poderá ocorrer em qualquer ferramenta de modelagem tridimensional que possua a possibilidade de criação de objetos paramétricos, que compreendam

o que são e como se comportam, que permitam a integração de dados e regras a eles associados. Em outras palavras, de um modelo orientado a objeto.

É possível mencionar ao menos três opções de ferramentas com as quais seria possível a aplicação do *plugin* idealizado pela presente pesquisa. São elas o Sketchup, o ArchiCAD e o Revit, que possibilitam a inserção de informação e de objetos inteligentes nos modelos tridimensionais da edificação.

A primeira delas, SketchUp, atualmente desenvolvida pela empresa Trimble, é definida em sua página virtual como uma maneira mais intuitiva de projetar, documentar e comunicar ideias em 3D. Conforme define Schreyer (2016), consiste em uma ferramenta de modelagem tridimensional que possibilita a inserção de dados inteligentes ao projeto, por meio de objetos paramétricos. Tais objetos são denominados no *software* em questão de “componentes dinâmicos”. Podem ser empregados como objetos inteligentes que permitem a interação com usuário, além de fornecerem as descrições e informações do produto e/ou fabricante. A atribuição de recursos dinâmicos nestes componentes ocorre, dentro da ferramenta, após a criação da sua geometria, por meio da inserção de parâmetros e fórmulas ao componente de modo a incorporar nele dados e informações ou para torná-lo reativo a determinadas ações do usuário (SCHREYER, 2016).

Um dos questionamentos frequentes verificados quanto ao uso do SketchUp é o fato de ser demasiadamente simples, afastando-se dos conceitos do processo BIM. Contudo, a simplicidade desta ferramenta é considerada aqui como uma de suas características favoráveis. Ainda assim, também se constatou a possibilidade de inserção de informações bastante complexas nos modelos desenvolvidos por esta ferramenta. Por meio de componentes dinâmicos, que atuam como objetos paramétricos, é possível, por exemplo, a inserção de informações simples, como sua geometria, até as mais complexas.

No SketchUp, especificamente, dá-se o nome de “extensão” para um *plugin*, que basicamente consiste em um módulo adicional que visa acrescentar funções a um programa existente. Essas extensões, por sua vez, podem ser programadas por qualquer usuário em Ruby, que é a linguagem de programação presente e disponível neste *software*. Conforme menciona Schreyer (2016), o Ruby é uma linguagem bastante comum entre os desenvolvedores de aplicativos e pode ser considerada como uma linguagem orientada a objetos.

A segunda ferramenta mencionada, o ArchiCAD, consistiu na primeira ferramenta a se viabilizar no campo da arquitetura, dentre as principais empregadas para o desenvolvimento e representação de projetos por meio de modelos tridimensionais. Criada pelo desenvolvedor

húngaro Graphisoft ainda no final da década de 1980, esta era, no início da década de 2000, uma das ferramentas BIM mais populares, sendo também a primeira comercializada industrialmente com tais habilidades. Como o próprio nome sugere, seu principal campo de atuação é a arquitetura, sendo voltado para profissionais arquitetos, *designers* e urbanistas (ONUR; NOUBAN, 2019).

O ArchiCAD, assim como o Revit, é definido por Eastman *et al* (2014) como ferramenta BIM de projeto de arquitetura que se desenvolveu “a partir das capacidades de modelagem paramétrica baseada em objetos desenvolvidos para o projeto de sistemas mecânicos” (EASTMAN *et al*, 2014, p. 29). Diferentemente do ArchiCAD, o Revit, no entanto, ampliou-se para além do campo da arquitetura. Este é um *software* de projeto de construção para arquitetura, engenharia estrutural e engenharia de sistemas mecânicos, elétricos e hidráulicos, conforme apresentado na página virtual do desenvolvedor, que consiste na Autodesk.

O emprego do Revit no setor da construção torna-se mais abrangente durante o final da década de 2000, sendo atualmente um *software* largamente adotado pelos profissionais da área. Trata-se de uma plataforma bastante robusta baseada em modelos inteligentes voltados para planejamento, concepção, projeto e construção de edificações e infraestruturas, que permite a associação e transição direta de vistas em 2D e modelo tridimensional (ONUR; NOUBAN, 2019).

As funcionalidades necessárias para a real implementação do *plugin* aqui planejado estão presentes basicamente em todas as três ferramentas apresentadas. Ainda que cada uma funcione da sua própria maneira, todas orientam-se à mesma essência, isto é, fundamentam-se na modelagem tridimensional baseada em objetos inteligentes.

Os parâmetros a serem inseridos nos objetos inteligentes de modo a possibilitar a correta modelagem da estrutura, bem como as diretrizes traçadas para o funcionamento do *plugin* planejado, serão ilustrados neste trabalho na forma de um fluxograma.

A intenção em se planejar este *plugin* de forma mais generalizada e apresentá-lo por meio de um fluxograma é justamente para que este possa ser inserido em qualquer *software* de modelagem arquitetônica. Para sua concreta viabilização, futuramente, este planejamento deverá ser traduzido na linguagem de programação adotada por cada ferramenta de modelagem, por profissional especializado, possivelmente um programador. Basta, para isso, apropriar-se do conhecimento de profissionais que tenham o domínio de cada ferramenta a fim de compreender as melhores formas de inserção da ideia concebida naquela escolhida.

Reitera-se que não faz parte do escopo da pesquisa desenvolver códigos em linguagem de programação para viabilizar de maneira prática o *plugin* proposto, bem como este não será inserido no *software* apresentado de forma exemplificativa. Com base nas experiências profissionais práticas da presente autora, associadas aos estudos teóricos e de casos construídos aqui desenvolvidos, propõe-se a organização desta ferramenta e suas reais necessidades para atingir o objetivo para ela almejado.

Contudo, antes de apresentar o planejamento do *plugin* em si, mostra-se necessário compilar as premissas, aqui já discutidas, e consolidar os índices a serem calculados, determinando corretamente as variáveis levantadas e a forma de cálculo. Assim, nos capítulos sucessivos, serão apresentadas as premissas compiladas, que irão orientar o desenvolvimento do projeto arquitetônico, assim como os índices, a serem empregados para calcular efetivamente a racionalização do modelo quanto ao processo construtivo.

4.2. DEFINIÇÃO DAS PREMISSAS

Como observado e amplamente discorrido nos capítulos anteriores, as estruturas de madeira engenheirada possuem determinadas características e peculiaridades que devem ser consideradas desde o início do desenvolvimento do conceito arquitetônico, quando se pretende garantir maior racionalização do processo construtivo da tecnologia. Tendo em vista estas particularidades e visando melhor orientar e auxiliar o processo de criação do projeto de arquitetura, são definidas no presente trabalho três premissas básicas para o emprego de elementos de MLCC e MLC como solução construtiva. Essas partem do pressuposto da sua própria nomenclatura, ou seja, estruturas de madeira engenheirada, de modo que o termo engenheirada remete a um processo de industrialização intrínseco à fabricação da tecnologia.

Como primeira premissa, deve-se ter em mente que estes são elementos construtivos estruturais que podem ser utilizados, no caso de painéis de MLCC, como lajes de piso, lajes de cobertura, paredes autoportantes internas e externas, além de pilares ou vigas quando se trata de peças de MLC. Dessa forma, é necessário manter em mente que, além do uso, sua função principal é a de uma estrutura. Isto é, um conjunto de elementos que sustentam e direcionam as cargas da edificação para o solo. Nesse sentido, por mais que apresentem aparência agradável e possam permanecer expostas em determinadas situações – apenas em condições de uso que permitam tal solução, a exemplo de painéis empregados internamente, fora do contato com possíveis fontes de umidade – os elementos em estudo jamais devem ser compreendidos, nem tampouco confundidos, com peças decorativas ou de função estética, semelhantes a uma marcenaria.

Além disso, tanto painéis de MLCC quanto elementos de MLC se baseiam na colagem de lamelas de madeira maciça para sua fabricação. Por conseguinte, tem-se como segunda premissa o emprego da madeira como matéria-prima. Esta, apesar de apresentar grande número de benefícios, igualmente mencionados anteriormente, possui como maior suscetibilidade a possibilidade de degradação no contato com a água. Consequentemente, do conceito ao detalhamento do projeto arquitetônico, há que se respeitar as diferentes naturezas dos materiais envolvidos e a sua durabilidade. Em especial no que diz respeito às ligações estruturais entre componentes e sistemas, a criação de barreiras de proteção dos elementos de madeira contra possíveis fontes de umidades mostra-se fundamental para que se possa garantir a devida durabilidade da estrutura ao longo da vida útil da edificação.

Por fim, como terceira premissa fundamental tem-se o próprio processo de fabricação industrializado destas tecnologias, o qual é conduzido integralmente em ambiente controlado, no interior de uma fábrica, desde o início da seleção de matéria-prima até a etapa final de acabamento das peças. Este processo, por sua vez, inclui ainda uma etapa de corte e usinagem dos elementos construtivos em equipamento com CNC, conforme modelo tridimensional desenvolvido para a estrutura. A introdução de tecnologias digitais de fabricação, ao possibilitar um *continuum* direto entre modelo tridimensional elaborado em computador e os movimentos do equipamento de usinagem, exige uma mudança na mentalidade daquele que concebe a estrutura. Isso porque, em processos dessa natureza, de modo a garantir seu adequado funcionamento, a lógica de projeto a ser empregada passa a ser semelhante à da indústria manufatureira. Em outras palavras, o projeto de uma edificação passa a ser, na realidade, o projeto de um produto.

Dessa maneira, é possível afirmar que a estrutura, a madeira e a industrialização são, assim, os três pilares para o desenvolvimento de um projeto de arquitetura que garanta maior racionalização do processo construtivo da tecnologia em questão.

É importante ressaltar que tais premissas são válidas para qualquer fornecedor da estrutura ou contexto geográfico de sua inserção. São princípios básicos que devem estar na mente daquele profissional que se propõe a projetar edificações que empreguem as tecnologias, sendo válido tanto nacional como globalmente. Desse modo, quando não ocorre a consolidação desses conceitos previamente ao desenvolvimento do projeto, o processo criativo e a posterior conclusão da obra tornam-se bastante prejudicados e inadequados à tecnologia. Algumas das consequências mais perceptíveis dessa inadequação implicarão justamente no acréscimo dos custos para fornecimento e montagem da estrutura.

Para cada uma das três premissas básicas é importante ainda compilar determinadas considerações realizadas anteriormente, as quais podem ser denominadas como premissas específicas. Vale acrescentar que algumas delas, relacionadas à matéria-prima ou ao processo de fabricação, são próprias ao contexto nacional e do fabricante analisado, podendo ser extrapoladas para outros produtores ou localidades com o ajuste dos parâmetros apresentados. Tais premissas particulares serão discorridas na sequência, agrupadas segundo os três pilares aqui definidos.

ESTRUTURA

No que diz respeito ao comportamento estrutural dos elementos construtivos de MLCC ou MLC, a primeira questão a ser reforçada é a colagem das lamelas como princípio fundamental para a transmissão das cargas. Ou seja, pilares e vigas de MLC originam-se da colagem sempre paralela das lamelas, resultando em elementos lineares. Painéis de MLCC, por sua vez, derivam da colagem cruzada das lamelas, atuando de forma bidimensional, mas com predominância na transmissão das cargas pelas lamelas externas. Por conseguinte, usualmente, no caso de paredes de MLCC, as lamelas externas posicionam-se na direção vertical, isto é, transversais ao painel, enquanto para lajes estas lamelas são longitudinais.

Como também descrito nos capítulos anteriores, a composição das camadas que configuram o elemento de MLCC é consequência direta, principalmente, da carga que este está suportando, da sua função na edificação e do dimensionamento da estrutura em situações de incêndio, no caso desta permanecer aparente. A espessura mais comum confeccionada para painéis de paredes pelo fabricante analisado é de 80 mm, sendo três camadas dispostas da seguinte forma: camadas externas de 20 mm e camada interna de 40 mm. Esta esbelteza das peças, no entanto, acarreta a necessidade de garantir o travamento da estrutura de maneira global, o que pode ser realizado pelo posicionamento das paredes perpendicularmente entre si, de forma análoga a uma dobra em uma folha de papel visando sua estabilidade quando posicionada na vertical.

Elementos empregados como lajes, por sua vez, possuem espessura mínima de 80 mm quando utilizados apenas como coberturas não transitáveis, na mesma composição mencionada para as paredes, para vãos de até 3,00 m e cargas baixas, equivalentes ao peso apenas da camada de impermeabilização. Já para o uso como pisos, essa espessura total é de, no mínimo, 120 mm (três camadas de 40 mm), tratando-se de vãos máximos de 4,00 m.

De modo a garantir o adequado funcionamento desta estrutura, mostra-se fundamental compreender o projeto arquitetônico de uma maneira global desde o início, incluindo determinadas decisões que possuem impacto direto no dimensionamento e disposição dos elementos estruturais. Para edificações de mais de um pavimento, por exemplo, nas quais são empregados painéis de MLCC como laje de piso, é possível a adoção de um contrapiso em concreto. Esta solução permite a execução de futuros serviços posteriores à montagem da estrutura, como desníveis entre áreas molhadas e ambientes secos, ou mesmo impermeabilização e assentamento de piso em espaços externos como varandas, que necessitam possuir o nível do piso acabado inferior ao nível do piso interno. A adoção dessa capa de concreto acarreta maior

peso na estrutura e impacta diretamente no cálculo estrutural, podendo resultar em aumento nas seções de vigas ou na espessura das lajes de MLCC. Isso ocorre também no caso de especificação de revestimentos muito pesados no piso, como pisos de pedra (mármore, granito etc.) com espessuras elevadas. Da mesma forma, as necessidades de passagem de instalações podem gerar impactos semelhantes no dimensionamento estrutural, quando exigem grandes aberturas na estrutura e acarretam a inclusão de apoios adicionais que sustentem as regiões sujeitas a interferências significativas.

Detalhes como esses parecem insignificantes em um primeiro momento e são muitas vezes definidos, inclusive, apenas ao final do projeto arquitetônico. Contudo, no caso de estruturas de madeira engenheirada, estes possuem grande impacto no projeto da estrutura, visando uma concepção estrutural adequada, ou seja, que não esteja sub ou superdimensionada.

MADEIRA

A utilização da madeira como matéria-prima para as estruturas aqui estudadas propicia inúmeros benefícios à edificação isolada e à construção no geral, relacionados principalmente ao uso de um recurso renovável, com menor impacto ao meio ambiente em comparação aos demais materiais empregados tradicionalmente pelo setor, associada a um processo de fabricação industrializado. No entanto, esse emprego pressupõe também a adequação de detalhes construtivos e premissas arquitetônicas às características particulares dessa matéria-prima, ao se buscar a produção de uma arquitetura consciente e durável.

