YURI ENDO KOKUBUN

O processo de produção de um sistema construtivo em painéis
estruturais pré-fabricados em madeira.

Dissertação apresentada à Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo da Universidade de São Paulo, para a
obtenção do título de Mestre em Arquitetura e
Urbanismo.

Área de concentração:
Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo
Orientadora:
Prof^a. Dra. Claudia Terezinha de Andrade Oliveira

São Paulo
2014

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.

E-MAIL DO AUTOR: endokokubun@gmail.com

K81p Kokubun, Yuri Endo
O processo de produção de um sistema construtivo em painéis estruturais pré-fabricados em madeira / Yuri Endo Kokubun. – São Paulo, 2014.
171 p. : il.

Dissertação (Mestrado - Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura) – FAUUSP.
Orientadora: Claudia Terezinha de Andrade Oliveira

1.Sistemas e processos construtivos 2.Processos pré-fabricados
3.Industrialização da construção 4.Madeira (Estrutura) I.Título

CDU 69.057:691.11

Nome: KOKUBUN, Yuri Endo

Título: O processo de produção de um sistema construtivo em painéis estruturais pré-fabricados em madeira.

Dissertação apresentada à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr.: _____ Instituição: _____

Julgamento: _____ Assinatura: _____

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer ao meus pais, Fernando e Helena, que sempre me apoiaram e mostraram o valor da educação.

À Claudia, que além de me orientar nesta longa empreitada, sempre demonstrou grande competência frente a todas os obstáculos que tivemos pela frente.

À Fernanda e Lucas por serem esses grandes amigos e companheiros desde o início, e que acreditaram no projeto até o fim.

À todos da equipe brasileira do SDE, desde os que ficaram pelo caminho aos que seguiram bravamente até Madri. Parte do esforço de cada um está nas páginas deste trabalho.

À organização do Solar Decathlon Europe 2012 e a todos os participantes do evento por me proporcionarem uma das minhas melhores experiências de vida.

Aos profissionais da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAUUSP) e do Instituto de Energia e Ambiente (IEE-USP) pelo apoio durante esses anos.

À Mari, por toda a paciência com a minha ausência.

E à Centrais Elétricas Brasileiras (Eletrobras) pelo financiamento desta pesquisa.

“E passo a passo, depois de ter produzido nas fábricas tantos canhões, aviões, caminhões, vagões, dizemo-nos: Não poderia fabricar casas?”

Le Corbusier¹

¹ Le Corbusier. **Por uma arquitetura**. 6ª edição. São Paulo: Editora Perspectiva, 2000.

Resumo

KOKUBUN, Y. E. **O processo de produção de um sistema construtivo em painéis estruturais pré-fabricados em madeira.** 2014. 171 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Esta dissertação tem por objetivo documentar e analisar o processo de produção do sistema construtivo em painéis estruturais de madeira pré-fabricados aplicado ao protótipo de residência de energia zero – Ekó House. A estrutura do protótipo é composta por quadros de madeira serrada (cumaru - *Dipteryx odorata*) contraventados por chapas de OSB e ligações metálicas. A descrição do processo produtivo se inicia com a descrição do desenvolvimento do projeto para produção, elaborado em *software* de manufatura digital, da fabricação com equipamentos convencionais e máquinas de comando numérico computadorizado (CNC), chegando à etapa de montagem da estrutura, utilizando equipamentos de transporte, de içamento e mão de obra capacitada. A partir da análise deste processo, é possível verificar ganhos de produtividade e qualidade na estrutura em painéis pré-fabricados em madeira devido aos procedimentos adotados, dos quais se destacam: (1) precisão obtida pelo emprego de máquina CNC em conjunto com *software* de manufatura digital; (2) utilização de dispositivos de montagem e; (3) maior controle de produção pelo maior emprego de atividades em ambiente industrial. Esses procedimentos possibilitaram a montagem da estrutura em painéis pré-fabricados em 4 dias e sua desmontagem em 2 dias. As dificuldades mais expressivas estão relacionadas a: (1) manuseio e montagem dos painéis devido à necessidade do uso de equipamentos de içamento e mão de obra treinada; (2) difícil trabalhabilidade da madeira nos processos de pré-fabricação da estrutura e; (3) emprego de soluções não convencionais ao processo construtivo tradicional, o que exigiu a adaptação de ferramentas e o desenvolvimento de procedimentos não usuais na construção em madeira no Brasil. Os processos, procedimentos e ferramentas desenvolvidos, mediante ajustes, se mostraram viáveis para utilização em sistemas construtivos em painéis pré-fabricados em madeira no Brasil.

Palavras-chave: Sistemas e processos construtivos. Processos pré-fabricados. Industrialização da construção. Madeira (Estrutura).

Abstract

KOKUBUN, Y. E. **O processo de produção de um sistema construtivo em painéis estruturais pré-fabricados em madeira.** 2014. 171 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

This dissertation aims to document and analyze the production process of a constructive system in prefabricated wooden panels applied to a net zero energy house prototype – Ekó House. The structure of the prototype consists of bearing panels in timber frame (cumaru – *Dipteryx odorata*) braced by OSB plates and metallic connections. The description of the production process starts with the development of the design for production, elaborated with digital manufacturing software, the fabrication with conventional woodworking equipment and Computer Numerical Control Machines (CNC Machines), and the assembly of the structure, using transportation and lifting equipment and skilled labor. From the analysis of this process, it was possible to verify gains in productivity and quality in the structure of prefabricated wooden panels due to the procedures adopted, among which are highlighted: (1) the precision achieved by the use of CNC Machines combined with digital manufacturing software; (2) use of jigs and (3) greater control of production due to the greater employment of activities in an industrial environment. These procedures allowed the assembly of the prefabricated structure in 4 days, and disassembly in 2 days. The main challenges are related to: (1) handling and assembly of the wooden panels due to the need of lifting equipment and skilled labor; (2) difficult wood workability in the prefabrications process of the structure and (3) using unconventional solutions to the traditional construction methods, required adaptation of regular tools and the development of unusual procedures in wood construction in Brazil. The process, procedures and tools developed, with some adjustments, area feasible for use in prefabricated wooden panels in Brazil.

Keywords: Systems and constructive processes. Process of prefabrication. Industrialization fo construction. Wood (structure).

Lista de Ilustrações

Figura 2.1 - Estrutura da cadeira produtiva da madeira.	27
Figura 2.2 - Processos e produtos da cadeia produtiva da habitação pré-fabricada em painéis estruturais de madeira.	29
Figura 4.1 - Evento Solar Decathlon Europe 2012.	56
Figura 4.2 - Protótipo Ekó House no evento Solar Decathlon Europe 2012.	57
Figura 4.3 - Planta Baixa do protótipo Ekó House.....	60
Figura 4.4 - Vista explodida da composição da Ekó House..	61
Figura 4.5 – Estrutura em painéis pré-fabricados em madeira do protótipo Ekó House.	62
Figura 4.6 - Composição de um painel horizontal: quadro de madeira serrada com contraventamento em chapas de <i>OSB</i>	63
Figura 4.7 - Planta baixa com a divisão em módulos da estrutura.....	64
Figura 4.8 - Módulos estruturais e seus respectivos painéis: M1 (direita); M2 (centro) e M3 (esquerda).	65
Figura 4.9 - Planta com a disposição dos painéis verticais.	67
Figura 4.10 - Composição dos painéis verticais.	68
Figura 4.11- Tipos de conexão entre painéis verticais.	70
Figura 4.12 - Composição das vigas transversais dos painéis horizontais.	71
Figura 4.13 - Composição dos painéis horizontais.	71
Figura 4.14 - Detalhe de composição dos painéis horizontais de piso.....	72
Figura 4.15 Conexão entre painéis horizontais.	73
Figura 4.16 - Composição da fundação metálica do protótipo Ekó House.....	73
Figura 4.17 - Esquema lógico da organização da modelagem no <i>software</i> de manufatura digital.	78
Figura 4.18 - Diagrama demonstrando esquema de montagem do painal vertical M1P4a...	80

Figura 5.1 - Tipos de rebaixos executados nas peças de madeira serrada.	93
Figura 5.2 - Peças de madeira serrada com identificação utilizada para facilitar as operações de fabricação.	95
Figura 5.3 - Diagrama de resumos dos procedimentos adotados para usinagem das peças de madeira serrada e chapas de OSB.	96
Figura 5.4 - Ferramentas utilizadas para usinagem das peças de madeira serrada, de cima para baixo: Fresa com ponta 60º e pinça para fresa, broca de aço rápido de 6mm e broca de aço rápido rebaixada 11/5mm.	98
Figura 5.5 - Usinagem em router CNC de uma peça de madeira serrada.	99
Figura 5.6 - Operação da furadeira horizontal (esquerda). Diagrama de movimentação da furadeira horizontal (direita).	99
Figura 5.7 – Furo guia executado na router CNC utilizado como guia de posicionamento para garantir precisão na usinagem dos rasgos de conexão de painéis na furadeira de horizontal.	101
Figura 5.8 - Dispositivo de montagem para painéis verticais.	104
Figura 5.9 - Sargentos fixados junto à estrutura do dispositivo de montagem.	107
Figura 5.10 – Montagem do quadro de madeira serrada no dispositivo de montagem.	108
Figura 5.11 - Painéis verticais finalizados.	108
Figura 5.12 - Dispositivo empregado para garantir o esquadro e dimensões das vigas transversais.	112
Figura 5.13 - Montagem dos painéis horizontais do módulo 1, na foto é possível observar o quadro de madeira serrada do painel de cobertura sobre o de piso.	116
Figura 5.14 - Movimentação do painel horizontal de cobertura durante a montagem (esquerda). Preenchimento do painel de horizontal de cobertura com lã de vidro (direita).	121
Figura 5.15 - Instalação painel vertical utilizando ponte rolante de pórtico.	122
Figura 5.16 - Medidas de segurança adotadas para instalação painel vertical sem a ponte rolante de pórtico.	126
Figura 5.17 - Içamento de um painel horizontal de cobertura utilizando o caminhão guindauto.	127
Figura 5.18 - Barreira de vapor instalada sobre os painéis estruturais.	130

Figura 5.19 - Interior da estrutura de madeira durante a instalação dos sistemas prediais e do piso.	131
Figura 5.20 - Armazenamento de um painel horizontal de cobertura na gaiola.	133
Figura 6.1 - Lote de montagem no evento Solar Decathlon Europe 2012.	137
Figura 6.2 – Equipamentos utilizados para manuseio de cargas no evento Solar Decathlon Europe 2012: manipulador telescópico (esquerda) e guindaste (direita).	138
Figura 6.3 - Movimentação painel horizontal de piso (M1HP) utilizando manipulador telescópico – evento SDE 2012.....	146
Figura 6.4 - Içamento painel vertical utilizando guindaste - evento SDE 2012.	150
Figura 6.5 - Instalação painel horizontal de cobertura (M1HC) utilizando guindaste - evento SDE 2012.	153
Figura 6.6 - Detalhe de içamento painel horizontal: na peça de conexão metálica das vigas transversais está fixado um olhal para içamento e uma manilha, que por sua vez está fixada à cinta de içamento presa ao guindaste.	154

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Dimensões dos Principais Produtos de Madeira Serrada.	32
Tabela 3.1 - Classificação de sistemas construtivos em madeira em diversos países.	40
Tabela 3.2 - Controle de aceitação de materiais (madeira): métodos e frequências de avaliação conforme Diretriz SINAT nº005.	50
Tabela 3.3 - Exemplo das principais atividades a verificar durante a montagem de paredes, conforme a diretriz SINAT nº005.	51
Tabela 4.1 Dimensões e massas dos painéis estruturais do protótipo Ekó House.	66
Tabela 4.2 - Organização da modelagem da estrutura da Ekó House.	81
Tabela 5.1 - Relação de materiais para a fabricação dos painéis estruturais.	90
Tabela 5.2 - Peças de madeira serrada adquiridas para fabricação dos painéis estruturais.	91
Tabela 5.3 – Resumo das operações de transporte e corte dos lotes de madeira serrada.	94
Tabela 5.4 - Operações de usinagem e ferramentas utilizadas.	97
Tabela 6.1 - Sequência de montagem da estrutura em painéis pré-fabricados de madeira no evento Solar Decathlon Europe 2012.	139

Lista de Quadros

Quadro 4.1 - Estrutura de provas do SDE 2012. Fonte: adaptado de SDE, 2012	56
Quadro 4.2 - Classificação dos painéis verticais conforme aberturas.....	69
Quadro 5.1 - Sequência de montagem dos painéis verticais.	105
Quadro 5.2 - Sequência de montagem dos painéis horizontais de piso.	113
Quadro 5.3 - Sequência de montagem dos painéis horizontais de cobertura.....	117
Quadro 5.4 - Sequência de operações para instalação dos painéis verticais utilizando ponte rolante de pórtico.	123
Quadro 5.5- Sequência de operações para instalação dos painéis horizontais de cobertura.	127
Quadro 6.1 - Sequência de montagem dos painéis horizontais de piso – evento SDE 2012.	141
Quadro 6.2 - Sequência de montagem dos painéis verticais - evento SDE 2012.....	147
Quadro 6.3 - Sequência de montagem dos painéis horizontais de cobertura - evento SDE 2012.....	150

Sumário

Agradecimentos.....	1
Resumo	3
Abstract.....	4
Lista de Ilustrações.....	5
Lista de Tabelas	8
Lista de Quadros	9
Sumário	10
Capítulo 1 - Introdução	13
1.1. Antecedentes.....	15
1.2. Justificativa	16
1.3. Objetivo.....	17
1.4. Metodologia	17
1.5. Limitações do trabalho.....	18
1.6. Estrutura da dissertação.....	18
Capítulo 2 – Madeira na construção.....	20
2.1. Aspectos ambientais do uso da madeira.....	21
2.2. Uso da madeira como material de construção	22
2.3. O setor florestal brasileiro.....	23
2.4. A Cadeia Produtiva da Madeira.....	25
2.5. Produtos de Madeira	30
2.5.1. Madeira Roliça.....	31
2.5.2. Madeira Serrada	31
2.5.3. Madeira beneficiada	33

	11
2.5.4. Painéis	34
2.5.5. Madeira estrutural composta	36
2.6. Considerações sobre o capítulo	36
Capítulo 3 – Sistemas construtivos pré-fabricados em madeira	39
3.1. Sistemas Construtivos em Madeira	39
3.1.1. Classificação de sistemas construtivos em madeira partir do grau de industrialização	43
3.2. Pré-fabricação de sistemas construtivos em painéis estruturais de madeira	45
3.3. Requisitos para sistemas construtivos inovadores em madeira para habitações	48
3.4. Considerações sobre o capítulo	52
Capítulo 4 – Projeto Ekó House	54
4.1. Solar Decathlon Europe.....	54
4.2. O Projeto Ekó House	57
4.2.1. Concepção.....	58
4.2.2. Sistema construtivo em painéis pré-fabricados em madeira	61
4.3. Projeto para Produção	76
4.3.1. Modelagem	79
4.3.2. Detalhamento para fabricação e montagem.....	81
4.3.3. Documentação para fabricação e montagem	83
4.4. Considerações sobre o capítulo	86
Capítulo 5 – Produção estrutura de madeira do protótipo Ekó House	88
5.1. Infraestrutura	88
5.2. Fabricação dos painéis estruturais da Ekó House	89
5.2.1. Aquisição das peças estruturas de madeira	89
5.2.2. Cortes e Rebaixos nas peças de madeira serrada.....	92
5.2.3. Usinagens das peças de madeira serrada e chapas de OSB	96
5.2.4. Fabricação dos painéis estruturais	102

	12
5.3. Processo de fabricação da estrutura do protótipo Ekó House	121
5.3.1. Instalação dos painéis verticais	121
5.3.2. Instalação dos painéis horizontais de cobertura.....	127
5.3.4. Instalação da barreira de vapor	129
5.3.5. Instalação dos sistemas prediais, esquadrias e revestimentos	130
5.4. Desmontagem e transporte do protótipo Ekó House.....	132
5.5. Considerações sobre o capítulo	134
Capítulo 6 – Montagem do protótipo Ekó House – Solar Decathlon Europe 2012.....	136
6.1. Infraestrutura	136
6.2. Equipamentos	138
6.3. Montagem da estrutura em painéis pré-fabricados de madeira	139
6.3.1. Montagem dos Painéis Horizontais de Piso	141
6.3.2. Montagem dos painéis verticais.....	147
6.3.3. Montagem dos painéis horizontais de cobertura	150
6.4. Avaliação do protótipo durante o evento Solar Decathlon Europe 2012	154
6.5. Considerações sobre o capítulo	155
Capítulo 7 – Considerações Finais.....	157
Referências Bibliográficas	161

Capítulo 1

Introdução

A dissertação aborda a produção de sistemas construtivos em painéis estruturais de madeira pré-fabricados para edificações residenciais. A proposta se insere como uma contribuição ao desenvolvimento destes sistemas no Brasil.

Esta trabalho faz parte de um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) de maior abrangência², cujo objetivo geral foi iniciar o desenvolvimento de competência nacional em projeto e construção de residência energia zero (REZ), para implantação de uma indústria nacional com tecnologia própria e adequada às condições bioclimáticas brasileiras.

No contexto dessa pesquisa, o conceito de residência de energia zero está de acordo com uma das definições adotadas por Torcellini et al. (2006): *net zero site energy building* – site ZEB. Nesta definição, a edificação produz, por meio de fontes locais, toda a energia que consome, considerando um balanço anual. Nesta situação, a REZ pode ser conectada à rede pública de energia, integrando um sistema de geração distribuída.

² Projeto P&D amparado pelo convênio ECV308/09 estabelecido entre Eletrobrás (Centrais Elétricas Brasileiras S.A.), Universidade de São Paulo (USP) e Fundação da Universidade de São Paulo (FUSP), considerando as diretrizes e o plano de ação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel). Além dos pesquisadores da Universidade de São Paulo, também participam desse convênio pesquisadores das Universidades Federais de Santa Catarina (UFSC), do Rio Grande do Sul (UFRGS), do Rio de Janeiro (UFRJ), do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) e da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp).

A eficiência energética é um dos requisitos fundamentais em projeto, construção e uso de uma REZ, pois reduz o consumo energético, diminuindo a necessidade de geração de energia (GRIFFITH et al 2007; TORCELLINI et al, 2006). Em se tratando de uma REZ industrializada, pode-se dizer que projeto também deve propor soluções racionalizadas e criteriosamente planejadas, que também resultem no menor dispêndio de energia durante a fabricação de componentes e a montagem da casa em canteiro de obras.

Além da racionalização e redução do consumo de recursos, um dos requisitos importantes da montagem de uma REZ industrializada é a garantia da estanqueidade da envoltória da casa (piso, paredes externas, cobertura). Uma envoltória estanque é necessária para o controle da infiltração e exfiltração de ar o que, conseqüentemente, minimiza as trocas de calor entre os ambientes interno e externo e colabora para o melhor desempenho energético da edificação.

No projeto P&D optou-se por desenvolver o protótipo de uma residência unifamiliar, térrea, composto por um sistema construtivo em madeira de painéis pré-fabricados estruturais (piso, cobertura e paredes internas e externas), com isolamento térmico incorporado. Além da função estrutural, os painéis atuam como vedação vertical e horizontal (interna e externa), fazem parte do sistema de isolamento térmico da envoltória da casa e servem como suporte físico para a fixação das esquadrias, revestimentos e instalações complexas (sistema fotovoltaico, sistema hidráulico com montagem rápida, etc.).

É importante salientar que, se por um lado, a utilização desse sistema parece limitar a flexibilização dos espaços (pois em muitos casos apresenta limitações dimensionais por restrições do próprio sistema estrutural), por outro lado, possibilita a execução de partes complexas da edificação em um ambiente controlado, garantindo maior qualidade no produto final.

A estrutura foi projetada para utilizar madeira nativa brasileira (cumarú) de alta densidade de massa aparente e classe de resistência C60, conforme determinação do cálculo estrutural, para os quadros de madeira, e painéis de *OSB (Oriented Strand Boards)* foram usados para contraventar a estrutura desses quadros. A madeira foi selecionada como material estrutural para evitar pontes térmicas que pudessem comprometer a eficiência energética do protótipo.

Esta pesquisa insere-se no contexto da produção do sistema construtivo em madeira em painéis estruturais pré-fabricados do protótipo de REZ – Ekó House.

Ino (1992)³ *apud* Pinto (2001) observa que há uma deficiência na sistematização das informações existentes relativas à tecnologia de construção em madeira no Brasil, e que esforços são necessários para compilar informações sobre esse tipo de habitação. Passados 20 anos após essa observação, ainda hoje a falta de dados compilados dificulta a difusão em larga escala de edificações em madeira no Brasil.

Há uma mobilização de parte do setor madeireiro (projetistas, construtores, indústria, associações de classe e o meio acadêmico) no desenvolvimento, aprimoramento e avaliação de sistemas construtivos em painéis estruturais pré-fabricados em madeira (SZÜCS et al, 2006; PARTEL, 2007; LAROCA, 2007; STAMADE, 2013, SHINTECH, 2013). Esses esforços tem permitido avanços quanto à oferta de serviços e produtos destinados à construção pré-fabricada em madeira.

1.1. Antecedentes

O projeto P&D, no qual se insere esta proposta, teve origem nos estudos iniciais de um projeto de uma residência, concebido a partir dos princípios de eficiência energética e conforto ambiental, visando à participação na competição Solar Decathlon. O Projeto da residência, denominado Ekó House⁴, foi desenvolvido por uma equipe de estudantes e professores da Universidade de São Paulo (USP) e da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), além de contar com o apoio da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Universidade de Campinas (Unicamp), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). O protótipo Ekó House foi pré-fabricado e montado na USP, São Paulo, e posteriormente participou do evento Solar Decathlon Europe 2012 em Madri, na Espanha.

Os painéis pré-fabricados da estrutura atendem a vários requisitos de uma REZ já apontados e também outros requisitos relacionados à logística de transporte, montagem e desmontagem para atender condições e regras específicas do evento. Adicionalmente, os painéis estruturais foram desenhados para atender uma modulação estrutural capaz de satisfazer a necessidade futura de reconfiguração da estrutura para alteração do tamanho da casa e de reorganização dos espaços. As demais vantagens da pré-fabricação – aumento da produtividade e

³ INO, A. Classificação de sistemas construtivos em madeira, alguns exemplos de construção de madeira para habitação no Brasil. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4., São Carlos, 1992.

⁴ www.ekobrasil.org

racionalização no canteiro; redução do desperdício de materiais – estão em conformidade com o requisito precípua do projeto - a eficiência energética, não apenas no uso, mas também na montagem do protótipo físico.

Diante dessas condicionantes, um desafio do processo foi coordenar todos os requisitos e definir os critérios a serem considerados para o desenvolvimento do projeto e na produção da estrutura do protótipo.

Outro desafio está associado ao uso da madeira como principal material de construção em uma cadeia que não está familiarizada com as demandas de projeto de residências de energia zero.

Tento em vista o exposto, o presente trabalho se propõe a realizar uma análise referente ao processo de pré-fabricação, montagem e desmontagem do sistema estrutural do protótipo de REZ – Ekó House.

1.2. Justificativa

A madeira é um dos poucos materiais de construção renováveis, pode substituir em determinadas aplicações outros materiais de origem finita trazendo benefícios ao meio ambiente.

A partir dessa premissa muitas pesquisas sobre o uso de madeira de forma mais intensiva na produção habitacional têm sido desenvolvidas. As pesquisas apresentam resultados positivos para o uso predominante de madeira plantada, valendo-se de processos construtivos com variados graus de industrialização.

Da leitura de diversos trabalhos sobre a industrialização de habitações em madeira, é possível observar que eles têm os mesmos objetivos de outras áreas da indústria: melhorar a qualidade, reduzir custos e perdas materiais, diminuir o tempo da construção.

A proposta desta dissertação, como outras pesquisas, tem sua base na industrialização da construção em madeira no Brasil. No entanto, contribui para o conhecimento de novos arranjos formais e produtivos com a apresentação de painéis estruturais que atendem uma série de requisitos aplicáveis a projetos de residências que têm como princípio a alta eficiência energética e às exigências da logística de transporte, montagem e desmontagem.

É importante observar que muitos trabalhos têm sido feitos de forma a melhorar a qualidade de habitações de madeira. Mas ainda há campo para estudo de sistemas com diferentes lógicas produtivas.

1.3. Objetivo

O objetivo deste trabalho é analisar o processo de produção do sistema construtivo constituído por painéis estruturais de madeira pré-fabricados, aplicados a um protótipo de residência energia zero – Ekó House.

1.4. Metodologia

A metodologia empregada neste trabalho é de carácter exploratório, utilizando como estratégia para o seu desenvolvimento o estudo de caso.

O estudo de caso é uma modalidade de pesquisa que consiste no estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento (GIL, 2002). Essa estratégia de exploração é encarada como o delineamento mais adequado para a investigação de um fenómeno contemporâneo dentro de seu contexto real (YIN, 2001).

No caso deste trabalho o fenómeno a ser estudado é o processo de produção e montagem de um sistema construtivo de madeira para habitações pré-fabricadas utilizado no protótipo Ekó House.

A utilização deste protótipo se justifica pela atuação do autor no desenvolvimento do projeto, processo de pré-fabricação dos componentes estruturais e nas fases de montagem e desmontagem.

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica, que buscou identificar na literatura os aspectos relevantes, limitações e possibilidades do emprego da madeira como material construtivo, observando em sua cadeia produtiva aspectos que favorecem ou dificultam a produção de edificações pré-fabricadas de madeira.

A segunda parte da revisão bibliográfica aborda os sistemas construtivos pré-fabricados em madeira, identificando suas principais características produtivas, e os requisitos que devem ser observados no desenvolvimento de sistemas construtivos inovadores para habitação em madeira.

O escopo da pesquisa aborda essencialmente a fase de produção (pré-fabricação dos painéis e montagem/desmontagem) do ciclo de vida da edificação. Por se tratar de uma habitação pré-fabricada também são descritos aspectos relevantes da fase de projeto, especificamente o desenvolvimento do projeto para produção da estrutura.

A etapa de produção é descrita a partir da observação, registro e coleta de dados no ambiente de desenvolvimento das atividades do processo construtivo. É dividida em duas etapas. Na primeira é descrito o desenvolvimento do processo construtivo da estrutura na Universidade de São Paulo, abordando a infraestrutura utilizada, a fabricação dos painéis estruturais, o processo de fabricação da estrutura de painéis pré-fabricados em madeira e a logística de transporte adotada. A segunda parte descreve a montagem e desmontagem da estrutura do protótipo Ekó House no evento Solar Decathlon Europe 2012.

1.5. Limitações do trabalho

Este trabalho está inserido um conjunto de pesquisas que visam o desenvolvimento de competência nacional em projeto e construção de residências de energia zero adaptadas às condições brasileiras.

Dessa forma, muitos dos assuntos de fundamental importância do processo construtivo do protótipo (geração fotovoltaica, automação de REZ, integração de sistema de geração fotovoltaica à arquitetura, redução da emissão de gases de efeito estufa em casa solares, avaliação de risco em projeto de arquitetura com inserção de tecnologias que minimizam gastos energéticos, fabricação e processos digitais para produção de componentes para REZ, eficiência energética, divulgação de tecnologias sustentáveis à população) não são abordados ou aprofundados neste trabalho, porém fazem parte do escopo de análise em outros trabalhos relacionados.

1.6. Estrutura da dissertação

A dissertação foi estruturada da seguinte forma:

O **Capítulo 2 – Madeira na Construção** apresenta uma revisão bibliográfica a respeito do uso da madeira como produto para a construção civil. Fazendo uma breve apresentação da situação do setor produtivo (ou cadeia produtiva) da madeira (florestas nativas ou plantadas), passando pelo beneficiamento, processos de tratamento e industrialização até o uso final.

São destacados os produtos utilizados em projetos de estruturas industrializadas aplicáveis ao caso específico da Ekó House, o estudo de caso deste trabalho.

O **Capítulo 3 – Habitação Pré-Fabricada em Madeira** faz uma revisão bibliográfica de sistemas construtivos em madeira destinados a produção de habitação, em seguida apresenta um panorama de industrialização e racionalização de algumas tipologias construtivas em madeira e por fim, as características técnicas da pré-fabricação de painéis estruturais de madeira para habitação.

O **Capítulo 4 – Projeto Ekó House** descreve o projeto da Ekó House. Partindo de um breve panorama do desenvolvimento do projeto (concepção e premissas). Na sequência é apresentado o desenvolvimento do projeto para produção da estrutura de madeira do protótipo.

O **Capítulo 5 – Produção da Ekó House** descreve o processo de pré-fabricação dos componentes estruturais e do protótipo. São detalhadas as operações de fabricação em marcenaria convencional, a utilização de equipamentos controlados por Comando Numérico Computadorizado (CNC) e a fabricação da estrutura do protótipo Ekó House.

O **Capítulo 6 – Montagem do protótipo Ekó House – Solar Decathlon Europe 2012** descreve o processo de montagem do protótipo durante o evento Solar Decathlon Europe, em Madri.

O **Capítulo 7 – Considerações Finais** será destinado a uma análise crítica do processo de produção da Ekó House. Identificando as vantagens e as dificuldades na utilização de painéis pré-fabricados na produção de uma residência de energia zero – Ekó House, e relacionando-os com as decisões projetuais e operacionais adotadas.

Capítulo 2

Madeira na Construção

Este capítulo apresenta os aspectos tecnológicos da produção da madeira para o emprego na construção, especialmente para uso estrutural.

O texto inicia apresentando as vantagens no emprego da madeira como material construtivo e em seguida apresenta o setor florestal brasileiro, de forma a demonstrar a viabilidade no emprego da madeira no Brasil.

Na sequência é descrita a cadeia produtiva da madeira serrada, material empregado na estrutura de painéis pré-fabricados do protótipo Ekó House, salientando os aspectos relevantes deste processo que influenciam a execução dos sistemas construtivos subsequentes.

Por fim, é feita uma apresentação dos produtos de madeira que são produzidos pelo setor florestal brasileiro.

As propriedades, microestrutura e o comportamento da madeira enquanto material de construção civil não são detalhadas, mas podem ser acessadas em títulos especializados no

assunto (ZENID, 2009; GOTZ, 1983; CALLISTER JR., 2008⁵; LELIS, 2001⁶). Temas relacionados à compra responsável de madeira (como forma de combater a ilegalidade) também não fazem parte do escopo de análise e podem ser consultados em CBCS (2012); Braga (2011)⁷.

2.1. Aspectos ambientais do uso da madeira

A madeira apresenta baixo consumo energético para sua produção. Segundo Barbosa et al (apud BARRIEL, 2009), na quantificação do consumo de energia das edificações, em geral, era considerado somente o processo básico de produção dos materiais e dos componentes construtivos e o uso do edifício (aquecimento, refrigeração e iluminação). Porém, segundo Barriel (2009), recentes pesquisas revelam a importância de quantificar a energia embutida do material desde a extração, transformações, uso e demolição, ou seja, analisando todo o ciclo de vida dos materiais.

O menor impacto das construções em madeira tem sido comprovado por meio de pesquisas e concretizado por meio de aplicações duráveis que resultam em mecanismos de fixação de carbono e substituição de materiais não renováveis.

Além de ser um recurso renovável, o uso da madeira na produção de edificações duráveis fixa o carbono, minimizando a liberação de CO₂ na atmosfera.

Diversos países adotam como parte de suas estratégias de diminuição das emissões de gases de efeito estufa o incremento da utilização da madeira na construção (GAUZIN-MÜLLER, 2011). Durante seu crescimento as árvores absorvem CO₂ da atmosfera para fabricar a celulose e lignina, elementos dos quais são constituídas, assimilam o carbono e liberam oxigênio à atmosfera. A utilização da madeira como material de construção, retarda a liberação do carbono incorporado à atmosfera (GAUZIN-MÜLLER, 2011). Dessa forma,

⁵ CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2008.

⁶ LELIS, A. T. (coord.). **Manual de biodeterioração de madeiras em edificações**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2001.

⁷ BRAGA, E. (coord.). **Aquisição responsável de madeira na construção civil. Guia Prático para as construtoras**. Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de São Paulo – SindusCon-SP e WWF-Brasil, 2011. Disponível em <http://www.sindusconsp.com.br/downloads/prodserv/publicacoes/manual_madeira.pdf>. Acesso em fevereiro/2014.

quanto maior a utilização da madeira em elementos com vida útil prolongada, maior será a capacidade de sequestro de CO₂ da atmosfera (PARTEL, 2006).

Segundo Moura-Costa⁸ (apud WEST, 2012), a fixação de carbono se dá por acumulação e estocagem. Sendo assim, qualquer atividade ou prática de manejo que altere a biomassa de uma área tem efeito em sua capacidade de estoque ou sequestro de carbono. Ou seja, segundo Moura-Costa (apud WEST, 2012), as práticas de manejo florestal podem ser utilizadas para reduzir a quantidade de CO₂ na atmosfera de duas formas, aumentando as taxas de acumulação (sequestro) de carbono da atmosfera e, prevenindo ou reduzindo as taxas de liberação de carbono já fixado.

De acordo com Barbosa et al.⁹ (2000 apud Barriel, 2009), ao final de seu ciclo de vida na edificação, a madeira ainda pode ser utilizada para fins energéticos. Nesta situação, a liberação de CO₂ é equivalente à quantidade absorvida durante a fotossíntese, e proporcionalmente, igual a sua decomposição natural na floresta.

No entanto, atenção deve ser dada às práticas da cadeia produtiva da madeira de modo a assegurar a melhor seleção de materiais (madeira serrada nativa, madeira serrada plantada ou madeira beneficiada) e métodos de produção que resultem nos benefícios desejados.

2.2. Uso da madeira como material de construção

A NBR 7190:1997 apresenta as condições que devem ser seguidas para projetos, execução e controle de estruturas em madeira. Além das questões específicas para o cálculo de estruturas em madeira, a NBR 7190:1997 apresenta informações importantes como a classificação das madeiras para fins estruturais e recomendações para assegurar a durabilidade da madeira.

As madeiras serradas para fins estruturais são classificadas conforme sua classe de resistência a compressão paralela às fibras (ABNT, 1997). Essa classificação tem por objetivo a orientação da escolha do material para elaboração de projetos estruturais a partir da padronização das propriedades mecânicas das madeiras. A NBR 7190:1997 subdivide as

⁸ MOURA-COSTA, P. Tropical forestry practices for carbono sequestration. In: SCHULTE, A.; SCHÖNDE, D.H. **Dipterocarp forest ecosystems: towards sustainable management**. Singapore: World Scientific, chapter 3, p.308-334, 1996.