Dessa maneira, a proteção da estrutura contra qualquer fonte de umidade não se refere apenas ao desenvolvimento de conexões ou barreiras físicas adequadas, a exemplo de revestimentos externos (fachadas), impermeabilização, rufos e pingadeiras. Esta questão deve ser incorporada também como uma premissa para a concepção dos projetos. Nesse sentido, presume-se que afastar a edificação de madeira das regiões naturalmente úmidas da construção é o caminho mais adequado para se garantir a durabilidade. A exemplo, é possível mencionar que projetar uma estrutura encostada em um muro de arrimo ou uma laje de piso de madeira muito próxima do solo não parece a solução ideal quando se intenciona o emprego de uma matéria-prima suscetível à umidade. A escolha dos materiais deve ser pautada também pelo seu desempenho em cada contexto no qual são inseridos, de forma a serem especificados nas condições que permitam o melhor aproveitamento possível de suas particularidades e seus benefícios.

Depreende-se, ainda, que a própria escolha da matéria-prima é uma questão a ser considerada na concepção da arquitetura, tendo em vista as diferentes características das espécies disponíveis atualmente na fabricação nacional de MLCC e MLC. Tais particularidades vão desde a resistência às intempéries, sendo que o eucalipto apresenta desempenho superior ao pinus neste quesito, até pontos mais específicos que influenciam no dimensionamento estrutural, como os módulos de elasticidades próprios de cada tipo de madeira. Logo, quanto ao uso da madeira, são definidas as premissas específicas a seguir:

- Quanto à escolha da matéria-prima: pinus ou eucalipto.
- Quanto à durabilidade: considerar a criação de barreiras contra possíveis fontes de umidade e o afastamento dos elementos estruturais de regiões naturalmente úmidas, sendo vetado o contato direto da madeira com o solo.

INDUSTRIALIZAÇÃO

Especificamente no que diz respeito ao processo construtivo industrializado das tecnologias construtivas em questão, é possível levantar premissas específicas para cada macro etapa desse processo a partir do início da “Fabricação”. Para esta primeira, especificamente, as duas etapas aqui consideradas como as principais para se atingir os objetivos almejados são: prensagem e corte/usinagem dos painéis. A prensagem, inicialmente, define os tamanhos máximos de fabricação dos painéis de MLCC. Posteriormente, a etapa de corte/usinagem, caso não planejada corretamente pelo Plano de Corte, ou desconsiderada durante a concepção do Projeto de Arquitetura, pode acarretar grandes perdas de material ou improdutividade na prensagem. Assim, da macro etapa de Fabricação, podem ser levantados os seguintes pontos:

- Quanto à prensagem: considerar o tamanho da prensa como limite dimensional dos painéis, sendo que, atualmente, as máximas dimensões que podem ser obtidas em projeto são de 14,40 m x 2,95 m.
- Quanto ao corte: considerar o planejamento dos cortes dos elementos de MLCC, visando garantir maior racionalização do painel, com perda mínima de material, aliado ao menor número possível de tipologias a serem prensadas. Para isso, manter em vista que peças com direção transversal não podem ser dispostas junto com aquelas longitudinais. O mesmo ocorre para diferentes espessuras e composições de camadas.

Posteriormente, tratando-se da macro etapa de “Logística”, reitera-se a importância do transporte da fábrica até o local de construção da edificação, o qual, assim como a prensa, pode também condicionar limites dimensionais para os elementos projetados. Como visto nos capítulos anteriores, quando o acesso à obra apresenta maior complexidade, este pode tornar imprescindível o uso de veículos menores, os quais permitem o transporte de cargas – ou seja, elementos estruturais – também com dimensões reduzidas. Desta macro etapa em questão, ressalta-se, portanto, a premissa específica a seguir:

- Quanto à logística: considerar a possibilidade de acesso do veículo de transporte ao local de montagem da estrutura. Para isso, respeitar os limites de carga, tendo em vista que caminhões *truck* permitem o transporte de peças com até 8,00 m de comprimento e carretas convencionais possibilitam transportar carga com até 12,00 m de comprimento.

Já a “Montagem”, por sua vez, irá se delongar de forma proporcional à quantidade de peças empregadas na estrutura. Assim, quanto mais peças, maior o tempo necessário para conclusão dessa macro etapa. Neste item, vale salientar que a quantidade de peças não é determinada exclusivamente pelo Projeto de Arquitetura. Em determinadas situações, as condições no entorno da obra podem impossibilitar o acesso de equipamentos de grande porte para execução do içamento das peças, acarretando a necessidade de conceber elementos de menores dimensões, os quais, em situações extremas, muitas vezes devem, inclusive, possuir peso máximo de modo a permitir que dois operários o carreguem. Deste modo, da macro etapa de Montagem, levanta-se o seguinte aspecto:

- Quanto à montagem: considerar a menor quantidade de elementos para configurar a estrutura, visando alcançar a maior redução possível do tempo total de montagem. Simultaneamente, verificar as possibilidades de acesso de equipamentos de grande porte, como guindautos ou guindastes. Quando não é possível proceder com a montagem por meio de tais equipamentos, considerar peso máximo da peça de madeira, de modo que esta possa ser movimentada apenas por operários.¹⁰

¹⁰ Conforme definição do artigo 198 da Consolidação das Leis do Trabalho, Decreto-Lei no 5.452 de 01/05/1943, o peso máximo que um empregado pode remover individualmente é de 60 kg. Uma peça, contudo, para ser movimentada manualmente, demanda no mínimo dois operários, devendo assim ter peso máximo de 120 kg.

4.3. DEFINIÇÃO DOS ÍNDICES

Para a checagem do modelo tridimensional da estrutura por meio do *plugin* analítico serão definidos, a seguir, determinados índices, que poderão ser calculados a partir dos dados levantados deste modelo. A finalidade dessa operação é, justamente, constatar maior ou menos racionalização do processo construtivo da tecnologia e melhor orientar a aplicação das premissas, visando à implementação das variáveis aqui encontradas em uma ferramenta de modelagem tridimensional.

A aplicação dos índices para comparar quesitos específicos do projeto já foi utilizada anteriormente nos capítulos 3.3 e 3.4, quando da análise dos orçamentos e dos estudos de caso. Portanto, os índices aqui definidos se apresentam como um aperfeiçoamento daqueles empregados de forma ainda preliminar nas análises realizadas previamente. Consolida-se, assim, o que se entende como a melhor maneira para, de fato, mensurar e apurar a adequação do projeto às premissas específicas definidas para a tecnologia construtiva em estudo.

Vale lembrar que, durante a análise dos orçamentos, foram levantados três indicadores, todos relacionados à área construída da estrutura. São eles: (i) o volume total de madeira empregado por área (já considerando perdas significativas no planejamento do corte); (ii) a quantidade de peças utilizadas na montagem por área e (iii) o custo por área. Neste último, contudo, o custo não representa o valor real da estrutura, mas sim o preço resultante da adaptação dos dados descrita com maiores detalhes no capítulo em questão.

Para os estudos de caso, por sua vez, optou-se por analisar questões mais relacionadas à fabricação em si. Desse modo, a porcentagem de racionalização do Plano de Corte foi calculada por meio da relação entre o volume líquido das peças utilizadas na montagem e o volume bruto de painéis de MLCC fabricados. Também se identificou o número de tipologias de painéis prensados para cada obra estudada.

Contudo, para a consolidação dos índices finais, duas das relações realizadas no momento da análise dos orçamentos não parecem adequadas para o que aqui se propõe, quais sejam, o volume e o custo por área construída da estrutura. Isso porque, não cabe neste momento levantar questões relativas ao custo, dado que o objetivo da definição dos índices é atuar justamente no auxílio à concepção arquitetônica quanto à adequação da forma e do espaço ao processo construtivo da tecnologia empregada. Dessa maneira, quando se trata da macro etapa

de fabricação da estrutura, entende-se que os critérios definidos para análise dos estudos de caso, ou seja, de racionalização do plano de corte e repetibilidade de tipologias de painéis prensados, são mais condizentes.

Para as macro etapas de logística e montagem, por outro lado, entende-se que a relação por área construída, definida na análise dos orçamentos, é bastante adequada. Como apontado anteriormente, quanto maior o número de peças estruturais empregadas, maior será o tempo de montagem da estrutura e, conseqüentemente, maior a influência do custo de montagem no orçamento global. Assim, é possível considerar a quantidade de peças como um parâmetro para avaliar a adequação da estrutura no que diz respeito à montagem dos elementos estruturais.

Nesse sentido, são estabelecidos aqui três índices, sendo o primeiro deles definido pela fórmula apresentada a seguir:

- **Índice de fabricação** = VP / VT

Onde:

Índice de fabricação é o cálculo da racionalização da fabricação dos painéis de MLCC

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

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

Para o primeiro índice, vale realizar algumas ressalvas. A primeira delas remete ao que foi mencionado sobre 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.

Além disso, ressalta-se que neste item serão considerados apenas elementos de MLCC, uma vez que sua produção apresenta maior complexidade e relação mais direta com o projeto arquitetônico, em comparação aos elementos de MLC.

Ademais, tendo em vista que a disposição das peças nos painéis a serem prensados depende de sua espessura, composição das camadas e direção longitudinal ou transversal, esta relação deverá ser calculada de forma separada para os diferentes itens que compõem a estrutura, os quais podem atuar como vedações ou lajes.

Inicialmente, no que diz respeito às paredes, estas terão espessura pré-determinada de 80 mm (composta por três camadas, sendo as externas com 20 mm e a interna com 40 mm), por consistir

na composição de camadas utilizada na grande maioria das vedações de tipologias residenciais unifamiliares pelo fabricante estudado. É de se destacar, ainda, 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.

O segundo grupo reunirá as peças utilizadas como lajes, com 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. Como visto, a espessura e composição de camadas dos elementos de MLCC atuando como lajes estão sujeitas ao dimensionamento estrutural baseado em diferentes parâmetros já mencionados em capítulos anteriores, sendo que aqueles que podem ser apontados como de maior relevância são o vão a ser vencido pelo elemento e seu uso (piso ou cobertura), que define inicialmente as cargas acidentais ou permanentes a serem consideradas. Por esse motivo, na grande maioria das edificações, lajes de piso, por estarem sujeitas a cargas mais elevadas, apresentarão espessuras maiores do que aquelas empregadas como coberturas.

A diferente espessura destes elementos, portanto, não permite que sejam agrupados em um mesmo painel para prensagem, tornando necessária esta divisão por uso. Da mesma forma, parte-se aqui do pressuposto que, neste momento de concepção inicial da forma estrutural, para um mesmo plano de lajes, seja este um plano de cobertura ou um plano de piso, todos os elementos individuais deverão ser pré-dimensionados de forma homogênea, isto é, com a mesma espessura para todos, possibilitando assim o agrupamento de todas as lajes de piso ou todas as lajes de cobertura em uma mesma categoria tanto para o planejamento do corte quanto para o cálculo dos índices.

Entende-se, com isso, que essa divisão de paredes e lajes permitirá definir o aproveitamento de material de forma real, frente às demandas do planejamento de corte e prensagem. Assim, serão obtidos até quatro resultados para este mesmo índice: 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 segundo índice, que diz respeito às tipologias de painéis de MLCC fabricados, representado pela fórmula a seguir:

- **Índice de tipologias** = NT / NP

Onde:

Índice de tipologias é o cálculo da racionalização da prensagem dos painéis de MLCC

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 relação entre ambos os números indicados. Ou seja, o usuário irá visualizar o número total de tipologias e o número total de painéis. Isso porque, considera-se que, neste caso, 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 no 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.

Já o terceiro índice aqui definido diz respeito à etapa de montagem, considerando todos os elementos de madeira que compõem a estrutura, incluindo aqueles de MLCC 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 foi ajustado em relação aos índices propostos para a análise dos orçamentos, passando a ser calculado pela seguinte fórmula:

- **Índice de montagem** = A / Q

Onde:

Índice de montagem é o cálculo da racionalização da montagem da estrutura

A é a área construída da estrutura de madeira

Q é a quantidade de elementos estruturais empregados, 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, menor será a quantidade de peças necessárias para a edificação total, potencialmente resultando em uma montagem mais rápida e eficiente.

Aqui, é necessário verificar previamente as possibilidades de acesso, bem como definir o tamanho máximo das peças a serem utilizadas, considerando o veículo de transporte mais adequado ao local de instalação. Ressalta-se, nesse ponto, que em canteiros de obra onde não é possível a permanência do guindauto ou guindaste, deve ser levado em conta peso máximo das peças de 120 kg, de forma a possibilitar a montagem apenas com a mão de obra, dispensando equipamentos auxiliares de grande porte.

Conclui-se, portanto, que os índices, conforme acima definidos, contemplam os principais aspectos abordados e identificados ao longo deste trabalho, de modo a possibilitar o desenvolvimento de um conceito arquitetônico adequado às premissas da tecnologia construtiva em estudo. Entende-se, ainda, que a relação dos volumes, ao considerar aquele utilizado (líquido) em relação àquele fabricado (bruto), mostra-se válida mesmo após refinamento dimensional dos elementos estruturais, pois a espessura da peça líquida deverá ser a mesma da peça bruta. A própria divisão entre paredes e lajes, sejam elas de piso ou cobertura, já contempla qualquer imprecisão, uma vez que os planos de lajes, em especial nesta tipologia construtiva pré-estabelecida, de uso residencial, usualmente serão dimensionados como uma unidade.

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 6. Já 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 7.

Conforme verificado na Tabela 6, no que diz respeito à etapa de montagem, como era de se esperar, os dois casos resultaram em índices significativamente diferentes. Enquanto para o

Tabela 6: Resultados dos Índices definidos para os Estudo de Caso 01 e 02.

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

Fonte: da autora (2023).

Tabela 7: Resultados dos Índices de fabricação e de tipologias por tipo de painel para o Estudo de Caso 02, calculados com base nos dados apresentados na Tabela 5.

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

Fonte: da autora (2023).

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 montagem 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 MLCC, 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 racionalização 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 racionalização do projeto arquitetônico.

Contudo, como visto, o aproveitamento 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.

4.4. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS

Para a inserção das premissas e índices definidos previamente em uma ferramenta de modelagem tridimensional, planeja-se o desenvolvimento de um *plugin* analítico. Este poderá ser associado à ferramenta em questão no momento da concepção inicial da forma arquitetônica. As diretrizes para funcionamento do *plugin* planejado foram estabelecidas de acordo com a explanação realizada previamente no capítulo 4.1 e se dividem em 6 passos subsequentes, os quais são ilustrados pelo fluxograma abaixo (Figura 67) e descritos em maiores detalhes a seguir.

Vale acrescentar que, ao final do processo, após apresentação dos resultados no último passo (Passo 06), caso estes sejam considerados satisfatórios, o usuário poderá optar por encerrar o uso do *plugin* e prosseguir com o desenvolvimento da modelagem arquitetônica ou realizar a exportação do modelo e utilizá-lo em outra ferramenta de sua escolha. No entanto, se considerar os resultados insatisfatórios, poderá também retornar à modelagem (Passo 04) e alterar o modelo até atingir os índices desejados.

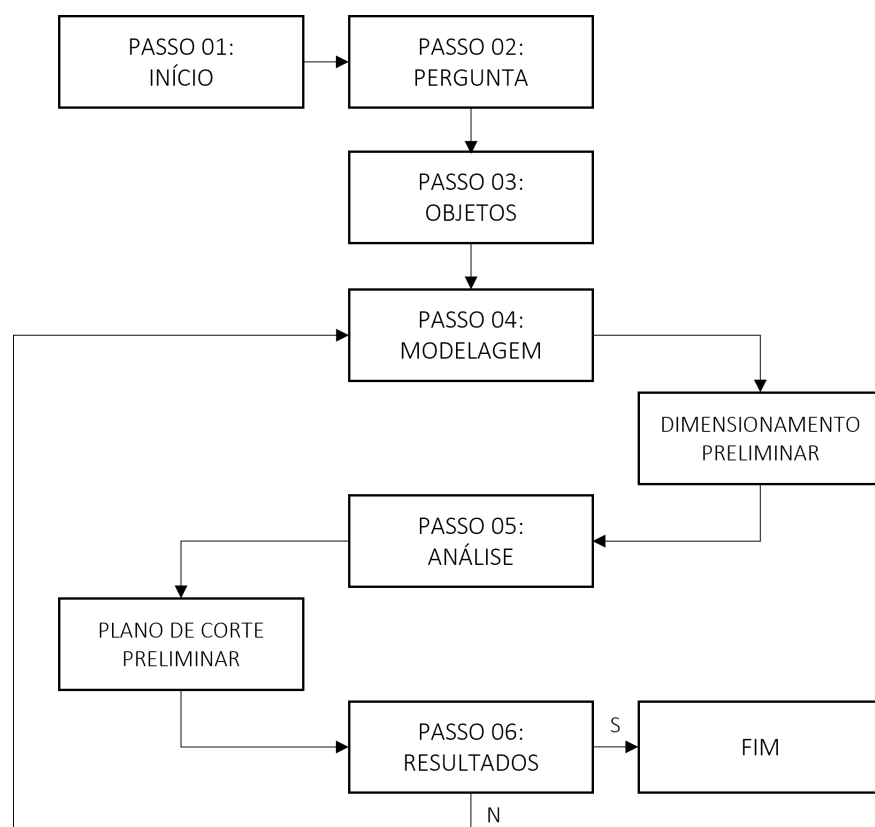


Figura 67:
Fluxograma
ilustrando a
organização e o
funcionamento do
plugin planejado.

Fonte: da autora
(2023).

PASSO 01: APRESENTAÇÃO

Entende-se que, antes do usuário iniciar o emprego do *plugin*, seria necessária uma apresentação inicial simples, rápida e ilustrativa de como irá funcionar a ferramenta que ele pretende utilizar e quais serão os resultados alcançados ao final. Da mesma forma, deverão ser transmitidas neste primeiro momento tanto as premissas fundamentais da tecnologia construtiva escolhida para o desenvolvimento do projeto (estrutura, madeira e industrialização), quanto o recorte tipológico para o qual o *plugin* em questão foi planejado (edificações residenciais unifamiliares com até dois pavimentos).

Além disso, é necessário fazer uma ressalva ao usuário, ao informá-lo que o objetivo do *plugin* não é executar o dimensionamento acurado do modelo. Algumas características básicas dos elementos, como espessura das lajes de MLCC e altura das vigas de MLC, serão definidas de maneira preliminar para que seja possível compreender a volumetria criada. No entanto, sua função será, basicamente, auxiliar na concepção da forma arquitetônica, sendo que, em uma próxima etapa de projeto, é fundamental que o dimensionamento preciso da estrutura seja realizado por um profissional especializado nesse campo de atuação.

Posteriormente, entende-se, ainda, que, para cada um dos passos que compõem o funcionamento do *plugin*, algumas caixas informativas deverão ser disponibilizadas a fim de que o profissional projetista possa compreender claramente aquilo que está sendo executado e as razões para tal. Isso ocorrerá, por exemplo, no momento da disponibilização dos objetos inteligentes, quando poderão ser apresentadas as regras de modelagem associadas a cada objeto disponibilizado, assim como os limites dimensionais de cada um.

Além disso, é possível também acrescentar neste *plugin* alguns ícones que poderão ser acessados pelo usuário, quando ele desejar, para que possa obter maiores informações sobre a tecnologia construtiva que está utilizando. Assim, poderão existir ícones denominados MLCC ou MLC que apresentem explicações sobre os processos de fabricação ou funcionamento estrutural de cada um desses elementos construtivos, por exemplo.

Todas estas interações, contudo, deverão ser muito sucintas, para não provocar no usuário uma reação adversa em relação à ferramenta. Poderão ser compostas por textos curtos, apresentados em caixas de diálogo, ou mesmo por meio de animações narrando as informações acima mencionadas.

PASSO 02: PERGUNTA

Na sequência, serão apresentadas duas perguntas para a correta disponibilização da biblioteca de objetos inteligentes, sendo a primeira delas:

1. Há restrições de acesso no local onde a estrutura será montada?
 - I. vias íngremes de terra;
 - II. vias com curvas muito fechadas;
 - III. vias locais (estreitas) em zonas urbanas;
 - IV. presença de edificação existente na frente e nas laterais ao local de montagem;
 - V. a montagem ocorrerá no interior de uma edificação existente;
 - VI. nenhuma das opções acima.

Para esta primeira pergunta, o usuário deverá selecionar ao menos uma das opções, mas pode marcar quantas considerar necessário.

Quando selecionada apenas a opção VI, os objetos inteligentes poderão ser utilizados com seus limites dimensionais máximos, ou seja, comprimento de 12,00 m, possibilitando o transporte com uma carreta comum, e, no caso de elementos de MLCC, largura de 2,95 m, por ser essa a máxima dimensão possível para prensagem dos painéis.

Quando selecionada uma ou mais dentre as opções I, II ou III, os objetos a serem disponibilizados passarão a ter como limite de comprimento o valor de 8,00 m, tendo em vista que as restrições de acesso selecionadas, via de regra, permitirão apenas a escolha de um *truck* como veículo de transporte da carga. A largura máxima pode ser a mesma da opção anterior, de 2,95 m.

Quando selecionadas as opções IV ou V, além de qualquer outra, o limite dimensional é restringido ainda mais, dado que a montagem possivelmente só ocorrerá sem o auxílio de equipamentos de grande porte auxiliares, mas apenas com o apoio da mão de obra humana. Assim, o limite dimensional passa a ser o peso dos elementos construtivos (máximo de 120 kg), calculado a partir das dimensões máximas e da densidade da matéria-prima escolhida. Por esse motivo, a segunda pergunta deverá ser:

2. Qual a matéria-prima de sua preferência para fabricação da estrutura?
 - i. pinus;
 - ii. eucalipto;

PASSO 03: OBJETOS

Definidas essas primeiras questões, serão preenchidos os parâmetros internos dos objetos inteligentes a serem disponibilizados para o usuário no segundo passo do fluxograma. Os parâmetros consistem nas premissas relacionadas às macro etapas de matéria-prima, fabricação, logística e montagem. Os objetos inteligentes, por sua vez, dividem-se da seguinte forma: lajes de MLCC, paredes de MLCC, vigas de MLC e pilares de MLC. Todos os parâmetros a serem inseridos nesses objetos serão apresentados e explicados a seguir. Além disso, estes podem ser também visualizados de forma compilada na Tabela 8 (página 216).

Para todos os quatro tipos de objetos, um parâmetro comum a ser considerado relaciona-se à densidade do elemento construtivo. Ademais, o cálculo do volume e do peso das peças também segue a mesma lógica, conforme descrito a seguir:

- densidade se selecionada a opção pinus, então = 550 kg/m³
 se selecionada a opção eucalipto, então = 650 kg/m³
- volume (m³) = espessura x comprimento x largura
- peso (kg) = espessura x comprimento x largura x densidade

Para as lajes de MLCC (Figura 68), são introduzidos ainda no objeto os seguintes parâmetros adicionais:

- espessura ≥ 0,08 m
- comprimento se selecionada apenas a opção vi, então ≤ 12,00 m
 se selecionada alguma das opções I, II ou III, então ≤ 8,00 m
 se selecionada alguma das opções IV ou V, então ≤ 4,00 m
- largura ≤ 2,95 m
- direção das lamelas = longitudinal

Se selecionadas as opções IV ou V na primeira pergunta, então o peso máximo da peça passa a ser limitado a 120 kg. Nestes casos, haverá limite dimensional para o comprimento e a largura a serem calculados pela fórmula (1) a seguir:

$$(\text{comprimento} \times \text{largura}) \leq (120 \text{ (peso)} / (\text{espessura} \times \text{densidade})) \quad (1)$$

Se selecionadas as opções IV ou V na primeira pergunta, então o peso máximo da peça passa a ser limitado a 120 kg. Nestes casos, haverá limite dimensional para o comprimento, que será calculado pela fórmula (2) a seguir:

$$\text{comprimento} \leq (120 \text{ (peso)} / (0,08 \text{ m (espessura)} \times \text{largura} \times \text{densidade})) \text{ (2)}$$

No caso das paredes, de forma diferente do que ocorre com as lajes, a largura passa a ser a variável fixa na fórmula anterior, tendo em vista que ela é equivalente, na maioria dos casos, ao pé-direito da edificação. Esta opção de restrição do comprimento reflete situações semelhantes ao Estudo de Caso 01 apresentado anteriormente, no qual é necessário o recorte dos painéis em peças demasiadamente pequenas para que se viabilize sua movimentação. Neste caso específico, a largura equivalia à altura dos módulos desta edificação específica estudada, de 2,75 m.

Em seguida, para as vigas (Figura 70) e pilares de MLC (Figura 71), são introduzidos nos objetos os seguintes parâmetros adicionais comuns:

- espessura = 0,16 m (pré-definida)
- comprimento se selecionada apenas a opção VI, então $\leq 12,00$ m
se selecionada alguma das opções I, II ou III, então $\leq 8,00$ m
se selecionada alguma das opções IV ou V, então \leq fórmula (3)

Se selecionadas as opções IV ou V na primeira pergunta, então o peso máximo da peça passa a ser limitado a 120 kg. Nestes casos, o comprimento será calculado pela fórmula (3) a seguir:

$$\text{comprimento} \leq (120 \text{ (peso)} / (0,16 \text{ m (espessura)} \times \text{largura} \times \text{densidade})) \text{ (3)}$$

No caso de vigas e pilares, a espessura pré-estabelecida de 0,16 m para ambos advém da dimensão padrão de fabricação das lamelas, a qual pode ter 0,14 m ou 0,16 m, como explicado anteriormente. Optou-se, então, por adotar a maior dentre elas.

Para pilares especificamente será, ainda, estabelecida largura de 0,16 m, resultante da colagem de 4 camadas de madeira com 4 cm de espessura cada. Esta é uma seção bastante usual para edificações com uso residencial e gabarito de até dois pavimentos.

É possível, contudo, que em um momento posterior de dimensionamento preciso desta estrutura, após consolidação do conceito estrutural, constate-se a necessidade de uma maior seção para estes elementos. Porém, a definição de uma seção padrão para estes objetos inteligentes visa simplificar a futura concretização do *plugin* em questão. Acrescenta-se, assim, o parâmetro largura da seguinte forma:

- largura = 0,16 m (pré-definida)

No que diz respeito às vigas de MLC, por outro lado, será considerado um valor mínimo para o parâmetro largura, da forma como apresentado abaixo:

- largura $\geq 0,20$ m

Observa-se que o estabelecimento de uma dimensão mínima para as vigas segue a mesma lógica daquilo já definido anteriormente também para a espessura de lajes. Nestes dois casos, entende-se que a definição de parâmetros fixos para suas espessuras (lajes) ou larguras (vigas), pode prejudicar bastante a compreensão volumétrica da forma estrutural que se pretende conceber. Isso porque, como explicado anteriormente, o dimensionamento desses elementos está intrinsicamente atrelado não apenas à carga que estes transmitem, mas também ao vão que vencem, tanto para a espessura e composição de camadas de lajes, quanto para a largura, ou altura, de vigas.

Por esse motivo, no caso de lajes, para a espessura mínima para esses elementos foi estabelecida a mesma empregada predominantemente para paredes, ou seja, 0,08 m compostos por 3 camadas (camadas externas de 2 cm e interna de 4 cm). Lajes com essas características são empregadas apenas em coberturas não transitáveis, que recebem apenas uma camada de impermeabilização do tipo flexível (mantas de impermeabilização). Para lajes de piso, esta espessura é, comumente, superior. Já para vigas optou-se aqui por estabelecer uma altura mínima de 0,20 m destes objetos inteligentes, tendo em vista que esta dimensão resulta de um MLC composto por uma camada a mais do que a do objeto pilar descrito anteriormente, isto é, 5 camadas de madeira com 4 cm de espessura cada.

Esta especificação mínima para objetos com função de lajes ou vigas tem como objetivo possibilitar a disponibilização no *plugin* de um objeto com uma volumetria inicial. No entanto, para esses elementos específicos, considera-se fundamental o seu dimensionamento preliminar para validação da seção, o qual será melhor apresentado no passo seguinte.

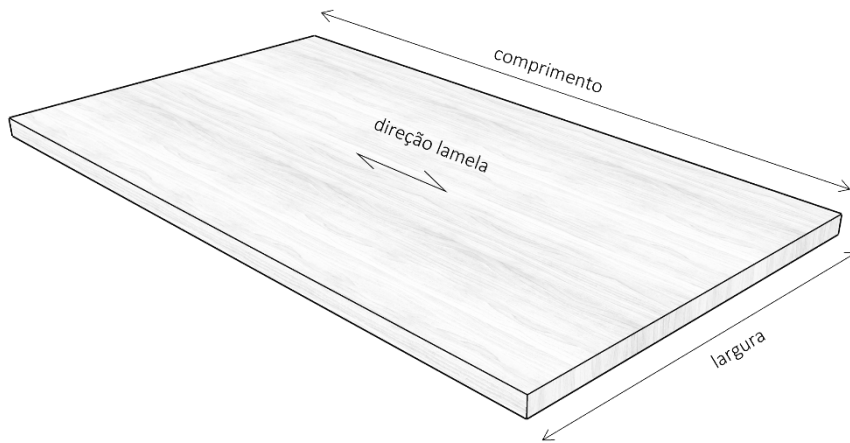


Figura 68: Ilustração da configuração geométrica do objeto laje.