⁹ BARBOSA, Juliana Cortez; INO, Akemi. **Cadeia Produtiva de Habitação em Madeira de Reflorestamento – Análise do Ciclo de Vida (LCA) e Indicadores de Sustentabilidade**. In: VII EMBRAMEM – Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira, 2000, São Carlos. Anais..., São Carlos, 2000.

classes de resistência em C20, C25 e C30 para as coníferas, e C20, C30, C40 e C60 para as dicotiledôneas.

A classificação por classes de resistência das madeiras auxilia no projeto estrutural, pois elimina a necessidade de especificação de uma espécie, bastando a verificação das propriedades de resistência do lote de peças de madeira frente à classe de resistência especificada em projeto (ZENID, 2009). Porém, na especificação de uma espécie de madeira também deve ser considerada as questões de durabilidade e trabalhabilidade.

De acordo com a NBR 7190:1997, a madeira, como todo material orgânico, está sujeita a biodeterioração por exposição a diferentes organismos xilófagos e às condições ambientais que podem favorecer o ataque. Dessa forma, deve ser feita uma análise prévia das condições de uso do material, para avaliar a necessidade de tratamento preservativo. Assim, a NBR 7190:1997, afirma que para a execução de estruturas de madeira, devem ser empregadas espécies que apresentem boa resistência natural à biodeterioração ou espécies submetidas a tratamentos preservativos adequados e seguros para as estruturas. Para executar tratamentos preservativos, é preciso observar as características de tratabilidade da espécie vegetal selecionada, pois existem madeiras mais suscetíveis a determinados métodos ou soluções preservativas.

Outra características que também precisa ser observada é a trabalhabilidade da espécie a ser utilizada, pois sua escolha impacta diretamente no processamento da madeira, e consequentemente na qualidade final do produto.

Outro ponto importante a ser considerado no emprego da madeira na construção é a segurança contra incêndio. No Brasil, a casa de madeira é vista muitas vezes com ressalvas devido a potenciais riscos, dentre os quais está a questão da segurança contra incêndio. Porém, conforme Pinto (2001), a madeira apresenta um bom desempenho contra incêndio ao ser comparada a outros materiais estruturais, pois peças robustas quando sob a ação das chamas, formam uma camada de carvão isolante que impede a saída de gases inflamáveis e retarda a propagação de calor para o interior do peça. Ainda segundo Pinto (2001), a segurança contra incêndio deve ser considerada em todas as etapas do processo produtivo

2.3. O setor florestal brasileiro

A cobertura florestal brasileira é uma das maiores do mundo, estima-se que 56% do território são ocupados por florestas naturais e 0,5% por florestas plantadas. Em termos globais, de

acordo com dados da FAO/ONU, o Brasil responde por 57% da área florestal sul-americana e 12% da área total mundial (Brasil, 2007).

As florestas nativas brasileiras são classificadas em três biomas distintos: florestas tropicais, florestas de cerrado e florestas semi-temperadas. Atualmente, do total da cobertura vegetal brasileira quase dois terços são formados pela Floresta Amazônica (Brasil, 2007).

De acordo com Brasil (2007), as florestas plantadas brasileiras se concentram nas regiões sul e sudeste. Elas foram criadas a partir do marco regulatório de 1934, e devido a incentivos governamentais a partir de 1966 intensificou-se esse processo. Ainda segundo Brasil (2007), estima-se que o país possua cerca de cinco milhões de hectares com plantios de *pinus* e *eucaliptos*.

Existem duas formas básicas de exploração econômica dentro do setor florestal: a extração a partir de florestas nativas (com ou sem reposição); e as atividades de reflorestamento, no caso brasileiro, com plantio de espécies exóticas (majoritariamente *pinus* e *eucaliptos*) e em menor escala espécies nativas (Brasil, 2007).

A legislação brasileira prevê a extração de madeira nas florestas nativas de duas maneiras: por meio do manejo florestal ou por desmatamento para conversão de áreas de floresta para outros usos (ZENID, 2009). Convém observar que o desmatamento só pode ser autorizado por um órgão ambiental estadual ou pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), e seu requerimento não pode ser apenas para ter acesso à madeira, é preciso que a área seja destinada ao uso sustentável (ZENID, 2009).

De acordo com o IBAMA (2012), manejo florestal diz respeito à administração da floresta para a obtenção de benefícios econômicos e sociais, respeitando os mecanismos de sustentação do ecossistema. A produção de madeira e outros produtos florestais são condicionados a um Plano de Manejo Florestal Sustentável, que deve ser aprovado pelo IBAMA, através de suas áreas técnicas.

O Plano de Manejo Florestal Sustentável é de grande importância, pois define os mecanismos e procedimentos adotados na exploração da floresta, segundo Putz et al.¹⁰ (2000 apud WEST, 2012), o emprego de melhorias no manejo florestal de florestas tropicais poderia representar

¹⁰ PUTZ, F.E.; ZULDEMA, P.A.; PINARAD, M.A.; BOOT, R.G.A.; SAYER, J.A.; SHEIL, D.; SIST, P.; ELLAS; VANCLAY, J.Y. Improved tropical forest management for carbono retention. **Plos Biology**. São Francisco, v.6, p.1368-1370, 2000.

uma redução de cerca de 10% das emissões de gases de efeito estufa oriundas do desmatamento anual de florestas.

Um dos grandes problemas na exploração das florestas nativas no Brasil é a extração ilegal. São necessárias diversas ações para mitigar este problema, e uma forma de coibir a extração e comercialização de madeira ilegal é por meio do Documento de Origem Florestal (DOF). O DOF tem por objetivo possibilitar o rastreamento da madeira desde o local de extração à comercialização (CBCS, 2012).

Diversas pesquisas no Brasil demonstram que existe um estágio de desenvolvimento de técnicas construtivas em madeira que permitem sua aplicação em projetos estruturais com soluções modernas e ousadas (STAMATO, 2006; CALIL JR et al., 2003 apud VALLE, 2011). Porém, segundo Valle (2011), há uma falta de harmonia entre os diversos atores do processo de construção com madeira, que resultam negativamente na qualidade dos produtos, impossibilitando grandes avanços no setor.

Além disso, atualmente o setor da construção civil em madeira não possui uma participação representativa nas estruturas em madeira, está concentrada em áreas como: construções provisórias, elementos provisórios de construção (escoras, formas), coberturas e os produtos de maior valor agregado, com portas, janelas e pisos (VALLE, 2011).

2.4. A Cadeia Produtiva da Madeira

O estudo a respeito da utilização da madeira como elemento estrutural de um sistema construtivo pré-fabricado, requer um conhecimento amplo de todas as etapas do seu processo produtivo. Desta forma, neste trabalho, será estudado como se estrutura a cadeia de produção da madeira na produção de habitações pré-fabricadas em painéis estruturais de madeira (estudo de caso deste trabalho).

A exploração da madeira faz parte do sistema agroindustrial, e é classificado como uma atividade “não alimentar” (BATALHA, 1997 apud YUBA, 2005), segundo Yuba (2005), a cadeia produtiva agroindustrial apresenta um conjunto de três definições:

- “a cadeia de produção é uma sucessão de operações de transformações dissociáveis, capazes de serem separadas e ligadas entre si por um encadeamento técnico”;

- “a cadeia de produção é também um conjunto de relações comerciais e financeiras que estabelecem, entre todos os estados de transformação, um fluxo de troca, situado de montante a jusante, entre fornecedores e clientes”;
- “a cadeia de produção é um conjunto de ações econômicas que presidem a valoração dos meios de produção e asseguram a articulação das operações”.

Dessa forma, é possível concluir que cadeia produtiva é um conjunto de atividades econômicas, articuladas de forma sequencial no processo produtivo.

A compreensão da cadeia produtiva possui relevância neste estudo, pois através deste entendimento é possível identificar isoladamente os agentes e os processos envolvidos. O que apresenta uma grande importância na compreensão nas etapas de transformação da madeira, permitindo que ações de aprimoramento de qualidade possam ser corretamente direcionadas.

Gonçalves¹¹ (2000, apud YUBA, 2005), procura normatizar os termos técnicos utilizados no processamento da madeira, definindo *processo* como o tipo de trabalho a ser executado com intuito de modificar a forma ou composição da madeira utilizada como matéria-prima para produção de um determinado produto (por exemplo: usinagem, secagem); e *operação* como o trabalho de transformação de forma da madeira inserido num determinado processo (por exemplo: desdobro de toras).

De acordo com Yuba (2005), essas definições permitem que atividades como o projeto das edificações (processo de projeto) sejam contempladas na cadeia produtiva, mesmo que não impliquem em uma transformação direta do produto.

A estrutura da cadeia produtiva da madeira pode ser então representada de acordo com a Figura 2.1. Este organograma representa os caminhos que a madeira percorre na cadeia produtiva, consequentemente em cada uma dessas etapas estão os agentes econômicos (RIBAS, 2009).

A Figura 2.1 apresenta uma macroestrutura da cadeia produtiva da madeira no Brasil, porém no escopo deste trabalho é interessante a visualização mais detalhada dos processos e operações por quais a madeira passa até ser descartada.

¹¹ GONÇALVES, Marcos Tadeu. Tibúrcio **Processamento da madeira**. Bauru: Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves, 242p, 2000.

Figura 2.1 - Estrutura da cadeia produtiva da madeira. Fonte: Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES)

De acordo com Ribas (2009), a cadeia da madeira pode ser constituída por três tipos de cadeia que envolvem o setor madeireiro: (a) energia (lenha e carvão vegetal); (b) madeira para processamento mecânico e; (c) madeira industrial. Cada um desses setores apresenta particularidades em seus processos produtivos e nos agentes econômicos envolvidos, dessa forma, é possível identificar três tipos de cadeias que envolvem o setor madeireiro (Ribas, 2009):

- Cadeia produtiva da madeira industrial – papéis, painéis de alta densidade, aglomerados, *Medium Density Fibreboard* (MDF) e *Oriented Strand Board* (OSB);
- Cadeia produtiva da madeira para energia – madeiras utilizadas na produção de lenha e carvão vegetal;
- Cadeia produtiva do processamento mecânico – madeiras serradas, compensados e laminados.

No caso deste estudo, é de interesse analisar a produção das madeiras serradas que de acordo com Ribas (2009), situa-se na cadeia produtiva do processamento mecânico da madeira.

A cadeia produtiva do processamento mecânico compreendem as indústrias que trabalham com serrados, compensados e laminados (RIBAS, 2009). O interesse deste estudo é o

processo de produção das madeiras serradas, dessa forma, ela foi decomposta de forma a possibilitar uma melhor visualização de seu processo produtivo.

A decomposição de uma cadeia produtiva se presta a separar e delimitar os processos que a compõem de forma a facilitar sua compreensão. Em seu trabalho Yuba (2005) analisa a cadeia produtiva da habitação em madeira de plantios florestais, decompondo-a da seguinte forma:

- Processo de produção florestal, com as operações de plantio, manejo e colheita;
- Processo de beneficiamento (de modo geral), englobando as operações de desdobro, secagem, usinagem e tratamento.
- Processo de construção, com as operações de pré-fabricação e montagem;
- Uso e manutenção;
- Processo de desconstrução, que também pode ser entendido como desmontagem.

As atividades da cadeia produtiva da madeira serrada do protótipo Ekó House apresenta uma estrutura semelhante à apresentado por Yuba (2005). Desta forma, ela foi adaptada para que pudesse representar parte do processo produtivo da Ekó House (Figura 2.2).

Figura 2.2 - Processos e produtos da cadeia produtiva da habitação pré-fabricada em painéis estruturais de madeira. Fonte: adaptado de Yuba (2005).

A decomposição da cadeia produtiva da habitação pré-fabricada em painéis estruturais de madeira indicados na Figura 2.2 está de acordo com as delimitações dos processos existentes - entradas e saídas dos produtos – que estão vinculados por uma fase de transporte. Destaca-se que a fase de transporte não pode ser compreendida apenas como uma série de atividades que permitem mobilização dos materiais entre os diversos locais onde se desenvolvem as atividades de produção. Entre os processos de pré-fabricação e montagem, o transporte deve ser criteriosamente planejado, considerando as atividades de carga e descarga segundo a lógica de montagem da estrutura. Esse planejamento visa à minimização de erros e desperdício de tempo na montagem da estrutura.

A seguir são detalhados os processos:

- a) Processo de Produção Florestal: extração na mata nativa das toras de madeira.
- b) Processo de beneficiamento: recebimento das toras provenientes da floresta, onde o material passa pelas operações de desdobro, secagem e usinagem, produzindo a madeira serrada.
- c) Processo de construção: recebimento da madeira serrada, matéria prima para que sejam feitas as operações de pré-fabricação dos componentes estruturais; a partir do término da produção dos elementos estruturais, estes são combinados na montagem da habitação.
- d) Habitação – Uso e Manutenção: a qualidade da habitação não depende somente dos processos de produção, seu desempenho na fase de uso está ligado a outros fatores. A avaliação de desempenho é de fundamental importância para analisar os procedimentos adotados desde a fase de projeto, permitindo um processo de retroalimentação e implementação de melhorias no produto.
- e) Processo de desconstrução: de acordo com Yuba (2005), é preciso alterar o pensamento tradicional em que a fase final seja definida como “deposição de resíduos”, para um raciocínio cíclico, de reintrodução do material, na forma de reaproveitamento, reuso ou reciclagem. Porém, é preciso que estas operações estejam previstas desde a etapa de projeto, por meio de escolha dos materiais e de técnicas construtivas que viabilizem seu descarte ou reutilização.

2.5. Produtos de Madeira

O setor de base florestal brasileiro produz uma diversidade muito grande de produtos e possui diversos nichos de mercado muito específicos (BRASIL, 2007). Nesse sentido, é preciso

delimitar os produtos destinados ao setor da construção civil, escopo de trabalho deste estudo.

Segundo Zenid (2009), os produtos de madeira utilizados na construção variam desde peças com pouco ou nenhum processamento – madeira roliça – até peças com beneficiamento intensivo – madeira serrada e beneficiada, laminados, painéis, etc.

A seguir são descritos os produtos de madeira utilizados na construção.

2.5.1. Madeira Roliça

Segundo Zenid (2009), a madeira roliça é um produto com baixo grau de processamento, proveniente do fuste da árvore, obtido através de cortes transversais (traçamento) ou mesmo sem esses cortes (varas: peças longas de pequeno diâmetro).

São empregados como escoramentos de lajes (pontaletes) e construção de andaimes. Em construções rurais, é comum sua utilização em estruturas de telhados. Também são utilizados na pré-fabricação de *log homes* (ZENID, 2009).

Na região centro-sul do país a madeira roliça é proveniente de reflorestamentos, especialmente com espécies de eucalipto (*Eucalyptus spp*). Madeiras nativas empregadas na forma roliças são utilizadas essencialmente nas áreas produtoras, como na Amazônia (ZENID, 2009).

2.5.2. Madeira Serrada

A madeira serrada é obtida através da transformação de toras em vários produtos com formatos e dimensões (BRASIL, 2007). É produzida em serrarias, onde as toras são processadas mecanicamente, transformando a peça cilíndrica em peças quadrangulares ou retangulares, de menor dimensão (ZENID, 2009).

O Brasil é um dos maiores produtores de madeira serrada. Em 2004 a produção nacional atingiu 23,5 milhões de m³ (dados da ABIMCI¹²), onde a maior parte da produção (14,5 milhões de m³) provém de florestas nativas (tropicais), e o restante (9 milhões de m³) de florestas plantadas de pinus (BRASIL, 2007).

¹² ABIMCI – Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente

As serrarias produzem uma variedade de produtos com diferentes aplicações, a Tabela 2.1 apresenta os principais produtos obtidos em serrarias e suas dimensões, conforme NBR 7203:1982.

Tabela 2.1 - Dimensões dos Principais Produtos de Madeira Serrada. Fonte: adaptado de NBR 7203:1982

Produtos	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (m)
Pranchão	Maior que 70	Maior que 200	Variável
Prancha	40 – 70	Maior que 200	Variável
Viga	Maior que 40	110 – 200	Variável
Vigota	40 – 80	80 – 110	Variável
Caibro	40 – 80	50 – 80	Variável
Tábua	10 – 40	Maior que 100	Variável
Sarrafo	20 – 40	20 – 100	Variável
Ripa	Maior que 20	Maior que 100	Variável
Dormente	160 – 170	220 – 240	2,00 – 5,60 / 2,80 – 5,60
Pontalete	75	75	Variável
Bloco	Variável	Variável	Variável

Em uma pesquisa realizada em 1996, Zenid (2001) entrevistou distribuidoras de madeira e construtoras na cidade de São Paulo, e constatou que grande parte afirma trabalhar com medidas padronizadas para as seções transversais de madeira serrada. Porém, em ambos os casos nenhum entrevistado citou a utilização de norma ou especificação de entidade de classe e instituições normalizadoras para a definição destas medidas, ao serem questionadas a respeito da padronização adotada, as distribuidoras de madeira afirmaram adotar dimensões comerciais (ZENID, 2001). Ao analisar as dimensões informadas pelos entrevistados, Zenid (2001) constatou que existe uma grande variedade de dimensões, uma confusão com relação aos nomes das peças identificados pela NBR 7203:1982 e em alguns casos uso do sistema imperial de medidas.

Nas serrarias as toras são beneficiadas de forma a obter a diversidade de produtos de madeira serrada. Usualmente as operações realizadas incluem o desdobro, secagem, usinagem e de pré-tratamento.

Segundo Gonçalves (2000, apud YUBA, 2005), a operação de desdobro consiste em realizar cortes longitudinais nas toras (com ou sem casca) para formar as pranchas, tábuas, vigas, vigotas, caibros, sarrafos ou ripas. O desdobro pode ser realizado através do uso de serra de fita, serra circular múltipla, refiladeira, destopadeira e reserra (YUBA, 2005).

A madeira passa por um pré-tratamento. De caráter preventivo, pois tem por objetivo proteger a madeira recém-serrada contra fungos e insetos xilófagos, apenas no período de secagem natural (ZENID, 2009).

Após o desdobro a madeira deve passar pela operação de secagem, que segundo Martins (1988) consiste em reduzir o teor de umidade da madeira a fim de alcançar um valor definido, com o mínimo de defeitos, no menor tempo possível e de forma economicamente viável.

De acordo com Yuba (2005) para a operação de secagem pode ser observado um maior investimento na aquisição equipamentos por parte das empresas do setor, tendo em vista ser a operação intermediária que mais agrega valor ao produto final.

Ducatti, Jankowsky e Andrade (2001), atribuem a etapa de secagem como a principal responsável pelo baixo padrão de qualidade da madeira serrada. Os defeitos de secagem podem ocasionar rachaduras, fendilamentos e empenamentos (abaulamento / encanoamento, encurvamento, arqueamento, torcimento e forma diamante), devido a diferenças de contração da madeira ao secar, por tensão hidrostática e por tensões de crescimento (DUCATTI, JANKOWSKY e ANDRADE, 2001).

Segundo Jankowsky (1990) a secagem da madeira apresenta benefícios, entre eles: (1) a redução da movimentação dimensional a limites aceitáveis para utilização; (2) melhoria das propriedades mecânicas da madeira, tais como resistência a flexão, compressão e a sua dureza; (3) aumento da resistência da madeira contra fungos e insetos xilófagos; (4) facilita as operações de beneficiamento secundário, como torneamento, furação e ligamento.

Após a secagem, a madeira passa pelas operações de usinagem, que consistem em trabalhos de seccionamento das peças, aplainamento ou lixamento (GONÇALVES, 2000 apud Yuba, 2005). Esta é a etapa que confere à madeira bruta a sua seção final (YUBA, 2005).

2.5.3. Madeira beneficiada

As peças de madeira serrada podem passar por um processo de usinagem, agregando assim valor às mesmas, gerando as madeiras beneficiadas (ZENID, 2009). Através da utilização de fresas, facas ou serras, as peças são modificadas, de forma a adquirir dimensões definitivas e acabamentos superficiais.

As peças que se originam destas operações podem ser assoalhos, forros, batentes, rodapés e tacos de piso.

2.5.4. Painéis

Nos últimos anos, a indústria de painéis de madeira tem apresentado um forte crescimento, com grandes investimentos tecnológicos de forma a garantir competitividade (BRASIL, 2007).

Segundo Zenid (2009) os painéis de madeira surgiram da necessidade de amenizar as variações dimensionais da madeira maciça, diminuir seu peso e custo e manter as propriedades isolantes, térmicas e acústicas.

A seguir são descritos algumas características de painéis de madeira disponíveis no mercado.

2.5.4.1. Compensado

O painel compensado é composto por várias lâminas desenroladas, unidas perpendicularmente uma a outra utilizando adesivos, sempre em número ímpar, garantindo maior estabilidade ao conjunto (ZENID, 2009).

A espessura do painel compensado pode variar de 3 a 35mm, com dimensões planas de 2,10 x 1,60m, 2,75 x 1,22m e 2,20 x 1,10m, sendo a última a mais comum (ZENID, 2009).

De acordo com Zenid, 2009, existem no mercado três tipos de painéis compensados:

- Laminados: são produzidos com finas lâminas de madeira prensada;
- Sarrafeados: possuem um miolo formado por vários sarrafos de madeira, colados lado a lado.
- Multisarrafeados: é considerado o mais estável, pois possui um miolo composto por lâminas prensadas e coladas na vertical, fazendo um “sanduiche”.

2.5.4.2. Chapas de fibra: chapa dura e MDF

As chapas duras (hardboard) são obtidas pelo processamento da madeira de eucalipto, apresentando a face superior lisa e a inferior corrugada. Seu processo de fabricação consiste em prensar a quente as fibras de eucalipto, que são unidas pela própria lignina da madeira (pois estas são reativas à prensa a quente), dessa forma não é necessário utilizar resinas. São chapas rígidas de alta densidade, com espessuras entre 2,5mm e 3mm (ZENID, 2009).

Segundo Zenid (2009), as chapas de MDF (*Medium Density Fiberboard*) são produzidas com fibras de madeira aglutinadas com resina sintética termofixa, que se unem sob ação de pressão e temperatura. O resultado é uma chapa de composição homogênea de alta qualidade, e com densidades entre 500 e 800 kg/m³. As chapas de MDF apresentam acabamento plano e liso, ideal para diversos tipos de acabamento (pintura, verniz, laminação).

São amplamente utilizados na fabricação de móveis devido a facilidade de ser manuseado e apresentar excelente acabamento superficial.

Também são produzidos pelo mesmo processo a seco chapas de HDF (*High Density Fiberboard*), porém apresentam maior densidade (800kg/m^3), dessa forma, podem ser utilizados na fabricação de pisos (ZENID, 2009).

2.5.4.3. Chapa de partículas: aglomerado, MDP e OSB

As chapas de aglomerado são compostas por partículas de madeiras provenientes de reflorestamentos (pinus e eucaliptos), elas são unidas com resina sintética termofixa, através de alta temperatura e pressão. São amplamente utilizadas na indústria moveleira e de embalagens, com alguns usos na construção civil. Não apresentam resistência à umidade, dessa forma devem ser utilizados em ambientes internos e secos (ZENID, 2009).

Os MDP (*Medium Density Particleboard*), são painéis de densidade elevada (950 a 1000kg/m^3), onde as partículas são dispostas de forma diferenciada, as maiores se encontram no centro do painel, enquanto as mais finas nas superfícies externas. Essa característica permite o painel apresentar bom acabamento superficial com maior resistência à flexão, se comparado aos painéis aglomerados e MDF (ZENID, 2009).

Segundo Surdi (2012) e Zenid (2009), o OSB (*Oriented Strand Board*) é um painel de partículas de madeiras orientadas, finas e longas (*strands*), unidas através do uso de resinas fenólicas, calor e pressão. Foram dimensionados para suprir uma demanda por painéis com resistência mecânica para fins estruturais.

Os painéis de OSB são constituídos por três a cinco camadas, sendo nas externas as partículas se orientam paralelamente a formação do painel, enquanto nas internas são perpendiculares (TSOUMIS¹³, 1991 apud SURDI, 2012).

O custo de produção dos painéis de OSB é relativamente baixo, devido ao emprego de “matéria-prima menos nobre”, podendo ser confeccionados a partir de madeiras provenientes de desbastes de troncos finos e tortuosos, ou espécies de menor valor comercial (SURDI, 2012; ZENID, 2009).

¹³ TSOUMIS, G. Science and technology of wood: structure, properties, utilization. Nova Iorque: Chapman & Hall, p. 309-339, 1991.

Nos Estados Unidos, os painéis OSB são utilizados na construção habitacional, especialmente em paredes internas e externas, pisos e forros (ZENID, 2009).

2.5.5. Madeira estrutural composta

São produtos de madeiras processadas industrialmente. Seu uso é comum especialmente nos países do hemisfério norte (ZENID, 2009).

Este tipo grupo abrange uma série de produtos de madeira, entre eles a *Machine Evaluated Lumber (MEL)*, Madeira Laminada Colada (MLC) e *Cross-Laminated Timber (CLT)*.

A MEL são madeiras serradas classificadas eletromecanicamente de acordo com sua classe de resistência mecânica por meio de ensaios não-destrutivos (ZENID, 2009). Segundo Calil Jr (apud MONTANA, 2013) a MLC é composta por laminas de madeira coladas umas às outras, com as fibras paralelas ao eixo longitudinal da peça. Segundo Canadian Wood Concil – CWC (2014), CLT são painéis de madeira produzidos com camadas de laminas montadas de forma cruzada, coladas ou parafusadas. Geralmente possuem espessuras entre 50mm e 300mm (podendo ser produzidos com espessuras maiores), largura entre 1,2m e 3,0m e comprimentos até 15m (CWC, 2014).

2.6. Considerações sobre o capítulo

A partir dos dados obtidos na caracterização dos aspectos tecnológicos da produção da madeira para o emprego na construção, é possível verificar a viabilidade da madeira como material construtivo para fins estruturais no Brasil.

A análise direcionada aos produtos florestais (madeira serrada e chapas de OSB) empregados no desenvolvimento do protótipo Ekó House, objeto de estudo desta dissertação, mostra alguns pontos que devem ser observados nas etapas subsequentes.

Apesar da classificação das madeiras por classes de resistência permitir a diversificação do uso de espécies, é preciso atentar a questões de trabalhabilidade e durabilidade particulares de cada espécie vegetal na escolha da madeira a ser utilizada, tendo em vista que tais propriedades impactam o processo produtivo e o produto final.

De acordo com a pesquisa realizada por Zenid (2001), junto a distribuidoras de madeira e construtoras na cidade de São Paulo, é possível observar que apesar das normas existentes,

em especial a NBR 7203:1983, estas são ignorados pelos setores de produção e comércio de madeira serrada e beneficiada.

É importante observar que o processo de beneficiamento tem fundamental importância na qualidade final da madeira serrada. É preciso um cuidado maior na operação de secagem, de maneira a evitar os defeitos de secagem, que comprometem a qualidade do produto final, e consequentemente a produção de estruturas e produtos de madeira.

O processo de desconstrução precisa ser considerado desde a etapa de projeto, especificando, preferencialmente, materiais que permitam seu reaproveitamento, reuso ou reciclagem ao final do ciclo de vida da edificação. Nesse ponto, o emprego de madeira serrada apresenta vantagens: (1) quando utilizadas conexões pregadas, parafusadas ou cavilhadas o processo de desmontagem é facilitado (YUBA, 2005); (2) as madeiras naturalmente resistentes a organismos xilófagos podem ser reaproveitadas ou descartadas sem maiores riscos ambientais.

No caso de madeiras tratadas com preservativos tóxicos não existem soluções práticas de reciclagem (YUBA, 2005). É possível eliminar o material por meio de queima, porém esta opção exige temperatura e ambiente adequados de forma a evitar a liberação dos componentes tóxicos (YUBA, 2005). Também existe a possibilidade do descarte em aterros de resíduos inertes, apesar desta opção não ser considerada adequada devido a limitação da capacidade de acumulação de resíduos (WILSON, 1997 apud YUBA, 2001).

Diferentemente do *MDF*, que possui norma para o controle de qualidade, estabelecendo requisitos e procedimentos de ensaio (NBR 15316:2009), os painéis de *OSB*, utilizados para fins estruturais, não possuem normatização no Brasil que permita o controle de qualidade do material nas diversas classes de *OSB* produzidas nacionalmente. Como resultado da falta de parâmetro comuns de avaliação do produto durante o desenvolvimento do trabalho houve dificuldade na obtenção de informações sobre a caracterização das chapas de *OSB* adquiridas no mercado. Foram encontradas informações do fabricante relativas a normatização europeia (EN 300 – *Oriented Strand Boards (OSB) – Definitions, classification and specifications*) enquanto pesquisadores Dias et al (2004) e Okino et al (2008) realizaram ensaios para determinar as propriedades mecânicas de chapas de *OSB* seguindo os procedimentos propostos por normas norte-americanas (*American Society for Testing and Materials - ASTM*).

O crescente aumento do uso das chapas de *OSB* no Brasil, estimulado pela indústria, deve ser acompanhado também pelo estímulo do desenvolvimento de normatização que permita a

caracterização do produto e defina as suas aplicações. O meio técnico e científico tem apresentado resultados incrementais que permitem o início do processo de elaboração de normas para uniformizar parâmetros de avaliação, requisitos e critérios para o emprego confiável do produto buscando a melhor relação custo/benefício.

Capítulo 3

Sistemas construtivos pré-fabricados em madeira

Este capítulo aborda conceitos e requisitos de produção e montagem dos sistemas construtivos pré-fabricados em madeira empregados na construção de habitações.

O texto é dividido em três partes.

A primeira apresenta a definição de sistemas construtivos em madeira e suas classificações. A segunda parte aborda os métodos de pré-fabricação empregados na produção de sistemas construtivos em madeira para habitações. Por fim, a terceira parte consiste em uma análise de requisitos que devem ser observados no desenvolvimento de sistemas construtivo inovadores para habitações em madeira.

3.1. Sistemas Construtivos em Madeira

Sabbatini (1989), define por sistema construtivo um conjunto de métodos utilizados na construção da estrutura e das vedações de um edifício. Em concordância com essa definição, Valle (2011) entende por sistema construtivo em madeira, uma edificação que emprega prioritariamente a madeira como componente estrutural, podendo utilizar esse material também como vedação.

De acordo com Ino (1995 apud SILVA; INO, 2008), existe uma grande distinção dos critérios de classificação dos sistemas construtivos em madeira de acordo com a tradição construtiva de cada país e seu estágio de desenvolvimento tecnológico. A *Junta del Acuerdo de Cartagena – JUNAC* (junta composta por Bolívia, Colômbia, Equador, Peru e Venezuela), apesar de não representar países com grande tradição em construções de madeira, elaborou em 1984 o *Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino*, que contém uma coletânea sistematizada de sistemas construtivos em madeira (VALLE, 2011).

Silva e Ino (2008) apresentam uma compilação da variedade de classificação de sistemas construtivos em madeira em diferentes países (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Classificação de sistemas construtivos em madeira em diversos países. Fonte: Silva e Ino (2008)

Países Andinos (JUNAC)	Enfoque Estrutural	Sistema Pilar e Viga	
		Sistema Entramado	Plataforma (<i>platform</i>) Global (<i>ballon frame</i>)
	Enfoque Produtivo	Sist. Não Industrializado	Vernacular e habilitado
		Sist. Semi-industrializado	Sistema pré-cortado
		Sist. Constr. Industrializado	Pré-fabricação parcial ou total
EUA	Sistema Entramado		Balão (<i>ballon frame</i>) Plataforma (<i>platform</i>) Móble Homes
		Casa de troncos (<i>log homes</i>)	
		Colombage (enxaimel)	
Alemanha	Ossatura de Madeira	Pilar-viga (peça simples)	Viga contínua apoiada 1 pavimento 2 pavimentos
			Pilar contínuo
		Pilar-viga (peças múltiplas)	Pilar contínuo abraçado pela viga Viga contínua abraçada pelo pilar
			Balão (<i>ballon frame</i>) Plataforma (<i>platform</i>)
		Nervuras	
	Construção com painéis	Pequenos painéis portantes	
		Grandes painéis portantes	
		Elementos espaciais	
		Painéis não portante	
França	Grau de industrialização (famílias tecnológicas)	Pilar-Viga	
		Ossatura	Balão (<i>ballon frame</i>) Plataforma (<i>platform</i>)
		Painéis estreitos	Altura simples Altura dupla
		Painéis largos	

Japão	Sist. Convencional "Zairai Koho"	Módulos tridimensionais
		Tradicional
		Tradicional Simplificado
	Sistema 2"x4" (Sistema Americano)	
	Sistema Pré-fabricado	Entramado
		Painéis
		Painéis Modulares (kits)
		Painéis em madeira maciça
		Outros

Ino (1992 e 1995 apud SILVA; INO, 2008) realizou uma primeira sistematização de sistemas construtivos em madeira no Brasil, classificando-os a partir de um enfoque estrutural, definindo dois grupos: pilar e viga e painéis. Silva (2000) verificou o baixo nível de pré-fabricação de sistemas construtivos de madeira em painéis, onde a maioria desses produtos denominados pré-fabricados, na realidade consistem de em um sistema estrutural de pilar e viga ("casas pré-cortadas"). Posteriormente, Silva e Ino (2008) realizam uma coleta de sistemas construtivos em madeira no país, e então, considerando o repertório nacional de construções em madeira, os autores ampliam a classificação de sistemas construtivos em madeira sob o enfoque estrutural para quatro grupos: (a) Sistema Pilar-Viga; (b) Sistema Entramado; (c) Sistema Paineis Pré-Fabricado; (d) Sistema Troncos Encaixados.

Sistema Pilar-Viga

Segundo a JUNAC (1984), esse sistema é constituído por pilares e vigas que se dispõem em forma de pórticos. Trata-se de um sistema autoportante e independente de outros sistemas, vedação vertical, por exemplo, onde a distribuição de cargas é concentrada, das vigas aos pilares e desses para as fundações. Segundo Ino (1992) e Calil Jr et al. (2003) apud Valle (2011), neste sistema é preciso atenção especial às cargas de vento e, conseqüentemente, ao contraventamento das vedações verticais e horizontais.

Valle (2011) afirma que no período colonial brasileiro este sistema foi amplamente utilizado, com peças superdimensionadas, tanto por proteção a ataques de fungos e insetos, quanto por ausência de um correto dimensionamento. Ainda segundo Valle (2011), devido a sua simplicidade construtiva, o sistema pilar-viga continua sendo empregado, porém com seções mais otimizadas, devido ao rigor do cálculo estrutural e do desenvolvimento de novos produtos de madeira.