Fonte: da autora (2023).

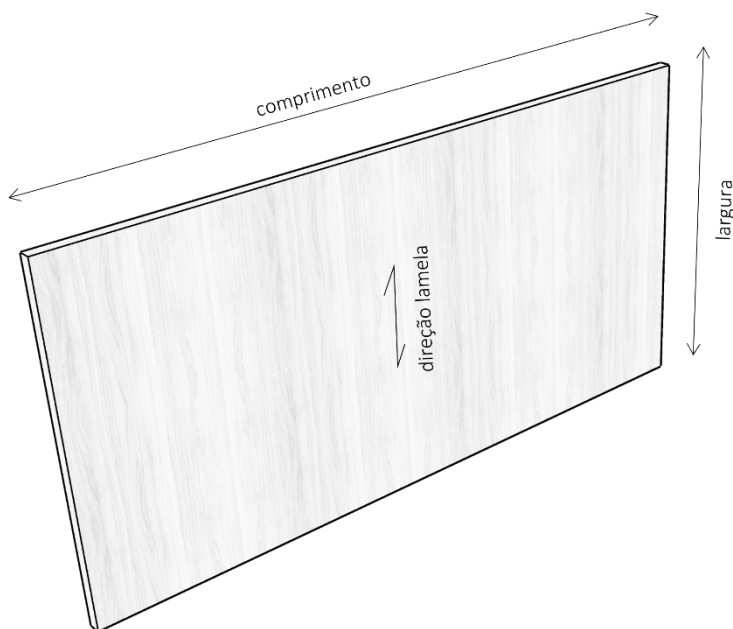


Figura 69: Ilustração da configuração geométrica do objeto parede.

Fonte: da autora (2023).

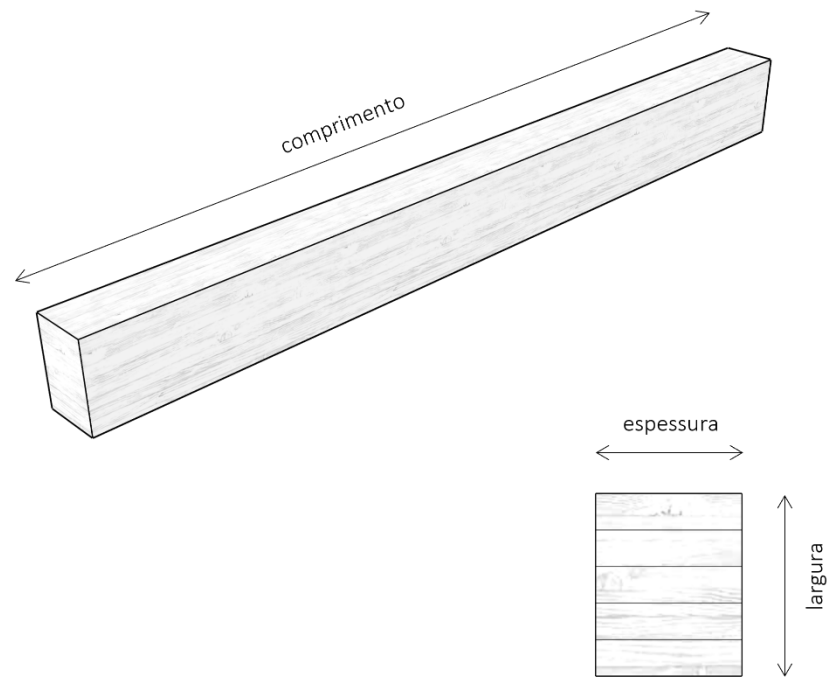


Figura 70: Ilustração da configuração geométrica do objeto viga.

Fonte: da autora (2023).

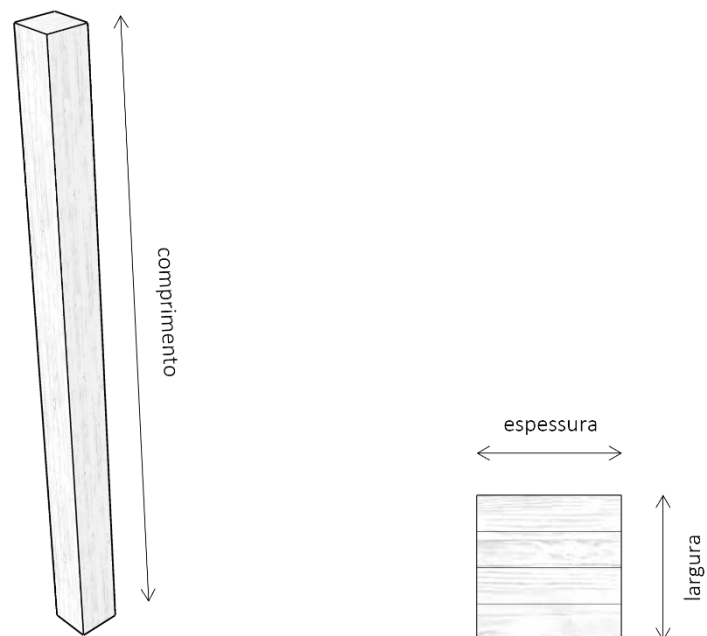


Figura 71: Ilustração da configuração geométrica do objeto pilar.

Fonte: da autora (2023).

Tabela 8: Parâmetros compilados para os quatro tipos de objetos.

	laje MLCC	parede MLCC	pilar MLC	viga MLC
espessura	$\geq 0,08$ m	= 0,08 m	= 0,16 m	
comprimento	se opção VI, então $\leq 12,00$ m			
	se opções I, II ou III, então $\leq 8,00$ m			
	se opções IV ou V, então $\leq 4,00$ ¹¹	se opções IV ou V, então $\leq (120 / (\text{espessura} \times \text{largura} \times \text{densidade}))$		
largura	$\leq 2,95$ m	se comprimento $> 2,95$ m, então $\leq 2,95$ m se comprimento $\leq 2,95$ m, então: <ul style="list-style-type: none"> ○ se opção VI, então $\leq 12,00$ m ○ se opções I, II ou III, então $\leq 8,00$ m 	= 0,16 m	$\geq 0,20$ m
volume	= espessura x comprimento x largura			
densidade	se pinus, então = 550 kg/m ³ se eucalipto, então = 650 kg/m ³			
peso	= espessura x comprimento x largura x densidade			
direção lamela	= longitudinal	se largura $> 2,95$ m, então = longitudinal se largura $\leq 2,95$ m, então = transversal	n/a	
transitável	se sim, então uso = piso se não, então uso = cobertura	n/a		

Fonte: da autora (2023).

¹¹ Neste caso, aplicar ainda a restrição: $(\text{comprimento} \times \text{largura}) \leq (120 / (\text{espessura} \times \text{densidade}))$

PASSO 04: MODELAGEM

Na sequência, após respondidas as perguntas e disponibilizada a biblioteca adequada de objetos inteligentes, inicia-se o passo da modelagem da estrutura concebida. Para isso, as premissas estruturais apresentadas nos capítulos anteriores foram transformadas em regras para orientar a modelagem de modo que essa ocorra da maneira mais fidedigna possível.

Entende-se que é fundamental conceber a estrutura desde o início de tal forma que ela possa garantir minimamente a sua estabilidade e dispensando grandes alterações drásticas em seu conceito para viabilizá-la posteriormente, quando do dimensionamento real da estrutura. Naturalmente, esta etapa de dimensionamento acurado, a ser realizada após a concepção, é de fundamental importância, sendo que as premissas ou regras de modelagem aqui propostas são bastante simplificadas e generalizadas, visando atender aos objetivos estabelecidos de auxílio e orientação da concepção da arquitetura alinhada à racionalização do processo construtivo.

As regras de modelagem são as que seguem:

- As paredes, ao transmitirem cargas verticais, quando apoiadas em lajes de fundação ou de piso, deverão ser posicionadas com suas lamelas externas na vertical (Figura 72);
- Pilares, ao transmitirem cargas verticais, deverão ser posicionados na vertical;
- As lajes deverão ser posicionadas de tal forma a possuírem ao menos dois apoios que deverão ser elementos de paredes ou vigas e estarão dispostos transversalmente à sua direção de atuação, ou seja, alinhados à sua largura (Figura 73);
- Toda viga deverá possuir ao menos dois apoios. Os apoios deverão ser elementos de paredes, pilares ou outras vigas;
- De maneira semelhante ao conceito de dobra na folha de papel, toda parede deverá ter ao menos um segundo objeto de transmissão vertical de carga posicionado de forma perpendicular a ela, que poderá ser uma segunda parede ou um pilar (Figura 72);
- A estrutura poderá ter gabarito máximo de dois pavimentos (recorte tipológico pré-determinado na presente pesquisa).

As supracitadas regras de modelagem baseiam-se no funcionamento estrutural da tecnologia em estudo, sobre o qual se discorreu no item 3.2 do presente trabalho. Apesar do dimensionamento estrutural não consistir no foco deste estudo, ou mesmo a área de atuação da autora, constatou-se que sem adentrar minimamente nesse tema, não seria possível a conclusão satisfatória do planejamento do *plugin* da forma como almejado nesta pesquisa. Mesmo porque, como definido

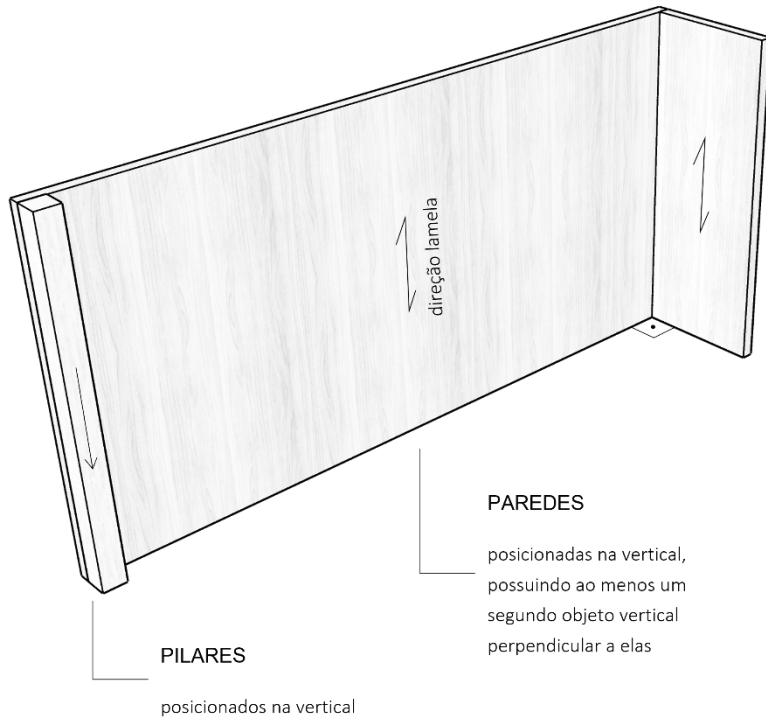


Figura 72: Regra de modelagem para objetos paredes.

Fonte: da autora (2023).

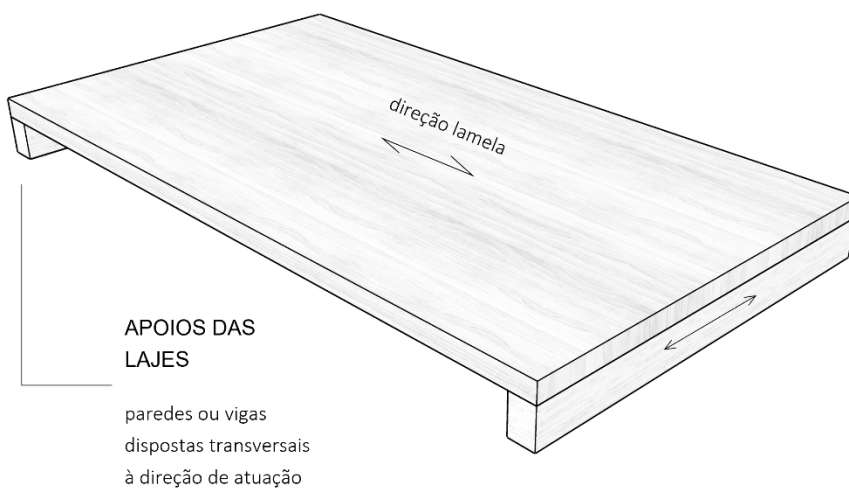


Figura 73: Regra de modelagem para objetos lajes.

Fonte: da autora (2023).

nas premissas fundamentais das estruturas de madeira engenheirada, estas são, em sua essência, elementos com função estrutural, atuando na sustentação da edificação e na transmissão de cargas.

Quando se trata de uma estrutura de madeira engenheirada, forma arquitetônica e comportamento estrutural estão extremamente relacionados, sendo que um é resultado do outro e vice-versa. Para qualquer tecnologia construtiva esta relação também é válida conforme ressalta Rebello (2007). Contudo, no caso das estruturas objeto desta pesquisa, tendo em vista seus atributos estéticos e o emprego de vedações com função estrutural, reforça-se ainda mais essa interdependência. A maior racionalização do processo construtivo, inclusive, se dá com o alinhamento de uma forma arquitetônica adequada a um emprego estruturalmente viável e eficiente dos elementos estruturais.

Nesse sentido, durante o desenvolvimento da pesquisa, compreendeu-se a real importância em associar diferentes disciplinas para o desenvolvimento satisfatório da ferramenta almejada. Esta interdisciplinaridade inerente às estruturas de madeira engenheirada foi, inclusive, bastante mencionada durante o segundo capítulo desta pesquisa. Justamente por esse motivo, não se considerou factível concluir a idealização do *plugin* proposto excluindo os conhecimentos oriundos da fundamental atuação dos profissionais engenheiros calculistas.