Sistema Entramado

Segundo a JUNAC (1984), no sistema entramado a estrutura é constituída por elementos de seção transversal de pequenas dimensões, esbeltos e espaçamentos curtos entre si. De acordo com Valle (2011), essas tramas são então revestidas de diversas maneiras (chapas, tábuas, etc.), proporcionando rigidez ao conjunto. Com essa configuração, as cargas transmitem-se de forma distribuída pelos elementos estruturais.

As cargas provenientes das coberturas e pisos são distribuídas uniformemente pelas paredes, que por sua vez as distribuem para as fundações. Segundo Valle (2011), o sistema entramado possui grande potencial para industrialização e racionalização da construção, e consequentemente para a pré-fabricação de componentes ou elementos.

De acordo com a JUNAC (1984), existem duas variantes principais desse sistema: plataforma (*platform*) e balão (*ballon frame*). No sistema plataforma, os montantes possuem a altura do pé-direito, formando um entramado onde se apoia o piso. No sistema balão os montantes (componentes verticais) das paredes externas são contínuos, vencendo dois pavimentos, nos quais são fixadas as vigas que servem de apoio para o piso.

Sistema Painel Pré-Fabricado

Neste sistema construtivo as paredes, os pisos e as coberturas são formados por painéis, constituídos por ossatura e fechamentos. Segundo Szücs¹⁴ (1991, apud KRAMBECK, 2006) os sistemas em painéis não possuem estrutura principal, trata-se de um sistema construtivo onde as cargas são transferidas para as fundações pelos painéis verticais.

De acordo com Hoor (1987), a fabricação dos painéis é feita em uma oficina, e somente a montagem da estrutura é realizada no canteiro, dessa forma, sendo menos dependente das condições meteorológicas.

Valle (2011), afirma que esse sistema foi desenvolvido a partir de novos meios de ligação oferecidos pelas indústrias metalúrgicas, facilitando sua construção em oficinas, reduzindo o tempo no canteiro e aumentando a precisão nos elementos de união dos componentes pré-fabricados. Ou seja, por meio da pré-fabricação, esse sistema apresenta grande potencial de racionalização e industrialização de seu processo construtivo.

¹⁴ SZÜCS, C.P. **Système ouvert de construction en bois pour la Maison populaire, applique à une systématique autoconstrutive, comme une réponse à la demande d'habitations dans la Région Sud-brésillienne.** (Tese de Doutorado). Nancy, França: L'université de Metz, 1991.

Sistema Troncos Encaixados

De acordo com Valle (2011), o sistema construtivo em troncos encaixados, também chamado de sistema construtivo em madeiras maciças empilhadas, caracteriza-se por um sistema autoportante, onde a estrutura também serve de vedação (paredes).

O sistema é composto por peças de madeira roliça ou serrada empilhadas, com comprimento do ambiente, ou da fachada inteira (VALLE, 2011). Ainda segundo Valle (2011), neste sistema a correta execução dos encontros entre as peças nos cantos das paredes e, o contato horizontal e longitudinal entre cada camada de peça, são fatores críticos na obtenção de qualidade construtiva. Ambos os detalhes estão relacionados à: amarração entre as peças, desempenho estrutural, estanqueidade contra ventos e chuvas e o isolamento térmico.

3.1.1. Classificação de sistemas construtivos em madeira partir do grau de industrialização

Outra maneira de classificar os sistemas construtivos em madeira é a partir do seu grau de industrialização, onde, segundo a JUNAC (1984), a diferenciação reside principalmente na quantidade de trabalho a ser realizado na fábrica e no canteiro.

Vários autores procuram caracterizar a industrialização da construção. Para Ordonez et al. (1974) a industrialização da construção tem por objetivo o ganho de produtividade por meio do emprego de forma racional e mecanizada de materiais, meios de transporte e técnicas construtivas. Bruna (2002) associa a industrialização a conceitos de organização e produção em série. Foster (1974) apresenta uma definição que associa ambos os autores, afirmando:

[...] industrialização é um processo organizacional caracterizado por: continuidade no fluxo de produção; padronização; integração dos diferentes estágios do processo global de produção; alto nível de organização do trabalho, mecanização em substituição ao trabalho manual sempre que possível; pesquisa e experimentação organizadas e integradas à produção.

Por fim, Sabbatini (1989) acrescenta que a industrialização da construção tem por objetivo “incrementar a produtividade e o nível de produção e aprimorar o desempenho da atividade construtiva”. Ou seja, a industrialização pode ser entendida como um processo organizacional que busca melhorar o desempenho da atividade construtiva.

É possível extrair dessas definições a importância da substituição do trabalho manual pelo mecanizado no manuseio de materiais, seu transporte e nas técnicas construtivas. Dessa forma, a classificação por meio do grau de industrialização permite compreender o quanto de mecanização foi empregado no processo construtivo.

A JUNAC (1984) apresenta três tipos de sistemas construtivos em madeira sob enfoque produtivo (Tabela 3.1), e os agrupa conforme seu grau de industrialização: (a) Sistemas construtivos não industrializados; (b) Sistemas construtivos semi-industrializado; (c) Sistemas construtivos industrializados.

Sistemas construtivos não industrializados

De acordo com a JUNAC (1984) os sistemas construtivos não industrializados são aqueles onde o material é utilizado em seu estado bruto ou muito próximo disso (com pouca transformação – madeira roliça). Segundo Valle (2011), as peças sofrem poucas modificações, que são executadas por meio de ferramentas e máquinas no próprio canteiro de obras.

A JUNAC (1984) agrupa nesta categoria o sistema construtivo vernacular e o sistema construtivo habilitado ou semi pré-cortado. No primeiro prioriza-se o emprego de materiais locais e sofrem pouca ou nenhuma transformação. As sambladuras e montagens das uniões são realizadas por meio de método e ferramentas tradicionais, utilizando pouca tecnologia e equipamentos para deslocamentos pesados (JUNAC, 1984).

De acordo com JUNAC (1984), o sistema habilitado ou semi pré-cortado, utiliza peças de madeira aparelhadas (com seção transversal final) provenientes de serrarias, exigindo a execução de perfurações e rebaixos necessários para a fabricação e montagem dos componentes no canteiro de obras.

Sistemas construtivos semi-industrializado

Segundo a JUNAC (1984), os sistemas construtivos semi-industrializados são aqueles onde há um número de repetições de alguns elementos construtivos suficiente para serem pré-fabricados em grande escala, porém sem a necessidade de finalizar a montagem de painéis, componentes ou elementos volumétricos.

A JUNAC (1984) inclui nesta categoria os sistemas pré-cortados. Neste sistema, as madeiras passam por processos de industrialização simples, porém são encaminhadas ao canteiro de obras já com as dimensões finais, com rebaixos, perfurações, etc. Ainda de acordo com a

JUCAC (1984), o maquinário necessário neste tipo de sistema construtivo não precisa ser sofisticado, podendo ser realizado em carpintarias de pequeno porte.

Sistemas construtivos industrializados

A JUNAC (1984) subdivide os sistemas construtivos industrializados em dois grupos: (a) Pré-fabricação parcial; (b) Pré-fabricação total. De acordo com Valle (2011), em ambos os materiais passam por processos industriais, sendo fabricados em partes ou em sua totalidade antes de serem transportados para o canteiro de obras. O tempo de montagem em canteiro de obras é reduzido, podendo ser realizado em questão de dias, porém é necessário um mão-de-obra altamente especializada (KRAMBECK, 2006).

3.2. Pré-fabricação de sistemas construtivos em painéis estruturais de madeira

Lewicki apud Sabbatini (1989), define a pré-fabricação como a produção de elementos de construção fora do seu lugar definitivo, que usualmente são produzidos *in loco*.

De acordo com Smith (2010), a pré-fabricação de componentes de madeira, painéis e módulos garante eficiência do processo construtivo e aos mesmo tempo permitem ganhos de qualidade na manufatura destes componentes, além diminuir desperdícios de material no canteiro de obras. Smith (2010) afirma que um dos grandes ganhos de produtividade com a pré-fabricação em indústrias é a redução no tempo de construção no canteiro de obras. Essa economia de tempo é resultado da possibilidade de operacionalizar tarefas no canteiro de obras e na indústria simultaneamente. Outro ponto, é a possibilidade de executar componentes em mais de uma indústria.

Ainda segundo Smith (2010), uma das grandes vantagens na pré-fabricação de componentes, painéis e módulos de madeira é a precisão obtida nos processos de corte e montagem em um ambiente industrial. Porém, ele afirma que essa precisão não é obtida exclusivamente pelo emprego de máquinas automatizadas no processo de fabricação, mas também pelo aperfeiçoamento obtido com a repetição de tarefas desempenhadas pelos trabalhadores.

A pré-fabricação em ambiente industrial, protegido das intempéries, além de garantir um trabalho ininterrupto devido a condições meteorológicas, permite que a madeira fique seca e a uma temperatura constante Isso reduz as chances de deformação do material, garantindo qualidade nos componentes, painéis e módulos a serem fabricados.

Os sistemas construtivos em painéis estruturais de madeira são classificados como sistemas construtivos industrializados (JUNAC, 1984), e podem ser classificados em dois grupos: (a) Pré-fabricação parcial; (b) Pré-fabricação total.

Nos sistemas construtivos de pré-fabricação parcial, são produzidos na indústria painéis ou grandes componentes, que podem ser paredes inteiras, partes do piso, da cobertura, etc. Em alguns casos, esses componentes são pré-fabricados com instalações, esquadrias, portas e alguns acabamentos, para posterior finalização no canteiro de obras (JUNAC, 1984). Podem ser planejados para serem montados no canteiro manualmente ou por meio da utilização de equipamentos de içamento e transporte de carga no canteiro.

De acordo com a JUNAC (1984), os sistemas construtivos com pré-fabricação total, também chamada de pré-fabricação volumétrica, consistem naqueles onde as unidades habitacionais são finalizadas na indústria, e somente as fundações e alguns serviços são executados no canteiro de obras.

Segundo Hoor (1987), em 1931 Walter Gropius havia desenvolvido um sistema construtivo pré-fabricado com grandes elementos, a casa *Kupfer*. Os painéis de parede eram padronizados, e consistiam em um quadro de madeira contendo uma fola de alumínio revestida com placas cimentícias no lado interior, e do lado exterior uma chapa de cobre nervurada. Estes elementos eram dispostos em uma trama modular e eram unidos por meio de conectores.

Ainda segundo Hoor (1987), entre 1943 e 1945, Walter Gropius e Konrad Wachsmann desenvolveram o *Packaged House System*, em parceria com a *General Panel Corporation*. Este sistema pré-fabricado era semelhante ao da casa *Kupfer*, porém com painéis de menores dimensões, sendo mais fáceis de serem manuseados e oferecendo maiores possibilidades de combinação. Diferentemente do sistema anterior, as ossaturas dos painéis eram revestidas por pranchas de madeira montadas na vertical (HOOR, 1987).

De acordo com Hoor (1987) e Smith (2010), o *Packaged House System*, utilizava um conector metálico patenteado por Wachsmann, que permitiam a montagem tanto na direção horizontal quanto na vertical. Cada conector era fixado à ossatura dos painéis, permitindo a conexão de até quatro painéis. Este sistema de ligação permitia, inclusive, que a edificação pudesse ser desmontada (HOOR, 1987).

Mitchell e Hurst (2009), produziram uma avaliação comparativa entre tecnologias utilizadas na produção de casas modulares nos Estados Unidos e na indústria de casas de madeiras da

Alemanha. Neste documento os autores observam que a construção de componentes construtivos de forma pré-fabricada, sob um teto de fábrica, alcança resultados de melhor qualidade comparados aos feitos no canteiro de obras diretamente, tendo em vista o trabalho ser realizado em um ambiente mais confortável, e usualmente esse tipo de operário é mais capacitado.

De acordo com Mitchell e Hurst (2009), na Alemanha aproximadamente 14% de novas residências são em madeira, deste percentual 84% são casas construídas com painéis prontos pré-fabricados em industriais e posteriormente transportadas ao canteiro de obras e montados.

Segundo os autores, na Alemanha, geralmente os painéis produzidos nas indústrias são transportados para o canteiro já com portas, esquadrias, isolamento térmico, eletrodutos para instalações elétricas, barreiras de umidade, *OSB (Oriented Strand Board)* e placas de gesso acartonado instaladas. Em alguns casos os revestimentos internos e externos também já são fixados na própria fábrica.

Molina e Calil Jr. (2010) utilizam o termo painéis *wood frame* para designar a construção em painéis industrializados produzidos na Alemanha. Segundo os autores, esse sistema apresenta alto controle de qualidade a partir da industrialização dos painéis de parede, de piso e cobertura. A construção das casas pode ser concluída em apenas 60 dias, sendo necessário apenas 1 dia para montagem da casa.

Hoor (1987) classifica os sistemas construtivos de painéis portantes em função de suas dimensões: (1) painéis portantes de pequenas dimensões; (2) painéis portantes de grandes dimensões.

Os painéis portantes de pequenas dimensões possuem a altura de um pavimento e largura entre 1,00m e 1,20m. Sua estrutura portante – composta por montantes e travessas em madeira maciça – recebe fechamento em ambas as faces e isolamento térmico em seu interior (HOOR, 1987). Segundo Partel (2006), as esquadrias (janelas e portas) são fixados diretamente na ossatura dos painéis.

De acordo com Hoor (1987), os revestimentos externos e internos dos painéis podem ser incorporados durante a produção, no ambiente industrial. Partel (2006), afirma que esses materiais de revestimento são fixados, colados, grampeados, ou aparafusados diretamente sobre a ossatura dos painéis. Dessa forma, os elementos portantes da ossatura e os pontos

de conexão ficam recobertos, sendo assim, protegidos contra agentes exteriores (Parte, 2006).

Os painéis portantes de grandes dimensões possuem altura de um pavimento e podem ser constituídos por painéis de pequena dimensão unidos na indústria, podendo chegar a 10m. Porém, as travessas superior e inferior são contínuas (HOOR, 1987). De acordo com Hoor (1987), os pisos e coberturas também podem ser compostos por painéis de grandes dimensões.

Segundo Partel (2006), o comprimento dos painéis de grandes dimensões deve ser definido em função das características espaciais projeto (planta), das possibilidades de transporte e dos limites das máquinas de içamento.

3.3. Requisitos para sistemas construtivos inovadores em madeira para habitações

O presente trabalho faz uma análise do processo de produção de um sistema construtivo em painéis estruturais de madeira pré-fabricados. Este objeto de estudo está inserido em um ambiente de pesquisa e desenvolvimento de novos produtos e processos.

Devido à falta de normas que orientem a produção de sistemas construtivos pré-fabricados em madeira, a avaliação de novos sistemas construtivos pode ser executada seguindo os procedimentos estabelecidos pelo Sistema Nacional de Avaliações Técnicas de produtos inovadores (SINAT).

O SINAT é um projeto do Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H) que visa estabelecer o conjunto de procedimentos para avaliar novos sistemas construtivos e produtos utilizados nos processos de construção, quando inexisterem normas técnicas prescritivas específicas aplicáveis ao produto. (BRASIL, 2013b).

O SINAT elabora documentos de referência que contém as diretrizes para avaliação técnica de produtos (Diretriz SINAT), incluindo requisitos e critérios de desempenho, bem como os métodos de avaliação a serem adotados pelas Instituições Técnicas Avaliadoras (ITA).

As ITA são instituições responsáveis pela avaliação dos novos sistemas construtivos e produtos utilizados nos processos de construção, cabendo a eles a elaboração de um Documento de Avaliação Técnica (DATec) com os resultados da avaliação técnica de determinado produto.

A Diretriz SINAT nº005 apresenta os requisitos para avaliação de sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas (sistemas entramados, conforme classificação de Silva e Ino, 2008). Esta diretriz é voltada à avaliação de sistemas de madeira e não aborda especificamente o sistema construtivo foco deste trabalho. Porém, apesar da dissertação não tratar da avaliação do sistema construtivo do protótipo, além de utilizar outro sistema construtivo, os requisitos e critérios nela contidos são utilizados no estudo desta pesquisa.

A diretriz SINAT nº005 exige uma listagem dos materiais e componentes empregados nos produtos avaliados, e suas respectivas conformidades frente à normas técnicas pertinentes, listadas pela própria diretriz SINAT.

Os requisitos e critérios de desempenho apresentados pela diretriz SINAT nº005 são provenientes das NBR 15575:2013, NBR 7190:1997 e outras normas pertinentes. A NBR 15575:2013 estabelece níveis de desempenho mínimo ao longo de uma vida útil para os principais elementos de uma edificação habitacional (estrutura, cobertura, vedações, instalações elétricas, hidrossanitárias, pisos e fachadas). A NBR 7190:1997 estabelece as condições gerais para o cálculo e execução das estruturas de madeiras.

Assim, os requisitos e critérios de desempenho utilizados na diretriz SINAT nº005 estão organizados nas seguintes classes: (a) Desempenho estrutural; (b) Segurança contra incêndio; (c) Estanqueidade à água; (d) Desempenho térmico; (e) Desempenho acústico; (f) Durabilidade e manutenibilidade.

A diretriz SINAT nº005 estabelece também procedimentos de controle da qualidade na montagem da unidade habitacional. Esses procedimentos estão agrupados em dois tipos de atividades: (a) Controle de aceitação de materiais; (b) Controle e inspeção das etapas de montagem.

No caso de sistemas construtivos pré-fabricados, onde ocorrem procedimentos produtivos tanto em unidades industriais quanto no canteiro de obras, os controles de qualidade são executados nos locais específicos de cada atividade.

O documento da diretriz SINAT nº005 lista os itens a serem controlados no recebimento de materiais, os requisitos esperados, os métodos e frequência ou amostragem para avaliação. Esta relação é uma referência e, no caso do emprego de materiais que não constem nela, a diretriz SINAT nº005 estabelece que estes também devem ser avaliados antes de seu recebimento em canteiro de obras.

No caso específico das peças estruturais de madeira, os requisitos e métodos de avaliação são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Controle de aceitação de materiais (madeira): métodos e frequências de avaliação conforme Diretriz SINAT nº005. Fonte: Brasil (2011)

Item	Material/Componente	Requisito	Método de avaliação	Amostragem/ Frequência de inspeção
1	Peças estruturais de madeira			
1.1	Procedência da madeira	Procedência legal	Avaliar documento de procedência da madeira - Nota Fiscal	Por lote de peças recebido na obra
1.2	Classificação visual a ser considerada	Conforme projeto		
1.3	Dimensões e tolerâncias geométricas	Especificação de projeto	Conferência com micrômetros	
1.4	Tipo de proteção contra organismos xilófagos		Relatório de ensaio ou certificado de tratamento	
1.5	Proporção de nós na seção transversal da peça	Conforme limites estabelecidos pela diretriz SINAT nº005.	Inspeção visual	
1.6	Racha anelar e fenda	Conforme limites estabelecidos pela diretriz SINAT nº005.		
1.7	Absorção de água	Madeira recebida em canteiro deve estar estabilizada conforme a umidade relativa ambiente - NBR 7190:1997	Verificação no local com medidor de umidade	
1.8	Classificação da madeira	-	Inspeção visual	-

De acordo com o anexo G do projeto de norma ce-03:126.10, ABNT (2003), as classes em que a madeira pode ser classificada conforme a presença de defeitos são as seguintes:

- Classe Estrutural Especial (SE): recomendada para aplicações na quais se requerem valores elevados para as propriedades de resistência e rigidez bem como boa aparência.
- Classe Estrutural Nº1 (S1): recomendada para edificações nas quais se requerem valores elevados para as propriedades de resistência e rigidez bem como boa aparência.

- Classe Estrutural Nº2 (S2): recomendada para aplicações gerais em edificações nas quais se requerem valores moderados para as propriedades de resistência e rigidez.
- Classe Estrutural Nº3 (S3): recomendada para aplicações gerais em edificações nas quais se permitem valores baixos para as propriedades de resistência e rigidez, sendo que a aparência não é um fator importante.

Conforme o anexo G do projeto de norma ce-03:126.10, ABNT (2003), a classificação visual deve ser realizada por pessoa qualificada e treinada, e consiste na inspeção visual de cada peça, avaliando a localização e a natureza dos nós e outros defeitos presentes na superfície das mesmas.

A diretriz SINAT nº005 exige que os procedimentos de montagem do sistema sejam descritas pelo proponente, e cabe a ITA a responsabilidade de verificá-los. A Tabela 3.3 exemplifica algumas das principais atividades que devem ser controladas no processo de montagem. Além do detalhamento dos procedimentos adotados, é preciso que o planejamento de armazenamento de peças e os equipamentos de transporte necessários sejam incorporados à documentação.

Tabela 3.3 - Exemplo das principais atividades a verificar durante a montagem de paredes, conforme a diretriz SINAT nº005. Fonte: Brasil (2011)

Item	Etapas	Requisito	Método de Avaliação
1	Marcação da obra		
2	Nivelamento do terreno e marcação da fundação		
3	Concretagem da fundação		
4	Marcação do eixo das paredes externas		
5	Execução de detalhe que evite o contato da travessa inferior do quadro estrutural com a umidade dos elementos de fundação - instalação de componente nivelador	Conforme especificação de projeto (projeto executivo e projeto para produção)	Inspeção visual baseada em projeto e procedimento de execução
6	Posicionamento e fixação preliminar de alinhamento das travessas inferiores		
7	Fixação das travessas inferiores à fundação (emprego de chumbadores)		
8	Posicionamento dos montantes e travessas, formando os quadros estruturais		
9	Fixação dos quadros de canto		
10	Fixação de bloqueadores, umbrais, etc.		

11	Posicionamento e fixação das chapas de contraventamento
12	Posicionamento e fixação de barreiras impermeáveis
13	Colocação e fixação dos caixilhos aos montantes das estrutura das paredes
14	Vedação das juntas entre marcos de janela e parede
15	Tratamento das juntas
16	Proteção contra água de chuva dos materiais durante o armazenamento
17	Controle/medidas visando dificultar que os elementos/materiais tenham contato com a umidade durante a montagem/local de armazenamento das peças de madeira

Após a verificação dos procedimentos de montagem propostos, é necessário realizar inspeção visual do sistema construtivo finalizado, de maneira a identificar eventuais não conformidades que possam causar prejuízos no desempenho do sistema. Nestes casos, é preciso identificar suas causas e realizar as correções necessárias.

3.4. Considerações sobre o capítulo

Neste capítulo foram apresentados conceitos e requisitos de produção e montagem dos sistemas construtivos pré-fabricados em madeira empregados na construção de habitações.

A partir da classificação sistemas construtivos em madeira é possível constatar diversidade de tipologias que são utilizadas por diversos países com tradição neste tipo de construção. Já a classificação dos sistemas construtivos em madeira pelo seu grau de industrialização é de grande interesse para esta dissertação, pois permite classificar estes sistemas de acordo com o ganho de desempenho da atividade construtiva obtidos pelo emprego de trabalho mecanizado nas diferentes etapas do processo produtivo.

Dessas definições, é possível observar que a utilização de sistemas construtivos em painéis pré-fabricados apresentam vantagens produtivas e de qualidade devido ao maior emprego de trabalho em ambiente industrial.

A respeito das ligações em estruturas de madeira, a NBR 7190:1997 aborda os aspectos estruturais no emprego de ligações por pinos metálicos (pregos ou parafusos), cavilhas e conectores (anéis metálicos, chapas metálicas). Nas classificações dos sistemas construtivos em madeira o assunto também é pouco abordado. Porém, no estudo de sistemas construtivos que precisam ser montados rapidamente no canteiro, estas ligações possuem relevância, como pode ser observado no caso das *Packaged House System*, onde a flexibilidade do conector desenvolvido por Gropius e Wachsmann permitiu a montagem dos painéis horizontais e verticais com agilidade.

Os principais ganhos de produtividade no emprego de sistemas construtivos em painéis pré-fabricados em madeira são: (1) produção em ambiente controlado e protegido do intemperismo; (2) operacionalização de tarefas na indústria e na obra, simultaneamente e; (3) possibilidade de execução de componentes em mais de uma indústria.

Porém, é importante observar o emprego de estruturas pré-fabricadas (parcial ou totalmente) requer o uso de transporte (da indústria ao canteiro), equipamentos de içamento e transporte em obra e mão de obra treinada. Estes são elementos fundamentais para a obtenção de qualidade na execução desses sistemas construtivos, e devem ser considerados em todas as fases de projeto.

A implementação de sistemas construtivos em madeira industrializados passa, necessariamente, pela qualificação de mão de obra. Existe certa tradição de carpintaria no Brasil, o que leva a crer que o treinamento dessa mão de obra para a execução de sistemas construtivos em painéis pré-fabricados em madeira não seja um empecilho. Por outro lado, existem grandes desafios na organização da cadeia produtiva, de maneira a estabelecer uma estrutura de planejamento e gestão dos processos de produção.

A implementação de sistemas construtivos pré-fabricados em madeira pressupõe uma mudança de paradigma, passando da construção para a montagem. Nos próximos capítulos, essas questões são tratadas vinculadas às formas de controle de produção, de maneira a garantir qualidade do produto final.

Por fim, cabe salientar a relevância da diretriz SINAT nº005, que ocupa uma lacuna devido a inexistência de normas de procedimentos para sistemas estruturais pré-fabricados de madeira. Ela traz importantes considerações sobre o controle de qualidade dos materiais e dos serviços, indicando procedimentos adequados para inspecionar no projeto e no canteiro de obras.

Capítulo 4

Projeto Ekó House

Este capítulo aborda o projeto Ekó House.

O texto é dividido em três partes. Na primeira são apresentados os antecedentes que definiram os requisitos de projeto do protótipo Ekó House. Na segunda parte é descrito o projeto Ekó House, desde a concepção arquitetônica até o detalhamento do projeto estrutural do sistema construtivo em painéis pré-fabricados em madeira. A terceira parte consiste na descrição do projeto para produção, detalhando a metodologia para modelagem e documentação para produção (fabricação de componentes, montagem e desmontagem).

4.1. Solar Decathlon Europe

O Solar Decathlon é uma competição de casas solares promovido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (EUA), no qual cada universidade participante deve projetar, construir e operar uma casa autossuficiente em energia. O evento, bienal, ocorre em Washington, EUA, sendo assim as equipes participantes devem construir protótipos transportáveis¹⁵. Uma parceria entre o Departamento de Energia Estadunidense e o Governo

¹⁵ www.solardecathlon.gov

da Espanha resultou na versão europeia do evento¹⁶. As duas primeiras edições do evento europeu foram sediados na cidade de Madri (2010 e 2012).

O evento tem por objetivo contribuir para o conhecimento e disseminação de casas solares, industrializadas e sustentáveis (SOLAR DECATHLON EUROPE - SDE, 2012). Em sua documentação, a organização do evento define também as seguintes premissas:

- Aumentar a conscientização dos estudantes participantes sobre os benefícios e oportunidades oferecidas pelo uso de energias renováveis e construção sustentável, desafiando-os a pensar de forma criativa e desenvolver soluções inovadoras que contribuam para a economia de energia e como isso afeta o dia-a-dia.
- Incentivar os profissionais da construção a selecionar materiais e sistemas que reduzam o impacto ambiental de um edifício durante sua vida, otimizando sua viabilidade econômica e proporcionando conforto e segurança aos seus ocupantes.
- Educar o público em geral sobre o uso responsável de energia, energias renováveis, eficiência energética e as tecnologias de redução do consumo de energia.
- Enfatizar as prioridades de intervenção: primeiro a redução no consumo de energia da edificação e aumentar sua eficiência energética; e depois integrar sistemas solares ativos e/ou outras tecnologias renováveis. Além disso, os sistemas devem ser selecionados e dimensionados com base em critérios ambientais e econômicos (custo-benefício).
- Encorajar o uso de tecnologias solares e outras fontes de energia renovável.
- Promover a integração da arquitetura com sistemas solares, trabalhando de forma a utilizar tecnologias solares em substituição a materiais de construção convencionais no envelope do edifício, como telhado, claraboias ou fachadas.
- Demonstrar que casas solares de alto desempenho podem ser confortáveis, atraentes e economicamente acessíveis.

O evento conta com a participação de vinte equipes universitárias de todo o mundo, onde cada uma deve projetar, construir e operar uma casa solar autossuficiente em energia elétrica durante a competição em Madri.

Segundo o SDE (2012), o evento avalia os projetos de acordo com dez provas. Cada uma dessas provas apresenta um regulamento específico de avaliação, passando por critérios subjetivos (aferidos por um júri técnico definido pela organização do evento), e objetivos

¹⁶ www.sdeurope.org

(alguns aspectos avaliados por júri técnico e outros por meio de medições como temperatura, umidade, isolamento acústica, geração de energia, consumo de energia). O Quadro 4.1 demonstra a estrutura das dez provas avaliadas pelo evento SDE.

Quadro 4.1 - Estrutura de provas do SDE 2012. Fonte: adaptado de SDE, 2012

Solar Decathlon Europe - Provas	Arquitetura	1. Arquitetura	
		2. Engenharia e construção	
	Energia	3. Eficiência energética	
		4. Balanço energético	
	Conforto	5. Condições de conforto	
		6. Funcionamento da casa	
	Socioeconômico	7. Comunicação e sensibilização social	
		8. Industrialização e viabilidade de mercado	
	Estratégico	9. Inovação	10. Sustentabilidade

A participação dura cerca de dois anos, desde o início do projeto à última etapa da competição, que consiste em montar e operar a casa em Madri (SDE, 2012). Ao longo deste período as equipes participantes devem desenvolver os respectivos projetos de acordo com um cronograma definido pela organização, onde existem submissões programadas do material referente a cada projeto. Dessa forma, além da construção de vinte casas solares, as equipes precisam gerar uma documentação bastante detalhada de cada projeto.

Figura 4.1 - Evento Solar Decathlon Europe 2012. Fonte: Solar Decathlon Europe 2012 / I+D+Art

Figura 4.2 - Protótipo Ekó House no evento Solar Decathlon Europe 2012. Fonte: Solar Decathlon Europe 2012 / I+D+Art

4.2. O Projeto Ekó House

O projeto de residência de energia zero – REZ, objeto de estudo deste trabalho, teve origem em 2009, na primeira tentativa de uma equipe brasileira em participar do Solar Decathlon Europe. Na ocasião, um esforço entre seis universidades brasileiras¹⁷ originou o projeto Casa Solar Flex destinado a participação no evento Solar Decathlon Europe 2010. Porém, uma série de fatores inviabilizaram a construção do protótipo e consequentemente a participação no evento.

Em 2010, parte dos integrantes do primeiro projeto de desenvolvimento de uma residência de energia zero – REZ, se organizaram em uma nova equipe, desta vez coordenada pela Universidade de São Paulo e pela Universidade Federal de Santa Catarina, para participar do evento em 2012.

¹⁷ Consórcio Brasil: Universidade de São Paulo, Universidade Federal de Santa Catarina, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Universidade Federal de Minas Gerais e Universidade de Campinas.

O projeto da Ekó House foi desenvolvido por uma equipe multidisciplinar de estudantes e professores das universidades envolvidas. Além de participar da competição Solar Decathlon Europe 2012, a Ekó House é produto de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) de maior abrangência, que tem por objetivo o desenvolvimento de competência nacional em projeto de residência de energia zero.

4.2.1. Concepção

O regulamento da competição Solar Decathlon Europe 2012 foi utilizado como referencial para o desenvolvimento do projeto da residência de energia zero. Conforme apresentado anteriormente, a competição apresenta uma série de características relacionadas às provas e à logística de transporte que foram consideradas desde as primeiras etapas de concepção do projeto.

Inicialmente a equipe definiu o programa de necessidades que deveria ser seguido na concepção do projeto. De acordo com a ABNT NBR 13531:1995, o Programa de Necessidades é a etapa onde os projetistas devem determinar as exigências de caráter prescritivo ou de desempenho que a edificação deverá atender.

O programa de necessidades foi definido a partir da combinação de aspectos do regulamento da competição e das premissas estabelecidas pela equipe de projetistas.

De acordo com SDE (2012), as residências participantes precisam atender uma série de aspectos para que possam competir no evento. Estas definições vão desde propriedades espaciais dos protótipos (como áreas máximas e mínimas e rotas de entrada e saída); passando por elementos obrigatórios que a casa deve conter (como sistema fotovoltaico, eletrodomésticos e espaços funcionais); até as documentações legais e construtivas (projeto estrutural, projeto arquitetônico, memorial de projetos).

O atendimento a todos os requisitos dispostos no caderno de regras do Solar Decathlon Europe (SDE, 2012) é essencial para a participação do protótipo no evento. Porém, a necessidade de atender cada requisito é condicionada a um determinando momento no desenvolvimento do protótipo, não devem ser todos considerados logo na fase de concepção, existe um processo crescente de complexidade, tanto pela natureza construtiva, quanto pelos requisitos que vão sendo agregados.

Dessa forma, a equipe do projeto Ekó House definiu como parte do programa de necessidade os seguintes aspectos provenientes do regulamento da competição:

- Área de projeção máxima: é definida pela projeção de todos os elementos que compõem a casa. A área máxima permitida é de 150m².
- Área condicionada: é caracterizada como o espaço protegido pela envoltória, ou seja, a superfície protegida pelo envelope térmico da edificação. Sua área deve estar compreendida entre 45m² e 70m².
- Espaços funcionais de uma casa: cozinha, sala de jantar.
- Possibilidade de montagem e desmontagem sucessivas com rapidez.
- Possibilidade de transportar.
- Integração com sistemas de geração de energia fotovoltaica.

Além dos requisitos acima definidos, a competição apresenta dez pontos de avaliação (como mencionado anteriormente). Esses itens de avaliação objetiva e subjetiva também foram considerados no desenvolvimento do projeto do protótipo. Porém, de forma indireta, sendo utilizados como elementos de verificação das propostas desenvolvidas pela equipe. Ou seja, ao longo do processo de projeto, as ideias foram confrontadas frente ao atendimento ou não de determinado ponto de avaliação. Convém observar que este processo foi feito de forma empírica, em função da natureza das avaliações propostas pelo Solar Decathlon Europe.

O protótipo foi concebido para atender as necessidades mínimas de um casal. Foram definidos os espaços funcionais do protótipo: banheiro, cozinha, quarto, sala de jantar e sala de estar. Porém, por se tratar de um espaço destinado a um casal, a proposta foi criar um ambiente o mais integrado possível, sendo assim, internamente, somente o banheiro se configura como um ambiente isolado (Figura 4.3).

Na Figura 4.3 a casa está orientada de acordo com a latitude de Madri na Espanha, onde ocorre o evento Solar Decathlon Europe. Dessa forma, a fachada sul, que apresenta grandes aberturas e todo o espaço social da casa, corresponderia à fachada norte no Brasil. A documentação de projeto do protótipo Ekó House foi feita de acordo com o evento na Espanha, dessa forma, quando necessário, esta será a notação adotada por este trabalho.