Tendo em vista o exposto, para o Passo 04, de modelagem do conceito arquitetônico com o auxílio do *plugin* idealizado, constatou-se a necessidade de incluir também processamentos para o dimensionamento estrutural preliminar para a definição mais realística da espessura de lajes de MLCC e largura das vigas de MLC. Estes dois parâmetros são puramente estruturais, definidos pelo profissional engenheiro calculista responsável pelo dimensionamento da estrutura. Dessa forma, considera-se imprescindível que também o *plugin* aqui concebido englobe definições dessa natureza, pois, caso contrário, não poderá espelhar de forma fidedigna a realidade interdisciplinar dessas estruturas.

Assim, para a real concretização do *plugin* planejado, da mesma maneira como mostra-se necessária a associação de um profissional programador, que possa traduzir o fluxograma aqui apresentado em linguagem de programação adequada à ferramenta de modelagem tridimensional no qual ele será inserido, a figura do engenheiro calculista também será fundamental para a concretização deste produto final. Este, por sua vez, deverá conceber a forma de cálculo dos parâmetros “espessura” no caso de lajes e “largura” para vigas, considerando o recorte temático e as regras de modelagem aqui estabelecidas.

PASSO 05: ANÁLISE

Na sequência, o modelo final da estrutura, após dimensionamento prévio dos elementos anteriormente destacados (lajes e vigas) será analisado para levantamento dos dados a serem considerados durante o cálculo dos índices. O primeiro dado a ser levantado do modelo global será a área construída da estrutura (A), a qual corresponderá à área da projeção ocupada pela estrutura. Caso a estrutura apresente dois pavimentos, então a área total será a soma da área de projeção individual de cada pavimento.

Posteriormente, realiza-se a análise global do modelo, considerando elementos de MLC e MLCC, levanta-se a quantidade de objetos modelados para cada categoria construtiva (laje, parede, pilar e viga), denominada como Q (quantidade total das peças modeladas), sendo que:

$$Q = Q_{\text{lajes}} + Q_{\text{paredes}} + Q_{\text{vigas}} + Q_{\text{pilares}} \quad (4)$$

Onde:

Q é a quantidade de objetos modelados

Q_{lajes} é a quantidade de objetos lajes

Q_{paredes} é a quantidade de objetos paredes, seja qual for a direção das lamelas

Q_{vigas} é a quantidade de objetos vigas

Q_{pilares} é a quantidade de objetos pilares

Por fim, serão analisados apenas os elementos de MLCC, os quais serão agrupados em 4 categorias: (i) paredes, onde direção das lamelas = transversal; (ii) paredes, onde direção das lamelas = longitudinal; (iii) lajes, onde uso = piso; e (iv) lajes, onde uso = cobertura. Para cada uma dessas categorias, será elaborado um plano de corte preliminar, ou seja, distribuição dos elementos classificados na categoria em questão em painéis maiores a serem fabricados, conciliando a busca por menor perda de material e a fabricação da menor quantidade de tipologias possível. A dimensão máxima do painel a ser fabricado é aquela mencionada anteriormente, isto é, de 14,40 m de comprimento por 2,95 m de largura. Entende-se, ainda, que, no caso de lajes, a espessura a ser definida pelo dimensionamento preliminar durante o Passo 04 irá estabelecer mesma espessura, para elementos empregados com o mesmo objetivo, isto é, como piso ou como cobertura. Assim, a distribuição dos objetos individuais em painéis a serem fabricados irá pressupor o agrupamento de elementos com as mesmas características de fabricação.

Finalizada esta disposição, é possível levantar para cada categoria o volume total dos painéis a serem fabricados (VT), o número total de painéis a serem fabricados (NP) e o número de

tipologias dos painéis a serem fabricados (NT). Levanta-se ainda a soma dos volumes individuais de cada objeto modelado (parâmetro volume), denominado como VP (volume total de objetos modelados). Estes dados mencionados serão calculados pelas seguintes fórmulas:

$$VT = VT_{\text{lajes piso}} + VT_{\text{lajes cobertura}} + VT_{\text{paredes lg}} + VT_{\text{paredes tr}} \quad (5)$$

Onde:

VT é o volume total dos painéis de MLCC a serem fabricados

$VT_{\text{lajes piso}}$ é o volume total dos painéis longitudinais a serem fabricados para uso como lajes de piso

$VT_{\text{lajes cobertura}}$ é o volume total dos painéis longitudinais a serem fabricados para uso como lajes de cobertura

$VT_{\text{paredes lg}}$ é o volume total dos painéis longitudinais a serem fabricados com espessura de 80 mm

$VT_{\text{paredes tr}}$ é o volume total dos painéis transversais a serem fabricados com espessura de 80 mm

$$NP = NP_{\text{lajes piso}} + NP_{\text{lajes cobertura}} + NP_{\text{paredes lg}} + NP_{\text{paredes tr}} \quad (6)$$

Onde:

NP é o número total de painéis a serem fabricados

$NP_{\text{lajes piso}}$ é o número total de painéis a serem fabricados para uso como lajes de piso

$NP_{\text{lajes cobertura}}$ é o número total de painéis a serem fabricados para uso como lajes de cobertura

$NP_{\text{paredes lg}}$ é o número total de painéis longitudinais a serem fabricados com espessura de 80 mm

$NP_{\text{paredes tr}}$ é o número total de painéis transversais a serem fabricados com espessura de 80 mm

$$NT = NT_{\text{lajes piso}} + NP_{\text{lajes cobertura}} + NT_{\text{paredes lg}} + NT_{\text{paredes tr}} \quad (7)$$

Onde:

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

NT_{lajes} é o número de tipologias de painéis a serem fabricados para uso como lajes de piso

$NT_{\text{lajes cobertura}}$ é o número de tipologias de painéis a serem fabricados para uso como lajes de cobertura

$NT_{\text{paredes lg}}$ é o número de tipologias de painéis longitudinais a serem fabricados com espessura de 80 mm

$NT_{\text{paredes tr}}$ é o número de tipologias de painéis transversais a serem fabricados com espessura de 80 mm

$$VP = VP_{\text{lajes piso}} + VP_{\text{lajes cobertura}} + VP_{\text{paredes lg}} + VP_{\text{paredes tr}} \quad (8)$$

Onde:

VP é o volume total dos objetos de MLCC modelados

VP_{lajes} é o volume total dos objetos lajes para uso como lajes de piso

VP_{lajes} é o volume total dos objetos lajes para uso como lajes de cobertura

$VP_{\text{paredes lg}}$ é o volume total dos objetos paredes, onde direção das lamelas = longitudinal

$VP_{\text{paredes tr}}$ é o volume total dos objetos paredes, onde direção das lamelas = transversal

PASSO 06: RESULTADOS

Como último passo da ferramenta analítica concebida, são apresentados os resultados, os quais consistem justamente nos índices definidos nos capítulos anteriores, que serão calculados com base nos dados levantados da análise do modelo. Assim, os dois índices a serem calculados são retomados a seguir:

- **Índice de montagem** = A / Q

Onde:

A é a soma da área de projeção ocupada pela estrutura em cada pavimento

Q é a quantidade de objetos modelados, ou seja, quantidade de elementos estruturais de madeira empregados

- **Índice de fabricação** = VP / VT

Onde:

VP é o volume total dos objetos de MLCC modelados, ou seja, volume total de peças empregados no projeto, resultante da soma dos volumes individuais de cada peça de MLCC utilizado no projeto

VT é o volume total dos painéis de MLCC a serem fabricados

Os resultados desses dois índices serão apresentados por meio de porcentagens, como realizado durante a análise dos estudos de casos, quando se verificou uma porcentagem de racionalização da prensagem, equivalente ao índice de fabricação, na ordem de 98%.

Para cada um deles serão apresentados também os resultados individuais de cada tipo de elemento estrutural empregado. Assim, para o índice de montagem poderá ser visualizado ainda o resultado calculado apenas para lajes, paredes, vigas ou pilares, como na fórmula inserida a seguir, que ilustra o exemplo do caso das paredes.

- **Índice de montagem (paredes)** = A / Q_{paredes}

Onde:

A é a soma da área de projeção ocupada pela estrutura em cada pavimento

Q_{paredes} é a quantidade de objetos paredes, seja qual for a direção das lamelas

A mesma lógica é aplicada também para o índice de fabricação, o qual poderá ser visualizado individualmente para lajes de piso ou de cobertura, paredes longitudinais ou paredes transversais, como na fórmula inserida a seguir, que ilustra o exemplo do caso das lajes.

- **Índice de fabricação (lajes piso)** = $VP_{\text{lajes piso}} / VT_{\text{lajes piso}}$

Onde:

$VP_{\text{lajes piso}}$ é o volume total dos objetos lajes empregados como piso

$VT_{\text{lajes piso}}$ é o volume total dos painéis longitudinais a serem fabricados para lajes empregadas como piso

Por fim, o último resultado a ser apresentado pelo *plugin* será o número de tipologias dos painéis de MLCC a serem fabricados, conforme representado a seguir.

- **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

Da mesma forma como ocorre nos índices anteriores, 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.

4.5. CONSIDERAÇÕES PARCIAIS DO PRODUTO

Finalizada a apresentação do produto é importante lembrar que a intenção deste trabalho não é o desenvolvimento de uma ferramenta pronta para disponibilização ao público. Consiste, na verdade, no seu planejamento, isto é, no desenvolvimento de diretrizes para seu funcionamento, conforme definido no propósito inicial desta pesquisa.

Constata-se, com isso, possibilidades para o desenvolvimento futuro deste estudo, por meio da associação de equipes multidisciplinares para sua evolução. Em um primeiro momento, verifica-se a importância de incluir neste *plugin* dois processamentos diferentes, já considerados inclusive na apresentação do fluxograma. São eles: um para o dimensionamento estrutural preliminar, a ser realizado no Passo 04 (modelagem), e outro para elaboração do plano de corte preliminar dos painéis de MLCC, que irá ocorrer no Passo 05 (análise), para cálculo das variáveis relacionadas ao volume bruto e número de tipologias dos painéis a serem fabricados.

O primeiro deles será responsável pela definição da largura (altura) de vigas de MLC, além da espessura das lajes de MLCC, considerando o vão a ser vencido pelo elemento, sua forma de emprego (piso ou cobertura) e outras informações que deverão ser especificadas por engenheiros calculistas especializados nessa área de atuação. Sabe-se, contudo, que esta proposta é totalmente viável e factível, sendo que já existem, inclusive, pesquisas similares desenvolvidas com esse objetivo. Como exemplo, é possível recapitular uma pesquisa nacional, mencionada anteriormente no capítulo 2.2, que se iniciou como um trabalho final de graduação e culminou no desenvolvimento do *plugin* Beaver. Esta ferramenta, a qual pode ser utilizada no *software* Grasshoper, permite a realização de análises estruturais para vigas e pilares de MLC com base no Eurocode 5 (PINI; SOUZA, 2020).

O segundo processamento deverá elaborar o plano de corte preliminar dos elementos de MLCC empregados no modelo tridimensional, ou seja, agrupá-los conforme suas classificações pré-determinadas (lajes de piso ou cobertura, paredes longitudinais ou transversais) e distribuí-los em painéis maiores a serem fabricados, conciliando a busca por menor perda de material e a fabricação da menor quantidade de tipologias possível. Da mesma forma, por meio do estudo de pesquisas anteriores, constata-se que esta proposta é igualmente possível, tendo em vista o trabalho desenvolvido por Yazdi *et al* (2021).

Neste último, os autores abordam tanto a etapa de planejamento do corte de painéis de MLCC quanto a logística de transporte, desenvolvendo um algoritmo que atua no projeto inicial modelado pela arquitetura de modo a otimizar as dimensões especificamente de elementos empregados como paredes, reduzindo as perdas de material na etapa de corte dos painéis. Vale lembrar que o algoritmo em questão não trata de uma plataforma de modelagem, mas pode ser integrado a ferramentas de projeto pré-existentes.

Percebe-se, assim, que a concretização e a disponibilização do *plugin* planejado ao público exige a associação de profissionais de diferentes áreas de atuação. Tal magnitude de desenvolvimento, como era de se esperar, não se esgota neste trabalho. Contudo, entende-se que os resultados alcançados, ao possibilitarem a divulgação do planejamento inicial desta ferramenta, poderão ser o ponto de partida para esses desenvolvimentos futuros, mais complexos e multidisciplinares, que culminarão em um produto real de auxílio na modelagem tridimensional de estruturas de madeira engenheirada.

ANÁLISE CRÍTICA

Além dos pontos apresentados, uma questão adicional que se considera fundamental para a completude deste *plugin* em um cenário ideal futuro, é a correta classificação dos índices calculados como resultado da análise do modelo. Atualmente, por falta de dados, não seria possível ainda classificar os resultados que seriam gerados após análise do modelo tridimensional. Portanto, não se compreende, de fato, quais números obtidos seriam bons indicadores de um maior racionalização do processo construtivo e quais indicariam maior desperdício de material ou de energia, consequência de um menor proveito deste processo. Idealmente, esta classificação pode ser realizada com a associação de algoritmos de inteligência artificial, os quais, após longa coleta de dados, poderão compreender os níveis de racionalização alcançados por cada projeto. Inclusive, tais algoritmos poderiam até orientar o próprio desenvolvimento da estrutura em si. Para isto ocorrer, no entanto, a análise do modelo e apresentação dos resultados – dos índices calculados – deve ocorrer em tempo real, simultaneamente à fase de modelagem.

Este cenário, contudo, não é passível de concretização ainda. Isso porque, tendo em vista que não há modelos concluídos, desenvolvidos dentro desse ambiente digital, consequentemente, não há dados suficientes que possam ser analisados para se obter uma conclusão clara e

fidedigna. Sabe-se que um algoritmo de inteligência artificial baseado em aprendizado profundo necessita de um item primordial para viabilizar seu funcionamento: quantidade massiva de dados relevantes. Assim, a atuação de tais algoritmos só poderá se viabilizar após a coleta de informações suficientes acerca dos modelos tridimensionais desenvolvidos e dos resultados obtidos.

Dessa maneira, em um momento posterior, possivelmente em uma atualização futura, após coleta de dados em número suficiente, este algoritmo de inteligência artificial poderá ser inserido na programação da ferramenta digital para atuar diretamente na classificação dos resultados e, muito possivelmente, no auxílio da modelagem em si, tendo como base os padrões identificados por meio da coleta prévia de informações. Uma das possibilidades conjecturadas para essa classificação dos resultados é por meio da correlação dos resultados de cada um dos três índices calculados, com os contextos nos quais os projetos se inserem (Pergunta 01). Imagina-se, com isso, que seria possível chegar em uma definição mais apropriada da adequação do projeto ao processo construtivo, por não se traçar um limite definido meramente para uma boa ou má adequação, e sim por considerar também as questões relacionadas ao contexto, que se mostram bastante significativas na tomada de cada decisão arquitetônica.

Antes de se atingir esse momento, contudo, o *plugin* planejado poderá ser empregado pelo profissional responsável pela concepção do projeto de forma comparativa. Isto é, para um mesmo projeto, o arquiteto terá a possibilidade de elaborar mais de um modelo estrutural, que poderão se distinguir por um simples ajuste de pé-direito ou mudanças bruscas de forma e *layout*. Assim, após análise dos modelos desenvolvidos e disponibilização dos resultados dos índices calculados, o arquiteto poderá verificar qual das opções concebidas garante maior racionalização do processo construtivo e escolher por qual caminho seguir de forma consciente quanto à adequação de sua proposta à tecnologia construtiva especificada.

Um segundo ponto, a ser analisado criticamente, diz respeito à adaptação futura do *plugin*, mantendo a lógica de seu funcionamento, sequência dos passos e índices estabelecidos. Os parâmetros, por sua vez, podem ser ajustados para se adequarem a outro fabricante ou outro contexto geográfico, por exemplo. Sabe-se que para seu desenvolvimento, foram utilizadas as informações referentes ao processo construtivo do fabricante estudado, de modo que eles se baseiam nas especificidades de maquinário e características específicas deste processo. Porém, caso se deseje adequar o *plugin* a outro cenário, ou outro país, inclusive, onde seja utilizada uma matéria-prima diferente, isso é completamente possível e viável, com o devido ajuste dos parâmetros específicos mencionados ao longo da apresentação do fluxograma.

O *plugin* planejado não pretende englobar as possibilidades de exceções no que diz respeito às soluções estruturais, mas apenas auxiliar e orientar o início do conceito de um projeto arquitetônico que busca maior adequação à tecnologia construtiva. Contudo, afora as regras e premissas estabelecidas, praticamente qualquer solução construtiva pode ser executada, mediante, claro, recursos financeiros capazes de sustentar formatos estruturais que se distanciam da racionalidade intrínseca à tecnologia, além de um emprego com possivelmente grande desperdício de recursos naturais, muito superior ao que de fato seria necessário.

Todas as premissas e parâmetros inseridos se baseiam no estudo prévio acerca do processo construtivo, da precificação da estrutura e, naturalmente, da experiência profissional da autora neste nicho específico de mercado. Assim, a definição do produto dessa pesquisa pretende englobar a maioria das soluções projetuais e, principalmente, aquelas que possam se adequar mais facilmente ao processo construtivo da tecnologia estudada.

Consequentemente, todas as regras de modelagem estabelecidas não se configuram como princípios absolutos. São, na realidade, diretrizes básicas que visam orientar a modelagem. Reitera-se que a intenção do *plugin* aqui proposto não é engessar a arquitetura, tendo em vista que a autoria do projeto, neste caso do modelo tridimensional da estrutura, será sempre do arquiteto.

E justamente por esse motivo ressalta-se a importância da mente humana, a qual poderá analisar criticamente também o próprio *plugin* empregado e compreender a implicação de seu uso em cada projeto específico. Sabe-se que todo projeto é único, sendo concebido e desenvolvido pela lente do profissional arquiteto da forma como se interpreta a solução mais adequada para o contexto de sua inserção. Assim, as premissas, índices e parâmetros apresentados pretendem, acima de tudo, munir este profissional de informações a fim de que ele possa definir os melhores caminhos para seu projeto, tendo consciência das consequências de suas escolhas, visando garantir maior viabilidade potencial para a concretização de sua criação e, ao mesmo tempo, um emprego consciente dos recursos naturais necessários para a materialização de sua ideia. A ferramenta digital constitui-se apenas como um suporte, mas os dados de entrada iniciais e veredito final são sempre do ser humano.

05

CONCLUSÃO

A quinta parte da tese apresenta as conclusões finais da pesquisa, reunindo as considerações parciais expostas ao longo do trabalho e as possibilidades de pesquisas futuras que se delineiam, tendo a presente como ponto de partida. Também engloba determinadas reflexões pessoais da autora, no que diz respeito ao papel do profissional arquiteto frente aos temas abordados nesta tese.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como motivação inicial a percepção da necessidade de se esclarecer a problemática relacionada a um conhecimento ainda não aprofundado acerca das estruturas de madeira engenheirada por parte dos profissionais que atuam na concepção de projetos de edificações que empregam esta tecnologia construtiva. Verifica-se que esta lacuna resulta em um emprego não otimizado e inadequado dos elementos estruturais, acarretando desperdícios de recursos naturais, como material e energia.

Assim, o objetivo principal do trabalho consistiu em demonstrar a influência do projeto arquitetônico na racionalização do processo construtivo de estruturas de madeira engenheirada. Destaca-se que a pesquisa reflete a realidade brasileira, trazendo para a academia desafios e reflexões da prática profissional da arquitetura destas edificações específicas, assim como questões de cunho industrial.

Ao final, buscou-se desenvolver meios que possibilitassem auxiliar na concepção arquitetônica de forma consciente e coerente, alinhada ao conceito de sustentabilidade intrínseco à matéria-prima madeira, garantindo maior racionalização de todo o processo construtivo da tecnologia escolhida e possibilitando maior viabilidade financeira potencial para a real concretização das estruturas.

Para tanto, inicialmente, por meio do estudo do processo construtivo das estruturas de madeira engenheirada, que teve como referência as técnicas adotadas pelo primeiro fabricante de painéis de MLCC do Brasil, comprovou-se que sua racionalização está intrinsecamente relacionada ao projeto arquitetônico, sendo uma consequência direta deste. Todas as etapas deste processo também se relacionam entre si. Decisões e escolhas tomadas no projeto de arquitetura, como por exemplo a altura do pé-direito da edificação, interferem totalmente na etapa de prensagem e planejamento do corte dos painéis, por serem estes longitudinais ou transversais. Estes, por sua vez, acarretam implicações também no tempo de montagem da estrutura, por resultarem em maior ou menor quantidade de peças. A própria disposição da edificação no terreno pode, inclusive, ocasionar implicações neste processo, caso desencadeie restrições de transporte, que, por sua vez, alteram as dimensões para fabricação das peças.

A adequação do projeto ao processo construtivo não se trata simplesmente do conhecimento de suas características superficiais, como tamanho máximo de prensagem dos painéis de MLCC.

Engloba, para além disso, uma gama muito mais abrangente de especificidades e variáveis, como percorrido previamente. Assim, para este processo construtivo se desenvolver de forma adequada, de modo que a estrutura se concretize de maneira otimizada, a concepção arquitetônica em si deve nascer alinhada às premissas da tecnologia construtiva, como precede o conceito DFMA (projeto para fabricar e montar).

Ao se abordar também o estudo dos orçamentos, analisando e relacionando as variáveis que compõem essa etapa de precificação da estrutura, verificou-se as implicações da racionalização do processo construtivo igualmente nos custos da estrutura. A consideração das características da tecnologia construtiva em estudo e sua relação com a racionalização deste processo pôde ser verificada pelo cálculo de determinados índices, como é o caso do “índice de quantidade de peças”. Este relaciona a quantidade de elementos estruturais empregados à área construída da edificação e acompanha, de maneira proporcional, a influência do valor de montagem da estrutura no custo total desta. Além disso, verificou-se também a grande influência do item material na precificação de uma estrutura de madeira engenheirada, representando mais da metade do seu custo total, sendo que em alguns casos esta participação pode ser superior a 85 %. Este volume, naturalmente, aumenta conforme cresce o tamanho da edificação. No entanto, muitas vezes esse aumento não é proporcional, tendo em vista que a própria configuração da estrutura, por possibilitar maior ou menor desperdício de material no planejamento do corte, influencia diretamente no volume final de madeira empregado.

Portanto, para as edificações de madeira engenheirada, comprova-se que a interferência do projeto arquitetônico na racionalização do processo construtivo da tecnologia, conseqüentemente, nos custos da edificação, atinge proporções mais expressivas. Assim, no que diz respeito ao custo unitário para fornecimento e montagem das estruturas de madeira engenheirada, ressalta-se que a métrica usual para precificação de edificações tradicionais, baseada em valores padronizados por área de construção, é inteiramente equivocada, tornando-se inviável. Mesmo para edificações convencionais, inclusive, como apontado pela literatura estudada, as variáveis identificadas no projeto arquitetônico resultam em impactos significativos no custo final de construção.

Ainda neste aspecto, no que diz respeito ao valor real para fornecimento e montagem dessas estruturas, item não abordado pelo estudo da precificação, as referências bibliográficas estudadas indicam ser este superior quando comparado ao emprego de técnicas de construção convencionais, como o concreto. Porém, esta constatação, conforme levanta Sorathiya (2019),

pode decorrer da falta de conhecimento e entendimento dessas edificações por parte dos profissionais e demais agentes do setor da construção civil.

Ainda assim, ressalta-se aqui que estes valores, quando comparados em termos absolutos, não espelham integralmente a realidade, tendo em vista que essa análise comparativa deve ser encarada de uma maneira mais holística. O resultado da comparação entre tecnologias poderia, inclusive, se reverter quando se leva em conta os demais benefícios alcançados em uma edificação de madeira, como o reflexo positivo na percepção sensorial do usuário no ambiente e a adoção de um material natural e renovável, com relevante contribuição no sequestro de carbono.

Posteriormente, o estudo dos casos construídos permitiu verificar a aplicação real dos conceitos levantados, constatando-se também a importância do contexto no qual se insere a edificação. Em decorrência das particularidades de cada contexto, é possível pensar em diferentes possibilidades estruturais e construtivas que permitam, inclusive, a execução de estruturas não convencionais, mais específicas e que poderiam até não ser viáveis financeiramente de outra maneira.

Cada contexto exigirá, assim, soluções singulares, as quais, apesar de apropriadas para um caso, possam ser consideradas como equivocadas para um segundo. Isso porque, muitas vezes, as soluções que viabilizam determinada construção podem ser inadequadas ou impossibilitadas em uma outra edificação inserida em um contexto distinto. A exemplo do que se verificou no Caso 01 estudado, tornou-se necessário conceber uma quantidade grande de peças com dimensões reduzidas, para possibilitar uma montagem que seria inexecutável de outra maneira.

As constatações apresentadas no decorrer do desenvolvimento desta tese permitiram a definição de determinadas premissas básicas e específicas para a concepção do projeto coerente à tecnologia empregada. Como premissas básicas, estabeleceram-se três pilares: estrutura, madeira e industrialização. As premissas específicas, por sua vez, naturalmente, podem ser extrapoladas para outros fornecedores ou outras regiões geográficas. Para isso, no entanto, pressupõe-se uma adaptação de certos parâmetros, além do conhecimento das condições locais de fornecimento, disponibilidade de matéria-prima e legislações estruturais regionais.

Na sequência, consolidaram-se três índices, sendo dois deles estabelecidos preliminarmente quando do estudo dos orçamentos. Estes foram, contudo, ajustados para que pudessem ser incorporados da melhor forma possível no *plugin* proposto, de modo a permitir a mensuração do projeto da estrutura quanto à racionalização do processo construtivo.

As premissas específicas, assim como os índices, foram utilizadas também como base para a definição de parâmetros e para o planejamento do *plugin*, cuja proposição seria impossibilitada sem as discussões, reflexões e conclusões realizadas previamente durante a terceira parte desta tese, denominada Desenvolvimento.

Este *plugin*, por sua vez, foi apresentado na forma de um fluxograma e, em desenvolvimentos futuros deste estudo, poderá ser traduzido em uma linguagem de programação para associação a uma ferramenta de modelagem tridimensional pré-existente. Seu emprego objetivará auxiliar o profissional arquiteto na fase de criação inicial do projeto, possibilitando que a forma arquitetônica possa ser concebida de modo a garantir maior racionalização do processo construtivo da tecnologia empregada para sua concretização, resultando assim em uma estrutura otimizada e alinhada aos conceitos de sustentabilidade, para além da matéria-prima em si.

Com o planejamento deste *plugin* comprova-se a amplitude, complexidade e interdisciplinaridade exigida para se projetar uma edificação de madeira engenheirada. Por esse motivo, como desdobramentos futuros deste estudo, tem-se, inicialmente, a real implementação do *plugin*, após definição de uma equipe completa de pesquisadores e profissionais das mais diversas áreas de atuação, incluindo programadores, engenheiros calculistas, arquitetos e *designers* gráficos, dentre outros que se mostrarem necessários.

Outras pesquisas futuras podem extrapolar também a atuação do *plugin* para outros recortes tipológicos para além do abordado, englobando usos diferentes do residencial, como corporativo ou educacional, e composições estruturais de múltiplos pavimentos. Estas últimas podem, inclusive, ser compostas por elementos estruturais híbridos, como lajes e vigas metálicas, estruturas de concreto pré-moldada, ou até lajes híbridas de madeira e concreto, por exemplo. Como verificado no início da tese, já são observados no país esforços para construções em maior altura com madeira engenheirada, sendo que o primeiro edifício residencial com múltiplos pavimentos encontra-se em construção no momento.

Nessa mesma linha, uma possibilidade a ser explorada futuramente é a validação dos parâmetros aqui definidos, incluindo até sua adequação a outros contextos geográficos ou produtivos, a partir de um número significativamente maior de amostras. Por meio da coleta de dados em quantidade suficiente será possível, ainda, a posterior classificação dos resultados a serem encontrados pelo cálculo dos índices previamente estabelecidos.

Nesse sentido, entende-se que também é plausível a associação deste futuro *plugin* a algoritmos de inteligência artificial para proceder com esta classificação e com a análise precisa dos dados a serem coletados. Em desenvolvimentos posteriores do *plugin*, novas perguntas poderão ser introduzidas para permitir que se delinear melhor o contexto no qual se insere a estrutura. Perguntas mais acuradas e, inclusive, possivelmente subjetivas, relacionadas, por exemplo, às preferências do usuário, poderão munir melhor o algoritmo de inteligência artificial para que ele possa realizar a classificação adequada dos resultados da análise do modelo, por meio da correlação dos índices calculados às informações próprias do contexto.

Ressalta-se, contudo, que esta ferramenta não pretende, de forma alguma, excluir o papel do arquiteto na criação arquitetônica ou restringir e padronizar as soluções projetuais para edificações de madeira engenheirada. Como mencionado por algumas referências estudadas, tendo em vista a progressiva especialização extrema das atuações, datada de alguns séculos, resultou-se que, atualmente, a maior parte da produção arquitetônica contemporânea exclui os arquitetos da participação dos mecanismos e métodos do fazer.