Figura 4.3 - Planta Baixa do protótipo Ekó House. Fonte: Projeto Ekó House

Para otimizar a eficiência energética, o protótipo possui um núcleo condicionado mínimo, diminuindo assim o consumo de energia para manter as condições de conforto. Porém, de forma a maximizar o espaço de convivência, a casa possui uma grande varanda ao redor deste núcleo condicionado, que também contribui na proteção solar das aberturas.

Essa configuração espacial definiu a organização dos espaços. A residência é dividida em duas partes distintas, cada uma com um sistema estrutural (Figura 4.4):

- Núcleo Condicionado: que abriga os espaços funcionais do programa arquitetônico: sala de estar, sala de jantar, cozinha, banheiro e quarto. Possui uma estrutura em painéis estruturais pré-fabricados em madeira.
- Envoltória: que abriga: (a) o gabinete técnico onde estão os controles e comandos dos sistemas de geração de energia fotovoltaica e distribuição de eletricidade, aquecimento, armazenamento e distribuição de água quente e fria e; (b) varanda, que

serve de expansão da área condicionada da casa, criando espaços de convivência ao redor do núcleo condicionado. A estrutura da envoltória é composta por quadros com estrutura de alumínio ancorados à estrutura de madeira do núcleo condicionado.

Figura 4.4 - Vista explodida da composição da Ekó House. Fonte: Projeto Ekó House.

4.2.2. Sistema construtivo em painéis pré-fabricados em madeira

A escolha da madeira como material estrutural da Ekó House foi pautado por questões ambientais - ser um material renovável e promover o sequestro de carbono, por questões de desempenho - reduzir as pontes térmicas, e por questões de durabilidade – uso de uma madeira com propriedades que dispensassem o uso de preservativos tóxicos para garantir a sua durabilidade frente aos ataques de organismos xilófagos. Este último aspecto possibilita o descarte da madeira, ao final do ciclo de uso da edificação, com menor impacto ambiental.

A escolha pelo cumaru foi pautada a partir da compatibilização de vários critérios: (a) por ser uma madeira que apresenta um cerne altamente resistente a ataques xilófagos (IPT, 1989a¹⁸ apud IPT, 2012), segundo Jesus et al¹⁹. (1998 apud IPT, 2012) foram realizados ensaios com estacas de cumaru em contato direto com o solo, e foi constatado que sua durabilidade a organismos xilófagos é superior a 12 anos; (b) por ser uma madeira de fácil secagem ao ar,

¹⁸ INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Fichas de características das Madeiras Brasileiras**. 2ª. Ed. São Paulo: IPT, 1989a.

¹⁹ JESUS, M.A.; MORAES, J.W.; CARDIAS, M.F.C.; ABREU, R.L.S. Durabilidade natural de 46 espécies de madeira Amazônica em contato com o solo em ambiente florestal. **Scientia Forestalis**. IPEF-ESALQ USP: v.54, p. 81-92, 1998.

com pequena tendência de sofrer rachaduras superficiais, além de um empenamento moderado pelo processo de secagem (Jankowsky²⁰, 1990 apud IPT, 2012); (c) por sua classe de resistência C60, conforme a ABNT NBR 7190:1997, classe de resistência exigida pelo cálculo estrutural.

A estrutura do núcleo condicionado do protótipo Ekó House (Figura 4.5) consiste em um sistema estrutural composto por vinte e sete painéis portantes em madeira. São vinte e um painéis de parede (painéis verticais) com larguras que variam entre 650mm e 2200mm, altura de 2870mm e espessura de 96mm, e seis painéis de laje de cobertura e de piso (painéis horizontais), com até 2200mm de largura e 8600mm de comprimento, e espessura de 236 mm. composto por montantes e travessas de madeira serrada (cumaru)

Os painéis portantes utilizados na estrutura da Ekó House possuem um quadro em madeira composto por montantes e travessas de madeira serrada (da espécie cumaru - *Dipteryx odorata*), com contraventamento em chapas de partículas aglomeradas do tipo OSB (*Oriented Strand Board*), esta composição pode ser vista na Figura 4.6.

Figura 4.5 – Estrutura em painéis pré-fabricados em madeira do protótipo Ekó House. Fonte: elaborado pelo autor

²⁰ JANKOWSKY, I.P. (Coord.) **Madeiras Brasileiras**. Caxias do Sul: Spectrum, 1990.

Figura 4.6 - Composição de um painel horizontal: quadro de madeira serrada com contraventamento em chapas de OSB. Fonte: elaborado pelo autor

No local das aberturas foram utilizados peças de madeira com dimensões especiais para receber as esquadrias. A ligação entre os montantes é feita por meio de cantoneiras em aço carbono galvanizado (DIN EN 10056-1) e parafusos com ponta auto perfurante, específico para madeiras de alta e média dureza. Externamente ao quadro de madeira, são fixadas, com parafusos auto perfurantes, chapas de OSB que funcionam como contraventamento.

A estrutura de madeira do núcleo condicionado do protótipo Ekó House possui 8,60m por 6,00m, e é dividida em três na direção transversal, configurando três módulos estruturais (M1, M2 e M3), conforme pode ser observado na Figura 4.7.

Os três módulos (M1, M2 e M3) foram projetados como módulos estruturais volumétricos. A concepção inicial do projeto previa o transporte destes módulos de forma tridimensional, e na montagem da casa seria necessário unir esses três grandes volumes para compor o volume condicionado da casa.

Cada um dos módulos estruturais é composto por 2 painéis horizontais (laje de piso e laje de cobertura) e painéis verticais. A divisão do volume em painéis se deu como estratégia de pré-fabricação, desta forma, é possível obter um maior controle de qualidade na manufatura das peças, garantindo maior precisão de montagem dos módulos.

Figura 4.7 - Planta baixa com a divisão em módulos da estrutura. Fonte: Projeto Ekó House.

O primeiro módulo (M1) foi projetado de forma a abrigar as funções básicas da casa, contendo a cozinha, banheiro e quarto. O posicionamento da cozinha e do banheiro no mesmo módulo foi adotado de forma a reduzir a extensão e facilitar a montagem das instalações, notadamente de hidráulica e de condicionamento de ar, simplificando o processo de montagem (menor número de conexões). Já os outros dois módulos (M2 e M3) abrigam os espaços sociais da casa, sala de estar e sala de jantar.

O projeto da Ekó House possui uma elevada complexidade, pois além do processo de desenvolvimento e produção de um protótipo de residência de energia zero, foi preciso trabalhar juntamente com questões de logística para viabilizar o transporte, montagem e desmontagem no Solar Decathlon Europe.

As dimensões dos módulos estruturais tridimensionais (M1, M2 e M3) foram concebidas de acordo com os modais de transporte a serem utilizados no deslocamento do protótipo, tanto para a competição na Espanha, quanto para locomoções no Brasil. Dessa forma, o maior módulo (M1, 2200mm de largura por 8660mm de comprimento) apresenta dimensão compatível com containers marítimos. Os outros dois módulos (M2 e M3) possuem o mesmo comprimento, porém com 1900mm de largura. Posteriormente a forma de transporte foi repensada de para ser realizada em peças de menores dimensões, de maneira a facilitar o seu manuseio, otimizar o espaço nos containers e simplificar a própria estrutura. Para que pudesse ser transportada em grandes volumes seria necessário projetar reforços temporários para a estrutura. O arranjo tridimensional, além de onerar o custo da estrutura, aumentava a

complexidade do processo de transporte, considerando as condições, disponíveis à época, para o içamento e acomodação dos módulos nos contêineres.

Decidiu-se transportar os módulos desmontados, isso resultou a necessidade da construção de estruturas para o transporte dos painéis que facilitaram o manejo desses elementos nas operações de carga e descarga dos contêineres, montagem e desmontagem da estrutura. Apesar da alteração na estratégia de transporte, a concepção estrutural se manteve inalterada. Também foi mantida a nomenclatura de módulos (M1, M2 e M3) de forma a auxiliar na identificação de peças e no planejamento de montagem da estrutura (Figura 4.8).

**Figura 4.8 - Módulos estruturais e seus respectivos painéis: M1 (direita); M2 (centro) e M3 (esquerda).
Fonte: Projeto Ekó House**

A Tabela 4.1 apresenta uma listagem de todos os painéis estruturais em madeira que compõem o volume estrutural de madeira do protótipo Ekó House, com as respectivas dimensões e massa (somente a estrutura de madeira e elementos de ligação metálica).

Uma das estratégias adotadas com o objetivo de obter qualidade no produto final, foi a redução do tempo de operação em canteiro de obras, substituído por maior tempo trabalho em um ambiente industrial.

Dessa forma, os revestimentos (internos e externos), esquadrias e parte dos sistemas prediais (hidráulica, elétrica, automação residencial e HVAC) foram projetadas de maneira a serem incorporadas à estrutura portante dos painéis.

Tabela 4.1 Dimensões e massas dos painéis estruturais do protótipo Ekó House. Fonte: elaborado pelo autor

Módulo	Painel Estrutural	Dimensão (mm)	Massa (kg)
Módulo 1	M1HP	8600 x 2200 x 236	1275,50
	M1HC	8600 x 2200 x 236	1118,00
	M1P1	2200 x 2870 x 96	191,70
	M1P2a	1765 x 2870 x 138	148,00
	M1P2b	1330 x 2870 x 138	151,00
	M1P3	2140 x 2870 x 96	181,00
	M1P4a	1885 x 2970 x 138	153,00
	M1P4b	1330 x 2870 x 138	106,60
	M1P4c	1705 x 2870 x 138	135,90
	M1P5	2140 x 2870 x 96	181,10
	M1P6	2200 x 2870 x 96	181,00
Módulo 2	M2HC	8600 x 1900 x 236	1100,00
	M2HP	8600 x 1900 x 236	1054,10
	M2P7a	1900 x 2870 x 138	63,00
	M2P7b	1900 x 2870 x 138	63,00
	M2P7c	650 x 2870 x 96	67,00
	M2P7d	650 x 2870 x 96	67,00
Módulo 3	M3HP	8600 x 1900 x 236	1210,70
	M3HC	8600 x 1900 x 236	1049,00
	M3P8	1900 x 2870 x 96	170,50
	M3P9a	1280 x 2870 x 118	65,70
	M3P9b	1320 x 2870 x 118	82,80
	M3P9c	1320 x 2870 x 118	82,80
	M3P9d	1460 x 2870 x 118	74,30
	M3P9e	1550 x 2870 x 96	136,80
	M3P9f	1550 x 2870 x 96	137,00
	M3P10	1900 x 2870 x 96	94,20

As operações de montagem foram planejadas de maneira a otimizar a utilização de equipamentos de movimentação de carga (guindaste), de forma a minimizar custos e tempo de montagem. A mesma metodologia foi aplicada ao planejamento de desmontagem.

Sempre tendo em mente as operações de montagem e desmontagem, o desenvolvimento do projeto estrutural foi sendo alterado de forma a contemplar melhorias no planejamento dessas operações. Essa abordagem resultou em um detalhamento extremamente amplo e minucioso das soluções adotadas.

4.2.2.1. Painéis verticais

Os 21 painéis verticais possuem 2870mm de altura e comprimentos que variam de 650mm a 2200mm. A espessura também apresenta variações, de 96mm nos quadros sem aberturas a 138mm nos painéis com esquadrias. Essas dimensões correspondem aos quadros estruturais de madeira, ao acrescentar as instalações e revestimentos interno e externos, os painéis verticais chegam a 225mm de espessura.

A nomenclatura dos painéis verticais segue a seguinte estrutura:

<MÓDULO ESTRUTURAL><NÚMERO PAINEL>

Ex.: o painel M3P8, correspondente ao painel vertical 8 e está localizado no módulo 3.

Figura 4.9 - Planta com a disposição dos painéis verticais. Fonte: elaborado pelo autor

Os montantes, peças que fazem a sustentação vertical, que compõem os quadros de madeira serrada possuem 60x60mm nas extremidades do painel e os montantes intermediários 30x60mm. As travessas inferior e superior possuem 60x60mm, e as travessas intermediárias 30x60mm. As esquadrias são fixadas em tábuas de 30x120mm fixadas ao quadro de madeira serrada (Figura 4.10).

Quatro painéis verticais posicionados consecutivamente na face sul do protótipo possuem grandes aberturas (painéis M3P9a, M3P9b, M3P9c e M3P9d, Figura 4.9), o que fez com que

os montantes ficassem muito espaçados. Sendo assim o projeto estrutural especificou montantes de 100x100mm.

Outra situação que exigiu peças de madeira serrada com dimensões particulares ocorre nos quatro cantos do protótipo. Nessa situação um dos painéis que configuram o canto possui um montante vertical de 60x90mm, permitindo que haja uma interface de 60mm entre os montantes de madeira dos painéis (painéis M1P1, M1P6, M3P8 e M3P10, Figura 4.9).

Figura 4.10 - Composição dos painéis verticais. Fonte: elaborado pelo autor

Sobre o quadro de madeira serrada são fixadas chapas de *OSB* para contraventamento do painel.

Nos painéis verticais foram incorporados as instalações elétricas, de automação residencial e hidráulica. No caso de elétrica e automação, foram acopladas à estrutura dos painéis tomadas, sensores, eletrodutos, cabos e caixas de conexão e distribuição (pontos de conexão das instalações entre painéis). Já as instalações hidráulicas estão concentradas em três painéis, um com os pontos de uso e as tubulações de água fria, água quente e esgoto da cozinha e do banheiro (M1P3), e nos outros dois existem caixas de conexão hidráulica entre as tubulações internas e externas (M1P2b e M1P4a). Sobre as instalações foram fixados os painéis de revestimento interno e externo, utilizando um sistema de encaixe para facilitar a montagem, desmontagem e manutenção.

Os painéis verticais podem ser classificados em três tipos: fechado, semi-aberto e aberto. Os painéis fechados correspondem àqueles em que não existem aberturas. No caso de janelas

ou portas, a dimensão da abertura em relação ao painel define a tipologia. São classificados como abertos, os painéis onde as janelas ou portas ocupem toda a extensão do painel. Nos demais casos, os painéis verticais são classificados como semi-abertos.

Quadro 4.2 - Classificação dos painéis verticais conforme aberturas. Fonte: elaborado pelo autor

Painel Fechado	Painel Semi-Aberto	Painel Aberto

Total: 9 painéis	Total: 5 painéis	Total: 6 painéis
M1P1, M1P3, M1P5, M1P6. M2P7c. M2P7d. M3P8, M3P9e, M3P9f	M1P2a, M1P2b, M1P4a, M1P4b, M1P4c.	M2P7a, M2P7b M3P9a, M3P9b, M3P9c, M3P9d, M3P10.

As conexões entre painéis verticais são feitas de duas formas: (a) por meio de chapas em aço carbono galvanizado (60mm x 120mm x 3mm) parafusadas entre os painéis; (b) por meio de parafusos fixados diretamente nos montantes dos quadros estruturais de madeira serrada.

A Figura 4.11 mostra as conexões entre painéis verticais. As chapas em aço carbono galvanizado são utilizadas para a conexão de painéis paralelos entre si. No caso de painéis perpendiculares, são utilizados somente parafusos para a conexão.

Figura 4.11- Tipos de conexão entre painéis verticais. Fonte: elaborado pelo autor

4.2.2.2. Painéis Horizontais

Os painéis horizontais de piso e cobertura possuem dimensões de 8600mm x 2200mm no módulo 1 e 8600mm x 1900mm nos módulos 2 e 3. Todos os painéis horizontais possuem 236mm de espessura. Contabilizando somente o quadro de madeira serrada e as chapas de OSB, a massa dos painéis ultrapassa 1.000kg.

A nomenclatura dos painéis horizontais segue a seguinte estrutura:

<MÓDULO ESTRUTURAL><TIPO>

Ex.: o painel M2HP, correspondente ao painel horizontal de piso e está localizado no módulo 2.

Os painéis horizontais são formados por vigas de bordo e vigas transversais de madeira serrada ligadas entre si por peças de aço galvanizado que também têm a função de conectar o painel horizontal adjacente. As vigas de bordo possuem seção transversal de 60x200mm.

Cada painel horizontal possuem cinco vigas transversais, que são compostas por duas peças de madeira serrada com seção transversal de 60x200mm e 2150mm de comprimento nos painéis horizontais do módulo 1 e 1850mm de comprimentos nos painéis horizontais dos módulos 2 e 3. Essas peças de ligação possuem também função de conectar os painéis horizontais entre si, além de possuírem pontos para fixação de olhais aparafusáveis DIN 580 3/8", utilizados no içamento do painel (Figura 4.12).

Figura 4.12 - Composição das vigas transversais dos painéis horizontais. Fonte: elaborado pelo autor

Entre as vigas transversais são fixadas tábuas de madeiras com 30x200mm, conectadas entre si e com as vigas transversais por sarrafos de madeira com 30x60mm. Sob os painéis verticais são utilizadas vigas de 60x200mm para possibilitar a conexão dos painéis.

Figura 4.13 - Composição dos painéis horizontais. Fonte: elaborado pelo autor

Sobre o quadro de madeira serrada são fixadas chapas de *OSB* para contraventamento do painel.

Nos painéis de piso, o assoalho de madeira foi incorporado à estrutura do painel, dessa forma, a espessura final destes painéis é de 305mm (somando os barrote e o assoalho). Nos painéis de cobertura foram incorporados as instalações elétricas e de automação residencial, foram acopladas à estrutura dos painéis tomadas, sensores, eletrodutos, cabos e caixas de conexão e distribuição (pontos de conexão das instalações entre painéis).

Os painéis horizontais são classificados em dois tipos: (a) painel horizontal de piso; (b) painel horizontal de cobertura. Apesar de possuírem funções distintas, os painéis horizontais de piso e cobertura são estruturalmente semelhantes. A distinção é feita pela existência de peças de suporte para as fundações metálicas nos painéis horizontais de piso, e na posição de encaixe dos painéis verticais, nos três painéis de piso essas esperas estão na face superior, enquanto nos três de cobertura, na face inferior.

Figura 4.14 - Detalhe de composição dos painéis horizontais de piso. Fonte: elaborado pelo autor

Os painéis horizontais são ligados entre si com pinos de conexão (5 pinos em cada) que se encaixam em um canal (negativo) no painel horizontal adjacente. Ambas as peças são em aço carbono galvanizado, que estão fixadas nas peças estruturais de madeira serrada (Figura 4.15).

Figura 4.15 Conexão entre painéis horizontais. Fonte: elaborado pelo autor.

4.2.2.3. Fundação

A fundação do protótipo Ekó House é composta por vinte sapatas metálicas. Cada uma é composta por uma chapa de aço carbono galvanizado (700x700x25mm) posicionado sobre o solo, e nelas são encaixadas barras em aço carbono galvanizado (75mm de diâmetro e 500mm de comprimento) fixadas nos painéis horizontais de piso por meio de roscas que permitem o ajustar o nivelamento do protótipo (Figura 4.16).

Figura 4.16 - Composição da fundação metálica do protótipo Ekó House. Fonte: elaborado pelo autor

A extremidade da barra de fundação possui formato esférico para contato com a sapata metálica, assim é possível absorver pequenas declividades do terreno (5% de declividade) e manter a estrutura do protótipo nivelada (Figura 4.16). Para unir as peças do sistema de fundação, as sapatas metálicas possuem travas removíveis, que garantam a união dos elementos sem limitar a movimentação da barra no caso de ajuste de declividade.

4.2.2.4. Isolamento térmico

De maneira a otimizar a eficiência energética e garantir níveis de conforto adequados ao protótipo Ekó House, foi especificado um alto nível de isolamento térmico para as vedações.

As cavidades dos quadros de madeira serrada dos painéis estruturais foram preenchidas com feltro flexível constituído de lã de vidro aglomerada com resinas sintéticas. Dessa forma, os painéis verticais possuem 60mm de isolamento em lã de vidro, e os painéis horizontais 200mm.

Os painéis verticais são revestidos internamente e externamente por painéis de revestimento em chapas cimentícias fixados em quadros leves de aço carbono galvanizado. Nos painéis de revestimento externos, o isolamento de fachada é complementado com uma camada de 60mm de isolante de alto desempenho à base de sílica amorfa sintética, fibra de vidro de filamento contínuo e hidróxido de magnésio, este produto é pouco utilizado na construção civil, sendo empregado predominantemente em instalações industriais.

Para complementar o isolamento térmico das fachadas, as esquadrias (portas e janelas) utilizam vidros duplos com câmara de gás inerte entre as folhas de vidro, além de utilizar vidros de baixa emissividade (*low e*).

As fachadas apresentam índice de transmitância térmica de $0,148\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, o piso e a cobertura índice de transmitância térmica de $0,162\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, já as esquadrias possuem índice de transmitância térmica de $1,322\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ (PROJETO EKÓ HOUSE, 2012). Para efeito de comparação uma alvenaria em bloco de concreto de 14cm com revestimento em argamassa interna e externa apresenta um índice de transmitância térmica de $2,76\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ (MORISHITA et al., 2010).

Esses valores foram definidos seguindo as estratégias adotadas para a competição Solar Decathlon Europe 2012, porém, ao em um modelo de viabilidade para as condições

brasileiras, é possível alterar os coeficientes obtidos partindo das necessidades de cada região bioclimática do Brasil.

4.2.2.5. Barreira de Vapor

De acordo com Lstiburek (2002), a difusão de vapor de água pode movimentar a umidade do meio externo e interno da edificação através da envoltória. Esta migração pode ocasionar a condensação do vapor de água no interior da envoltória, ocasionando a diminuição do desempenho dos materiais de isolamento e o apodrecimento da estrutura de madeira (SHERWOOD, 1989; LSTIBUREK, 2002).

Para evitar a movimentação de vapor de água de um ambiente para o interior da envoltória podem ser empregados barreiras de vapor, que permitem a movimentação do ar, porém bloqueiam a passagem de vapor de água.

Segundo Lstiburek (2002), em locais de clima frio, a envoltória de uma edificação precisa ser protegida da umidade proveniente do ambiente interno, para tanto é preciso utilizar barreiras de vapor nas superfícies aquecidas do interior da edificação, além de permitir que a envoltória seque em direção ao meio externo. Já em climas quentes e úmidos, Lstiburek (2002) afirma que a proteção precisa ser contra a umidade proveniente do meio externo à edificação, necessitando instalar a barreira de vapor na face externa da envoltória, e permitir que a envoltória seque em direção ao meio interno.

De acordo com Lstiburek (2002) no caso de climas temperados, a solução não é tão direta quanto os casos anteriores. Nestes casos, a envoltória precisa ser protegida tanto da umidade proveniente do meio externo quanto interno, e paralelamente secar para o exterior e/ou interior da edificação.

No caso do protótipo Ekó House, as simulações para o clima de Madri demonstraram a maior necessidade de aquecimento do que resfriamento do protótipo (PROJETO EKÓ HOUSE, 2012). Assim, foi utilizada uma barreira de vapor de comportamento variável instalada internamente ao protótipo. Nos períodos de frio, quando o fluxo de vapor de água é do interior para o exterior, a barreira evita que este vapor de água migre para o interior da envoltória. Nos períodos de calor, a barreira permite que o vapor de água resultante do aquecimento da estrutura migre do exterior para o interior da edificação, evitando que esta fique acumulada na estrutura de madeira.

4.3. Projeto para Produção

A integração entre o projeto da edificação e os processos de produção é fundamental na busca por um melhor desempenho da construção. Segundo Melhado (1998), o processo de projeto é marcado (usualmente) por uma série de indefinições, tanto nas características do produto, quanto das atividades produtivas, acarretando em uma acentuada improvisação nos canteiros de obra.

De forma a buscar essa integração é necessário que durante o processo de projeto a construtibilidade²¹ do produto seja simultaneamente desenvolvida. Para tanto, é preciso desenvolver juntamente ao projeto do produto (edificação) o projeto para produção. De acordo com Melhado (1998 apud MELHADO, 1994), o Projeto para Produção consiste em:

[...] conjunto de elementos de projeto elaborados de forma simultânea ao detalhamento do projeto executivo, para utilização no âmbito das atividades de produção em obra, contendo as definições de: disposição e sequencia de atividades de obra e frentes de serviço; uso de equipamentos; arranjo e evolução do canteiro; dentre outros itens vinculados às características e recursos próprios da empresa construtora.

Sendo assim, o desenvolvimento simultâneo do projeto da edificação e do projeto para produção, permite um melhor entendimento das características e especificações do produto (edificação) nos procedimentos e sequencias de produção. Melhado (1998) ainda coloca que a realização simultânea dos projetos auxilia o rompimento da tradicional separação entre projetistas do produto dos projetistas do processo, pois estabelece práticas de intercambio profissional entre as áreas do conhecimento.

Esta visão foi almejada pela equipe do projeto da Ekó House, pois em seu entendimento, é preciso romper essa divisão entre projeto e produção, e compreender que são atividades complementares e interdependentes. É necessária uma troca de informação mútua, pois dessa forma é possível melhorar a qualidade do setor construtivo.

²¹ De acordo com Sabbatini (1989), construtibilidade *“é a propriedade inerente ao projeto de um edifício, ou de uma sua parte, que exprime a aptidão que este edifício (ou sua parte) tem de ser construído”*.

De acordo com Pupo (2009), atualmente, com a utilização de sistemas CAD/CAM²² os projetos deixaram de ser somente criados digitalmente, mas também passaram a ser fabricados a partir de processos digitais, por meio de técnicas de fabricação digital. Pupo (2009) engloba as técnicas destinadas à produção de edifícios ou partes deles, por meio do uso de equipamentos Comando Numérico Computadorizado (CNC), como de Fabricação Digital.

Para Schodek (2005), o processo de fabricação digital apresenta duas etapas:

- Análise das informações estruturais para todas as partes do projeto por meio de *software* CAM;
- Tradução da informação analisada para a máquina CNC.

A partir de então, a máquina CNC produz fisicamente o modelo digital 3D que foi traduzido, as características deste produto dependem dos tipos de operação da máquina empregada (PUPO, 2009). Esses processos baseados em máquinas CNC podem ser chamados de “*file-to-factory*”, quando o modelo digital 3D pode ser então transmitido diretamente às máquinas de corte.

Tendo em vista as exigências de qualidade e desempenho do protótipo Ekó House, o processo de pré-fabricação exigiu um elevado nível de controle e planejamento. A partir do dimensionamento estrutural²³, o projeto para produção foi desenvolvido valendo-se de um *software* de manufatura digital para então ser, posteriormente, produzido com a utilização de máquina CNC.

Durante o processo de modelagem digital da estrutura, onde a lógica de trabalho é semelhante à lógica de produção real, foi preciso “produzir” individualmente todas as peças para depois montá-las, de forma a compor os elementos construtivos e, posteriormente, a estrutura da casa. A Figura 4.17 representa a lógica de montagem no *software*, cada peça é chamada de *part*, e a combinação de duas ou mais *parts* produzem um *assembly*, sendo possível fazer combinações com *assemblies* ou *parts*.

²² CAD/CAM: Computer Aided Design and Manufacturing.

²³ A concepção e dimensionamento da estrutura foram feitos por uma equipe integrante do projeto P&D, sob orientação e coordenação do Prof. Dr. Pedro Afonso de Oliveira Almeida (DOMINGUES; OLIVEIRA, 2011)

Figura 4.17 - Esquema lógico da organização da modelagem no *software* de manufatura digital. Fonte: elaborado pelo autor

Os modelos de *assembly* são feitos por meio da combinação de uma ou mais *parts*. Durante a montagem digital são impostas restrições aos elementos existentes no modelo tridimensional (*part* e *assembly*). Essas restrições são feitas por meio de operações denominadas *assembly constraints*, que limitam determinados graus de liberdade de um elemento (*part* ou *assembly*). Normalmente estas restrições são aplicadas entre componentes, definindo uma relação espacial entre ambos. As restrições servem para definir o comportamento físico dos elementos em um determinado *assembly*.

No caso da estrutura do protótipo foram modelados todas as peças de madeira serrada, painéis de OSB e as peças metálicas. Além dos elementos produzidos especificamente para o projeto (peças personalizadas), existe um grande número de peças utilizadas que são comumente disponíveis no mercado (como parafusos), que são feitas de acordo com padrões internacionais, dessa forma, o próprio *software* apresenta um banco de dados disponibilizando-as.

A modelagem de cada *part* que compõe a estrutura possui, além das informações geométricas (modelo tridimensional), informações do material empregado, propriedades físicas (massa, área, volume, resistência mecânica, etc.). Com esses dados é possível executar simulações por elementos finitos, podendo assim verificar as tensões e deformações nos elementos estruturais durante a fase de concepção, de forma a validar decisões de projeto (DOMINGUES; OLIVEIRA, 2011).

Com o objetivo de obter uma melhor compreensão do desenvolvimento do projeto para produção da Ekó House, esta fase foi subdividida em três etapas: (a) Modelagem e validação; (b) Detalhamento para fabricação e montagem; (c) Documentação para fabricação e montagem. Na primeira etapa foi realizada a modelagem de todos os elementos que

compõem a estrutura (*parts ou assemblies*) e posteriormente a montagem da estrutura da Ekó House (*assembly*). Em paralelo ao desenvolvimento do modelo tridimensional, foi feita a validação do dimensionamento estrutural, para poder consolidar o protótipo digital. Na segunda etapa, com o modelo digital finalizado, foram realizadas adaptações no projeto da estrutura, a partir de um planejamento detalhado das operações de pré-fabricação e montagem. Por fim, na terceira etapa, foram elaborados os documentos para fabricação (planilhas, desenhos de fabricação de peças – madeira e aço, desenhos de montagem).

4.3.1. Modelagem

O ambiente de modelagem do *software* de manufatura digital, utilizado no desenvolvimento da Ekó House, permitiu desde os primeiros estágios de projeto uma visão dos processos produtivos, estreitando assim as relações entre projeto e produção, almejadas pela equipe.

Para a montagem digital da estrutura da Ekó House foi necessário modelar todos os elementos que compõem o protótipo: peças de madeira serrada, painéis de OSB, e peças metálicas desenvolvidas para o protótipo. Também foram utilizados componentes padronizados de acordo com normas internacionais, como os parafusos. Cada um desses elementos é uma *part* no *software* de manufatura, a união desses para montar a estrutura geram os *assemblies* (montagens).

O modelo tridimensional da estrutura da Ekó House foi iniciado a partir da modelagem de cada elemento individualizado, ou seja, para cada montante de madeira serrada, painel de OSB e peça metálica foi criada uma *part* (um arquivo individual). A esse arquivo também são atribuídas as propriedades do material do elemento modelado (madeira, aço, alumínio, etc). As propriedades são adquiridas a partir de um banco de dados incorporado ao próprio *software*. A partir da modelagem tridimensional e das propriedades do material escolhido, o *software* informa dados como a densidade, massa, volume, área e o centro de gravidade da peça, entre outros dados.

Tendo as peças modeladas foram montados os painéis estruturais. Cada painel foi individualmente montado no *software* de manufatura digital, dessa forma, gerando um arquivo de *assembly* para cada um dos painéis. A modelagem em etapas seguiu a mesma lógica que foi planejada para o processo de produção, primeiramente são produzidas as peças individuais, a partir delas são montados os painéis e, por fim, é montada a estrutura da Ekó House.

Figura 4.18 - Diagrama demonstrando o esquema de montagem do painel vertical M1P4a. Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 4.18 mostra a composição de um painel estrutural da Ekó House que é composto por 181 peças modeladas (mais 177 parafusos que não foram incluídos neste modelo, somando 358 peças) que foram utilizadas em sua montagem real.

Todos os vinte e sete painéis estruturais da Ekó House foram modelados seguindo a mesma lógica da Figura 4.18, no total o arquivo com a montagem da estrutura completa possui mais de 6.500²⁴ peças modeladas, dos quais 660 são peças de madeira serrada (Cumaru) e 202 são painéis de OSB, as demais são peças metálicas de ligação dos painéis e da fundação.

Na Tabela 4.2 é possível observar o processo de modelagem adotada para criar o modelo tridimensional da estrutura de madeira da Ekó House, partindo da modelagem de cada painel até a estrutura finalizada.

²⁴ Esta contabilização não inclui parafusos utilizados para fixação dos painéis de OSB. Por motivos de otimização, eles não foram incluídos na modelagem. Dessa forma, a estrutura real apresenta mais elementos do que a modelagem tridimensional.

Tabela 4.2 - Organização da modelagem da estrutura da Ekó House. Fonte: elaborado pelo autor

Painel	Módulo	Estrutura	
M1HP		Estrutura Ekó House 3 Módulos 27 Painéis	
M1P1			
M1P2a			
M1P2b			
M1P3			
M1P4a			
M1P4b			
M1P4c			
M1P5			
M1P6			
M1HC			
M2HP
M2P7a			
M2P7b			
M2P7c			
M2P7d			
M2HC			
M3HP
M3P8			
M3P9a			
M3P9b			
M3P9c			
M3P9d			
M3P9e			
M3P9f			
M3P10			
M3HC			

4.3.2. Detalhamento para fabricação e montagem

Após a definição da estrutura do protótipo uma segunda etapa teve início, o detalhamento das peças de forma a viabilizar os processos de pré-fabricação e montagem.

Foram realizadas pequenas alterações na estrutura, a partir de um raciocínio baseado no planejamento das operações de pré-fabricação em máquinas de marcenaria usual e equipamentos CNC e das operações de montagem.

Nesta etapa, a modelagem do protótipo em um *software* de manufatura mostrou-se bastante vantajosa. Com o detalhamento feito então foi possível verificar conflitos entre diversos componentes (como parafusos e chapas metálicas), ou seja, a equipe de projeto pode fazer verificações em um ambiente virtual dos possíveis problemas das etapas seguintes.

Essa etapa foi desenvolvida de maneira extensiva, os procedimentos de pré-fabricação e montagem foram repassadas e simuladas em ambiente virtual diversas vezes pela equipe de projeto. Resultando em uma série de alterações na modelagem inicial, com intuito de otimizar as operações a serem realizadas (tanto na pré-fabricação quanto na montagem).