Porém, de forma contrária, intenciona-se aqui auxiliar o trabalho criativo dos projetistas e nunca o limitar. Sabe-se que todo projeto é único, sendo concebido e desenvolvido pela lente do profissional arquiteto da forma como se interpreta a solução mais adequada para o contexto de sua inserção. Assim, as premissas, índices e parâmetros apresentados pretendem, acima de tudo, munir este profissional de informações, que, em um momento passado da história, eram acessíveis apenas ao *master builder*, possibilitando sua contribuição direta na maior racionalização do processo construtivo.

Para a compreensão correta dos conceitos aqui expostos e implementação das premissas de maneira plenamente consciente, pressupõe-se, todavia, uma mudança de mentalidade por parte dos agentes envolvidos no desenvolvimento dessas edificações, do início do projeto ao final da obra. Exigem, como se refletiu anteriormente neste trabalho, um pensamento disruptivo não no sentido formal, mas por meio da associação coerente e inteligente de ideias, por meio da compreensão de que estas consistem em tecnologias intrinsecamente industriais.

A forma de enxergar os projetos e todo o processo construtivo das edificações de MLCC e MLC deve migrar de uma mentalidade condicionada à construção tradicional para a percepção de que aquilo que está sendo construído, ou melhor, desenvolvido, é, na verdade, um produto industrial. Em outras palavras, entende-se que a mudança de mentalidade, bastante mencionada ao longo

deste trabalho, consiste justamente na compreensão de que estruturas de madeira engenheirada são um produto, e não uma construção.

Não se espera que edificações de madeira engenheirada de fato se disseminem e consolidem na construção civil brasileira, migrando de um desejo de um nicho específico desse mercado para uma realidade factível, sem essa mudança de mentalidade. Aqui, deve-se reforçar que esta nova visão, de como abordar o projeto e a edificação, é ainda necessária por parte de todos os agentes da construção, inclusive daqueles profissionais que de alguma forma já estão inseridos neste setor específico da madeira engenheirada. A implementação de novas indústrias, a entrada de novos profissionais ou empresas especializadas na área, ou mesmo alterações normativas não possibilitarão reais mudanças na construção civil nacional. Claro que todos esses fatores possuem grande importância. Mas, sem esta “virada de chave” na mentalidade individual e coletiva, movimentações externas, por si só, não viabilizarão um futuro em que a madeira engenheirada seja uma possibilidade real, potencialmente viável e competitiva em nosso país.

Nesse sentido, não há forma melhor para abordar o processo de projeto do que por meio do conceito de DFMA – *Design For Manufacture and Assembly*, ou seja, conceber um projeto levando em consideração fabricação e montagem. Depreende-se, ainda, que deve ser acrescentada a etapa de logística nesta sigla, resultando em um projeto para fabricar, transportar e montar. Tratando-se de estruturas de madeira engenheirada, o projeto, por sua vez, não é compreendido aqui meramente como o projeto arquitetônico, mas como resultado da associação da arquitetura à engenharia civil, tendo em vista que a forma arquitetônica e função estrutural estão intrinsecamente relacionadas, sendo uma consequência direta da outra.

Constata-se, portanto, que a aplicação do conceito de DFMA para abordar projetos de estruturas de madeira engenheirada equivale ao resgate do *master builder* introduzido por Kolarevic (2003), em ambiente digital.

Hoje, sabe-se que a realidade em que se vive é outra, sendo que o *master builder* medieval e renascentista não se aplica mais ao cotidiano presente, que pressupõe níveis extremamente profundos de conhecimento em cada área. Contudo, em sua essência, esta figura que permeava por todas as formas de atuação baseia-se no mesmo conceito da metodologia DFMA. Ambos partem do mesmo pressuposto, ao introduzirem a necessidade de associação dos conhecimentos oriundos das diferentes áreas de atuação para concretização de uma edificação ou de um objeto. Originam-se, no entanto, em diferentes contextos, sendo um no campo da construção civil e

outro na indústria manufatureira. Assim, em se tratando de tecnologias construtivas intrinsecamente industriais, tem-se a união desses dois setores.

Nessa lógica, o próprio produto final dessa pesquisa, ao pressupor a associação de diferentes profissionais, advém desta interdisciplinaridade inerente e imperativa às estruturas de madeira engenheirada. Dessa forma, entende-se que o resultado alcançado justamente reforça e reflete a necessidade de conexão e comunicação entre especialidades distintas. Reitera-se, portanto, que este trabalho não pretende finalizar uma atividade, mas sim ressaltar a importância e consolidar o início de um diálogo para a atuação conjunta, inter e multidisciplinar dos profissionais envolvidos nas edificações de madeira engenheirada.

Conclui-se, então, que o planejamento do *plugin* proposto delinea o ponto de partida e estabelece os princípios básicos para resgatar, de forma metafórica, a figura do *master builder* renascentista em ambiente digital. Isso ocorrerá por meio da implementação de processos de projetos baseados em uma abordagem bastante abrangente do conceito DFMA e conciliando os conhecimentos das mais diversas áreas de atuação. Resultará da união do arquiteto, do engenheiro, do programador, do *designer* gráfico, do desenvolvedor do *software*, do fornecedor de madeira, do operário da fresadora CNC, do motorista do frete, do montador da estrutura, da gerenciadora da obra e de muitos outros profissionais envolvidos nesse processo, cujas contribuições são fundamentais para que se atinja os melhores resultados possíveis no projeto da edificação.

Assim, o que se entende por um resgate do *master builder* é, na verdade, a implementação digital da interdisciplinaridade e consiste na possibilidade de associar diferentes conhecimentos dentro da ferramenta aqui planejada. Esta figura não deve mais ser designada a uma profissão específica. É justamente reflexo do conjunto, isto é, da consorciação de ideias oriundas de profissionais das mais diversas especialidades na busca por soluções cada vez melhores.

REFLEXÃO FINAL

A arquitetura, concretizada na forma de uma edificação, não existe de maneira isolada. Pelo contrário, ela é, na sua essência, idealizada para interagir com o ser humano e exige, para sua conformação, a transformação dos recursos naturais disponíveis e do contexto topográfico no qual se insere. Dessa maneira, imprescindivelmente, a criação de uma nova forma arquitetônica acarretará impactos no seu entorno imediato e no meio ambiente global. Que o impacto existe, isso é fato. Já a magnitude desse impacto, contudo, poderá ser maior ou menor como consequência direta das escolhas realizadas a cada traço concebido no desenvolvimento arquitetônico.

Dentre essas escolhas projetuais, aquela que tem recebido maior atenção nos projetos contemporâneos é a especificação de materiais que justamente dizem proporcionar menor impacto ao meio ambiente. Em outras palavras, são os denominados materiais sustentáveis. Sabe-se, porém, que não existe material perfeito, isento de ressalvas, ou até mesmo desvantagens. Nenhum material é capaz de atender de forma integral a todos os anseios e demandas de qualquer projeto arquitetônico, qualquer contexto ou qualquer exigência do usuário. Cada material tem seus benefícios e suas limitações. Muitas vezes, inclusive, os benefícios proporcionados por sua inserção em determinada situação podem ser considerados como uma limitação em um cenário distinto. Além disso, todos eles também causam impactos ambientais, em maior ou menor grau.

Contudo, sem menosprezar a matéria-prima, há que se considerar que não só de matéria-prima se faz uma edificação. Deve-se compreender que, para além do material em si, a forma de emprego dele na composição da arquitetura está totalmente associada à busca por soluções mais sustentáveis. Na época em que objetos e abrigos eram feitos manualmente, quando o ato de confeccionar estava alinhado às leis da economia, a demanda por reduzir o gasto de energia necessária para conversão de um recurso natural em um objeto real era incontestável. Na atualidade, de forma análoga, a busca por economia de energia para a transformação de elementos construtivos em uma edificação completa deveria ser igualmente inquestionável.

Atualmente, contudo, como consequência da desconexão verificada entre projeto e construção, aquele que concebe muitas vezes desconhece a forma de execução e os esforços necessários

para tal, sendo que essa busca por economia na concretização da forma arquitetônica, isto é, na prática em canteiro – ou melhor, em fábrica – pode receber menor atenção do que a especificação da matéria-prima na prancheta – ou melhor, no modelo.

Porém, assim como os impactos proporcionados pela materialização dessa arquitetura podem nascer das mãos do arquiteto, esses podem, igualmente, ser mitigados por elas. Na figura do arquiteto inicia toda a concepção do projeto, que não deveria se limitar apenas à especificação de materiais verdes. Esses, por si só, não garantem uma construção coerente e sustentável da maneira mais ampla como pode ser compreendido esse conceito. Mesmo porque, empregar um único material apenas pelo fato dele possuir um selo de matéria-prima sustentável pode, inclusive, não ser a opção mais coerente para determinadas situações.

O papel do arquiteto consiste, na verdade, em aliar as exigências do contexto, do usuário e do uso da edificação às características da matéria-prima e da tecnologia empregadas. A beleza da arquitetura é justamente essa. Respeitar a natureza de cada material e tecnologia da mesma forma como se busca respeitar o local e contexto no qual a edificação se insere, atendendo aos desejos e anseios do usuário e respeitando as limitações exigidas pelas legislações específicas que cada uso e local demandam. Adequar o projeto às premissas impostas pela tecnologia construtiva especificada é necessariamente buscar o emprego consciente dos recursos.

Logo, deduz-se que garantir a racionalização do processo construtivo por meio da concepção de uma estrutura otimizada, é, assim, não só uma questão de viabilidade financeira, mas de sustentabilidade acima de tudo.

Sabe-se que a madeira é sim uma matéria-prima que traz muitos benefícios e está integralmente alinhada aos conceitos de sustentabilidade almejados pela sociedade. Seu emprego, contudo, deve ser consciente e inteligente, almejando a racionalização para além, unicamente, da garantia de um melhor custo-benefício para a estrutura. Da mesma forma, quando a justificativa para o não emprego das premissas da tecnologia remete à existência de recursos financeiros suficientes para sustentar soluções desalinhadas, conseqüentemente, a estrutura também não será sustentável em todas as suas potencialidades. Tendo em vista, ainda, que o principal argumento para a escolha das estruturas de madeira engenheirada é o fato de serem soluções sustentáveis, a não otimização, quando proposital, ou seja, visando atender a desejos ou caprichos pessoais, orientações estéticas ou mesmo extravagâncias, mostra-se extremamente contraditória e talvez até hipócrita.

Assim, a busca pela sustentabilidade não se resume ao emprego de uma matéria-prima com selo verde. Mas pressupõe a racionalização de todo o processo construtivo, para que se alcance, de fato, máxima economia dos recursos naturais, garantindo um desenvolvimento sustentável do presente, em prol do futuro das próximas gerações.

Por último, vale acrescentar a seguinte reflexão:

De que adianta utilizar um material sustentável - e aqui podemos até dizer "sustentável" - se ele não é empregado de forma consciente, quando se escolhe empregar mais material do que seria necessário, ou uma quantidade maior de peças, ou formatos aleatórios que acarretam maior desperdício... tudo isso para garantir mais "beleza" ao projeto. Beleza também entre aspas, porque a beleza é muito relativa. Ela está nos olhos de quem vê e depende do que é visto, do que é de fato enxergado por trás de cada objeto, edificação ou pessoa.

Para mim, na arquitetura, beleza é um conceito estrutural coerente, bem pensado, otimizado. É um revestimento adequado, que proporciona a proteção da estrutura. É o detalhe que faz sentido, que tem um objetivo real na garantia da durabilidade da edificação, e não apenas uma função estética.

Isso é o belo para mim. Mas sei também que não é para todos. E está tudo bem.

Ainda assim, de qualquer maneira, é válido refletir. Qual é o ponto de utilizar um material por ele ser sustentável sendo que seu emprego não é realizado de maneira consciente? Seria apenas a moda - talvez uma ostentação - ou mesmo para estar alinhado com as tendências ecológicas, arquitetônicas ou estéticas? Se é esse o seu objetivo final, então imagino que nada do que foi passado aqui terá utilidade no seu caso. Mas se a sua beleza for a mesma que a minha beleza, espero que tenha aproveitado muito a leitura e, o mais importante de tudo, que possa colocar em prática esse nosso objetivo comum.

E, por que não, fazer tudo isso de tal forma que todos possam também considerar belo? Afinal, quem disse que o otimizado, necessariamente, é esteticamente desagradável?

(da autora, 2023)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOPYAN, Vahan; JOHN, Vanderley M. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. Col. Sustentabilidade - Vol. 5. Editora Blucher, 2014.

AHMED, Shafayet; AROCHO, Ingrid. **Analysis of cost comparison and effects of chance orders during construction: Study of a mass timber and a concrete building project**. Journal of Building Engineering 33, 2021.

ALENCAR, Juliana Bello Mussi. **Sistema Construtivo em Madeira Laminada Colada Cruzada ou Cross-Laminated Timber (CLT): Análise da viabilidade técnica de madeira com baixo valor agregado**. Dissertação de Mestrado. Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2015.

AMARAL, Rafaela S.; ROSA, Talitha O.; TEREZO, Rodrigo F.; BOURSCHEID, Cleide B.; LARYAN, João; CARDOSO, Rodolfo J.; KUHN, Leonardo S. **Estimativa de Custos e Desempenho de Painéis em Madeira Laminada Colada Cruzada**. III Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Florianópolis, 2017.

AMBROZEWICZ, Paulo Henrique Laporte. **Construção de Edifícios: do início ao fim da obra**. São Paulo: Pini, 2015. 270 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7190 – Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12721: Avaliação de custos unitários de construção para incorporação imobiliária de custos edílios – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15965: Sistema de classificação da informação da construção**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 16143 – Preservação de madeiras – Sistema de categorias de uso**. Rio de Janeiro, 2013.

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.

BLANCO, Jose Luis; FUCHS, Steffen; PARSONS, Matthew; RIBEIRINHO, Maria João. **Artificial intelligence: Construction technology's next frontier**. Building Economist, Sep., 2018, p. 7-13.

BOGUE, Robert. **Design for manufacture and assembly: background, capabilities and applications**. Assembly Automation, v. 32, n. 2, 2012, p. 112-118.

BRANDÃO, Douglas Queiroz. **Avaliação da qualidade de arranjos espaciais de apartamentos baseada em aspectos morfo-topológicos e variáveis geométricas que influenciam na racionalização construtiva**. Porto Alegre: Ambiente Construído, v. 6, n. 3, 2006.

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.

BRANDNER, R.; FLATSCHER G.; RINGHOFER, A. SCHICKHOFER, G. THIEL, A. **Cross-Laminated Timber (CLT): overview and development**. European Journal of Wood and Wood Products, v. 74, n. 3, 2016, p. 331–351.

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.