A seguir são exemplificadas as alterações e ajustes mais significativos realizados nesta etapa de trabalho:

- **Alteração na forma de conexão entre painéis estruturais:** até aquele momento, os painéis estruturais (horizontais e verticais) eram unidos com uma chapa de aço carbono galvanizado fixada por meio de pregos na face externa da madeira de ambos os painéis. Porém, foi proposto utilizar a chapa internamente às madeiras de ambos os painéis, inseridas em um rasgo na própria madeira que serve de guia de montagem (Figura 4.11), e alterando a forma de fixação da chapa para parafusos, facilitando o processo de montagem e desmontagem. Esta alteração foi possível, pois por meio do uso de máquinas CNC a precisão na realização destes rasgos é milimétrica, consequentemente agregando qualidade ao produto final. Convém observar também que a adoção desta alteração de projeto teve origem no planejamento dos procedimentos de montagem, pois solucionou uma preocupação com o posicionamento do painel na hora da instalação.
- **Alteração no encaixe entre painéis horizontais:** Originalmente os seis painéis horizontais (três de cobertura e três de piso) somente se alinhavam nas operações de montagem. Pensando nos procedimentos de montagem, essa situação gerava a seguinte preocupação: como alinhar corretamente os painéis da laje de cobertura, tendo em vista a dificuldade de movimentá-los (a massa de cada um é de aproximadamente 1.200kg) e a necessidade de encaixe preciso, já que tinham que se alinhar também com as chapas metálicas dos painéis verticais já posicionados (no caso dos painéis de cobertura).

Cada painel horizontal possui cinco peças metálicas em suas extremidades longitudinais. Essas peças são componentes das vigas principais da estrutura. A solução adotada foi alterar essas peças de forma a adquirirem uma função de guia de montagem. Para tanto, foi proposto um pino cônico saliente em um painel e, no painel adjacente um canal para guiar este pino (Figura 4.15). Dessa forma, o painel poderia ser posicionado somente pela gravidade, sem necessidade de grande esforço por parte da equipe durante a montagem.

- **Gravação nos painéis de OSB:** O contraventamento dos quadros de madeira serrada nos painéis estruturais é feito mediante a utilização de chapas de OSB de 18 mm de espessura. Estas chapas são fixadas nos quadros por meio de parafusos e adesivo de alto desempenho²⁵. Segundo os critérios do dimensionamento estrutural, os parafusos devem ser fixados a uma distância de aproximadamente 20cm entre si, dessa forma, o número de parafusos utilizados para o contraventamento de chapas ultrapassa 6.000 unidades. Por essa razão, todas as chapas de OSB foram usinadas em máquina CNC.

Para os 27 painéis estruturais do projeto são utilizados 202 peças de OSB de tamanhos variados, assim como a disposição dos furos. Cada painel de OSB é projetado para ser posicionado em uma determinada posição em um determinado painel estrutural. Tendo em vista essa situação, foi proposta a gravação em cada painel de um código que facilitasse a identificação de cada painel de OSB e sua respectiva localização (painel e posição no mesmo). Como todas as chapas de OSB seriam usinadas em uma máquina CNC, a gravação foi incluída como etapa do processo.

Estes exemplos mostram como a análise dos processos de pré-fabricação e montagem foram fundamentais nas alterações realizadas no projeto. Todas essas decisões tiveram impacto no processo produtivo, e também no processo de projeto, pois servem de retroalimentação para essa etapa.

A utilização de *software* de manufatura digital teve grande importância, pois foram fundamentais nas simulações de montagem e verificação da viabilidade das propostas.

4.3.3. Documentação para fabricação e montagem

A produção da estrutura da Ekó House foi executada em duas etapas distintas, a pré-fabricação dos componentes e a montagem da estrutura.

Para cada um desses processos foi necessária a tradução de determinadas informações de projeto para que pudessem ser desenvolvidas as respectivas atividades em cada uma dessas etapas.

²⁵ A fixação das chapas de OSB é feita de forma redundante. Devido à necessidade de transportar os painéis a equipe de projeto decidiu aumentar a segurança na fixação destas chapas de contraventamento.

Cada processo possui uma série de operações distintas, onde cada uma necessita de uma determinada informação em um determinado formato. No geral, o desenho é a linguagem utilizada amplamente para a transmissão de informações entre uma etapa e outra.

O *software* utilizado no projeto estrutural permite a criação de arquivos de desenho. Nesses arquivos é possível inserir *parts* e/ou *assemblies* para gerar pranchas de desenho com informações desses modelos. É possível importar informações geométricas advindas do modelamento tridimensional, como também as informações vinculadas a esses modelos (massa, área, etc.).

Ao incorporar a modelagem tridimensional ao arquivo de desenho é possível que o projetista o manuseie praticamente de maneira ilimitada, podendo incluir projeções, seções, detalhes, dimensões e planilhas referentes ao seu modelo tridimensional. A geração de planilhas é de grande importância neste processo, pois além de ser um recurso de listagem de todos os elementos de um *assembly*, é possível exportar essas informações para outros *softwares* que trabalhem com planilhas, auxiliando no controle de determinadas operações.

No caso do projeto estrutural da Ekó House, foram gerados documentos para o processo de pré-fabricação e montagem. No primeiro, os procedimentos de trabalho podem ser divididos em duas etapas: (a) usinagem das peças de madeira e; (b) montagem dos painéis estruturais. Para a etapa de montagem da estrutura foram produzidos documentos com instruções detalhadas das operações de montagem da estrutura, juntamente com instruções para montagem do restante da casa.

Dessa forma, segue a descrição de forma como essas informações foram trabalhadas para auxiliar nas operações de produção:

Documentação para usinagem das peças de madeira

Para que a montagem da Ekó House tenha o desempenho almejado pela equipe, a pré-fabricação foi utilizada como forma de garantir a qualidade de seus componentes. A qualidade final de um painel não está somente relacionada às operações de montagem do mesmo, mas também às operações de produção de seus componentes.

Cada painel estrutural da Ekó House é composto por peças de madeira serrada (cumaru), painéis de OSB e peças de ligação²⁶ em aço carbono galvanizada. Para garantir a precisão

²⁶ As peças de ligação metálica foram projetadas pela equipe e produzidas por indústrias do setor. O processo de projeto e documentação delas é semelhante às aplicadas as peças de madeira, porém não fazem parte do escopo de estudo deste trabalho, portanto não serão contempladas nesta análise.

dimensional das peças de madeira e chapas de OSB, foi definido que estas seriam usinagem em máquinas CNC, garantindo dessa forma as medidas especificadas em projeto.

Devido à quantidade de peças e à variedade de dimensões, foi preciso um controle rigoroso no planejamento das operações, evitando assim a tomada de decisão durante a operação de corte. Por meio da combinação das informações extraídas do *software* de manufatura e das planilhas de dados foi possível planejar o melhor aproveitamento das peças de madeira, gerenciar a movimentação e o corte das peças.

Tendo as peças cortadas nas dimensões corretas, a próxima operação é a de usinagem em máquinas CNC. O equipamento utilizado para esta operação, uma *router* de três eixos, recebe as instruções de corte por meio de arquivos de desenho 2D. Esses arquivos de desenho precisam traduzir a informação do modelo tridimensional para uma informação que a máquina CNC compreenda e execute a operação correta.

Este procedimento foi realizado em um *software* CAD, a partir de dados extraídos do modelo tridimensional de cada peça de madeira. Cada tipo de usinagem executada nas peças foi convertido em uma instrução de desenho que pudesse ser interpretada pela máquina CNC.

Os painéis de OSB foram cortados e perfurados em equipamento CNC. Foram adotados os mesmos procedimentos de planejamento empregado às peças de madeira serrada: arquivos de desenho com instruções para máquina e planilhas de controle para gerenciar todo o processo.

Uma diferença com o planejamento de corte dos painéis de OSB foi a realização de uma otimização no aproveitamento das chapas compradas. As chapas são adquiridas com dimensões comerciais de 2440 x 1220mm e, valendo-se de um algoritmo de aproveitamento de chapa foi possível diminuir a quantidade de resíduos no processo de corte das chapas de OSB.

Documentação para montagem dos painéis estruturais

Tendo todas as peças preparadas, a próxima etapa foi a de montagem dos painéis estruturais. Esse processo foi realizado pelos estudantes da equipe e profissionais de uma empresa contrata para a pré-fabricação dos painéis.

A partir dos modelos tridimensionais gerados no *software* de manufatura, foram gerados desenhos com instruções de montagem de cada painel. Essas informações puderam ser produzidas diretamente no *software* onde os painéis foram modelados.

A documentação de montagem foi gerada com informações geométricas dos painéis, planilhas de consumo de material, ordem de montagem e dados importantes para o planejamento, como por exemplo, a massa de cada painel.

Documentação para montagem do protótipo Ekó House

A partir dos painéis estruturais produzidos, foi necessário extrair informações de montagem da estrutura da Ekó House. Dessa forma, a equipe produziu uma documentação detalhando passo a passo as operações de montagem, determinando além da ordem de montagem dos componentes pré-fabricados, os equipamentos utilizados, a mão-de-obra necessária para realização de todas as atividades, a movimentação de material no canteiro de montagem - incluindo a movimentação de caminhões de transporte de material - e os recursos e equipamentos que garantem a segurança nas operações. Todas essas operações foram relacionadas no tempo, ou seja, sequencialmente com a indicação da duração de cada operação.

4.4. Considerações sobre o capítulo

Entre os diversos objetivos que permeiam o Solar Decathlon Europe, a possibilidade da experimentação construtiva e o contato com o setor produtivo por parte de estudantes e pesquisadores das universidades participantes, caracteriza uma oportunidade ímpar na formação e no desenvolvimento de pesquisas em diversas áreas.

O protótipo Ekó House foi concebido a partir de um extenso programa de necessidades que engloba, além das questões de concepção usuais em projetos de residências, aspectos de produção pouco incorporados em projetos de habitação no Brasil.

Dada as características do evento, a necessidade de projetar uma estrutura que permita sucessivas montagens e desmontagens com rapidez e confiabilidade, além de ser transportável, foi um dos principais aspectos considerados em todas as etapas do desenvolvimento do projeto.

A escolha da madeira foi definida por questões: (a) ambientais, ser um material renovável e promover o sequestro de carbono; (b) desempenho, reduzir as pontes térmicas, aumentando a eficiência energética do protótipo e; (c) durabilidade, utilizar uma madeira resistente a organismos xilófagos que dispensasse o uso de preservativos tóxicos. O cálculo estrutural

especificou a utilização de uma madeira de classe de resistência C60, dessa forma, decidiu-se pelo uso do cumaru, pois atende aos requisitos de projeto estrutural e de durabilidade.

O emprego de um *software* de manufatura digital permitiu antever possíveis interferências entre a estrutura portante dos painéis de madeira e os sistemas prediais, revestimentos e esquadrias incorporados.

O desenvolvimento simultâneo do projeto de produto e o projeto para produção permitiu que os requisitos do processo de produção fossem contemplados desde as primeiras etapas do desenvolvimento. Além, o emprego de *software* de manufatura digital visando a utilização de máquinas *CNC*, possibilitou uma interface de “tradução” das informações digitais para o meio físico. A operacionalização e os ganhos desta metodologia são descritos nos capítulos seguintes.

Por fim, é importante observar que a metodologia de desenvolvimento contemplando os processos de produção permitiu a criação de uma extensa documentação para orientar as etapas posteriores.

Capítulo 5

Produção da estrutura de madeira do protótipo Ekó House

Este capítulo aborda a primeira parte da produção do sistema construtivo constituído por painéis estruturais de madeira pré-fabricados do protótipo Ekó House. A descrição do processo de produção é dividida em duas partes. A primeira, que é tratada neste capítulo, aborda o processo construtivo da estrutura, realizado na Universidade de São Paulo. A segunda, trata da montagem da estrutura do protótipo no evento Solar Decathlon Europe 2012, em Madri.

O desenvolvimento do processo construtivo da estrutura é descrito em quatro partes: (1) infraestrutura utilizada para pré-fabricação, montagem e desmontagem; (2) a fabricação dos painéis estruturais; (3) o processo de fabricação da estrutura em painéis pré-fabricados em madeira e; (4) logística de transporte do protótipo.

5.1. Infraestrutura

A produção do protótipo Ekó House foi realizada no canteiro de montagem localizado nas dependências do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE-USP). Foram instalados dois containers de 6,00m de comprimento para serem utilizados como escritório e depósito de materiais, além de uma tenda com dimensões em planta de 15,0x10,0m e altura livre de 11m.

Além do espaço de montagem, também foram utilizadas as instalações da oficina de manutenção do IEE-USP, principalmente com atividades de serralheria e pequenos trabalhos de marcenaria. Os cortes de madeira da estrutura foram executados nas instalações do Laboratório de Modelos e Ensaio da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (LAME-FAUUSP).

As operações de usinagem e montagem de painéis verticais foram realizadas nas dependências de uma empresa de cenografia que patrocinou o projeto Ekó House. Esta empresa disponibilizou a utilização de uma *router CNC* de três eixos, necessária para a usinagem das peças de madeira serrada e das chapas de *OSB (Oriented Strand Board)*.

5.2. Fabricação dos painéis estruturais da Ekó House

A fabricação dos componentes que compõem o sistema construtivo em painéis estruturais de madeira pré-fabricados do protótipo Ekó House pode ser dividida em cinco etapas:

- Aquisição das peças estruturais de madeira
- Usinagem das peças estruturais de madeira (serrada e *OSB*).
- Cortes e rebaixas nas peças de madeira serrada.
- Usinagens das peças de madeira serrada e chapas de *OSB*.
- Montagem dos painéis verticais.
- Montagem dos painéis horizontais.

5.2.1. Aquisição das peças estruturas de madeira

A partir dos projetos detalhados da estrutura de madeira do protótipo Ekó House, foi elaborada uma listagem de todo o material necessário para a fabricação dos painéis estruturais (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 - Relação de materiais para a fabricação dos painéis estruturais. Fonte: elaborado pelo autor

Material	Descrição	Quantidade
Madeira Serrada	Madeira Serrada classe C60 conf. NBR7190 - Espécie Cumaru (<i>Dipteryx odorata</i>)	5,67m³
Chapas OSB 18mm	Chapa de partículas do tipo <i>Oriented Strand Board</i> 2440x1220x18mm	152 un.
Parafuso 6x50	Parafuso em aço zincado c/ ponta autoperfurante e fenda hexalobular - Bitola 6mm/Comprimento 50mm	3230 un.
Parafuso 4,5x30	Parafuso em aço zincado c/ ponta autoperfurante e fenda hexalobular - Bitola 4,5mm/Comprimento 30mm	11218 un.
Parafuso Sextavado M12x80	Parafuso em aço zincado c/ rosca total e cabeça sextavada M12x80mm	80 un.
Porca M12	Porca M12 em aço zincado	160 un.
Arruela M12	Arruela lisa em aço carbono M12	80 un.
Cantoneira 30mm	Cantoneira em aço galvanizado e=1/8" 30x30x30mm	806 un.
Cantoneira 200mm	Cantoneira em aço galvanizado e=1/8" 30x30x200mm	288 un.
Ligação Viga Dupla	Peça em aço galvanizado para vigas duplas - conf. Projeto	60 un.
Suporte para Fundação	Peça em aço galvanizado para rosquear a barra roscada de fundação	20 un.
Barras Roscadas - Fundação	Barra roscada em aço galvanizado com cabeça esférica - conf. Projeto	20 un.
Chapa de Fundação	Sapata metálica em aço galvanizado 25x700x700mm - conf. Projeto	20 un.
Chapa ligação Painéis	Chapa em aço galvanizado para conexão painéis 3x60x120mm - conf. Projeto	212 un.
Isolamento em lã-de-vidro	Isolamento térmico e acústico em Feltro FSB - 12 (0,045 W/m.°C)	24 m³
Adesivo	Adesivo Selante Monocomponente de alto desempenho	-
Barreira de Vapor	Barreira de Vapor - Membrana em poliamida e polipropileno - e=0,2mm	150m²
Adesivo impermeabilizante	Adesivo monocomponente a base de resinas sintéticas de alto desempenho	-

As peças de madeira serrada foram especificados de acordo com as seções transversais de projeto (Tabela 5.2). Para este quantitativo foi considerado um percentual de 18,5% de perdas tendo em vista as operações de corte a serem realizadas pela equipe de produção. Além das quantidades, no projeto foi indicado também o teor de umidade exigido (18%) para o recebimento do material. O tratamento contra ataques de insetos xilófagos e fungos apodrecedores não foi especificado tendo em vista que a escolha pela espécie cumaru levou

em consideração a sua resistência natural à deterioração biológica e teor de umidade da madeira de 18% especificado em projeto²⁷.

Tabela 5.2 - Peças de madeira serrada adquiridas para fabricação dos painéis estruturais. Fonte: elaborado pelo autor

Tipo de Produto	Dimensão	Quantidade (un.)
Caibro	60x60x2000mm	14 un.
	60x60x2500mm	16 un.
	60x60x3000mm	26 un.
Sarrafo	30x60x2000mm	12 un.
	30x60x2500mm	38 un.
	30x60x3000mm	33 un.
Tábua	30x100x3000mm	2 un.
	30x120x2000mm	2 un.
	30x120x3000mm	15 un.
	30x200x2000mm	48 un.
	30x200x2500mm	20 un.
Viga	60x120x2000mm	4 un.
	60x120x3000mm	4 un.
	60x200x2000mm	40 un.
	60x200x3000mm	76 un.
	100x100x3000mm	6 un.
Vigota	60x100x2000mm	4 un.
	60x100x3000mm	2 un.
	60x90x3000mm	7 un.

Antes de efetuar a aquisição do lote de madeiras para a execução da estrutura do protótipo, a equipe visitou a madeireira de forma a realizar uma inspeção visual tanto do material que seria adquirido, como das operações de beneficiamento do material.

O lote de madeira serrada foi entregue conforme as especificações de projeto, com variações consideradas aceitáveis no momento do recebimento. As seções transversais não apresentaram variações dimensionais que comprometessem a fabricação dos painéis estruturais. As peças apresentavam variação de comprimento, porém sempre com medidas superiores às especificadas. Em relação ao arqueamento, não foram identificados deformações, todas as peças estavam aparelhadas conforme especificação de projeto. Após

²⁷ Segundo Jankowsky (1990) o ataque de fungos ocorre em madeiras com teor de umidade superior a 20%.

a verificação, as peças foram separadas conforme sua dimensão transversal e armazenadas afastadas do solo cobertas por lonas de tecido e lonas plásticas, sobre a tenda.

As peças de madeira serrada foram armazenadas afastadas do solo sobre peças de madeira, e cobertas por lonas plásticas. Contudo, algumas peças com seção transversal de 30x60mm e 60x60mm sofreram arqueamento²⁸ durante o período em que ficaram armazenadas antes do início da produção da estrutura do protótipo²⁹. As peças, em que o arqueamento foi mais acentuado, foram separadas para serem utilizadas como peças de menor comprimento nos quadros de madeira, tendo em vista que foram cortadas posteriormente, reduzindo a flecha para valores inferiores a 5mm por metro linear da peça³⁰.

No caso da aquisição das chapas de *OSB*, o procedimento inicial foi a quantificação do número de peças utilizadas no projeto estrutural. Estas peças apresentam dimensões variadas, em função da geometria de cada painel estrutural. Dessa forma, foi realizado um estudo de aproveitamento de corte de chapas em ambiente virtual³¹, de forma a contabilizar a quantidade de chapas de *OSB* que deveriam ser adquiridas.

As chapas de *OSB* foram armazenadas em quatro pilhas, sem contato direto com o piso, e cobertas com uma lona em tecido para protegê-las das intempéries.

5.2.2. Cortes e Rebaixos nas peças de madeira serrada

A distinção entre a etapa de cortes, rebaixos e usinagem das peças estruturais e de montagem dos painéis, é feita tendo como entendimento que os procedimentos adotados em todo o processo de pré-fabricação da estrutura do protótipo apresentam inovações relevantes ao setor da construção civil, especificamente à produção de habitações pré-fabricadas em madeira.

O volume de madeira serrada adquirida para a execução da estrutura de madeira do protótipo Ekó House é de 5,67m³, distribuídos em 362 peças já aparelhadas, porém com comprimentos de 2000, 2500 e 3000mm. O projeto estrutural previu o consumo de 4,81m³ de madeira

²⁸ Arqueamento é o empenamento longitudinal das bordas, ou seja, curvatura ao longo do comprimento da peça em um plano paralelo à face (CALIL; OKIMOTO; PFISTER, s/d).

²⁹ As madeiras ficaram armazenadas por 1 ano, pois foram adquiridas inicialmente para o projeto Casa Solar Flex – SDE 2010.

³⁰ Segundo Calil; Okimoto; Pfister (S/D) para peças arqueadas usadas em estruturas é admitida flecha máxima de 5mm por metro linear.

³¹ O estudo de aproveitamento de corte de chapas foi realizado utilizando uma rotina automatizada no *software Rhinoceros*.

serrada distribuídos em 660 peças que compõem os painéis verticais e horizontais. Assim, antes de realizar a usinagem das peças estruturais, foi necessário cortar no comprimento final e realizar rebaixos especificados em projeto.

Para a operação de corte das peças de madeira serrada nos comprimentos de projeto foi utilizada uma serra de bancada, operada por um técnico do LAME-FAUUSP. A equipe de estudantes e pesquisadores do projeto Ekó House atuou como apoio nas operações de corte e supervisionando as atividades conforme o planejamento. O mesmo procedimento foi adotado nas operações de rebaixo das peças de madeira, executadas em uma serra radial de bancada.

Os rebaixos possuem distintas finalidades, nas peças estruturais dos painéis horizontais (piso e cobertura), permitem o encaixe das peças metálicas de conexão entre painéis. Já nas peças dos painéis verticais, são destinados ao encaixe do painel vertical aos painéis horizontais (peças de topo e base). A Figura 5.1 apresenta os cinco tipos de rebaixos executados nas peças de madeira serrada.

Figura 5.1 - Tipos de rebaios executados nas peças de madeira serrada. Fonte: elaborado pelo autor

O volume de 5,67m³ de madeira serrada da espécie cumaru foi dividido em 5 lotes de corte. Cada um desses foi transportado do IEE-USP para o LAME-FAUUSP, cortado e transportado de volta ao IEE-USP no mesmo dia. O tempo de execução de cada lote variou de acordo com a disponibilidade de transporte obtida em cada dia. Já as operações de corte foram realizadas em aproximadamente 2-3h por lote.

Tabela 5.3 – Resumo das operações de transporte e corte dos lotes de madeira serrada. Fonte: elaborado pelo autor

		Lote 1	Lote 2	Lote 3	Lote 4	Lote 5	Total	
Transporte	Número de Peças	69 un.	59 un.	48 un.	56 un.	130 un.	362 un.	
	Volume	0,74m³	1,17m³	1,20m³	1,35m³	1,21m³	5,67m³	
	Massa	792 kg	1252 kg	1284 kg	1445 kg	1295 kg	6067 kg	
Operação de corte	Peças Geradas	77 un.	63 un.	48 un.	62 un.	410 un.	660 un.	
	Resíduos (volume)	0,06m³	0,17m³	0,08m³	0,35m³	0,26m³	0,94m³	
	Resíduos %lote	1,11%	3,08%	1,18%	6,17%	4,67%	16,52%	
	Rebaixos	Total Peças	4 un.	32 un.	48 un.	50 un.	20 un.	154 un.
		Tipo 01	-	20 un.	-	40 un.	-	60 un.
		Tipo 02	-	-	48 un.	-	-	48 un.
		Tipo 03	-	4 un.	-	10 un.	20 un.	34 un.
		Tipo 04	-	8 un.	-	-	-	8 un.
Tipo 05	4 un.	-	-	-	-	4 un.		

Em função da grande quantidade de peças que compõem os painéis estruturais do protótipo, houve um cuidado com a nomenclatura a ser adotada, de maneira a possibilitar a rápida identificação de cada peça. Cada peça de madeira serrada possui a seguinte estrutura de identificação:

<NOME PAINEL>_<VERT/HOR>_<DIMENSAO>

Ex. a peça M1P1_vert_60x60x2750, é um caibro do painel M1P1, com seção transversal de 60x60mm, com 2750mm de comprimento e está na posição vertical do painel.

Esta nomenclatura foi utilizada para identificar os arquivos em ambiente virtual e foi gravada em cada peça de madeira serrada de forma a possibilitar a rápida identificação de sua posição, facilitando assim operações de organização no canteiro e montagem do painel. (Figura 5.2)

Figura 5.2 - Peças de madeira serrada com identificação utilizada para facilitar as operações de fabricação. Fonte: autor

Essa identificação deveria ser realizada durante o procedimento de corte das peças. Porém, de forma a agilizar o processo, evitando que a operação de gravação se tornasse um gargalo na atividade de corte, decidiu-se utilizar uma nomenclatura simplificada para a marcenaria. Para tanto, as peças foram ordenadas por painel e receberam uma numeração sequencial, do 1 ao 660. Após serem cortadas todas as peças foram identificadas novamente, dessa vez com o código completo.

Além da nomenclatura, as faces das peças de madeira serrada foram identificadas em A, B, C e D no sentido anti-horário. Esta marcação foi utilizada para a identificação das faces corretas a serem usinadas na *Router CNC* de três eixos.

Dessa forma, todas as peças de madeira serrada foram identificadas da seguinte maneira:

- Código Simplificado na cor Azul
- Código da peça no Projeto para Produção na cor Preta
- Faces de Usinagem na cor Vermelha

Após finalizar todos os cortes e rebaios nas peças de madeira serrada, elas foram organizadas e estocadas no canteiro de montagem de acordo com os painéis pertencentes. De forma a organizar a etapa de usinagem em máquinas *CNC – router* de três eixos.

5.2.3. Usinagens das peças de madeira serrada e chapas de OSB

A execução das usinagens das peças estruturais foi feita a partir do detalhamento realizado em *software* de manufatura digital, *Autodesk Inventor*. Os desenhos tridimensionais foram convertidos em arquivos bidimensionais contendo as instruções de operação para a *router* CNC. Como observado na Figura 5.3, cada peça de madeira serrada é representada por um arquivo tridimensional, a “tradução” desta informação para um formato bidimensional foi necessário para que a *Router CNC* de três eixos pudesse efetuar as operações de usinagem necessárias.

Figura 5.3 - Diagrama de resumos dos procedimentos adotados para usinagem das peças de madeira serrada e chapas de OSB. Fonte: elaborado pelo autor

Algumas usinagens não puderam ser executadas somente por uma única ferramenta, necessitando a sobreposição de operações. A Tabela 5.4 sintetiza os tipos de usinagem e as operações necessárias para sua execução, bem como as ferramentas empregadas em cada caso.

Tabela 5.4 - Operações de usinagem e ferramentas utilizadas. Fonte: elaborado pelo autor

		Tipos de usinagem						
		1	2	3	4	5	6	7

Total usinagens		352	408	42	24	24	20	95
Ferramentas Utilizadas	Broca 6mm							
	Broca rebaixada 11/5mm							
	Fresa c/ ponta 60° e diâmetro 12,7mm							
	Fresa topo 15mm							

A compreensão dos meios produtivos empregados na etapa de projeto permitiu ganhos significativos durante todas as etapas de produção da estrutura do protótipo. Um exemplo deste raciocínio pode ser observado na usinagem dos furos para aparafusar as chapas de conexão dos painéis (Tipo de usinagem 1, na Tabela 5.4). Neste caso, era preciso efetuar furos de 5mm de diâmetro com profundidade de 30mm, e depois efetuar um rebaixo de 5mm de profundidade com 11mm de diâmetro na abertura de furo, permitindo que a cabeça do parafuso não criasse uma saliência na superfície da madeira

Para tanto, foi utilizado uma broca de aço rápido com diâmetro de 11 e 5mm. Essa ferramenta consiste em uma broca de 11mm padrão com os 25mm iniciais (ponta) reduzidos para um diâmetro de 5mm. Isso possibilitou executar a operação com uma única ferramenta ao invés de duas brocas. Dessa forma, foi possível economizar recursos, tendo em vista que o tempo de troca de uma broca por outra é contabilizado no custo de utilização da *Router CNC de três eixos*.

Para as usinagens em madeira serrada foram utilizadas as seguintes ferramentas:

- Broca de aço rápido 6mm

- Broca de aço rápido rebaixada 11/5mm (desenvolvida para o protótipo)
- Fresa com ponta 60°, diâmetro 12,7mm e pinça para fresa
- Fresa topo em aço rápido 15mm

Figura 5.4 - Ferramentas utilizadas para usinagem das peças de madeira serrada, de cima para baixo: Fresa com ponta 60° e pinça para fresa, broca de aço rápido de 6mm e broca de aço rápido rebaixada 11/5mm. Fonte: Camilla Almeida

As operações de usinagem em *router CNC* de três eixos foram realizadas utilizando o equipamento cedido por uma empresa patrocinadora da produção do protótipo Ekó House, cuja área de atuação profissional principal consiste na execução de ambientes de cenografia e estandes. A utilização principal da *router CNC* de três eixos é destinada à usinagem de chapas de *MDF*. Desta forma, não existe a necessidade de utilização do equipamento com materiais de grandes espessuras, as chapas usualmente chegam a 30mm de espessura. Porém, no caso da produção da estrutura do protótipo foi necessário usinar peças com espessuras que variavam de 30mm a 200mm.

Sendo assim, foi possível utilizar a *router CNC* em todas as peças cuja espessura não ultrapassasse 90mm. Essa dimensão também serviu de limite ao quanto uma broca poderia entrar em uma peça de madeira serrada, pois quanto maior a profundidade, maior a vibração a que a ferramenta é submetida, podendo ocasionar o rompimento da broca.

Figura 5.5 - Usinagem em router CNC de uma peça de madeira serrada. Fonte: autor

As peças cuja espessura ultrapassa 90mm foram usinadas em uma furadeira horizontal de bancada, o que corresponde a todas as peças com espessura de 200mm das vigas dos painéis horizontais e as peças de 100x100mm dos painéis verticais. Totalizando 36 peças de madeira serrada.

A furadeira horizontal permite movimentar a peça tanto no plano horizontal quanto no vertical, com o ajuste da mesa em relação à broca (Figura 5.6).

Figura 5.6 - Operação da furadeira horizontal (esquerda). Diagrama de movimentação da furadeira horizontal (direita). Fonte: elaborado pelo autor

A movimentação no plano horizontal e vertical é feito manualmente pelo operador do equipamento, dessa forma, o grau de precisão é muito menor do que o obtido pelo uso da *router CNC* de três eixos. Para contornar esse problema, as usinagens nas peças de madeira serrada dos painéis verticais foram majoradas, ou seja, as dimensões dos rasgos executados foram maiores do que as definidas em projeto. Dessa forma, o tempo de operação do equipamento foi maior do que o planejado, porém evitou problemas de montagem da estrutura do protótipo.

A usinagem das vigas de madeira serrada (peças com 60x200mm de seção transversal) exige um grau de precisão elevado, pois guiam o posicionamento dos painéis verticais da estrutura do protótipo. Dessa forma, foi preciso desenvolver procedimentos que minimizassem os possíveis desvios dimensionais provenientes do processo de usinagem dessas peças.

A furadeira horizontal de bancada possui um limitador de movimento que define o quanto a broca avança em direção à peça a ser trabalhada. Com este recurso é possível definir a profundidade do furo que a broca realiza.

Outro dispositivo existente permite limitar o movimento perpendicular da mesa em relação à direção de perfuração da broca. Com o uso desse recurso, foi possível delimitar o movimento da broca em 60mm (dimensão dos rasgos de encaixe das chapas de ligação entre painéis), no caso dos rasgos com 120mm, a proposta foi executar duas vezes a operação. Dessa maneira, não foi preciso ajustar o limite de movimento da mesa.

O posicionamento da peça de madeira serrada na mesa da furadeira horizontal de bancada é de grande importância, pois é este fator que garante o correto posicionamento do rasgo em relação à peça. Apesar de não ser possível executar esses rasgos na *router CNC*, devido às limitações dimensionais da peça, o equipamento foi utilizado para executar um furo guia na face perpendicular ao rasgo (Figura 5.7).

Na mesa da furadeira horizontal de bancada foi instalado um pino (removível) com a dimensão do furo executado nas peças de madeira serrada pela *router CNC*. Este pino foi posicionado no eixo da broca. Dessa forma, através dos limitadores de movimento da mesa, a broca só pode ser deslocada 30mm para cada lado do pino, totalizando os 60mm de rasgo. No caso dos rasgos de 120mm, foram executados dois furos guia na face da peça de madeira serrada.

Figura 5.7 – Furo guia executado na router CNC utilizado como guia de posicionamento para garantir precisão na usinagem dos rasgos de conexão de painéis na furadeira de horizontal. Fonte: elaborado pelo autor

Com as operações definidas, foi possível executar a usinagem de todas as peças de madeira serrada utilizando a *router CNC* e a furadeira horizontal de bancada.

O contraventamento dos painéis estruturais é composto por chapas de partículas aglomeradas do tipo *OSB* (*Oriented Strand Board*). No projeto para produção a equipe buscou otimizar o consumo de material através do melhor aproveitamento das chapas no processo de corte, utilizando softwares com de otimização de cortes em chapas planas (amplamente utilizados no setor industrial).

Na etapa de projeto de produção, foi definido que as chapas de *OSB* seriam cortadas em *router CNC*, otimizando o tempo de produção da estrutura. A partir da decisão de utilizar um equipamento de Comando Numérico Computadorizado para efetuar operações de corte, a equipe de projeto também decidiu incorporar nesta etapa do processo produtivo a usinagem de todos os furos dos parafusos de fixação nas chapas de *OSB*. Desta forma, o tempo de montagem do painel estrutural pode ser reduzido, pois a operação de furo da chapa seria incorporada por um processo computadorizado, liberando do montador a função de posicionar corretamente o furo de cada parafuso (tendo em vista que este já estaria feito e serviria de guia para parafusar a chapa de contraventamento no quadro de madeira).

Além da realização dos furos para fixação dos painéis de *OSB* nos quadros de madeira, foi também feita a gravação de um código de identificação em baixo relevo em cada peça, permitindo o posicionamento de cada peça de *OSB* no quadro de madeira.

5.2.4. Fabricação dos painéis estruturais

A partir do momento em que as peças de madeira serrada e as chapas de *OSB* que compõem os painéis da estrutura do protótipo ficaram prontas, a equipe de produção iniciou as operações relativas à montagem dos painéis verticais ainda na empresa de cenografia.

A montagem dos painéis verticais (paredes) foi planejada para ser realizada dentro das instalações da empresa cenográfica, devido a disponibilidade de dois funcionários com experiência em montagem para auxiliar a equipe de pesquisadores do projeto. Em relação aos painéis horizontais, foi decidido fabricá-los diretamente no canteiro de montagem da estrutura do protótipo (IEE-USP). Esta decisão foi tomada tendo em vista a elevada massa que cada um dos seis painéis horizontais possui, sendo assim a logística de transportá-los da empresa de cenografia ao canteiro de montagem seria muito complexa e de elevado custo, pois seria necessária a locação de um caminhão guindauto (comumente conhecido como caminhão *munck*) para esta atividade.