CALIL JÚNIOR, Carlito; CALIL NETO, Carlito. **O Futuro da Madeira Engenheirada na Construção Civil Brasileira: perspectivas e desafios do setor**. In: OLIVEIRA, Fabiana Lopes de; LOTUFO OLIVEIRA, Gabriela; BRAZOLIN, Sérgio (org.). A Madeira Industrializada na Arquitetura Contemporânea Brasileira. São Paulo: Leud, 2023.

CAZEMIER, Dylan S. **Comparing Cross-Laminated Timber with concrete and steel: a financial analyses of two buildings in Australia**. 2017 Modular and Off-site Construction Summit & the 2nd International Symposium on Industrialized Construction Technology. Shanghai, China. 2017.

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. Vol. 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 (MLCC). **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.

COSTA, Ana Alexandra Pontes da. **Construção de edifícios com Cross-Laminated Timber (CLT)**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2013.

COVER, Jennifer. **Mass Timber: The New Sustainable Choice for Tall Buildings**. International Journal of High-Rise Buildings. v. 9, n. 1, 2020.

CREPELL, Pablo; GAGNON, Sylvain. **Cross-Laminated Timber: a Primer**. Pointe-Claire: FPIInnovations, 2010.

DAWSON, Emily; ANDERSON, Roy; MUSZYNSKI, Lech. **2022 International Mass Timber Report**. Missoula: Forest Business Network, 2022.

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-gereciamento-de-autorizacao-especial-de-transito-siaet/RESOLUO012016DNITCargasIndivisveis.pdf>>. Acesso em setembro de 2018.

EASTMAN, Chuck; TEICHOLZ, Paulo; SACKS, Rafael; LISTON, Kathleen. **Manual de BIM: Um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores**. Porto Alegre: Bookman, 2014. 503 p.

FONSECA DE CAMPOS, Paulo Eduardo; LOPES, Eduardo Ignacio. **A fabricação digital aplicada à construção industrializada: estado da arte e perspectivas de desenvolvimento**. Concreto & Construção, v. 85, p. 22-29, 2017.

GASPAR, João Alberto da Motta; RUCHEL, Regina Coeli. **A evolução do significado atribuído ao acrônimo BIM: Uma perspectiva no tempo**. XXI Congresso de la Sociedade Ibero-americana de Gráfica Digital 22, Concepción, Chile, 2017.

GAUZIN-MÜLLER, Dominique. **Arquitetura Ecológica**. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2011.

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. Vol. 120. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.113>> Acesso em: setembro de 2022.

GIACAGLIA, Marcelo Eduardo. **Continuidade temporal e unidade espacial em modelos digitais: a busca da eficiência do projeto de construções**. FAUUSP: Rev. Pós, n.17, jun. 2005. p.62-75.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2002.

GIOZET OLIVEIRA, Giovana Martin. **Classificação da informação da construção em BIM: panorama e normalização**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2020.

GREEN, Michael. **The Case for Tall Wood Buildings. Second Edition: A new way of designing and constructing Tall Wood Buildings**. Tukwila: Blurb, 2017.

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

GREEN, D. W.; WINANDY, J. E.; KRETSCHMANN, D. E. **Mechanical properties of wood**. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY (Ed.). **Wood handbook. Wood as an engineering material**. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, p. 4.1-4.46, 1999.

HOUAISS, Instituto Antônio. **Minidicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2010.

ICC – International Code Council. **Mass Timber Buildings and the IBC®. 2021 Edition**. Country Club Hills: ICC Publications, 2020.

KIERAN, Stephen; TIMBERLAKE, James. **Refabricating architecture: How manufacturing methodologies are poised to transform building construction**. New York: McGraw Hill, 2004.

KREMER, Paul D.; RITCHIE, Laurence. **Understanding Costs and Identifying Value in Mass Timber Construction: Calculating the ‘Total Cost of Project’ (TCP)**. Mass Timber Construction Journal. V. 1, 2018.

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.

KOLAREVIC, Branko. **Architecture in digital age: Design and manufacturing**. New York: Spon Press, 2003.

KOLAREVIC, Branko; DUARTE, José Pinto. **From massive to mass customization and design democratization**. In: KOLAREVIC, Branko; DUARTE, José Pinto. **Mass customization and design democratization**. New York: Routledge, 2019. p 1-12.

KUZMANOVSKA, Ivana; GASPARRI, Eugenia; MONNE, David Tapia; AITCHISON, Mathew. **Tall Timber Buildings: Emerging trends and typologies**. WCTE 2018 World Conference on Timber Engineering. Seoul, 2018.

LEE, Kai-Fu. **Inteligência artificial: como robôs estão mudando o mundo, a forma como amamos, nos comunicamos e vivemos**. Rio de Janeiro: Globo Livros, 2019.

LELIS, Antonio Tadeu; *et al.* **Biodeterioração de madeiras em edificações**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 2001.

LEPAGE, Ennio Silva (Coord.); *et al.* **Manual de Preservação de Madeiras**. Volume I. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 1986.

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

LOTUFO OLIVEIRA, Gabriela; OLIVEIRA, Fabiana Lopes de. **A correta especificação do método de preservação como garantia da durabilidade de edificações em CLT**. XVII Ebramem 2020. Florianópolis, 2021. Disponível em: <<http://eventos.eesc.usp.br/ebramem2020>>

LOTUFO OLIVEIRA, Gabriela; OLIVEIRA, Fabiana Lopes de; BRAZOLIN, Sérgio. **A durabilidade de edificações de madeira no Brasil e o projeto arquitetônico**. In: MARINHO, Jefferson Luiz Alves; MESQUITA, Esequiel Fernandes Teixeira. (org.). **Patologias das edificações: manifestações nas edificações e no patrimônio histórico**. São Paulo: Leud, 2020. p. 132 – 146.

MASCARÓ, Juan Luis. **O custo das decisões arquitetônicas**. Porto Alegre: Masquatro Editora, 2006.

MATTOS, A.D. **Como preparar orçamento de obras**. São Paulo: Pini, 2006.

MAUÉS, F.C.A.; MELO, K.P.; LEÃO, C.B.O.; SERRA, S.M.B. **Estimativa de custos paramétricos de construção de edifícios usando modelo de regressão linear**. *Gestão & Tecnologia de Projetos*. São Carlos, V.17, n2, 2022.

MERK Timber GmbH/Züblin Timber Construction. **Leno Cross-Laminated Timber (CLT)**. 2015. Disponível em: <https://www.trada.co.uk/media/3874/leno_brochure_eng_012015.pdf>. Acesso em agosto de 2018.

MIOTTO, José Luiz. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2009.

MOODY, Russel; HERNANDEZ, Roland. **Glued Laminated Timber**. In: SMULSKI, Stephen, ed., **Engineered wood products - A guide for specifiers, designers and users**. Madison, WI: PFS Research Foundation: 1997. p. 1-39.

MORAES, Aline F. Souza; PICCHI, Flavio; GRANJA, Ariovaldo D. **Variáveis e índices geométricos de projeto arquitetônico relacionados ao custo de empreendimentos residenciais**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16, 2016, São Paulo. Anais. Porto Alegre: ANTAC, 2016.

MORRELL, J. J. **Chromate Copper Arsenate as a Wood Preservative**. In: *Environmental Impacts of Treated Wood*, T.G. Townsend and H. Solo-Gabriele (Ed.). CRC Press, Boca Raton, 2006, p. 5-17.

OLIVEIRA, Paulo. **The Fourth Industrial Revolution and the Industry 4.0**. 2020. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/fourth-industrial-revolution-industry-40-paulo-oliveira/>>. Acesso em: fevereiro de 2022.

ONUR, A. Zeynep; NOUBAN, Fatemeh. **Software in the Architectural Presentation and Design of Buildings: State-of-the-Art**. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. V. 8, 2019.

OXMAN, Rivka. **Theory and design in the first digital age**. *Design Studies*, Vol. 27 n. 3, p.229-265, 2006.

PEREIRA, Marcos Cesar de Moraes. **Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de Madeira Laminada Colada Cruzada**. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2014.

PERKINS + WILL. **Mass Timber Influencers: Understanding mass timber perceptions among key industry influencers**. Vancouver: Forestry Innovation Investment Ltd, 2018. Disponível em: <https://www.bcfii.ca/wp-content/uploads/2021/02/perkinswill_mass_timber_influencers_vancouver_oct-2018-1.pdf> Acesso em setembro de 2022.

PINI, J. T.; Souza, M. S. **Beaver: A computational parametric approach for conception, analysis and design of timber structures**. In: World Conf Timber Eng (WCTE). Santiago, Chile. 2020.

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.

REBELLO, Yopanan Conrado Pereira. **A concepção estrutural e a arquitetura**. São Paulo: Zigurate, 2007.

RETOLAZA, Iban; EZPELETA, Iñigo; SANTOS, Adrian; DIAZ, Iban; MARTINEZ, Felix. **Design to cost: a framework for large industrial products**. Procedia CIRP, v. 100, 2021, p. 828-833.

SAFARIK, Daniel; ELBRECHT, Jacob; MIRANDA, William. **State of Tall Timber 2022**. CTBUH Journal - Council on Tall Building and Urban Habitat, v. 2022, n. 1, 2022, p. 22-31. Disponível em: <<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/4526-state-of-tall-timber-2022.pdf>> Acesso em setembro de 2022.

SALVADORI, Vittorio. **Multi-storey Timber-Based Buildings: an international survey of case-studies with five or more storeys over the last twenty years**. Tese de Doutorado. Viena: Technische Universität Wien, 2021.

SCHREYER, Alexander C. **Architectural Design with SketchUp**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc: 2016.

SAVAGE, Maddy. **Is Finland's Wood City the future of buildings?** BBC News, 2022. Disponível em: <<https://www.bbc.com/news/business-62798950>> Acesso em setembro de 2022.

SORATHIYA, Rashmin. **Literature Review of Cost Information on Mid-Rise Mass-Timber Building Projects**. 2019. Disponível em:

<https://sustain.ubc.ca/sites/default/files/Mass%20Timber%20Cost%20Review_2019.pdf>.

Acesso em julho de 2022.

SOUZA, Leonardo Prazeres Veloso de; PONZIO, Angélica Paiva; BRUSCATO, Underléa Miotto; CATTANI, Airton. **A-BIM: A New Challenge for Old Paradigms**. In: Sousa, José Pedro; Henriques, Gonçalo Castro; Xavier, João Pedro (eds.). Anais do 37 eCAADe e XXIII SIGraDi Joint Conference, "Architecture in the Age of the 4Th Industrial Revolution". São Paulo: Blucher, 2019.

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

VEJA. **Escola de madeira no Tocantins vence prêmio internacional de arquitetura**. Revista Veja, 2018. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/cultura/escola-de-madeira-no-tocantins-vence-premio-internacional-de-arquitetura/>> Acesso em outubro de 2022.

WOODARD, Alastair; JONES, Adam. **Mid-rise Timber Building Structural Engineering**. WoodSolutions by Forest and Wood Products Australia Limited (FWPA), 2020.

WOODWORKS. **Mass Timber Cost and Design Optimization Checklists**. 2022. Disponível em: <https://www.woodworks.org/wp-content/uploads/wood_solution_paper-Mass-Timber-Design-Cost-Optimization-Checklists.pdf> Acesso em junho de 2022.

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

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.

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.

YUAN, Zhenmin; SUN, Chengshuang; WANG, Yaowu. **Design for Manufacture and Assembly-oriented parametric design of prefabricated buildings**. Automation in Construction, v. 88, p. 13-22, 2018.

REFERÊNCIAS PROJETAIS E DIGITAIS

PAGNOTTA, Brian. **Clássicos da Arquitetura: Museu Guggenheim de Bilbao / Gehry Partners**. ArchDaily Brasil, 2016. (Tradução SOUZA, Eduardo). Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/786175/classicos-da-arquitetura-museu-guggenheim-de-bilbao-gehry-partners>> Acesso em agosto de 2022.

HASAN, Zoya. **Maior arranha-céu de madeira do mundo é concluído em Vancouver**. ArchDaily Brasil, 2017. (Tradução LIBARDONI, Vinicius). Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/879671/maior-arranha-ceu-de-madeira-do-mundo-e-concluido-em-vancouver>> Acesso em outubro de 2022.

Escola Concept / Triptyque Architecture. ArchDaily Brasil, 2021 Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/918035/escola-concept-triptyque-architecture>> Acesso em setembro de 2022.

Escola Parque – EMEI Cleide Rosa Auricchio / Carolina Penna Arquitetos. ArchDaily Brasil, 2023. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/977957/escola-parque-nil-emei-cleide-rosa-auricchio-carolina-penna-arquitetura-e-urbanismo>> Acesso em junho de 2023.

HoHo Vienna / HASSLACHER group. The Potential of Prefabrication. ArchDaily. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/catalog/us/products/29352/the-potential-of-prefabrication-hoho-vienna-hasslacher-group>> Acesso em setembro de 2022.

Loja Conceito da Dengo Chocolates / Matheus Farah + Manoel Maia Arquitetura. Archdaily Brasil, 2021. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/960042/loja-conceito-da-dengo-chocolates-matheus-farah-plus-manoel-maia-arquitetura>> Acesso em outubro de 2022.

Mjøstårnet The Tower of Lake Mjøsa / Voll Arkitekter. ArchDaily, 2020. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/934374/mjostarnet-the-tower-of-lake-mjosa-voll-arkitekter>> Acesso em outubro de 2022.

Moradias Infantis / Rosenbaum® + Aleph Zero. Archdaily Brasil, 2020. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/879961/moradias-infantis-rosenbaum-r-plus-aleph-zero>> Acesso em outubro de 2022.

Praia da Grama / Gui Mattos. ArchDaily Brasil, 2023. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/979201/praiada-grama-arquitetura-gui-mattos>> Acesso em junho de 2023.

Sara Kulturhus Center / White Arkitekter. ArchDaily, 2021. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/967019/sara-kulturhus-center-white-arkitekter>> Acesso em setembro de 2022.

Stadthaus, 24 Murray Grove / Waugh Thistleton Architects. ArchDaily México, 2009. Disponível em: <<https://www.archdaily.mx/mx/02-22097/stadthaus-24-murray-grove-waugh-thistleton-architects>> Acesso em outubro de 2022.

Página virtual da ferramenta Autodesk. Disponível em: <<https://www.autodesk.com.br/>> Acesso em 11 de maio de 2020.

Página virtual da ferramenta SketchUp®. Disponível em: <<https://www.sketchup.com/>> Acesso em 11 de maio de 2020.

Página virtual da plataforma Think Wood. Disponível em: <<https://www.thinkwood.com/>> Acesso em 27 de fevereiro de 2022.