Sendo assim, é feita a distinção entre a etapa de montagem dos painéis de verticais (paredes) e horizontais (piso e cobertura) em razão das diferenças operacionais exigidas tendo em vista as dimensões físicas de cada tipo de painel. No caso dos painéis de parede, foi possível realizar toda a operação de fabricação dentro de uma marcenaria. Já os painéis de piso e cobertura foram fabricados diretamente no canteiro de montagem do protótipo, dessa forma, eliminando a necessidade de transportar grandes painéis nesta etapa.

5.2.4.1 Montagem dos painéis verticais

Materiais e equipamentos

Para a execução dos painéis verticais foram utilizadas as peças de madeira serrada previamente cortadas e usinadas em *router CNC* de três eixos, chapas de *OSB* também usinadas na *router CNC* de três eixos, cantoneiras em aço carbono galvanizado e parafusos auto perfurantes destinados a madeiras de médias e altas durezas nas bitolas 4,5mm e 6mm. Os equipamentos utilizados foram parafusadeira, furadeira e adesivo selante monocomponente de alto desempenho.

O projeto da Ekó House possui uma distinção entre as áreas de vivência e os espaços técnicos, responsáveis pelo funcionamento da residência. O gabinete técnico abriga

equipamentos do sistema de conversão de energia fotovoltaica, condicionamento do ar interno (HVAC *heating, ventilation and air conditioning*), aquecimento de água, instalações elétricas, hidráulicas e automação predial. Por estar localizado externamente ao núcleo condicionado, existe uma conexão física entre os dois ambientes, através da qual as instalações entram no ambiente interno (envolto pela estrutura de madeira pré-fabricada). Esta conexão é feita somente por dois painéis verticais, um localizado na cozinha e outro no banheiro (M1P2b e M1P4a).

Estes dois painéis apresentam grande complexidade, pois além de possuírem função estrutural, precisam permitir a conexão entre o gabinete técnico e o ambiente interno da casa, e ao mesmo tempo não prejudicar o isolamento térmico e acústico da envoltória, fundamental no ganho de eficiência energética do protótipo.

Tendo em vista tal complexidade, decidiu-se finalizar estes painéis no próprio canteiro de montagem (IEE-USP), onde foi possível compatibilizar fisicamente essas instalações e a estrutura do protótipo. Para tanto, a equipe de produção decidiu somente colar e parafusar somente uma das faces dos painéis verticais (face interna ao protótipo), deixando as chapas do lado externo somente parafusadas. Dessa forma, os painéis foram finalizados no canteiro de montagem na USP, onde foram instalados o isolamento térmico e os demais componentes dos sistemas prediais.

A proposta de trabalhar com uma estrutura pré-fabricada partiu da necessidade de produzir painéis com elevado grau de precisão dimensional, possibilitando sucessivas montagens e desmontagens às quais o protótipo deveria ser submetido, mantendo suas propriedades funcionais intactas (conectividade e desempenho de vedação). Essa premissa resultou em um cuidadoso processo de planejamento dos procedimentos adotados em todas as fases de produção do protótipo.

Sendo assim, o grau de precisão obtido na usinagem de cada peça de madeira serrada e chapa OSB foi mantido na montagem dos painéis estruturais. Para tanto, foi desenvolvido um gabarito de montagem para os painéis verticais. Este equipamento consiste em uma mesa de montagem, com guias que garantem o esquadro e a mesma dimensão (altura) dos painéis verticais (Figura 4.8).

O dispositivo foi montado a partir da estrutura dos decks do protótipo. São plataformas modulares em alumínio (utilizadas em palcos e passarelas) com sistema apoios telescópicos que permitem uma montagem rápida e ajustes precisos. O deck do protótipo utiliza módulos de 2,00x1,00m e 1,00x1,00mm. Para a montagem do gabarito foram utilizados dois quatro

módulos de 2,00x1,00m e um módulo de 1,00x1,00m, compondo uma mesa com 4,00x4,00m. Sobre a estrutura de alumínio foram apoiadas chapas de *OSB*, configurando uma superfície plana para a montagem dos painéis.

Sobre a mesa foram parafusados dois perfis L em aço (60x60mm) paralelos entre si a uma distância de 2870mm (altura de todos os painéis verticais). Perpendicularmente a esses perfis foi parafusado um terceiro perfil L (60x60mm), com a finalidade de garantir o esquadro durante a montagem (Figura 5.8).

Figura 5.8 - Dispositivo de montagem para painéis verticais. Fonte: elaborado pelo autor

Além de desenvolver um dispositivo para garantir a precisão dos painéis verticais, foram planejados processos que auxiliassem as operações de montagem, evitando atividades desnecessárias que pudessem comprometer tanto a qualidade do produto, quanto ocasionar atrasos no cronograma proposto. Dessa forma, o posicionamento dos materiais e ferramentas na oficina de sempre foi planejado de forma a facilitar as operações a serem desenvolvidas e evitar riscos desnecessários às pessoas envolvidas.

As peças de madeira serrada e as chapas de *OSB*, ambos já usinados, foram armazenados de acordo com os painéis a qual pertencem. Fisicamente, o gabarito de montagem foi locado em uma posição central da área destinada à montagem. De um lado ficaram armazenados as peças de madeira serrada de acordo com os painéis verticais, e do outro foram empilhadas as chapas de *OSB*, organizadas conforme seu uso. As cantoneiras em aço carbono galvanizado e os parafusos também foram agrupados juntamente com as peças de madeira conforme os painéis estruturais.

Quadro 5.1 - Sequência de montagem dos painéis verticais. Fonte: elaborado pelo autor

1. Montar quadro de madeira serrada

Materiais	Ferramentas/Equipamentos
Peças em madeira serrada, cantoneiras em aço carbono galvanizado, parafusos autoperfurantes, brocas 3mm	Dispositivo de montagem, grampos, furadeira e parafusadeira
Descrição da atividade Posicionar as peças de madeira serrada sobre o gabarito de montagem de acordo com o layout do projeto. Unir as peças de madeira serrada utilizando as cantoneiras em aço carbono galvanizado.	
Dificuldades encontradas Foi necessário utilizar grampos para fixar as peças de madeira no gabarito devido ao arqueamento e para evitar movimentações durante a montagem. Foi especificado o uso de parafuso autoperfurante para fixar as cantoneiras nas peças de madeira serrada. Porém, durante a montagem, constatou-se a dificuldade em parafusar diretamente na madeira, mesmo que a especificação do parafuso utilizado fosse para madeiras duras. Dessa forma, foi necessário realizar furos na madeira antes de fixar os parafusos. Isso ocasionou um consumo adicional de brocas e maior tempo de montagem.

2. Fixar chapas de OSB

Materiais	Ferramentas/Equipamentos
Quadro de madeira serrada, chapas de OSB, parafusos e adesivo de alto desempenho.	Furadeira, parafusadeira, espátula, pano úmido, aplicador para adesivo de alto desempenho.
Descrição da atividade As chapas da face interna (interior do protótipo) dos painéis verticais foram parafusadas e coladas. Já as chapas da face externa somente parafusadas. Sequência de operação:	

1. Posicionar a face do painel que fica voltada ao interior do protótipo para cima.
2. Posicionar sobre o quadro de madeira as chapas de OSB.
3. Furar o quadro de madeira a partir dos furos previamente usinados pela router CNC nas chapas de OSB.
4. Remover as chapas de OSB do painel.
5. Com um pano úmido limpar o quadro de madeira e as chapas de OSB.
6. Aplicar sobre o quadro de madeira o adesivo de alto desempenho.
7. Posicionar as chapas de OSB sobre o quadro de madeira
8. Parafusar as chapas de OSB.
9. Repetir a operação na outra face, porém sem a aplicação do adesivo.

Dificuldades encontradas

Da mesma forma que não foi possível fixar diretamente os parafusos autoperfurantes durante a instalação das cantoneiras, foi necessário furar a madeira serrada para parafusar a chapa de OSB.

Como descrito no Quadro 5.1, algumas dificuldades foram identificadas durante o processo de montagem dos painéis verticais.

A presença de peças arqueadas foi uma preocupação constante durante a montagem de todos os quadros de madeira, pois poderia ocasionar diferença nas dimensões dos painéis, que por sua vez poderiam dificultar a montagem da estrutura completa do protótipo. Para tentar solucionar este problema, as peças foram fixadas nos perfis L do gabarito através do uso de grampos de marceneiro (Figura 5.9), esta solução permitiu diminuir o arqueamento das peças além de evitar movimentações no quadro durante a montagem.

Figura 5.9 - Sargentos fixados junto à estrutura do dispositivo de montagem. Fonte: autor

Como apontado no Quadro 5.1, houve dificuldade na fixação das cantoneiras em aço nas peças de madeira serrada. O cumaru é uma madeira de alta densidade e de difícil perfuração (IPT, 2012), tomando por base esse conhecimento, foi especificado o uso de parafuso auto perfurante específico para madeiras de médias e altas densidades. O parafuso especificado apresenta uma ponta broca, rosca específica para madeiras duras (que produz menor deslocamento de material e reduz o risco de formação de trincas na madeira) e fenda hexalobular (que garante maior aderência entre o parafuso e a ferramenta de fixação).

Apesar do cuidado na especificação de um parafuso que atendesse as demandas técnicas necessárias ao projeto e à maneira de execução proposta, a experiência mostrou que o planejado não se mostrou a melhor alternativa. Dessa forma, decidiu-se, durante a montagem do primeiro painel vertical, que fosse realizado um furo com uma broca de 3mm de diâmetro sempre antes de fixar um parafuso nas peças em cumaru.

A inclusão de uma nova operação no processo de montagem dos painéis aumentou o tempo de execução. Outro aspecto importante a ser salientado é o elevado consumo de brocas de 3mm que o processo de montagem dos painéis exigiu. Devido a elevada dureza da madeira, elas sofreram um aquecimento muito rápido, esse fator, aliado a eventuais movimentos laterais da furadeira, ocasionaram um grande número de rupturas das brocas.

Figura 5.10 – Montagem do quadro de madeira serrada no dispositivo de montagem. Fonte: autor

Figura 5.11 - Painéis verticais finalizados. Fonte: autor

Em duas semanas foram montados os vinte e um painéis verticais da estrutura de madeira do protótipo, sem a instalação do isolamento térmico e acústico e da barreira de vapor. É importante observar que este tempo inclui uma fase de aprendizado e ajuste do processo,

onde os primeiros painéis foram executados de forma a treinar a equipe para a montagem dos demais.

Ao finalizar a montagem dos painéis verticais nas dependências da empresa de cenografia, a montagem da estrutura do protótipo passou a ser toda realizada no canteiro no IEE-USP.

A primeira atividade a ser realizada, após o transporte de todo o material ao IEE-USP, foi a instalação do isolante térmico dos painéis estruturais. O protótipo foi projetado com uma camada dupla de isolamento, composto por uma camada de 60mm de lã-de-vidro e uma camada de 60mm de manta de isolante de alto desempenho à base de sílica amorfa sintética.

A camada de 60mm em lã-de-vidro é instalada no interior dos painéis estruturais verticais. Para efetuar a colocação do material isolante, as chapas em *OSB* que não foram coladas na montagem do painel são desparafusadas para permitir o acesso ao seu interior.

O feltro em lã de vidro utilizado nos painéis estruturais verticais possui espessura de 75mm, 1,20m de largura e 10,0m de comprimento. Dessa forma, foi preciso cortar o feltro em porções com dimensões conforme as cavidades internas dos painéis. A lã de vidro é flexível, sendo assim, apesar da espessura de 75mm foi possível acomodar o material no interior dos painéis (60mm de espaço).

A camada de 60mm de isolante de alto desempenho à base de sílica amorfa sintética é instalada no interior dos painéis de revestimento externo, fixados à estrutura portante dos painéis verticais.

5.2.4.2. Montagem dos painéis horizontais

Materiais e equipamentos

Para a execução dos painéis horizontais foram utilizadas as peças de madeira serrada previamente cortadas e usinadas em *router CNC* de três eixos, chapas de *OSB* também usinadas na *router CNC* de três eixos, cantoneiras em aço carbono galvanizado, fundações metálicas em aço galvanizado e parafusos auto perfurantes destinados a madeiras de médias e altas durezas nas bitolas 4,5mm e 6mm. Os equipamentos utilizados foram parafusadeira, furadeira, adesivo selante monocomponente, nível a laser e ponte rolante de pórtico com capacidade de carga de 2.000kg.

A fabricação dos painéis horizontais foi realizada no canteiro no IEE-USP, local de montagem de todo o protótipo Ekó House. Essa etapa foi realizada após a fabricação de todos os painéis verticais, sendo assim, a equipe já possuía alguma experiência no trabalho de montagem dos painéis estruturais.

A sequência de montagem e o posicionamento dos painéis horizontais no canteiro foram planejados cuidadosamente, tendo em vista a dificuldade em movimentá-los quando montados.

Devido às limitações de espaço sob a tenda e ao fato de que a movimentação desses painéis é uma atividade complexa e de risco, decidiu-se montar os painéis de piso na posição final do protótipo. Ou seja, pré-fabricar esses painéis já posicionados sobre as fundações da estrutura.

É importante observar que, por se tratar de um projeto de pesquisa e desenvolvimento, algumas decisões feitas durante o processo de produção do protótipo Ekó House tiveram caráter experimental. Foram tomadas como forma de validar hipóteses, gerando conhecimento.

Seguindo essa linha de raciocínio, decidiu-se instalar os painéis verticais do módulo 1 logo após a montagem do piso desse módulo. Essa decisão foi feita de forma a testar o processo de montagem projetado. Porém, de maneira a sistematizar as informações, a montagem da estrutura completa será descrita após a descrição da montagem de todos os painéis horizontais.

Cada painel horizontal é formado por vigas de bordo e vigas transversais de madeira serrada ligadas entre si por peças de aço galvanizado que também têm a função de conectar o painel horizontal adjacente.

Todas as vigas transversais foram montadas em conjunto, de forma a garantir uniformidade dimensional entre elas. Para isso, foram utilizados dispositivos semelhantes aos desenvolvidos para a montagem dos painéis verticais. As vigas transversais são compostas por duas peças de madeira serrada com seção transversal de 60x200mm e 2150mm de comprimento nos painéis horizontais do módulo 1 e 1850mm de comprimentos nos painéis horizontais dos módulos 2 e 3. Elas são unidas por duas peças de ligação feitas em aço carbono galvanizado e parafusos auto perfurantes para madeiras de média e alta dureza. Essas peças de ligação possuem também função de conectar os painéis horizontais entre si, além de possuírem pontos para fixação de olhais aparafusáveis DIN 580 3/8", utilizados no içamento do painel.

Devido a diferença nas dimensões dos painéis horizontais, as vigas transversais não possuem todas o mesmo comprimento (1850mm e 2150mm). Sendo assim, foi preciso utilizar um gabarito de montagem que pudesse se adaptar ao tipo de viga transversal a ser montada. A solução adotada foi uma mesa com uma guia fixa em uma das pontas e outra que pudesse ser fixada em dois pontos diferentes (1850mm e 2150mm da guia fixa).

Para as guias foram utilizadas cantoneiras de aço carbono com 60x60mm. A guia fixa foi parafusada na mesa (feita sobre a estrutura de alumínio do deck, com chapas em OSB), enquanto a guia variável foi fixada utilizando grampos em peças de madeira parafusadas na mesa. A utilização de grampos permitiu o movimento longitudinal da guia ao longo da mesa, possibilitando a montagem de vigas transversais de diferentes dimensões.

Durante a montagem da primeira viga transversal foi constatado um problema no projeto do dispositivo, as cantoneiras possuem dimensão muito pequena para garantir que a viga fique no esquadro e na dimensão desejada. Isso ocorre pois as vigas possuem altura de 200mm, e a altura de 60mm das cantoneiras só conseguem garantir a dimensão na base da viga transversal.

Para corrigir esse problema, foi necessário aplicar uma força de compressão na viga transversal na face superior da peça. As peças de conexão das vigas duplas apresentam orifícios em suas faces, paralelos entre si³². No posicionamento das peças sobre o gabarito, os furos foram deixados na face superior da viga, dessa forma, seria possível aplicar essa força de compressão através dos orifícios.

Foi utilizado um dispositivo composto por uma barra de aço com uma chapa soldada em uma das pontas, e na outra, uma barra roscada (Figura 5.12). Dessa forma, foi possível aplicar uma compressão nas vigas transversais de forma uniforme (na porção inferior e superior da peça).

³² Estes furos foram projetados originalmente para a passagem de cabos de protensão. O projeto estrutural inicial (Casa Solar Flex) previa que os painéis horizontais fossem protendidos, fazendo com que os três painéis (no piso e na cobertura) trabalhassem como um único painel. No projeto da estrutura da Ekó House o vínculo entre as lajes horizontais foi feito por meio de alterações no desenho das peças de ligação, porém, esses furos já haviam sido executados nessas peças.

Figura 5.12 - Dispositivo empregado para garantir o esquadro e dimensões das vigas transversais. Fonte: autor

Outro problema identificado na montagem da primeira viga transversal foi em relação as peças de ligação metálica que unem as duas peças de madeira serrada. Essas ligações são compostas por chapas de aço carbono soldadas umas nas outras. As linhas de solda feitas dentro da cavidade de encaixe das vigas de madeira serrada agregaram alguns milímetros à sua dimensão. Dessa forma, não foi possível montar as peças com a dimensão de projeto. Para solucionar o problema, foi preciso efetuar cortes nas bordas de topo das vigas de madeira serrada.

Após as devidas correções nos procedimentos de montagem, foram produzidas as trinta vigas duplas dos painéis horizontais.

Os painéis de piso foram fabricados sobre as fundações metálicas, diretamente no local de montagem do protótipo. Dessa forma, não foi necessário movimentar esses painéis durante a primeira montagem da Ekó House. No caso dos painéis de cobertura não foi possível evitar sua movimentação durante o processo de montagem, pois foram montados no solo.

A sequência de produção dos painéis horizontais foi a seguinte:

- Montagem do painel de piso do módulo 1 (M1HP);
- Montagem do painel de cobertura do módulo 1 sobre o painel de piso do módulo 1;
- Montagem do painel de piso do módulo 2 encaixado no painel de piso do módulo 1;
- Montagem do painel de piso do módulo 3 encaixado no painel de piso do módulo 2;

- Montagem do painel de cobertura do módulo 2 sobre o solo;
- Montagem do painel de cobertura do módulo 3 encaixado no painel de cobertura do módulo 2.

A execução do painel da cobertura do módulo 1 sobre o painel de piso no início do processo foi realizado como forma de verificar a precisão das usinagens e cortes das peças de madeira serrada, garantindo que não houvessem problemas na instalação dos painéis verticais na estrutura protótipo. No caso dos painéis de cobertura dos módulos 2 e 3, estes não foram montados sobre os respectivos painéis de piso pois não seria possível içá-los com a ponte rolante, pois o vão entre apoios do equipamento é de 4,00m, enquanto que os painéis de cobertura montados lado a lado ocupam um espaço de 6,00x8,60m.

Quadro 5.2 - Sequência de montagem dos painéis horizontais de piso. Fonte: elaborado pelo autor

1. Posicionamento das chapas de fundação

Materiais	Ferramentas/Equipamentos
Sapatas em aço galvanizado	Trena
Descrição da atividade Os painéis horizontais de piso são montados em sua posição de instalação. Dessa forma, a locação é feita a partir do posicionamento das chapas metálicas da fundação.	
Dificuldades encontradas O posicionamento das chapas em aço galvanizado da fundação foi efetuado manualmente por duas pessoas. Porém, a massa elevada de cada peça (60kg) dificultou a operação.

2. Montagem do quadro de madeira serrada

Materiais	Ferramentas/Equipamentos
Peças em madeira serrada, cantoneiras em aço carbono galvanizado, barra roscada da fundação metálica.	Trena, nível a laser, parafusadeira, furadeira.

Descrição da atividade

A montagem dos quadros de madeira serrada foi executada a partir das vigas que possuem os suportes para as barras roscadas da fundação. Nessas peças, foram inseridas as barras roscadas com a dimensão definida a partir da medição do desnível do terreno com um nível a laser.

Essas vigas foram encaixadas nas chapas em aço galvanizado e serviram de guia para o restante da montagem, pois as demais peças de madeira serrada foram sendo fixadas à estas peças.

Dificuldades encontradas

Sem um gabarito de montagem, a checagem de esquadro e nivelamento das peças apresenta menor precisão. Dessa forma, algumas vezes foi necessário realizar ajustes ou refazer operações.

3. Fixas chapas de OSB da face inferior**Materiais**

Chapas de OSB, parafusos autoperfurantes, brocas 4mm, adesivo de alto desempenho.

Ferramentas/Equipamentos

Parafusadeira, furadeira, grampos, aplicador (adesivo), pano úmido.

Descrição da atividade

Com o quadro de madeira serrada montado foram fixadas as chapas de contraventamento da face inferior do painel.

Primeiramente as chapas foram posicionados sob o quadro de madeira serrada e fixados utilizando grampos.

Em seguida, foram executados os furos na madeira serrada, utilizando os furos das chapas de OSB como guia.

Após, as chapas de OSB e a superfície das madeiras serradas foram limpas com um pano úmido, para a aplicação do adesivo de alto desempenho.

Novamente as chapas foram posicionadas e presas com sargentos e então todos os parafusos foram fixados.

Dificuldades encontradas

Inicialmente fora especificado o uso de parafusos autoperfurantes 4,5mm. Porém, devido as características da operação de montagem (por baixo do painel), decidiu utilizar um parafuso de 6mm pois a fixação era mais firme.

A montagem na face inferior do painel apresentou dificuldades em determinadas situações em razão da área de trabalho abaixo do painel ser reduzida devido ao desnível do terreno.

4. Preencher painel com isolamento térmico

Materiais	Ferramentas/Equipamentos
Feltro FSB 12x75 e Feltro FSB 12x50 (densidade 12kg/m ³)	Estilete.
<p>Descrição da atividade</p> <p>Na montagem dos painéis verticais, a instalação da lâ-de-vidro foi efetuada após a finalização do painel, no caso dos painéis horizontais, o isolamento foi instalado durante sua fabricação.</p> <p>Para preencher a cavidade de 200mm foram utilizadas duas camadas de feltro FSB com 75mm e uma camada de 50mm.</p>	
<p>Dificuldades encontradas</p> <p>Não foi identificado nenhuma dificuldade relevante.</p>

5. Fixar chapas de OSB da face superior

Materiais	Ferramentas/Equipamentos
Chapas de OSB, parafusos autoperfurantes, brocas 4mm, adesivo de alto desempenho	Parafusadeira, furadeira, grampos, aplicador (adesivo), pano úmido.
<p>Descrição da atividade</p> <p>Após a instalação do isolamento térmico e acústico foram instaladas as chapas de OSB da face superior do painel.</p>	

Primeiramente as chapas foram posicionadas sobre o quadro de madeira serrada, assim, utilizando os furos como guias, foram executados os furos nas madeiras serradas.

Após, as chapas de OSB e a superfície das madeiras serradas foram limpas com um pano úmido, para a aplicação do adesivo de alto desempenho.

Novamente as chapas foram posicionadas e então todos os parafusos foram fixados, finalizando a montagem do painel.

Dificuldades encontradas

Não foi identificado nenhuma dificuldade relevante.

A falta de um gabarito de montagem dificultou a equipe em atingir a mesma precisão dimensional obtida na produção dos painéis verticais. Se por um lado, a montagem diretamente sobre as fundações serviu de teste para o sistema proposto, de outro, criou uma variável a mais a ser considerada: a posição vertical das peças ao serem montadas. No caso dos painéis verticais a superfície plana e nivelada do gabarito de montagem solucionou esta preocupação. Esta preocupação foi confirmada durante a montagem, pois foi preciso efetuar ajustes no nível das sapatas quando foram constatados desníveis nos quadros de madeira serrada.

Figura 5.13 - Montagem dos painéis horizontais do módulo 1, na foto é possível observar o quadro de madeira serrada do painel de cobertura sobre o de piso. Fonte: Lucas Sabino Dias

Após a montagem do quadro de madeira serrada foi preciso fixar as chapas de contraventamento em *OSB*. Porém, diferentemente dos painéis verticais, onde foi possível movimentar o quadro para a colocação do contraventamento, os quadros de madeira serrada dos painéis horizontais não puderam ser movimentados. Dessa forma, foi necessário fixar as chapas da parte inferior do painel por baixo do quadro de madeira serrada. Obrigando a equipe a trabalhar debaixo do painel em um espaço de 50cm (distância média do painel de piso e o solo).

Após finalizar a montagem dos três painéis horizontais de piso, foram fabricados os dois painéis horizontais de cobertura restantes. Da mesma forma que os painéis de piso, os painéis horizontais de cobertura foram montados a partir do anterior, utilizando o sistema de encaixe como guia. Dessa forma, foi possível garantir que os encaixes estivessem alinhados no momento da montagem da estrutura.

A sequência de trabalho de montagem dos painéis de cobertura é descrita no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 - Sequência de montagem dos painéis horizontais de cobertura. Fonte: elaborado pelo autor

1. Montagem do quadro de madeira serrada

Materiais		Ferramentas/Equipamentos	
Peças em madeira serrada, cantoneiras em aço carbono galvanizado, barra roscada da fundação metálica.		Trena, nível a laser, parafusadeira, furadeira.	
Módulo 1 (M1HC)	Descrição da atividade A montagem do quadro de madeira serrada foi executada sobre o painel horizontal de piso do módulo 1. Primeiramente as peças de madeira foram posicionadas sobre o painel de piso, verificando o alinhamento das peças e dos rasgos para encaixe dos painéis verticais. Com as peças posicionadas, foram fixadas entre si parafusando as cantoneiras em aço carbono galvanizado.		
	Dificuldades encontradas Não foi identificado nenhuma dificuldade relevante.		
Módulos 2 e 3 (M2HC e M3HC)	Descrição da atividade Na área de montagem, o painel de cobertura do módulo anterior foi posicionado sobre peças de madeira e nivelado. O sistema de encaixe entre painéis horizontais, localizado nas vigas transversais, foi utilizado como referência de posicionamento das peças de madeira serrada do		

	painel. Após o posicionamento das peças, estas foram fixadas parafusando as cantoneiras em aço carbono galvanizado.
	Dificuldades encontradas Não foi identificado nenhuma dificuldade relevante.
M1HC	M2HC e M3HC

2. Fixar chapas de OSB da face superior

Materiais Chapas de OSB, parafusos autoperfurantes, brocas 4mm, adesivo de alto desempenho.	Ferramentas/Equipamentos Parafusadeira, furadeira, grampos, aplicador (adesivo), pano úmido.
Descrição da atividade Após a instalação do isolamento térmico e acústico foram instaladas as chapas de OSB da face superior do painel. Primeiramente as chapas foram posicionadas sobre o quadro de madeira serrada, assim, utilizando os furos como guias, foram executados os furos nas madeiras serradas. Após, as chapas de OSB e a superfície das madeiras serradas foram limpas com um pano úmido, para a aplicação do adesivo de alto desempenho. Novamente as chapas foram posicionadas e então todos os parafusos foram fixados, finalizando a montagem do painel.	
Dificuldades encontradas Não foi identificado nenhuma dificuldade relevante.

3. Reposicionar o painel

Materiais Cintas catraca.	Ferramentas/Equipamentos Ponte rolante de pórtico
Descrição da atividade Após fixar as chapas de OSB na face superior, foi preciso reposicionar o painel, de maneira a possibilitar o acesso à cavidade interior do quadro de madeira, para instalar o isolamento térmico e acústico. O painel foi preso ao gancho da ponte rolante de pórtico utilizando três cintas catraca em poliéster, fixadas em olhais aparafusáveis DIN 580 3/8", inseridos nos pontos de içamento de uma das faces do painel. Assim, foi possível girar o painel, permitindo o acesso à cavidade interna.	
Dificuldades encontradas Não foi identificado nenhuma dificuldade relevante.

4. Preencher painel com isolamento térmico

Materiais Feltro FSB 12x75 e Feltro FSB 12x50 (densidade 12kg/m3).	Ferramentas/Equipamentos Estilete.
Descrição da atividade Para preencher a cavidade de 200mm foram utilizadas duas camadas de feltro FSB com 75mm e uma camada de 50mm.	
Dificuldades encontradas Não foi identificado nenhuma dificuldade relevante.

5. Fixar chapas de OSB da face inferior

Materiais

Chapas de OSB, parafusos autoperfurantes, brocas 4mm, adesivo de alto desempenho.

Ferramentas/Equipamentos

Parafusadeira, furadeira, grampos, aplicador (adesivo), pano úmido.

Descrição da atividade

Após a instalação do isolamento térmico e acústico foram instaladas as chapas de OSB da face inferior do painel (devido ao reposicionamento do painel, essa face está voltada para a parte superior do painel).

Primeiramente as chapas foram posicionadas sobre o quadro de madeira serrada, assim, utilizando os furos como guias, foram executados os furos nas madeiras serradas.

Após, as chapas de OSB e a superfície das madeiras serradas foram limpas com um pano úmido, para a aplicação do adesivo de alto desempenho.

Novamente as chapas foram posicionadas e então todos os parafusos foram fixados, finalizando a montagem do painel.

Dificuldades encontradas

Não foi identificado nenhuma dificuldade relevante.

Figura 5.14 - Movimentação do painel horizontal de cobertura durante a montagem (esquerda). Preenchimento do painel de horizontal de cobertura com lã de vidro (direita). Fonte: Fernanda Antonio

5.3. Processo de fabricação da estrutura do protótipo Ekó House

Com os painéis estruturais finalizados a próxima etapa no processo de fabricação foi a montagem da estrutura em painéis pré-fabricados em madeira.

A montagem da estrutura do protótipo foi executada em quatro etapas:

- Instalação dos painéis verticais;
- Instalação dos painéis horizontais de cobertura;
- Instalação da barreira de vapor
- Instalação dos sistemas prediais, esquadrias e revestimentos

As duas etapas finais não fazem parte do escopo de estudo deste trabalho, porém apresentam relevância no desenvolvimento do projeto e das atividades de produção da estrutura de madeira do protótipo. Dessa forma, são descritas, ainda que brevemente, para melhor compreensão do processo de produção.

5.3.1. Instalação dos painéis verticais

A instalação de cada painel vertical possui características particulares, porém, de maneira geral podem ser classificadas conforme o método de içamento: (a) mecânico, utilizando a ponte rolante de pórtico e; (b) manual, manuseio do painel manualmente pela equipe de montagem.

Figura 5.15 - Instalação painel vertical utilizando ponte rolante de pórtico. Fonte: Fernanda Antonio

Essa diferenciação ocorre devido a restrições operacionais no canteiro de montagem. A instalação utilizando a ponte rolante de pórtico é mais simples e exige menor esforço das pessoas envolvidas. Porém, só foi possível instalar os painéis do módulo 1 utilizando esse método.

Da mesma forma que não foi possível utilizar a ponte rolante de pórtico para montar os painéis de horizontais de cobertura sobre os respectivos painéis de piso, não foi possível instalar os painéis verticais do módulo 2 e 3 devido à falta de espaço para operar o equipamento. Dessa forma, esses painéis foram instalados manualmente.

No Quadro 5.4 são apresentados os procedimentos adotados na instalação dos painéis utilizando a ponte rolante de pórtico:

Quadro 5.4 - Sequência de operações para instalação dos painéis verticais utilizando ponte rolante de pórtico. Fonte: elaborado pelo autor

1. Içamento do painel vertical

Materiais	Ferramentas/Equipamentos
Painel vertical a ser instalado, cinta catraca, chapas de conexão para içamento.	Ponte rolante de pórtico
<p>Descrição da atividade</p> <p>O painel vertical a ser instalado foi manualmente posicionado sobre uma mesa de trabalho.</p> <p>No topo desses painéis existem rasgos destinados à fixação de chapas metálicas de conexão entre o painel vertical e o painel horizontal de cobertura. Utilizando este recurso, foram fabricadas chapas semelhantes às de conexão de painéis, porém uma porca soldada para fixar um parafuso olhal.</p> <p>Ainda sobre a mesa, também foram fixadas as chapas de conexão entre painéis.</p> <p>O içamento foi executado com duas pessoas guiando a movimentação do painel, enquanto um terceiro operou o motor da ponte rolante de pórtico.</p>	
<p>Dificuldades encontradas</p> <p>As chapas utilizadas para o içamento do painel vertical sofreram deformações devido aos esforços provenientes da operação.</p> <p>As chapas de ligação em aço galvanizado possuem seção de 3mm x 60mm. Os esforços de içamento foram aplicadas na direção de menor momento de inércia da seção da chapa, ocasionando assim sua deformação.</p> <p>Esta incidente não resultou em ruptura de nenhuma peça, porém este fato causou apreensão na equipe durante o procedimento.</p>

2. Posicionamento e fixação do painel vertical na estrutura

Materiais Painel vertical a ser instalado, chapas de conexão em aço galvanizado, parafusos autoperfurantes	Ferramentas/Equipamentos Ponte rolante de pórtico, parafusadeira.
Descrição da atividade <p>A movimentação do painel para o local de instalação foi feita por meio da movimentação da ponte rolante de pórtico. Para tanto, foi necessário quatro pessoas para movimentar o equipamento até o local desejado.</p> <p>As chapas em aço galvanizado de conexão entre painéis foram utilizadas como guias para o posicionamento dos painéis verticais. O rasgo por onde a chapa é inserida possui abertura em forma de funil, isto guia as peças metálicas e consequentemente o painel.</p> <p>Com o painel posicionado sobre seu local de instalação, o operador do equipamento desceu o painel até as chapas de conexão inferiores encaixarem nos rasgos do painel horizontal de piso. Todo o ajuste e posicionamento do painel vertical foi feito manualmente. Após o painel vertical estar corretamente posicionado, as chapas foram parafusadas ao painel vertical adjacente (excetuando o primeiro painel).</p>	
Dificuldades encontradas Alguns painéis verticais apresentaram variações dimensionais em relação aos valores de projeto, devido ao arqueamento de alguns caibros utilizados. Isto ocasionou problemas no seu encaixe à estrutura. Dessa forma, durante a montagem foi necessário realizar ajustes, como a compressão de painéis já instalados por meio de cintas com catraca.

3. Fixar escoras de segurança

Materiais Peças de madeira serrada e cintas catraca.	Ferramentas/Equipamentos -
--	--

Descrição da atividade

Após a instalação de cada painel vertical, foi preciso executar dispositivos de segurança que evitassem a sua queda antes de finalizar a montagem da estrutura.

As escoras foram executadas conforme a configuração física que cada painel oferecia. Porém, de maneira geral, foram feitas com peças de madeira ou cintas com catraca.

Dificuldades encontradas

Não foi identificado nenhuma dificuldade relevante.

Os painéis verticais finalizados (com a incorporação de instalações prediais, esquadrias e revestimentos) apresentam massa acima de 200kg. Porém, contabilizando somente a estrutura em madeira e os isolamentos, a maioria não apresenta valores tão elevados. Ao analisar a Tabela 4.1 (capítulo 4), que mostra os valores de massa de cada um dos painéis estruturais, é possível observar que excetuando o painel M3P8 do módulo 3, todos os painéis com massa superior a 150kg estão localizados no módulo 1.

Os painéis com massa inferior a 150kg foram manuseados por um grupo de três pessoas. Essa operação envolveu levantar o painel e posicioná-lo nos encaixes dos painéis de piso, não havendo grandes deslocamentos.

No caso do painel M3P8, a instalação também foi efetuada manualmente, porém, por apresentar massa elevada, consequentemente um maior risco de um acidente, foram tomadas medidas de segurança. Para tanto, foi montado um andaime na face externa do protótipo, amarrado à estrutura de um container, de forma a evitar movimentações (Figura 5.16). Esse andaime foi utilizado com dois objetivos: (1) evitar que o painel ao ser levantado pudesse tombar para o lado externo do protótipo e; (2) ao levantar manualmente o painel,

uma cinta catraca – fixada ao andaime e ao painel – pudesse ser utilizada como cinto de segurança caso o painel viesse a tombar.

Figura 5.16 - Medidas de segurança adotadas para instalação painel vertical sem a ponte rolante de pórtico. Fonte: elaborado pelo autor

O manuseio dos painéis de forma manual é uma operação que apresenta dificuldade devido ao risco envolvido. Apesar desses painéis não apresentarem massa elevada, sempre há o risco de algum acidente devido à falta de um equipamento que garanta um nível de segurança a mais para a equipe envolvida.

É importante salientar que a decisão de instalar esses painéis de forma manual foi tomada a partir de restrições técnicas identificadas durante o processo de produção. Por se tratar de um constante processo de aprendizado e consequente evolução, o planejamento da montagem da estrutura no canteiro em Madri não contemplou a operação manual de nenhum painel estrutural.

Ao final da instalação dos painéis verticais foi constatado uma variação dimensional no sentido longitudinal da estrutura. Na face norte e sul a parede deveria medir 8600mm, porém, a medição após a montagem indicou 8610mm.

Essa variação dimensional não foi considerada grave a ponto de inviabilizar a instalação dos painéis horizontais de cobertura. Pois todos os encaixes entre painéis verticais e piso coincidiram, dessa forma, a equipe supôs que o mesmo ocorreria com os painéis de cobertura, tendo em vista que o alinhamento entre os painéis de piso e cobertura foi verificado.

5.3.2. Instalação dos painéis horizontais de cobertura

A instalação dos painéis horizontais de cobertura exigiu a utilização de um caminhão guindauto devido a elevada massa de cada painel. Os procedimentos adotados em cada um dos três painéis são semelhantes, com a diferença que as coberturas dos módulos 2 e 3 possuem encaixes no painel anterior.

Figura 5.17 - Içamento de um painel horizontal de cobertura utilizando o caminhão guindauto. Fonte: Fernanda Antonio

Antes de instalar os painéis horizontais de cobertura, foram fixadas todas as chapas de conexão no topo dos painéis verticais e realizada uma última verificação de medidas para evitar problemas durante o procedimento de instalação dos painéis. Nas chapas metálicas foi aplicada um pouco de vaselina para facilitar o encaixe dos painéis de cobertura.

O Quadro 5.5 apresenta os procedimentos adotados na instalação dos painéis horizontais de cobertura:

Quadro 5.5- Sequência de operações para instalação dos painéis horizontais de cobertura. Fonte: elaborado pelo autor

1. Içamento do painel horizontal de cobertura

Materiais	Ferramentas/Equipamentos
Painel horizontal de cobertura, olhais para içamento, viga içamento, cintas de poliéster	Caminhão guindauto

Descrição da atividade

Foram fixados olhais em todos os pontos de içamento, totalizando dez peças.

Utilizando cinco cintas catraca em poliéster o painel foi fixado à uma viga de içamento com 3m de comprimento, que foi fixada ao guincho do caminhão guindauto.

Nas extremidades dos painéis foram amarradas cintas para guiar a movimentação do painel no momento do içamento.

Dificuldades encontradas

Foi preciso efetuar ajustes na pressão das catracas para garantir que no içamento o painel não sofresse grandes deformações.

2. Posicionar o painel horizontal de cobertura**Materiais**

Painel horizontal de cobertura, olhais para içamento, viga içamento, cintas de poliéster

Ferramentas/Equipamentos

Caminhão guindauto

Descrição da atividade

O painel horizontal de cobertura foi içado e movimentado até sua posição na estrutura.

O posicionamento final do painel foi executado por meio das chapas de conexão no topo dos painéis verticais, que guiaram o painel horizontal de cobertura para sua posição definitiva.

Nos painéis horizontais de cobertura dos módulos 2 e 3 (M2HC e M3HC), o painel anterior também serviu de guia para sua instalação, por meio dos encaixes localizados nas vigas transversais.

Dificuldades encontradas

O espaço para manobrar o painel sob a tenda é baixo considerando que o braço do caminhão guindauto precisa alcançar o centro da estrutura do protótipo, dessa forma, exigiu muita perícia do operador do equipamento.

Ao final da instalação do painel horizontal de cobertura do módulo 3, a fabricação da estrutura em painéis foi concluída. Porém, conforme descrito no capítulo 4, os painéis foram concebidos com os sistemas prediais, esquadrias e revestimentos acoplados à sua estrutura portante. Estas instalações puderam ser executadas a partir da estrutura montada, para depois serem desmontadas juntamente com os painéis estruturais, finalizando o processo de fabricação dos painéis.

5.3.4. Instalação da barreira de vapor

Durante a fabricação dos painéis estruturais a barreira de vapor³³ não havia sido adquirida. Dessa maneira, decidiu-se instalá-la após a finalização da fabricação da estrutura do protótipo.

A barreira de vapor foi fixada diretamente na face interna dos painéis estruturais utilizando um grampeador para fixá-la à superfície das chapas de *OSB*. Esses grampos foram posicionados

³³ Vario KM Duplex produzida pela Isover.

em linhas paralelas, pois foi preciso colar uma fita adesiva (fornecida pelo fabricante) sobre eles, para garantir o desempenho da barreira de vapor.

Nas interfaces entre painéis a barreira de vapor foi transpassada em 15cm, garantindo a cobertura integral da junta dos painéis. Sobre a transposição foi colada a fita adesiva.

A Figura 5.18 mostra a barreira de vapor aplicada sobre os painéis estruturais do protótipo Ekó House.

Figura 5.18 - Barreira de vapor instalada sobre os painéis estruturais. Fonte: autor

A barreira de vapor foi inicialmente instalada em todos os painéis verticais e nos painéis horizontais de cobertura. A instalação sobre o painel de piso foi executada durante a instalação do piso de madeira, para evitar que fosse danificada.

5.3.5. Instalação dos sistemas prediais, esquadrias e revestimentos

Com a estrutura em painéis executada os diversos sistemas prediais que compõem o protótipo Ekó House puderam ser executados.

Conforme explicado anteriormente, toda a interface das instalações (hidráulica, elétrica, automação residencial e HVAC) entre o ambiente interno e externo do protótipo é feito por

dois painéis localizados na face norte da estrutura, um localizado na cozinha e outro no banheiro.

No painel do banheiro foram executadas duas calhas de passagem na parte superior do painel, por onde passam todas as instalações elétricas, automação residencial e HVAC. Na parte inferior de ambos os painéis existem duas caixas de conexão hidráulica, por onde passam todas as tubulações de água quente e fria e esgoto.

As instalações hidráulicas estão restritas à cozinha e o banheiro, devido a configuração dos ambientes, somente três painéis possuem elementos do sistema hidráulico, além dos dois que fazer interface com o ambiente externo, o painel que divide a cozinha e o banheiro.

Já as instalações elétricas, automação residencial e HVAC são distribuídas pelo ambiente interno do protótipo. Dessa forma, a maioria possui componentes desses sistemas acoplados à sua estrutura. Para garantir a facilidade de montagem e desmontagem, nas interfaces de painéis foram realizados plugues de conexão rápida para essas instalações.

A Figura 5.19 mostra o ambiente interno do protótipo com as instalações dos sistemas prediais aparentes.

Figura 5.19 - Interior da estrutura de madeira durante a instalação dos sistemas prediais e do piso. Fonte: Fernanda Antonio

As esquadrias foram encomendadas antes do término do processo de fabricação dos painéis estruturais, porém, devido à precisão obtida pelo uso de equipamentos CNC, foi possível garantir a dimensão do vão necessário para sua instalação.

As esquadrias foram parafusadas nas peças de madeira serrada. O vão entre a esquadria e a madeira foi preenchido com uma fita adesiva expansiva, fornecida pelo fabricante da esquadria. E por cima ainda foi aplicado o adesivo de alto desempenho, garantindo a estanqueidade térmica e acústica nas janelas e portas do protótipo. Após a fixação dos caixilhos, foram instalados as peças de vidro duplo laminado e insulado.

A face externa dos painéis foi impermeabilizada com um adesivo monocomponente a base de resinas sintéticas com propriedades impermeabilizantes. Mesmo havendo uma camada de isolamento e revestimento externo nos painéis verticais, foi preciso aplicar essa impermeabilização, por haver possibilidade de passagem de água por essas camadas, assim como durante o transporte o painel fica mais exposto à intempéries.

A última etapa no processo de fabricação da estrutura em painéis portantes do protótipo Ekó House foi a instalação dos revestimentos internos e externos. Os revestimentos verticais são compostos por painéis com estrutura de aço galvanizado e chapas cimentícias e/ou chapas de vidro (coladas sobre uma base de *mdf*).

Na parte interna do protótipo foram utilizados painéis de revestimento com acabamento em chapa cimentícias pintada, em vidro (banheiro e cozinha) e com espelho (banheiro).

Na parte externa, os painéis de revestimento possuem acabamento em chapa cimentícias natural, com uma camada de impermeabilização transparente. Esses painéis possuem uma camada de 60mm de *aerogel* (segunda camada de isolamento do protótipo). A disposição dos painéis de revestimento foi projetada de forma que as interfaces não coincidam com as interfaces dos painéis estruturais em madeira, reduzindo as pontes térmicas na envoltória do protótipo.

5.4. Desmontagem e transporte do protótipo Ekó House

Os painéis estruturais são as peças de maior volume e massa que compõem o protótipo. Dessa forma, sua operação é uma das mais complexas e críticas no processo de montagem. Para transportá-los foram projetadas e fabricadas três estruturas em aço carbono com baias de armazenamento, com capacidade para armazenar dois painéis horizontais e 6 painéis

verticais. Em uma dessas “gaiolas” metálicas foi possível armazenar 8 painéis verticais, sendo assim, foi necessário transportar um painel separadamente.

Figura 5.20 - Armazenamento de um painel horizontal de cobertura na gaiola. Fonte: Fernanda Antonio

Inicialmente, a proposta foi de armazenar em cada uma dessas “gaiolas” os painéis correspondentes a cada um dos três módulos estruturais do protótipo. Porém, o número de painéis verticais não é igual nos três módulos, dessa forma, seguindo a ordem de montagem, foi feita a seguinte distribuição de painéis por “gaiola”:

Para a desmontagem do protótipo foi utilizado um caminhão guindauto para retirar todos os painéis estruturais (já com os sistemas prediais, esquadrias e revestimentos acoplados) e armazená-los nas gaiolas.

A partir da experiência do processo de fabricação da estrutura do protótipo, a desmontagem foi executada na sequência inversa a da montagem. Utilizando os mesmos procedimentos adotados no processo de fabricação.

Todo o protótipo Ekó House, incluindo alguns móveis, eletrodomésticos e ferramentas de montagem foram armazenados em quatro containers de 40ft (12,19m), que foram transportado a Madri, para o evento Solar Decathlon Europe 2012.

5.5. Considerações sobre o capítulo

Neste capítulo foi descrito o processo de produção da estrutura em painéis de madeira pré-fabricados no canteiro de montagem do IEE-USP.

No recebimento da madeira serrada não foram identificados problemas visuais no material. Porém, devido ao tempo de armazenamento entre a aquisição e o início do processo de produção, foi identificado o arqueamento de algumas peças de madeira serrada. Nos casos mais acentuados, as peças foram identificadas e separadas para que fossem utilizadas como elementos de menor dimensão dos quadros estruturais. Nas demais peças, foram utilizados grampos em conjunto com o dispositivo de montagem, para reduzir o arqueamento dessas peças e possibilitar a montagem do quadro estrutural.

O uso de dispositivo de montagem garantiu precisão e velocidade na montagem dos painéis estruturais verticais. Na montagem dos painéis horizontais, devido a impossibilidade de utilizar um gabarito de montagem semelhante ao empregado na montagem dos painéis verticais, houve dificuldade na sua montagem, o que ocasionou um maior tempo de operação e menor precisão dimensional nos painéis.

Os dispositivos de montagem empregados auxiliaram na solução de problemas devidos ao arqueamento de algumas peças de madeira. Porém, tendo em vista este imprevisto (característicos no uso de madeira serrada no Brasil), outras soluções de projeto podem ser adotadas, como a previsão de folgas dimensionais na interface dos painéis, de maneira a absorver essas situações.

Com os painéis portantes executados, foi necessário a montagem da estrutura do núcleo condicionado do protótipo, para que os sistemas prediais, esquadrias e revestimentos fossem incorporados aos painéis estruturais.

Foi preciso utilizar equipamentos de içamento de carga para manusear os painéis de massa elevada. Os painéis horizontais de cobertura exigiram o emprego de um caminhão guindauto e um operador experiente, devido ao espaço restrito para movimentação sob a tenda. No caso dos painéis verticais de massa superior a 150kg, foi preciso utilizar uma ponte rolante de pórtico, nos painéis mais leves, foi possível manuseá-los em três pessoas e utilizando dispositivos de segurança adequados.

A utilização de estruturas próprias para o transporte dos painéis (gaiolas) demonstrou duas vantagens: (a) organizar a logística de transporte dos painéis para o local de montagem e; (b)

organizar o canteiro de montagem, pois possibilitou a otimização na distribuição dos materiais de maior volume no espaço físico.

A desmontagem da estrutura foi executada com agilidade, exigindo somente dois dias para desmontar e armazenar todos os painéis estruturais nas gaiolas.

Capítulo 6

Montagem do protótipo Ekó House – Solar Decathlon Europe 2012

Este capítulo aborda a segunda parte da produção do sistema construtivo constituído por painéis estruturais de madeira pré-fabricados do protótipo Ekó House.

Apresenta o processo de montagem da estrutura no evento Solar Decathlon Europe 2012 e compreende três etapas: (1) infraestrutura incluindo o transporte e o armazenamento temporário dos elementos da estrutura e; (2) montagem da estrutura.

6.1. Infraestrutura

A montagem foi realizada no Parque Casa de Campo, na cidade de Madri, Espanha. O protótipo foi montado em um lote de 20m x 20m com piso em asfalto e desnível máximo de 15 cm de uma extremidade a outra do lote. Nas faces leste, oeste e norte haviam lotes adjacentes destinados à montagem de outros protótipos, e na face sul uma rua de acesso para caminhões e equipamentos.

Em duas faces do lote foi reservada uma faixa de 1,5m para circulação segura de pedestres. Sendo assim, a área útil para a montagem do protótipo (incluindo áreas de estoque) foi de 18,5m x 18,5m.

Devido a essas dimensões da área de montagem, os materiais foram transportados em lotes, de acordo com as atividades a serem executadas pela equipe de montagem do protótipo. Dessa forma, foi necessário utilizar um galpão para armazenagem temporária dos materiais. Este espaço também foi utilizado como área de estoque de todo o material de montagem e transporte que não foi utilizado durante a exposição do protótipo durante o evento.

Conforme apresentado anteriormente, a necessidade de transporte foi um condicionante no desenvolvimento do projeto do protótipo Ekó House. Dessa forma, a sequência de montagem foi inteiramente planejada em conjunto com o planejamento de transporte.

A Figura 6.1 mostra a disposição dos equipamentos e materiais para a montagem para a montagem da estrutura do núcleo condicionado do protótipo.

Figura 6.1 - Lote de montagem no evento Solar Decathlon Europe 2012. Fonte: elaborado pelo autor

As “gaiolas” foram posicionadas próximas à face sul do lote e nas extremidades, o espaço entre elas foi utilizado como uma área de pré-montagem. Neste local, os painéis foram posicionados após serem retirados das “gaiolas”, e preparados para a instalação em sua posição definitiva.

As extremidades do lote foram utilizadas como áreas de estoque de materiais. Também foi instalada uma tenda, provendo um espaço sombreado para a equipe de montagem. A face sul do lote é aberta para a rua de acesso. Neste ponto foi posicionado o guindaste para efetuar a montagem do protótipo, além de descarregar e carregar os caminhões.

6.2. Equipamentos

Para a execução da montagem do protótipo foi necessário utilizar um guindaste para manusear os painéis estruturais, duas plataformas elevatórias móveis e um grupo gerador, para suprir energia para as ferramentas elétricas e iluminar o lote no período noturno.

O projeto para produção previa a utilização de um caminhão *munk* para as atividades de içamento dos painéis estruturais. Porém, devido a restrições da organização do evento, não foi possível utilizar este equipamento no canteiro de montagem. Dessa forma, inicialmente foi utilizado um manipulador telescópico para efetuar as atividades planejadas.

Porém, por possuir menor raio de abrangência de operação com as cargas provenientes dos painéis estruturais, foi necessário adaptar as operações de montagem conforme o equipamento. Contudo, após a utilização deste manipulador telescópico na montagem dos primeiros painéis estruturais, decidiu-se trocar de equipamento, pois sua utilização apresentou riscos de segurança à equipe, além de dificultar a montagem do protótipo.

Sendo assim, a solução adotada foi a utilização de um guindaste com alcance que abrangesse todo o lote a partir de um ponto fixo. O equipamento utilizado foi um LTM 1100, um guindaste telescópico com capacidade de 100 toneladas e comprimento de lança de até 91m.

Figura 6.2 – Equipamentos utilizados para manuseio de cargas no evento Solar Decathlon Europe 2012: manipulador telescópico (esquerda) e guindaste (direita). Fonte: Fernanda Antonio

6.3. Montagem da estrutura em painéis pré-fabricados de madeira

A montagem da estrutura em painéis pré-fabricados de madeira do protótipo Ekó House compreende uma série de atividades planejadas desde a sua concepção, e que ao longo do desenvolvimento do projeto foram ajustadas e detalhadas, formulando assim o projeto para produção.

A disposição dos painéis nas “gaiolas”, assim como o posicionamento destas no lote, foram planejados de acordo com a sequência de operações de montagem.

Cada um dos três tipos de painéis estruturais (vertical, horizontal de piso e horizontal de cobertura) possui procedimentos de manuseio distintos, porém empregados comumente de acordo com sua tipologia.

O Tabela 6.1 apresenta a sequência de montagem da estrutura em painéis pré-fabricados de madeira do protótipo.

Tabela 6.1 - Sequência de montagem da estrutura em painéis pré-fabricados de madeira no evento Solar Decathlon Europe 2012. Fonte: elaborado pelo autor

Etapas	Descrição	Equipamentos e Materiais
Instalação do painel horizontal de piso do módulo 1	1) Utilizando o manipulador telescópico, retirar o painel da Gaiola 1 2) Posicionar o painel na área de pré-montagem e instalar as fundações 3) Utilizar o Manipulador Telescópico para posicionar o painel com as fundações na posição final	Manipulador Telescópico Painel Horizontal de Piso M1HP 10 Fundações em Aço Galvanizado
Instalação dos painéis verticais do módulo 1	1) Utilizando o guindaste, retirar o painel vertical da Gaiola 2) Posicionar o painel vertical na área de pré-montagem 3) Utilizando o guindaste, posicionar o painel na posição final 4) Fixar o painel aos demais utilizando as chapas de ligação em aço galvanizado	Manipulador Telescópico Guindaste 9 Painéis verticais: M1P1, M1P2a, M1P2b, M1P3, M1P4a, M1P4b, M1P4c, M1P5, M1P6
Instalação do painel horizontal de piso do módulo 2	1) Utilizando o guindaste, retirar o painel da Gaiola 2 2) Posicionar o painel na área de pré-montagem e instalar as fundações 3) Utilizar o Guindaste para posicionar o painel com as fundações na posição final	Painel Horizontal de Piso M2HP 5 Fundações em Aço Galvanizado

Instalação dos painéis verticais do módulo 2	1) Utilizando o guindaste, retirar o painel vertical da Gaiola 2) Posicionar o painel vertical na área de pré-montagem 3) Utilizando o guindaste, posicionar o painel na posição final 4) Fixar o painel aos demais utilizando as chapas de ligação em aço galvanizado	Guindaste 4 Painéis Verticais: M2P7a, M2P7b, M2P7c, M2P7d 1 Painel de Aço galvanizado - Instalações
Instalação do painel horizontal de piso do módulo 3	1) Utilizando o guindaste, retirar o painel da Gaiola 3 2) Posicionar o painel na área de pré-montagem e instalar as fundações 3) Utilizar o Guindaste para posicionar o painel com as fundações na posição final	Guindaste Painel Horizontal de Piso M2HP 5 Fundações em Aço Galvanizado
Instalação dos painéis verticais do módulo 3	1) Utilizando o guindaste, retirar o painel vertical da Gaiola 2) Posicionar o painel vertical na área de pré-montagem 3) Utilizando o guindaste, posicionar o painel na posição final 4) Fixar o painel aos demais utilizando as chapas de ligação em aço galvanizado	Guindaste 8 Painéis Verticais: M3P8, M3P9a, M3P9b, M3P9c, M3P9d, M3P9e, M3P9f, M3P10
Instalação do painel horizontal de cobertura do módulo 1	1) Utilizando o guindaste, retirar o painel da Gaiola 1 2) Posicionar o painel na área de pré-montagem 3) Utilizar o Guindaste para posicionar o painel na posição final	Guindaste Painel Horizontal de Cobertura M1HC
Instalação do painel horizontal de cobertura do módulo 2	1) Utilizando o guindaste, retirar o painel da Gaiola 2 2) Posicionar o painel na área de pré-montagem 3) Utilizar o Guindaste para posicionar o painel na posição final	Guindaste Painel Horizontal de Cobertura M2HC
Instalação do painel horizontal de cobertura do módulo 3	1) Utilizando o guindaste, retirar o painel da Gaiola 3 2) Posicionar o painel na área de pré-montagem 3) Utilizar o Guindaste para posicionar o painel na posição final	Guindaste Painel Horizontal de Cobertura M2HC

É possível observar que a sequência de montagem da estrutura em painéis do protótipo é composta por repetições de procedimentos semelhantes de acordo com o tipo de painel (horizontal de piso, horizontal de cobertura e vertical). Naturalmente, existem diferenças

operacionais na instalação de cada painel, porém, mesmo com as particularidades de cada caso, a lógica operacional é a mesma.

Dessa forma, a seguir é descrito de forma detalhada as operações adotadas na instalação dos painéis de acordo com sua tipologia, e identificadas dificuldades relacionadas ao processo de montagem.

6.3.1. Montagem dos Painéis Horizontais de Piso

Conforme apresentado no Tabela 6.1, o painel horizontal de piso do módulo 1 (M1HP) foi instalado utilizando um manipulador telescópico, já os painéis horizontais de piso do módulo 2 e 3 (M2HP e M3HP) foram instalados por meio de um guindaste. Dessa forma, no Quadro 6.1 são apresentados essas sequências de montagem, salientando as diferenças operacionais.

Quadro 6.1 - Sequência de montagem dos painéis horizontais de piso – evento SDE 2012. Fonte: elaborado pelo autor

1. Preparação do painel para içamento

Materiais		Ferramentas/Equipamentos
Painel horizontal de piso, nível a laser, barra roscada da fundação		-
Módulo 1 (M1HP)	Descrição da atividade Utilizando um nível a laser, foi medido o desnível do solo em cada uma das 20 posições das sapatas metálicas. A partir desses valores, foi possível definir a altura em que cada ponto de fundação dos painéis horizontais de piso devem ficar do solo, consequentemente, a dimensão que cada barra roscada deve ser fixada. As barras roscadas foram inseridas no painel horizontal de piso com este ainda armazenado na Gaiola 1, na posição vertical. Como o painel possui 2,20m de largura, houve a necessidade de utilizar uma escada para poder inserir metade das barras roscadas. Para facilitar a operação de inserir as barras no painel horizontal de piso, a rosca foi lubrificada utilizando vaselina sólida.	
	Dificuldades encontradas Metade das barras roscadas do painel horizontal de piso do módulo 1 foram instaladas a 2,20m de altura, necessitando a utilização de uma escada. Devido a massa elevada de cada peça (25kg), o seu manuseio em cima de uma escada apresentou riscos de acidente, seja por queda do operário ou da barra roscada.	

Módulos 2 e 3 (M2HP e M3HP)	Descrição da atividade
	A partir da experiência obtida na operação do painel horizontal de piso do módulo 1, decidiu-se não instalar as barras roscadas enquanto o painel estivesse armazenado.
	Dificuldades encontradas
	-

2. Remover painel horizontal de piso da gaiola

Materiais		Ferramentas/Equipamentos	
Painel horizontal de piso, olhais para içamento, cintas de poliéster		Manipulador telescópico (M1HP) Guindaste (M2HP e M3HP)	
Módulo 1 (M1HP)	Descrição da atividade	<p>Para retirar os painéis horizontais de piso das gaiolas, são fixados os cinco olhais da extremidade localizada na face superior (quando armazenado na gaiola).</p> <p>Utilizando três cintas catraca em poliéster o painel horizontal de piso foi amarrado ao manipulador telescópico. Por meio da catraca é possível alterar a tensão da cinta, garantindo um ajuste na amarração do painel. Essa fixação foi feita de forma simétrica, de maneira a garantir uma distribuição uniforme de carga no momento do içamento.</p> <p>Com o painel fixado ao manipulador telescópico, este foi içado para fora da Gaiola 1.</p>	
	Dificuldades encontradas	<p>A Gaiola 1 não estava nivelada, devido à falha do seu posicionamento no lote. Quando o painel horizontal de piso do módulo 1 foi içado (movimento na direção vertical) houve uma força na direção horizontal, o que fez com que o painel não ficasse paralelo à base da gaiola, não permitindo a evolução da operação de içamento. Dessa forma, foi necessário ir corrigindo essa assimetria causada pelo desnível, movimento o braço telescópico do equipamento de içamento para fora do alinhamento com o painel.</p>	

Módulos 2 e 3 (M2HP e M3HP)	Descrição da atividade <p>Foram identificadas algumas dificuldades na instalação dos painéis utilizando o manipulador telescópico (descritos nos quadros de montagem dos painéis verticais e do painel horizontal de piso do módulo 1). Dessa forma, a montagem passou a ser realizada utilizando um guindaste posicionado fora do lote, e com maior alcance e capacidade de carga.</p> <p>Apesar de ser efetuado com outro equipamento, os procedimentos de retirada dos painéis horizontais de piso restantes foram iguais aos executados no módulo 1.</p>
	Dificuldades encontradas <p>A utilização do guindaste facilitou a operação de retirada dos painéis horizontais de piso das gaiolas. Porém, as Gaiolas 2 e 3 também estavam desniveladas, dessa forma, foi necessário efetuar correções no posicionamento do braço do guindaste durante a retirada dos painéis para compensar o desnivelamento.</p>
<p>M1HP (Manipulador telescópico) M2HP/M3HP (Guindaste)</p>	

3. Área de pré-montagem

Materiais		Ferramentas/Equipamentos
Painel horizontal de piso, olhais para içamento, cintas de poliéster, chapas em aço galvanizado da fundação, barras roscadas da fundação, apoios em madeira		Manipulador telescópico (M1HP) Guindaste (M2HP e M3HP)
Módulo 1 (M1HP)	Descrição da atividade As 10 chapas de fundação foram posicionadas na área de montagem dispostas de acordo com as barras roscadas do painel horizontal de piso do módulo 1. Entre cada uma das chapas de fundação foram posicionados apoios em madeira para suportar o painel. A proposta inicial era de apoiar o painel sobre as peças de madeira, modificar a amarração do painel ao manipulador telescópico, de forma a içar o painel paralelamente ao solo, para então baixar o painel diretamente sobre as chapas metálicas da fundação.	

	<p>Porém, não foi possível apoiar o painel sobre as peças de madeira. Sendo assim, após retirar o painel da gaiola, este foi apoiado diretamente no lote, sobre as barras roscadas.</p> <p>Em seguida, foi alterada a amarração das cintas entre o painel e o manipulador telescópico. Para permitir o içamento paralelo ao solo, foram utilizados os dez pontos de içamento localizados nas vigas duplas e cinco cintas catraca em poliéster.</p> <p>Com o manipulador telescópico, o painel horizontal de piso do módulo 1 foi posicionado sobre as chapas de fundação. Em seguida foram parafusadas as braçadeiras de fixação da chapa de fundação às barras roscadas.</p> <p>Dificuldades encontradas</p> <p>A proposta inicial de posicionar o painel sobre peças de madeira teve de ser descartada devido à altura dos apoios, em torno de 50cm. Para obter esta medida, foi necessário empilhar dormentes de madeira. Porém, devido à massa do painel horizontal de piso, no momento em que este começou a ser baixado (passando da posição vertical à horizontal), uma força na direção horizontal ocasionou o deslocamento das peças de madeira. Dessa forma, decidiu-se posicionar o painel horizontal diretamente no lote, apoiado nas barras roscadas.</p> <p>Inicialmente este procedimento foi evitado pois havia o risco de danificar as barras roscadas. Fato que não ocorreu durante a operação.</p> <p>Outra dificuldade é referente à utilização do manipulador telescópico para efetuar as operações de manuseio dos painéis, pois o equipamento estava operando próximo do limite de capacidade de carga e seu raio de abrangência é muito curto, havendo necessidade de deslocá-lo constantemente no lote.</p>
Módulos 2 e 3 (M2HP e M3HP)	<p>Descrição da atividade</p> <p>Com a experiência obtida na instalação do painel horizontal de piso do módulo 1, foram feitas alterações no planejamento de operações dos módulos seguintes.</p> <p>Utilizando o guindaste, o painel foi posicionado na área de pré-montagem sobre apoios de madeira, já na posição horizontal.</p> <p>Em seguida, foi alterada a amarração das cintas entre o painel e o guindaste. Para permitir o içamento paralelo ao solo, foram utilizados os dez pontos de içamento localizados nas vigas duplas e cinco cintas catraca em poliéster.</p> <p>Na sequência, o painel foi sendo içado aos poucos até se distanciar do solo o suficiente para instalar as barras roscadas. Como medida de segurança, foram posicionados apoios de madeira sob o painel a uma altura um pouco inferior ao que este estava distante do solo, e, caso houvesse algum problema, o painel poderia ser rapidamente apoiado nestas peças.</p> <p>As cinco barras roscadas foram instaladas no painel de acordo com a medição dos desníveis do lote.</p> <p>Com as barras roscadas inseridas no painel, foram posicionadas abaixo destas as chapas de fundação. Em seguida, utilizando o guindaste, o painel horizontal de piso foi baixado até que as barras roscadas encaixassem nas chapas da fundação, e então foram parafusadas as braçadeiras de fixação.</p> <p>Dificuldades encontradas</p> <p>Não foi identificada nenhuma dificuldade relevante.</p>

4. Posicionar e ajustar o painel

Materiais		Ferramentas/Equipamentos
Painel horizontal de piso, cintas de poliéster		Manipulador telescópico (M1HP) Guindaste (M2HP e M3HP)
Módulo 1 (M1HP)	Descrição da atividade Com as fundações fixadas ao painel horizontal de piso do módulo 1, este foi içado, utilizando o manipulador telescópico, movimentado até sua posição final e instalado de acordo com as marcações feitas no lote. O manipulador telescópico teve que se movimentar para posicionar o painel horizontal de piso, pois a carga do painel não permitiu estender o equipamento até a posição desejada.	
	Dificuldades encontradas Para demarcar a posição do painel, foi necessário efetuar marcações no lote de acordo com o posicionamento das chapas de fundação. Porém, para posicionar o painel no lote, o ajuste teve que ser feito manualmente, por meio de cintas amarradas ao painel. Este manuseio foi impreciso, ocasionando uma locação igualmente imprecisa.	
Módulos 2 e 3 (M2HP e M3HP)	Descrição da atividade Com as fundações fixadas ao painel horizontal de piso, este foi içado, utilizando o guindaste, e movimentado até o painel horizontal de piso anterior. Em seguida, com a equipe de montagem monitorando o acoplamento dos encaixes localizados nas vigas duplas, o painel foi instalado em sua posição.	
	Dificuldades encontradas Os painéis horizontais de piso dos módulos 2 e 3 possuem cinco fundações, todas ao longo de uma das faces do painel. Cada fundação (barra roscada e chapa) tem massa de 85kg, totalizando 425kg a mais ao longo de uma das faces do painel, desequilibrando a distribuição de cargas.	

O acoplamento entre os painéis horizontais é feito na direção vertical, e com as faces dos painéis paralelas entre si. Porém, essa distribuição assimétrica de cargas não permitiu que as faces estivessem rigorosamente paralelas. Outra dificuldade observada foi relacionada aos deslocamentos do painel durante o içamento. Foi constatado um deslocamento na direção longitudinal do painel, agravando a dificuldade no acoplamento das vigas transversais.

Para contornar esse problema, foi preciso utilizar uma alavanca nos encaixes para que estes acoplassem corretamente.

Figura 6.3 - Movimentação painel horizontal de piso (M1HP) utilizando manipulador telescópico – evento SDE 2012. Fonte: Fernanda Antonio

6.3.2. Montagem dos painéis verticais

A montagem de cada painel vertical foi executada em três etapas: retirada do painel vertical da gaiola; alteração da amarração do guindaste na área de pré-montagem e instalação do painel.

Quadro 6.2 - Sequência de montagem dos painéis verticais - evento SDE 2012. Fonte: elaborado pelo autor

1. Remover painel vertical da gaiola

Materiais	Ferramentas/Equipamentos
Painel vertical, cintas de amarração	Guindaste
<p>Descrição da atividade</p> <p>Os painéis verticais foram armazenados nas gaiolas com as faces laterais (interface de conexão os demais painéis verticais) paralelas ao solo.</p> <p>Para remover o painel vertical da gaiola foi preciso içá-lo na direção vertical. Para isso, foram utilizadas duas cintas de amarração ao redor do painel, posicionadas simetricamente, de forma que a distribuição de cargas fosse equivalente. Por sua vez, as cintas foram fixadas em duas correntes presas ao guindaste.</p>	
<p>Dificuldades encontradas</p> <p>Não foi identificada nenhuma dificuldade relevante.</p>

2. Área de pré-montagem

Materiais	Ferramentas/Equipamentos
Painel vertical, cintas de amarração, apoios de madeira, chapas de içamento	Guindaste
<p>Descrição da atividade</p> <p>Os painéis verticais foram retirados das gaiolas com as faces verticais na direção horizontal. Dessa forma, foi necessário alterar a forma de amarração ao guindaste para permitir sua instalação na estrutura.</p> <p>Para isso, após ser removido da gaiola, eles foram posicionados sobre apoios de madeira na área de pré-montagem.</p> <p>No processo de fabricação da estrutura, no canteiro na USP, foi utilizada uma chapa com uma rosca soldada para fixar um parafuso olhal para servir de ponto de içamento do painel. Porém essas chapas sofreram deformações devido ao içamento. Dessa forma, a equipe utilizou uma chapa com um leve vinco no eixo longitudinal, aumentando a resistência da peça. Também foi modificado a forma de se fixar ao guindaste, por meio de um furo onde foi presa uma manilha curva com pino roscado para engate do gancho do guindaste.</p> <p>Com a forma de amarração modificada, o painel vertical pode ser içado novamente e posicionado na estrutura.</p>	
<p>Dificuldades encontradas</p> <p>As novas chapas utilizadas para o içamento do painel vertical também sofreram deformações devido aos esforços provenientes da operação.</p>
<p>(1) Posicionar painel área pré-montagem</p> <p>(2) Modificar amarração e içamento para instalação</p>	

3. Posicionar e ajustar painel

Materiais	Ferramentas/Equipamentos
-----------	--------------------------

Painel vertical, cintas de amarração, apoios de madeira, chapas de içamento, escoras em madeira e cintas catraca

Guindaste

Descrição da atividade

Com a amarração ao guindaste feita pelo topo do painel vertical, este foi movimentado ao local de instalação por meio do guindaste.

O guindaste movimentou os painéis verticais até sua posição, porém a operação de encaixe foi executada manualmente pela equipe de montagem. Após o painel vertical estar corretamente posicionado, as chapas foram parafusadas ao painel vertical adjacente.

Após a instalação de cada painel vertical, foi preciso executar dispositivos de segurança que evitassem a sua queda antes de finalizar a montagem de toda a estrutura em painéis. Dessa forma, foram utilizadas escoras de madeira e cintas catraca para mantê-los posicionados.

Dificuldades encontradas

Houve dificuldade no encaixe de alguns painéis ao restante da estrutura de madeira.

Dois fatores podem ser identificados como causa deste problema: (1) alguns painéis verticais apresentaram variações dimensionais em relação aos valores de projeto, devido ao arqueamento peças de madeira serrada; (2) alguns painéis horizontais apresentaram variações dimensionais em relação aos valores de projeto, devido à imprecisão em sua fabricação.

Dessa forma, durante a montagem foi necessário realizar ajustes, como a compressão de painéis já instalados por meio de cintas com catraca.

Figura 6.4 - Içamento painel vertical utilizando guindaste - evento SDE 2012. Fonte: Solar Decathlon Europe 2012 / I+D+Art

6.3.3. Montagem dos painéis horizontais de cobertura

Após o término da montagem dos painéis verticais, foi realizado a instalação dos painéis horizontais de cobertura. Finalizando assim a estrutura em painéis pré-fabricados em madeira.

Cada painel horizontal de cobertura foi montado em três etapas: (1) retirada do painel da gaiola; (2) alteração da amarração ao guindaste na área de pré-montagem e; (3) instalação do painel.

Quadro 6.3 - Sequência de montagem dos painéis horizontais de cobertura - evento SDE 2012. Fonte: elaborado pelo autor

1. Remover painel horizontal de cobertura da gaiola

Materiais	Ferramentas/Equipamentos
Painel horizontal de cobertura, olhais de içamento, cintas catraca.	Guindaste

Descrição da atividade

Para retirar os painéis horizontais de cobertura das gaiolas, foram fixados os cinco olhais da extremidade localizada na face superior (quando armazenado na gaiola).

Utilizando três cintas catraca em poliéster o painel horizontal de cobertura foi fixado ao guindaste. Por meio da catraca é possível alterar a tensão da cinta, garantindo um ajuste na amarração do painel. Essa fixação foi feita de forma simétrica, de maneira a garantir uma distribuição uniforme de carga no momento do içamento.

Com o painel fixado ao guindaste, este foi içado para fora da Gaiola.

Dificuldades encontradas

As gaiolas estavam desniveladas, dessa forma, foi necessário efetuar correções no posicionamento do braço do guindaste durante a retirada dos painéis horizontais de cobertura para compensar.

2. Área de pré-montagem**Materiais**

Painel horizontal de cobertura, apoios de madeira

Ferramentas/Equipamentos

Guindaste

Descrição da atividade

Utilizando o guindaste, os painéis horizontais de cobertura foram posicionados sobre apoios de madeira na área de pré-montagem, já na posição horizontal.

Em seguida, foi alterada a amarração das cintas entre o painel e o guindaste. Para permitir o içamento paralelo ao solo, foram utilizados os dez pontos de içamento localizados nas vigas duplas e cinco cintas catraca em poliéster.

Com a forma de amarração modificada, o painel horizontal de cobertura pôde ser içado novamente e posicionado na estrutura.

Dificuldades encontradas

Houve dificuldade no posicionamento do painel horizontal de cobertura sobre os apoios de madeira, pois foi preciso ajustar o posicionamento dos apoios conforme as instalações acopladas à estrutura do painel.

3. Posicionar painel

Materiais

Painel horizontal de cobertura

Ferramentas/Equipamentos

Guindaste

Descrição da atividade

Com a amarração do painel horizontal de cobertura paralela ao solo, este foi movimentado até à estrutura em painéis pré-fabricados de madeira.

Todos os painéis verticais possuem em sua face superior chapas em aço galvanizado, para conectá-los aos painéis horizontais de cobertura. Já estes, possuem em sua face inferior os rasgos para encaixe das chapas. Este recurso foi utilizado de maneira a guiar os painéis para sua posição.

Para a instalação do primeiro painel horizontal de cobertura (módulo 1 – M1HC), foram fixadas cantoneiras de aço na face dos painéis verticais que configuram as quinas da estrutura, de maneira a também auxiliar no posicionamento do painel.

Nos painéis horizontais de cobertura dos módulos 2 e 3 (M2HC e M3HC), o painel anterior serviu de guia para sua instalação, por meio dos encaixes localizados nas vigas duplas.

Dificuldades encontradas

Não foi identificado nenhuma dificuldade relevante.

Figura 6.5 - Instalação painel horizontal de cobertura (M1HC) utilizando guindaste - evento SDE 2012.
Fonte: Fernanda Antonio

Figura 6.6 - Detalhe de içamento painel horizontal: na peça de conexão metálica das vigas transversais está fixado um olhal para içamento e uma manilha, que por sua vez está fixada à cinta de içamento presa ao guindaste. Fonte: Fernanda Antonio

6.4. Avaliação do protótipo durante o evento Solar Decathlon Europe 2012

A avaliação do protótipo Ekó House não é objetivo desta dissertação, porém é importante que trabalhos sejam feitos nesta direção, pois os procedimentos produtivos têm influência no desempenho da edificação em uso.

Durante duas semanas no evento Solar Decathlon Europe 2012, o protótipo Ekó House foi submetido a uma avaliação de desempenho por meio de medições (térmica, acústica, umidade do ar, qualidade do ar, consumo energético, geração de energia e iluminação). Além dessas medições, foram avaliados aspectos de concepção de projeto e execução do protótipo por júris especializados nas diferentes áreas de avaliação do evento (arquitetura, engenharia e construção, eficiência energética, balanço energético, industrialização e viabilidade de mercado, comunicação e sensibilização social, sustentabilidade e inovação).

Dessa forma, sobrepondo as informações de avaliação do evento às análises feitas a respeito do processo de produção do protótipo, é possível extrair algumas observações relacionadas ao desempenho do sistema construtivo em painéis pré-fabricados em madeira.

O protótipo apresentou bom desempenho nas provas de medições de condições de conforto (temperatura, acústica, qualidade do ar, umidade e iluminação). Este resultado pode ser atribuído a uma soma de fatores: o sistema *HVAC* utilizado, estratégias bioclimáticas adotadas no projeto de arquitetura (disposição de janelas, proteções solares) e desempenho

da envoltória. Este último ponto é resultado da composição dos painéis verticais e horizontais e da montagem da envoltória, possibilitando o desempenho esperado em uso do protótipo.

Foram identificadas pequenas frestas na interface de alguns painéis verticais que não chegaram a comprometer o desempenho térmico da envoltória, porém no caso da avaliação acústica houve uma perda considerável no desempenho.

A medição de isolamento acústico de fachada não apresentou o desempenho esperado de acordo com os cálculos de projeto. Na concepção do projeto Ekó House, foi calculado uma isolamento sonora da fachada de 35dB (PROJETO EKÓ HOUSE, 2012). Porém, a medição executada durante o evento apresentou resultado de 29dB (LABORATORIO DE ACÚSTICA Y VIBRACIONES – ARQUILAV, 2012). Além das frestas na fachada, este desempenho pode ser atribuído a problemas de vedação em uma esquadria localizada na fachada sul do protótipo.

O problema identificado na vedação desta esquadria teve origem na etapa de desmontagem no Brasil. O quadro de madeira serrada do painel que abriga a esquadria sofreu uma deformação no momento do içamento para ser armazenado na gaiola de transporte. Este problema foi corrigido, porém a deformação comprometeu a vedação do caixilho e não houve tempo hábil para corrigi-lo durante a montagem em Madri.

É importante observar que, apesar dos problemas identificados, o desempenho de isolamento sonora de fachada ficou dentro dos valores exigidos pela Diretriz SINAT nº005, proveniente da NBR 15575:2008, que especifica valor mínimo de 25dB para vedação externa de dormitórios (BRASIL, 2011).

Apesar do período de avaliação de uso durante o evento ser curto, foi possível observar alguns indicativos de desempenho do protótipo. Porém, de maneira a obter dados que de fato possam avaliar o protótipo Ekó House, é preciso a realização do monitoramento de desempenho em uso por um período mais longo no Brasil.

6.5. Considerações sobre o capítulo

Neste capítulo foi descrito as operações de montagem da estrutura em painéis de madeira pré-fabricados do protótipo no evento Solar Decathlon Europe 2012.

Diferentemente da montagem executada no Brasil, onde a estrutura em painéis foi montada de forma a dar continuidade no processo de produção do protótipo, a montagem executada

no evento foi a execução do sistema construtivo em painéis estruturais de madeira pré-fabricados da forma como foi concebida na etapa de projeto. Desta forma, foi possível avaliar o desempenho construtivo do sistema projetado.

O emprego de equipamentos apropriados é fundamental para que a montagem apresente o desempenho almejado e de forma segura. Inicialmente, a utilização do manipulador telescópico demonstrou riscos para a integridade dos painéis e da equipe de montagem, pois operou próximo ao limite de capacidade de carga e com raio de operação muito curto, o que exigiu o deslocamento constante do equipamento.

Ao substituir o manipulador telescópico pelo guindaste, os procedimentos de montagem transcorreram sem apresentar riscos de integridade dos painéis ou da equipe de montagem.

As dificuldades identificadas na montagem da estrutura são contornáveis mediante ajustes de projeto ou de procedimentos do processo de produção. Dessa forma, foi possível constatar que o planejamento das atividades produtivas apresentaram um resultado satisfatório na produção do sistema construtivo em painéis pré-fabricados em madeira, o que pode ser confirmado constatando o fato da operação ter sido executada em 4 dias, sem apresentar incidentes.

Capítulo 7

Considerações finais

A dissertação buscou apresentar a produção de um sistema construtivo em painéis pré-fabricados em madeira, relacionando a importância do desenvolvimento do projeto da edificação integrado aos requisitos dos processos produtivos. Por meio desta abordagem integrada entre o projeto de produto e o projeto para produção, foi possível observar ganhos de qualidade e produtividade no processo construtivo e no produto final (edificação).

No capítulo 4, foi descrito o projeto do sistema construtivo em painéis pré-fabricados em madeira do protótipo Ekó House, com enfoque no processo de elaboração do projeto para produção por meio de *software* de manufatura digital. Nesta etapa os procedimentos de produção, tanto de fabricação dos componentes estruturais, quanto de montagem da estrutura foram os requisitos que guiaram o desenvolvimento do projeto.

Nos capítulos 5 e 6, foi descrito o processo construtivo da estrutura de madeira do protótipo Ekó House, detalhando o uso de equipamentos *CNC* para usinagem das peças estruturais de madeira, os procedimentos de fabricação dos painéis empregando dispositivos de montagem e as operações de montagem da estrutura.

Com base nas informações apresentadas nesta dissertação, é possível observar ganhos de qualidade e desempenho na utilização do sistema construtivo em painéis pré-fabricados de madeira do protótipo Ekó House, dos quais os mais significativos foram:

- 1) A utilização de um *software* de manufatura digital no desenvolvimento do projeto para produção permitiu a construção virtual do protótipo, antevendo as possíveis interferências no projeto, compatibilizando o projeto estrutural com os sistemas prediais (hidráulica, elétrica, automação residencial e HVAC).
- 2) O emprego de máquinas CNC na usinagem de peças de madeira permitiu ganhos de produtividade e qualidade. A precisão obtida nas peças de madeira serrada e chapas de OSB, somada à utilização de dispositivos de montagem, garantiram rapidez e precisão na fabricação dos painéis estruturais. A combinação de desenvolvimento de projeto em ambiente de manufatura e fabricação digitais, permitiu a “tradução” do projeto virtual para o ambiente real com a qualidade projetada.
- 3) Foi obtido um maior controle da produção da estrutura devido ao maior emprego de atividades em ambiente industrial, diminuindo as atividades em canteiro. Foi possível substituir atividades convencionais de construção *in loco* por operações de montagem e desmontagem com ganhos de tempo e produtividade, melhor organização do canteiro de obras e redução de perdas materiais.
- 4) A incorporação das instalações na estrutura portante se mostrou bastante vantajosa, pois reduziu o tempo gasto no canteiro de obras para a sua instalação. Esta incorporação exigiu que durante a fase de projeto houvesse maior detalhamento por parte das diferentes equipes de projeto dos sistemas prediais, além da necessidade de um trabalho integrado entre todos os projetistas, resultando em um trabalho de melhor qualidade.
- 5) A utilização de estruturas de transporte (gaiolas) além de resolver a questão de logística que envolve movimentar os painéis para o local de montagem, também auxiliou na organização do canteiro de obras, pois permitiram otimizar a distribuição de materiais no espaço conforme a ordem de montagem.

As dificuldades mais expressivas durante a fabricação dos painéis estruturais e nos procedimentos de montagem/desmontagem da estrutura foram as seguintes:

1. A seleção da madeira da espécie cumaru cumpriu os requisitos do cálculo estrutural frente à classe de resistência exigida e os requisitos de durabilidade. Porém, conforme Jankowsky³⁴ (1990, apud IPT, 2012) e IBAMA³⁵ (1997, apud IPT, 2012), o cumaru é uma madeira que apresenta dificuldades de trabalhabilidade, sendo difícil de ser

³⁴ JANKOWSKY, I.P. (Coord.) **Madeiras Brasileiras**. Caxias do Sul: Spectrum, 1990.

³⁵ INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Madeiras Tropicais Brasileiras**. Brasília: IBAMA-LPF, 1997.

perfurada e de ser colada. Esta dificuldade pode ser observada pela necessidade das perfurações com broca antes da fixação de parafusos. Este procedimento, apesar de resolver o problema, ocasionou um consumo elevado de brocas devido ao rompimento da ferramenta durante a perfuração da madeira. Em relação à dificuldade de cola, o adesivo de alto desempenho utilizado apresentou bons resultados.

2. O emprego de soluções não usuais ao processo construtivo convencional resultou na necessidade de adaptação de ferramentas e desenvolvimento de procedimentos específicos de controle não usuais no segmento de construções de casas de madeira.
3. A precisão obtida na montagem dos painéis verticais não foi observada nos painéis horizontais. A impossibilidade de utilizar um dispositivo de montagem semelhante ao empregado na montagem dos painéis verticais, devido às dimensões dos painéis horizontais, é uma das principais razões dessa dificuldade. Como consequência, houve dificuldades no encaixe de alguns painéis durante a montagem da estrutura de madeira, o que exigiu a criação de soluções durante o procedimento de montagem.
4. A elevada massa dos painéis estruturais dificultou a montagem e o seu manuseio. Os painéis acabados, principalmente os horizontais, apresentaram riscos elevados de acidentes ao serem movimentados. Portanto, é necessário a utilização de equipamentos de porte para o içamento, além de mão de obra treinada para as operações de fabricação dos painéis e de montagem e desmontagem da estrutura.
5. Apesar de não terem sido identificadas variações dimensionais elevadas, elas não podem ser consideradas irrelevantes, e requerem novas soluções de projeto para compatibilizar as tolerâncias necessárias para montagem e a vedação de frestas para o controle do desempenho termo-acústico das fachadas. As principais causas dessas variações foram o arqueamento de peças de madeira serrada, e imprecisão de montagem dos painéis horizontais pela falta de um dispositivo de montagem.
6. A usinagem das peças de madeira serrada com espessura superior a 90mm tiveram de ser executadas em um furadeira horizontal. Apesar desta operação ter resultado em peças que não apresentaram problemas durante a montagem da estrutura, o tempo exigido para sua execução foi maior do que em uma máquina CNC. Mesmo com o emprego de procedimentos que visassem minimizar os possíveis desvios dimensionais, foi necessário a execução de rasgos maiores do que os especificados em projeto, de maneira a compensar a menor precisão obtida com a furadeira horizontal.

A execução do protótipo Ekó House contribui de maneira positiva à visibilidade da madeira como um material de qualidade para produção de habitações no Brasil. Esta experiência

levanta soluções de projeto e de montagem/desmontagem viáveis para aplicação em sistemas construtivos em painéis estruturas de madeira no Brasil, orientados ao segmento de edificações residenciais. É importante destacar que muitas dessas soluções foram desenvolvidas para um protótipo com regras direcionadas à uma competição, porém, a experiência mostrou que são opções viáveis, e que mediante ajustes podem ser utilizados em escala industrial.

De maneira geral, esta dissertação buscou analisar os procedimentos adotados em todo o processo descrito, de forma a produzir dados que pudessem indicar vantagens e dificuldades dos procedimentos adotados. Assim, a partir dessas informações, é possível indicar direções para estudos futuros que possam contribuir no setor de habitações em painéis pré-fabricadas em madeira.

A maior aproximação entre projeto e produção, por meio de processos de fabricação digital, é um caminho promissor para contribuir na implementação de sistemas construtivos em madeira no setor da construção de habitações no Brasil.

Ainda é necessário a elaboração de estudos com enfoque na produção de sistemas construtivos em painéis estruturais de madeira, pois assim será possível contribuir no embasamento de dados para a implementação de habitações utilizando esta tecnologia. Também é importante que sejam feitos trabalhos que enfoquem na avaliação do controle de qualidade do processo produtivo e de avaliação do desempenho em uso desses sistemas construtivos. Por meio da análise conjunta de informações, é possível avaliar vantagens no sistema construtivo proposto (tanto de concepção, como de processos produtivos).

Por fim, vale salientar que o desenvolvimento do projeto Ekó House contou com uma equipe de estudantes de pós-graduação, de graduação, professores e profissionais do setor privado. Esta cooperação se mostrou benéfica pois aproxima os setores produtivos das instituições de ensino e pesquisa, possibilitando um diálogo comum, e contribui para o desenvolvimento dos sistemas construtivos em madeira no Brasil.

A execução de uma atividade de natureza prática inserida no ambiente de ensino e pesquisa da universidade, possibilita aos estudantes uma atividade ímpar dentro de sua vivência acadêmica, introduzindo atividades investigativas relacionadas à prática profissional, algo pouco explorado nos currículos acadêmicos.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5706 – Coordenação Modular da Construção**. Rio de Janeiro: ABNT, 1977.

_____. **NBR 7203: Madeira serrada e beneficiada**. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

_____. **NBR 7190: Projeto de estruturas de madeiras**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

_____. **NBR 13.531: elaboração de projetos de edificações - atividades técnicas**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995a.

_____. **NBR 13.532: elaboração de projetos de edificações – arquitetura**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995b.

BALDAUF, A. S. F. **Contribuição à implementação da Coordenação Modular da construção no Brasil**. (Dissertação de mestrado). Porto Alegre: UFRGS, Escola de Engenharia, 2004.

BARRIEL, A. **Arquitetura de Madeira: Reflexões e diretrizes de projeto para concepção de sistemas e elementos construtivos**. (Tese de Doutorado em Tecnologia de Utilização de Produtos Florestais). Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. Coordenação-Geral de Mudanças Globais do Clima. **Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações**

Unidas sobre Mudança do Clima. Brasília: MCT, 2010. Disponível em <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0213/213909.pdf>. Acesso em: Novembro/2012.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Cadeia Produtiva de madeira.** / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Política Agrícola, Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura; coordenadores Antonio Márcio Buainain e Mário Otávio Batalha. – Brasília: IICA: MAPA/SPA, 2007. Disponível em <<http://www.iica.org.br/Docs/CadeiasProdutivas/Cadeia%20Produtiva%20de%20Florestas%20Plantadas%20e%20Madeira.pdf>>. Acesso em novembro 2012

BRASIL. MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Inventário brasileiro das emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa.** Informações gerais e valores preliminares. Brasília, 2009. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0207/207624.pdf>. Acesso em: novembro 2012.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Habitação. Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat. Sistema Nacional de Avaliações Técnicas. **Diretriz para Avaliação Técnica de Produtos – Diretriz SINAT nº 005. Sistemas construtivos estruturados com peças de madeira maciça serrada, com fechamentos de chapas delgadas. (Sistemas leves tipo “Light Wood Framing”).** Set. 2011. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/pbqp-h/projetos_sinat.php>. Acesso em: 30 dez. 2013.

BRASIL. MINISTÉRIOS DAS CIDADES. **Sistema Nacional de Avaliações Técnicas – SINAT.** 2013b. Disponível em <http://www.cidades.gov.br/pbqp-h/projetos_sinat.php> Acesso em 12 dez 2013.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Habitação. Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat. Sistema Nacional de Avaliações Técnicas. **Documento de Avaliação Técnica - DATec no 20. Produto: Sistema construtivo Tecverde: Sistema leva em madeira.** 2013a. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/pbqp-h/projetos_sinat.php>. Acesso em: 30 dez. 2013.

BRUNA, P. J. V. **Arquitetura, industrialização e desenvolvimento.** 2 ed. São Paulo: Editora Perspectiva, 2002.

CALIL JR, C.; OKIMOTO, F.S.; PFISTER, G.M. **Manual de classificação visual.** Convênio Racional Engenharia S/A e IBRAMEM. S/D.

CANADIAN WOOD CONCIL – CWC. Disponível em: < <http://www.cwc.ca>>. Acesso em 10 fev. 2014.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL – CBCS. **Como especificar, adquirir e receber madeira nativa legal**. Brasil, 2012. Disponível em <http://www.cbcs.org.br/_5dotSystem/userFiles/posicionamentos/CBCS_CTMateriais_Posicionamento_especificar%20adquirir%20receber%20madeira%20legal.pdf>. Acesso em fevereiro/2014.

CUPERUS, Y. **An introduction to open building**. Internation Group for Lean Construction Annual Conference, 9a, Singapura, agosto 2001. Disponível em <http://www.obom.org/DOWNLOADS2/IntroToOB.pdf>. Acesso em 07/08/2010.

DIAS, Gustavo L.; SZÜCS, C. A.; SANTOS, A. C.; LIMA, A. L. Determinação de Propriedades Mecânicas do OSB. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira - IX EBRAMEM, 2004, Cuiabá. **Anais do IX Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**. Cuiabá - MT: Editora da Universidade Federal de Mato Grosso, 2004.

DOMINGUES, Eduardo Hernandez; OLIVEIRA, Claudia Terezinha de Andrade. O Uso de Software de Manufatura no Desenvolvimento de Projetos de Edificações Pré-Fabricadas. In: ENCONTRO DE TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO - TIC, V, 2011, Salvador. **Anais...** Salvador: UFBA, 2011. p.1-11.

DUCATTI, M. A.; JANKOWSKY, I. P.; ANDRADE, A. Condições operacionais da secagem convencional em indústrias madeireiras no Município de Tietê, SP. **Scientia Forestalis**, n. 59, p. 101-113, jun. 2001.

FOSTER, J.S. **Structure and Fabric – Part 1**. Londres: B.T. Batsford, 1973.

GAUZIN-MÜLLER, D. **Arquitetura Ecológica**. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2011.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GOTZ, K.H. Ossature em bois. In: GOTZ, K.H.; HOOR, D.; MÖHLER, K.; NATTERER, J. **Construire em bois: choisir, concevoir, réaliser**. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1995.

GREVEN, H. A.; BALDAUF, A. S. F. **Introdução à coordenação modular da construção no Brasil: uma abordagem atualizada**. Porto Alegre: Antac, 2007. (Coleção Habitare, 9).

GRIFFITH, B.; LONG, N.; TORCELLINI, P.; JUDKOFF, R.; CRAWLEY, D.; RYAN, J. Assessment of the technical potential for achieving net zero-energy buildings in the commercial sector. National Renewable Energy Laboratory. U.S. Department of Energy. 2007. Disponível em <<http://www.osti.gov/bridge>>. Acesso em 15/abr/2011.

GRUPO de trabalho quer homologar construção em Light Wood Frame na Caixa. **Tecnologia & Materiais**. Disponível em: <<http://piniweb.pini.com.br/construcao/tecnologia-materiais/fabricantes-e-projetistas-querem-homologar-construcao-em-light-wood-frame-151379-1.aspx>>. Acesso em: 01 jan. 2014.

HOOR, D. Construction avec panneaux. In: GOTZ, K.H.; HOOR, D.; MÖHLER, K.; NATTERER, J. **Construire em bois**: choisir, concevoir, réaliser. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1995.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. **Informações Sobre Madeira: Cumaru**. Disponível em <http://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=10>. Acesso em: 26 nov. 2012.

IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. **Summary for Policymakers**. 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável**: Brasil, 2010 (Estudos e Pesquisas. Informação Geográfica; 7). Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Manejo Florestal: conceitos**. Disponível em <<http://www.ibama.gov.br/areas-tematicas/conceitos>>. Acesso em: 17 nov. 2012.

JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA – JUNAC. **Manual de diseño para maderas del Grupo Andino**. Lima: Junta del Acuerdo de Cartagena, 1984. Disponível em <http://www.comunidadandina.org/public/libro_3.htm> Acesso em 07 nov. 2013

JANKOWSKY, I.P. **Fundamentos da preservação de madeiras**. Documentos Florestais. Piracicaba, n.11, 1990.

KRAMBECK, T.I. **Revisão de sistema construtivo em madeira de floresta plantada para habitação popular**. (Dissertação de Mestrado). Florianópolis: Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

LAROCA, C. **Desenvolvimento de protótipo de habitação social em madeira de reflorestamento e avaliação do desempenho termo-acústico.** (Tese de Doutorado). Curitiba: Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2007.

LIGHT wood frame. **Revista Técnica**, São Paulo, ano 17, ed. 148, p. 48-53, jul. 2009.

LIMA, J. A. R. **Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas.** (Tese de Doutorado). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.

LSTIBUREK, J. **Moisture Control for Buildings.** In: ASHRAE Journal, February, 2002.

LUCINI, H. C. **Manual Técnico de Modulação de Vãos de Esquadrias.** São Paulo: Pini, 2001.

MARTINS, V. A. **Secagem de madeira serrada.** Brasília: Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, Departamento de Pesquisa, Laboratório de Produtos Florestais, 1988.

MELHADO, S.B.; FABRICIO, M.M. Projetos da Produção e Projetos para Produção na Construção de Edifícios: Discussão e Síntese de Conceitos. In: **VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído: Qualidade no Processo Construtivo.** Florianópolis, 1998.

MITCHELL, P.; HURST, R. R. III. **Technology assessment of automation trends in modular home industry.** (General Technical Report FPL-GTR-188). Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2009.

MOLINA, J.C.; CALIL JUNIOR, C. Sistema construtivo em *wood frame* para casas de madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, V.31, n.2, p.143-156, jul./dez. 2010.

MONTANA. **Madeira “engenheirada” na construção do futuro.** 03 jun. 2013. Disponível em <http://www.montana.com.br/Comunicacao/Noticias/Mais-noticias/Madeira-engenheirada-na-construcao-do-futuro> Acesso em 10 fev. 2014.

MORAES, P.D.; ESPÍNDOLA, LR.; BARICHELO, C. **Sistema Plataforma em madeira: coordenação modular e conectividade.** Relatório Parcial de Pesquisa. Florianópolis: Grupo Interdisciplinar de Estudo da Madeira, Departamento de Engenharia Civil, Universidade

Federal de Santa Catarina, 2008. Disponível em <<http://giem.ufsc.br/upload/20090417153433.pdf>> Acesso em 20 nov. 2013.

MORISHITA, C.; SORGATO, M.J.; VERSAGE, R.; TRIANA, M.A.; MARINOSKI, D.L.; LAMBERTS, R. **Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas (v.4)**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Departamento de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2010. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/catalogo_caixa_v4.PDF>. Acesso em: 26 jan. 2014.

OKINO, E.Y.A., TEIXIERA, D.E., SOUZA, M.R., SANTANA, M.A.E., SOUSA, M.E. Propriedades de chapas OSB de *Eucalyptus grandis* e de *Cupressus glauca*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.36 n.78, p.123-131, jun. 2008.

ORDONEZ, J.A.F. et all. **Pre-Fabrication – Teoria y Pratica**. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1974.

PARTEL, M. P. P. **Painéis estruturais utilizando madeira roliça de pequeno diâmetro para habitação social: desenvolvimento do produto**. (Tese de Doutorado em Ciências de Engenharia Ambiental). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

PINTO, E.M. **Proteção contra incêndio para habitações em madeira**. (Dissertação de Mestrado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001.

PROJETO EKÓ HOUSE. **Ekó House - Project Manual – Solar Decathlon Europe 2012**. Team Brasil, São Paulo, 2012.

PUPO, R.T. **Inserção da PROTIPAGEM e FABRICAÇÃO DIGITAIS no processo de projeto: um novo desafio para o ensino de arquitetura**. (Tese de Doutorado). Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, 2009.

RIBAS, A. J. F. **A cadeia produtiva da madeira no município de Guarapuava**. (Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento Econômico). Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009.

ROSSO, T. **Teoria e prática da coordenação modular**. São Paulo: FAU, 1976.

SABBATINI, F.H. **Desenvolvimento de métodos, processos e sistemas construtivos: formulação e aplicação de uma metodologia.** (Tese de Doutorado). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1989.

SCHODEK, D.; BECHTHOLD, M.; GRIGGS, K.; KAO, K.M.; STEINBERG, M. **Digital Design and Manufacturing – CAD/CAM Applications in Architecture and Design.** New Jersey: John Wiley and Sons, 2005.

SHERWOOD, G.; MOODY, R.C. **Light-wood frame wall and floor systems – analysis and performance.** General Technical Report FPL-GTR-59, Forest Products Laboratory, Forest Service, United States Department of Agriculture, 1989.

SHINTECH. Disponível em: <<http://www.shintech.com.br>>. Acesso em 08 jan 2013.

STAMADE. Disponível em: <<http://stamade.com.br>>. Acesso em 08 jan 2013.

SILVA, Ricardo Dias, INO, Akemi. **Habitação Econômica em madeira no Brasil: Estado da Arte.** In: XI EBRAMEM, Londrina, 2008.

SMITH, R. E. **Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction.** Wiley, 1 edition, 2010.

SOLAR DECATHLON EUROPE – SDE. **Solar Decathlon Europe 2012: Rules – v5.** Espanha, 2012.

SURDI, P. G. **Produção de painéis de partículas orientadas (OSB) a partir da madeira de um híbrido de *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.** (Dissertação de Mestrado). Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, 2012.

SZÜCS, C. P. **Sistema Stella-UFSC: Avaliação e desenvolvimento de sistema construtivo em madeira de reflorestamento voltado para programas de habitação social.** (Relatório Final de Pesquisa). Programa Habitare, 2004.

SZÜCS, C. P.; SZÜCS, C. A.; BARTH, F.; SOUZA, M. E. F. **Sistema STELLA/UFSC: avaliação e desenvolvimento de sistema construtivo em madeira de reflorestamento voltado para programas de habitação social.** p. 66-115. In: BONIN, L. C.; AMORIM, S. R. L. (Ed.). **Inovação Tecnológica na Construção Habitacional.** Porto Alegre: ANTAC, 2006.

TORCELLINI, S. P.; DERU, M. CRAWLEY, D. **Zero energy buildings: a critical look at the definition.** National renewable energy laboratory – NREL. Aceee Summer Study Pacific

Grove. Proceedings. Califórnia, August 14-18, 2006. 15p. Disponível <<http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39833.pdf>>. Acesso em: 20/out/2010.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP. Sistema Integrado de Bibliotecas. **Diretrizes para apresentação de dissertações e teses da USP....**

VALLE, I. M. R. **A pré-fabricação de dois sistemas de cobertura com madeira de florestas plantadas. Estudos de casos: os assentamentos rurais Pirituba II e Sepé Tiaraju.** (Tese de Doutorado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011.

WEST, T. A. P. **Metodologia para projetos florestais de crédito de carbono envolvendo a conversão da exploração madeireira convencional para o manejo florestal com exploração de impacto reduzido.** (Dissertação de Mestrado). Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, 2012.

ZENID, G. J. (coord). **Madeira uso sustentável na construção civil.** 2 .ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2009.

ZENID, G. J. Qualificação de produtos de madeira para a construção civil. In: **SIMADER - 2o. Seminário de Industrialização e Usos de Madeira de Reflorestamento** 2001, Caxias do Sul. Anais SIMADER - 2o. Seminário de Industrialização e Usos de Madeira de Reflorestamento. Caxias do Sul: Sindicato das Indústrias da Madeira e do Mobiliário da Região Nordeste do RS e Univ. Caixas do Sul, 2001.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos.** 2ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

YUBA, A. N. **Análise da pluridimensionalidade da sustentabilidade da cadeia produtiva de componentes construtivos de madeira de plantios florestais.** (Tese de Doutorado). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.

YUBA, A.N. **Cadeia produtiva de madeira serrada de eucalipto para produção sustentável de habitações.** (Dissertação de Mestrado). Porto Alegre: Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.